

МІНІСТЕРСТВО ВИЩОЇ ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ МАТЕРІАЛІВ

ЛЕКЦІЙНИЙ МАТЕРІАЛ
складений проф. Долговим О.М.

ДНІПРО - 2022
НТУ
«Дніпровська політехніка»

ВСТУП

Із різноманітних властивостей конструкційних матеріалів, в першу чергу – металів, найважливішими є механічні властивості: пружність, міцність, твердість, пластичність, опір втомі та повзучість, чутливість до концентраторів напружень, опір руйнуванню, які в більшості випадків є основними для вивчення і доцільності застосування того або іншого матеріалу.

Знання механічних властивостей важливе як для конструкторів, так і для технологів. Дослідження природи властивостей матеріалів показало, що найважливіші властивості, зокрема опір пластичній деформації і руйнуванню, залежать від особливостей структурного стану матеріалу.

У технологічних і структурних діях на матеріал закладені великі можливості підвищення конструкційної міцності. Наприклад, збільшення здатності матеріалу до поглинання енергії шляхом прискорення і полегшення мікрорелаксації напружень, а також зменшення внутрішніх розтягувальних напружень шляхом вимкнення джерел цих напружень.

Успішне розв'язання названих задач можливе тільки при узгодженій роботі фізиків, механіків, конструкторів, технологів і матеріалознавців.

Реалізація прогресу в техніці супроводжується формуванням робочих процесів, підвищенням рівня напружень в елементах конструкцій при одночасному підвищенні вимог до забезпечення надійності і ресурсу створюваних виробів.

Виконання зростаючих вимог до ресурсу і надійності може бути досягнуто за рахунок розробки оптимальних конструкцій, усунення надлишкових запасів міцності, максимального використання можливостей матеріалів і технологій.

Забезпечення високої і стабільної конструкційної міцності – одне з напрямків вирішення проблеми.

1. ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ НА ВЛАСТИВОСТІ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Теоретична і технічна міцність

Широке використання конструкційних матеріалів пов'язане з тим, що вони мають комплекс механічних властивостей: хороші пластичність і в'язкість поєднуються у них з високою міцністю, пружністю і твердістю. Якщо йдеться про метали та їх сплави, то дослідження показують, що більшість найважливіших властивостей у різних умовах навантаження залежить від особливостей кристалічної будови.

Під технічною міцністю розуміють опір реальних тіл пружній і пластичній деформації та руйнуванню. Технічну міцність визначають експериментально. Теоретичну міцність визначають з умов деформації або руйнування в пружній області ідеальних ґраток монокристала, в якій дії зовнішнього навантаження протистоїть міжатомний зв'язок. Міцність міжатомного зв'язку в кристалах є основним фактором, що визначає опір деформації і руйнуванню матеріалів.

Енергія міжатомного зв'язку в металах є роботою дисоціації металевого кристала. Загальна потенційна енергія U взаємодії іонів та електронів (енергія зв'язку) є функцією міжатомної відстані r для твердого стану може бути подана напівемпіричним виразом вигляду:

$$U = \frac{A}{r} + \frac{B}{r^2},$$

де A і B – константи; r – атомний радіус.

У цьому рівнянні член A відповідає енергії електростатичного тяжіння між позитивними іонами та електронами, а B/r^2 – кінетичної енергії електронів, що обумовлює дію сили відштовхування у кристалі.

Можна показати, що теоретична міцність при розтягуванні дорівнює

$$\sigma_{\max} = \left(\frac{EU_s}{r_0} \right)^{1/2},$$

де U_s - робота, витрачена при руйнуванні на розділення двох атомних площин і віднесена до одиниці поверхні (поверхнева енергія двох поверхонь, що знову утворилися).

Теоретична міцність кристалічних тіл, обчислена за зазначеною формулою, як правило, в сотні разів перевершує значення міцності металів.

Однак вивчення міцності при розтягуванні ниткоподібних кристалів (вусів), проведене останнім часом, показує, що вони володіють міцністю, яка наближається до теоретичної, – від $7 \cdot 10^3$ до $14 \cdot 10^3$ МПа. Наприклад, міцність при розтягуванні ниткоподібних кристалів заліза становить 13360 МПа, міді – 3020 МПа, цинку – 2250 МПа, міцність тих самих металів, одержаних звичайними методами, відповідно становить 302,2 і близько 180 МПа.

Теоретичні розрахунки також показують величезну розбіжність із результатами експериментальних досліджень.

Невідповідність між теоретичною і фактичною міцністю кристалічних тіл є результатом того, що внутрішня будова реального металу відрізняється від ідеального. Кристалічні ґратки реального твердого тіла мають багато дефектів, відхилень структурних елементів від правильного положення.

Для звичайних умов дефектність і неоднорідність зерен – явища нормальні та практично неминучі. При розрахунку теоретичної міцності не враховуються структура металу зі всією її недосконалістю.

Для кількісної оцінки енергії і сил міжатомного зв'язку в кристалічних тілах можуть бути використані різні фізичні величини. Однак під час вирішення проблеми міцності не всі вони рівноцінні, оскільки по-різному пов'язані з механізмом пластичної деформації і руйнування металів.

Глибокий аналіз цих величин і можливості використання їх для оцінки міцності міжатомного зв'язку показує, що немає однозначної кількісної залежності між міцністю кристалічних тіл і якої-небудь із цих фізичних величин, прийнятої за міру міжатомного зв'язку. Це обумовлено тим, що міцність є структурно-чутливою властивістю матеріалу в пружній і пластичній областях.

1.2. Недосконалість кристалічних ґраток

Для того щоб мати правильне уявлення про властивості матеріалу, що має кристалічну структуру, необхідно ознайомитися з тими різноманітними порушеннями реального кристалічного тіла, що впливають на його міцність. Спотворення атомних ґраток залежно від їх геометрії підрозділяються на точкові, лінійні й поверхневі, іноді їх називають нульвимірними, одно- і двовимірними. Точкові дефекти – це порушення ґраток в ізольованих одна від одної точках (рис. 1.1).

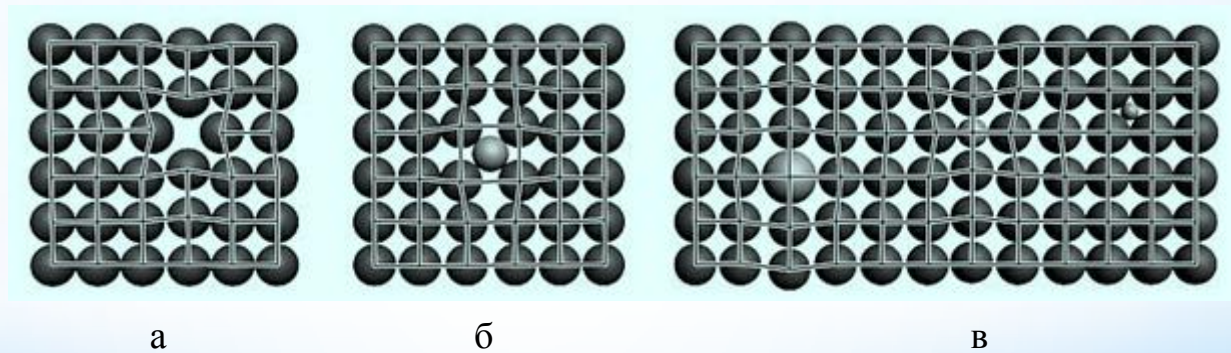


Рис. 1.1 – Точкові дефекти в кристалічних ґратках: а – вакансії; б – міжвузловий атом; в – домішкові атоми заміщення та проникнення

Вакансії. Виникнення вакансій пояснюється тим, що частина атомів унаслідок випадкового надлишку енергії (флуктуації) покидає свої місця. Атом, що при цьому вискочив, може виявитися або в міжвузловинах, або ж зовсім вийти за ґратки, на грань кристала. Чим вища температура, тим більше вакансій у ґратках і тим легше вони переміщуються.

Вакансії можуть змінювати своє положення в кристалі, під впливом несприятливих дій накопичуватися в деяких зонах, створюючи зародок субмікроскопічної порожнини – тріщини. Наявність вакансій порушує нормальну взаємодію між атомами.

Атоми проникнення. Шляхом дифузії у тверді тіла потрапляють атоми сторонніх речовин (рис. 1.1 б, в), дотичних із даним тілом. В основному це атоми газів з навколишнього середовища, але можлива і дифузія між твердими тілами при їх тісному контакті. У сплавах атоми домішок також потрапляють у ґратки основного металу.

Атом, що проникає шляхом дифузії в атомні ґратки кристала, порушує правильність останньої, оскільки його взаємодія з основними атомами відрізняється від взаємодії однорідних атомів; у ґратках виникає спотворення. Вплив домішок на міцність дуже великий. Атоми проникнення є точковими дефектами структури кристала.

Дислокації. Лінійні недосконалості, що мають малі розміри у двох вимірах і велику протяжність у третьому вимірі, називаються дислокаціями.

Згідно із сучасним уявленням дислокації виконують вирішальну роль у деформації кристала.

Крайова дислокація – це локалізоване викривлення кристалічної ґратки, що викликане наявністю в ній «надлишкової» атомної напівплощини (рис. 1.2, 1.3).

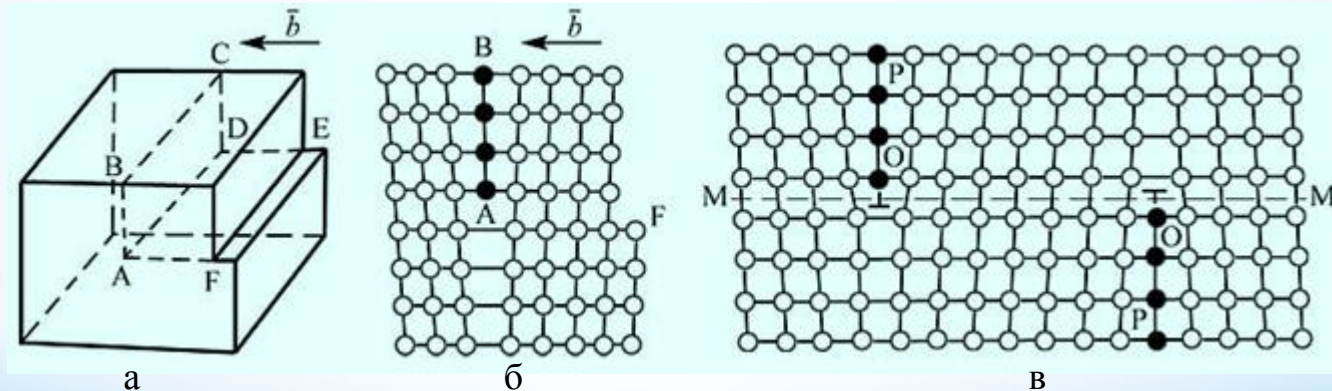


Рис. 1.2 – Крайова дислокація: а – зміщення атомних площин; б – схема розташування атомів біля дислокації; в – розміщення дислокацій щодо площин ковзання М-М

Крім крайових розрізняють ще і **гвинтові дислокації** (рис. 1.3).

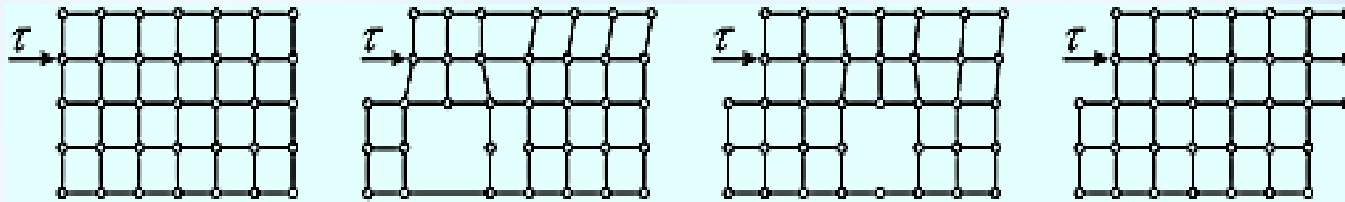


Рис. 1.3. Пластична деформація як результат руху крайової дислокації під дією зсуву
 Крім крайових, розрізняють ще і *гвинтові дислокації* (рис. 1.4).

Нехай в кристалі виникає такий зсув, при якому лінія дислокації OO' (рис. 1.4, а), що відокремлює область, де він стався, від області, де зсуву немає, паралельна вектору зсуву.

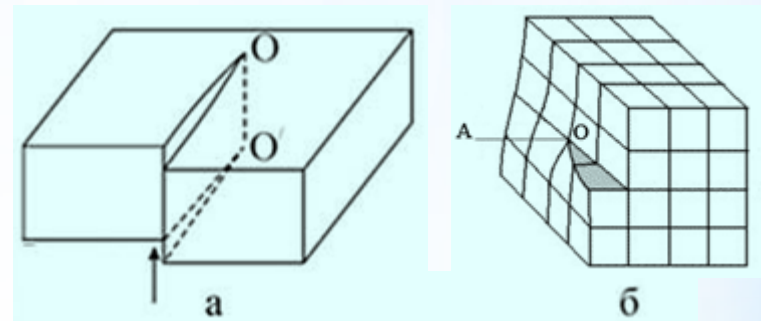


Рис. 1.4. Гвинтова дислокація

В цьому випадку кристал можна представити у вигляді атомної площині, «закрученої» навколо осі дислокації OO' гвинтом. Така дислокація названа гвинтовий (рис. 1.4, б).

Лінія крайової дислокації перпендикулярна вектору зсуву, тоді як лінія гвинтової дислокації паралельна йому.

Характер зміни кривої міцності від числа дефектів кристалічної структури показаний на рис. 1.5. На кривій міцності можна виділити такі чотири ділянки. Початковій точці (а) відповідає міцність кристала без дефектів, так звану теоретичну міцність ідеальних кристалічних ґраток, у якій всі атоми одночасно сприймають дію навантаження ($\sigma_{\text{вусів}}$ —міцність монокристалічних вусів).

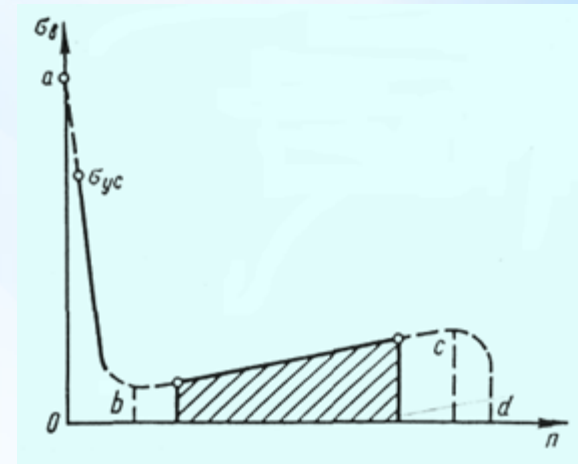


Рис. 1.5 – Залежність міцності від числа недосконалості в кристалічних ґратках

Ділянка (bc) становить зміцнення матеріалу унаслідок збільшення числа недосконалості в кристалічній структурі. Із збільшенням щільності дислокацій зменшується відстань між дислокаціями, а це призводить до посилення взаємодії дислокацій між собою і з іншими дефектами ґраток. При цьому опір руху дислокацій зростає, а отже, зростає і опір деформації (зміцнення), міцність матеріалу збільшується.

Вважається, що ділянка кривої (bc) лежить в інтервалі щільності дислокацій (приблизно) від 10^4 – 10^8 до 10^{12} см⁻². Ділянка (cd) відповідає граничному насиченню дефектами кристалічних ґраток, при якому відбувається втрата несучої здатності матеріалу. Метал у цьому стані має, як правило, велику щільність дислокацій. Гранична щільність дислокацій, здатна викликати руйнування кристала, становить 10^{14} – 10^{15} см⁻².

За сучасними уявленнями дислокації розглядаються як джерело виникнення пластичних ковзань. До припущення про наявність якихось систематичних дефектів у кристалах приводить різка розбіжність між теоретичною і фактичною міцністю металів. Згідно з теорією кристалічних ґраток Борна виходить, що в ідеальних ґратках напруження, необхідне для зрушення рядів атомів на одну міжатомну відстань, приблизно дорівнює величині модуля зсуву G (за найстрогішими підрахунками $G/30$). Тим часом, за дослідними даними, для виникнення ковзання достатнє напруження всього від 10^{-4} - $10^{-5}G$.

Рухливість дислокації у площині ковзання – одна з її найважливіших властивостей. Вона тісно пов'язана з відносним зсувом шляхом ковзання однієї частини кристала по іншій. Звідси зрозуміло, яку велику роль виконують дислокації в теорії пластичних деформацій; цим дислокації особливо виділяються серед інших дефектів ґраток, наприклад вакансій, переміщення яких не спотворює форми кристала.

Теорія дислокацій може бути використана для пояснення механізму ковзання, що є основою пластичної деформації.

Важливим у теорії дислокацій є питання про їх зародження. З цієї точки зору дислокації можуть бути розділені на дві категорії: дислокації, що утворюються в процесі кристалізації, і дислокації, що виникають під час деформації.

1.3. Субмікроскопічні та мікроскопічні дефекти структури

Дуже важливим джерелом спотворення ідеальної структури кристала є неоднорідності, що охоплюють окремі його зони, – вони займають порівняно великі ділянки атомних ґраток, але в той самий час дуже малі для спостереження неозброєним оком. Розділення величин на мікроскопічні й субмікроскопічні досить умовне. Ця умовність підтверджується тим, що деякі дефекти, наприклад включення, пори, тріщини, можуть бути будь-якого порядку – як мікроскопічного, так і макроскопічного. Проте категорія мікроскопічних дефектів повинна бути виділена, оскільки інакше незрозумілий зв'язок між порушеннями макроскопічними і неправильностями атомного порядку. З відомою умовністю розглядаються мікроскопічні дефекти, які є спотвореннями ґраток, що охоплюють значні її зони, а тому спостерігаються в оптичні прилади:

- а) мікропори і мікротріщини;
- б) мозаїчність структури кристала;
- в) міжкристалітні граничні прошарки.

Мікропори і мікротріщини. Вони можуть розглядатися у двох аспектах:

1) як зменшення до нехтуваних розмірів порожнини мікроскопічного характеру, що мають технологічне походження (наприклад, усадкові раковини зливка, газові бульбашки, температурні тріщини);

2) як скупчення дефектів ґраток, що є результатом неправильностей атомної будови.

Розглядатимемо дефекти ґраток.

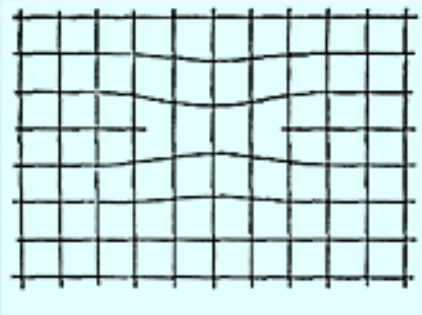


Рис. 1.6 – Утворення «сидячої» дислокації

Одним із найважливіших джерел утворення субмікроскопічних і мікроскопічних тріщин (порожнин) є вакансії, які легко переміщаються. Вакансії групуються усередині кристала, головним чином біля дислокацій або інших порушень ґраток, що створюють концентрацію напружень: за відомих умов вакансії скупчуються і мимовільно утворюють мінімальних розмірів порожнини або пори;

наприклад, групування вакансій в одному шарі може породити так звану «сидячу» (тобто малорухливу) дислокацію (рис. 1.6), яка сама по собі вже становить стійкий зародок мікропори.

Інше характерне місце скупчення вакансій – це межі зерен, головним чином у зонах розтягувальних напружень. Згідно з підрахунками кількість вакансій у граничних шарах у багато разів перевищує число, необхідне для утворення первинних мікропор товщиною в три атомні шари.

Теорія дислокацій висунула ряд інших можливих механізмів утворення найдрібніших пор в атомних ґратках – потенційних осередків розвитку мікротріщин. Порожнина в ґратках може виникнути у тому разі, коли при деформації кристала починають рухатися групи дислокацій різних знаків.

У місцях скупчення дислокацій у пластично деформованому металі створюється концентрація напружень, особливо в місцях, що розмежовують зони пружних і пластичних деформацій. Дуже ймовірно, що саме тут і виникає зародкова тріщина. Особливо велика небезпека розтріскування у тому випадку, коли дислокації скупчуються перед настільки жорсткою перешкодою, що не можуть її подолати. Такою перешкодою може з'явитися стороннє включення в ґратках.

Крім скупчення вакансій у цих місцях, у суміжних зернах виявляється складна картина розподілу залишкових напружень, що охоплюють окремі зони зерна або цілі зерна. Під впливом цих напружень відбувається повільна перебудова в спотворених ґратках, виникають ковзання по межах, змінюється і картина напружень.

При циклічних навантаженнях розмір і кількість пор істотно впливають на умови руйнування: якщо є незначна кількість порівняно великих пор, тріщина руйнування виникає легше, але розвиток її надалі відбувається нешвидко і може загальмуватися; навпаки, при значній кількості дрібних пор первинне пошкодження настає при напруженнях вище за межу втоми, але, з'явившись, росте швидко, і процес руйнування прискорюється.

Мозаїчна структура. Вивчення структури металу субмікроскопічними методами виявило, що колишні уявлення про ідеальну геометричну правильність будови кристала, форму його граней, кутів не відповідають дійсності. Зовнішні грані кристала – далеко не ідеальні площини: вони покриті виступами, западинами. Наявність цих дефектів – не випадкова, вона є закономірністю розвитку кристалів. Тепер встановлено, що і весь об'єм кристала теж не має ідеально однорідної будови, як це вважалося раніше. З'ясувалося, що кристал ніби складений із численних блоків, осі яких не строго паралельні, а утворюють дуже малі кути – порядку 1° . Оскільки грати сусідніх блоків не збігаються за орієнтацією, то стулення їх зв'язане з порушенням правильності ґраток (рис. 1.7). Блоки мають лінійні розміри близько 10^{-4} см.

Кристал, розділений на блоки, має своєрідну структуру, яка одержала назву **мозаїчної**.

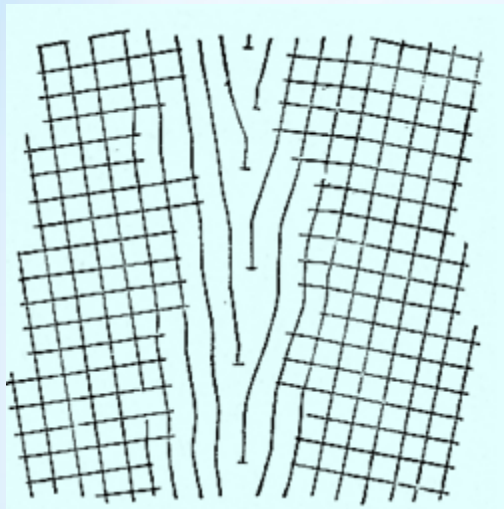


Рис. 1.7 – Схема сполучення блоків (зерен) у кристалах

Мозаїчність структури кристала стосовно розподілу напружень має сама по собі не особливо велике значення, оскільки кути між кристалографічними осями блоків дуже малі. Але істотне значення має виникнення між блоками граничних шарів порушеної структури. Це відображається на деформативності кристала.

Міжкристалітні граничні шари. Особливості граничних шарів найцікавіші там, де вони найбільш розвинені, – саме між кристалітами.

У міжкристалітних примежових шарах відхилення від нормальної структури - суттєве; тут певною мірою в наявності деякі з тих особливостей, які визначають різку своєрідність зовнішніх шарів металевого стрижня як монокристала, так і полікристала. Характерні відмінності будови зовнішніх шарів вимагають окремого розгляду; тут же необхідно відзначити ті особливості, які властиві міжкристалітним граничним шарам.

Граничні шари характеризуються різкими порушеннями будови атомних ґраток: при кристалізації виникають великі розбіжності в орієнтації осей сусідніх кристалів. Унаслідок цього сусідні кристали можуть сполучатися різнойменними кристалографічними осями. Стикаються грані з дуже різкою відмінністю величини енергетичної активності. Все це призводить до того, що примежові шари атомів мають безладну структуру. Тут уже вважається неможливою структура у вигляді ланцюжка дислокацій, характерна для міжблокових меж.

Межі між кристалітами характеризуються ще й тим, що тут дифузія атомів проникнення йде значно легше, ніж у товщі кристала: прошарки мають розпушену будову, атоми розміщені неправильно; сили зчеплення незначні, а енергія атомів збільшена. Для переміщення атома в нове положення потрібна набагато менша енергія. У результаті коефіцієнт дифузії в примежових шарах у багато разів вищий, ніж у самих кристалічних ґратках монокристала. Завдяки цьому атоми домішок особливо інтенсивно накопичуються на межах зерен, утворюючи міжкристалітний прошарок. Це одна з найхарактерніших особливостей граничних шарів. Ці прошарки мають аморфну структуру, хоча і побудовані з атомів металів.

1.4. Макроскопічні дефекти

До цієї категорії належать з певною умовністю такі дефекти, які не пов'язані безпосередньо із структурою атомних ґраток. До макроскопічних дефектів належать:

- а) дефекти, що виникають при відливанні металу: пористість структури, сторонні включення;
- б) дефекти в результаті прокатування: розтріскування і розшарування різного роду, текстура металу як порушення ізотропії;
- в) дефекти термічної обробки (гартування).

Пористість. Пористість структури отримується у литому металі як результат процесу його охолодження і кристалізації.

Зростання кристалів відбувається у всі боки, гілкоподібно (дендритна структура); у кінці процесу охолодження залишаються ще невеликі не застигли об'єми металу, затиснуті між гілками кристалів, що розрослися. При подальшому твердінні, кристалізації й охолодженні цих незначних мас метал скорочується в об'ємі, а надходження додаткових кількостей рідкого металу з тих зон, де він є, ускладнюється в капілярних ходах, що залишилися між кристалами, або зовсім відрізане. Виходять усадкові мікрораковини, що роблять дуже шкідливий вплив на механічні властивості металу, тому що вони є різкими концентраторами напружень.

Існування таких дефектів, що надають кристалу пористої структури, іноді навіть впливає на об'ємну вагу металу.

Дуже небезпечна мікропористість може бути усунена низкою заходів, з яких найважливішими є такі:

- а) прискорене охолодження зливка;
- б) порушення кристалізації струшуванням (вібрацією);
- в) лиття під підвищеним тиском.

Із цих трьох заходів найважливіші перший і третій.

Сторонні включення. Сторонні включення належать до випадкових дефектів, як правило, макроскопічного характеру, що виникають при розливанні рідкого металу. Найчастіше трапляються уламки футерівки печей, яка поступово руйнується, шматочки шлаку, іноді зола, що відноситься гарячими газами з топкового простору, дрібні частинки силікатів. Якщо метал забруднений шлаком, то при заливанні його у виливницю частина шлаку встигає спливати, частина – у процесі заливання відтісняється до стінок виливниці й залишається у зовнішніх шарах зливка.

Встановлено, що неметалічні включення різко знижують деякі показники міцності, наприклад у 2 — 3 рази знижуються циклічна міцність на згин.

Дефекти у прокатному металі. У прокатаному металі з'являються дефекти як у результаті вад відливання зливка, так і виниклі в самому процесі прокатування. Дефекти останнього роду дуже різноманітні. Розглянемо тільки ті їх види, які можуть вплинути на міцність металу; це в основному порожнини, а також внутрішні й зовнішні тріщини і розшарування різного роду.

Дефекти металургійного походження мають велике практичне значення, тому що саме вони найчастіше є джерелом статичного або динамічного руйнування конструкцій.

Волосовини. Так називаються дрібні тріщини волосяної товщини завдовжки, як правило, 20 – 30 мм, але іноді і 100 – 150 мм. Причина виникнення волосовин – газові бульбашки, усадкові мікрораковини, дрібні включення (зерна шлаку). В процесі прокатування метал у гарячому стані багато разів обтискається, витягується; внаслідок цього дефекти набирають зазначеної вище форми. Волосовини дуже знижують механічні властивості металу – настільки, що роблять його непридатним для застосування.

Розшарування. Розшарування відрізняються від тріщин тим, що останні виникають з поверхні, а розшарування – усередині прокату. У розшарованому місці дві поверхні металу при прокатуванні тісно стикаються, але не злипаються (не заварюються).

Частіше за все розшарування виникають від великих газових бульбашок.

Внутрішні розриви. Такі розриви можливі як наслідки умов прокатування: якщо в зливку є зона, де особливо концентруються забруднення і включення, то при прокатуванні вона, як менш пластична, ніж чистий метал, гірше піддаватиметься деформації і, відстаючи від доброякісного металу, може відірватися від нього. Можливе також відшаровування в результаті недостатнього нагрівання і малої пластичності зливка при перших пропусках: зовнішні, більш нагріті й сильніше обтиснені шари витягуються набагато більше, ніж внутрішні, внаслідок чого між ними може бути розрив. Такі внутрішні розриви механічного характеру трапляються у великих профілях, у товстих листах.

Флокени. Флокени – внутрішні тріщини дуже малої товщини з блискучою великокристалічною поверхнею (Рис 1.8). Виділяються у вигляді круглих або овальних плям блискучого сріблясто-білого забарвлення. У подовжньому розрізі флокени мають вигляд прямої або звивистої лінії; довжина флокенів може бути від десятих часток міліметра до 5 – 10 мм, іноді й більше. Флокени утворюються при охолодженні після прокатування при температурах 100 – 250 °С. Можливе виникнення їх і значно пізніше (через 3 – 5 діб після охолодження) при звичайних температурах.

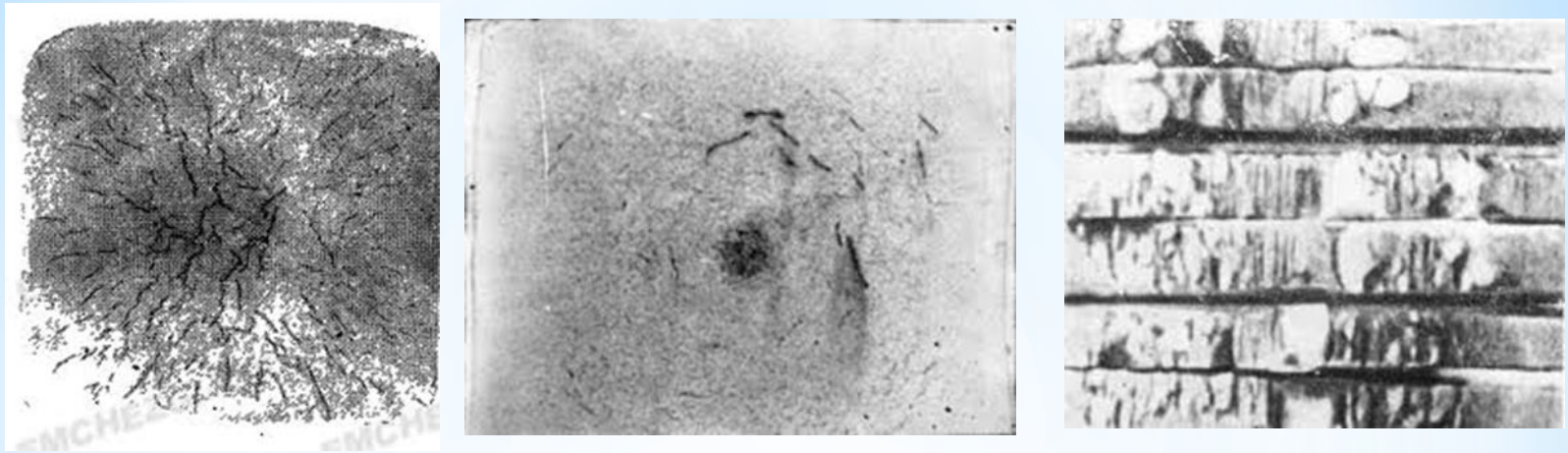


Рис. 1.8 – Флокени у сталі

Перепал сталі. Особливий вид дефекту сталі, що виникає в процесі прокатування, становить так званий перепал. Якщо під час операцій нагрівання, пов'язаних із прокатуванням, допущена дуже висока температура (наприклад, більше 1200 °С при вмісті вуглецю 1%), то на межах зерен починається окиснення і часткове оплавлення. Перепалений метал є безумовним браком.

Зміна ступеня наклепу. Температура в кінцевій стадії прокатування, а також швидкість охолодження після прокатування дуже позначаються на механічних властивостях металу, тому що від температурного фактора залежить величина наклепу при пластичній деформації.

Так, для сталі з великим вмістом легуючих добавок зміна швидкості охолодження позначилася таким чином (табл. 1.1):

Табл. 1.1 – Вплив швидкості охолодження при прокатуванні на властивості листа з високолегованої сталі

Охолодження	Межа міцності, МПа	Межа текучості, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, Дж/см ²
Швидке охолодження	780	540	16	4
Повільне охолодження (у штабелі)	620	380	19	10

Як бачимо, зміни в одному тільки режимі охолодження можуть настільки вплинути на найважливіші механічні характеристики металу, що належать до однієї і тієї самої плавки, можна прийняти за показники зовсім різних марок сталі.

Тріщини від гартування. Особливо потрібно відзначити гартівні тріщини, що виникають унаслідок нерівномірного охолодження матеріалів і фазових перетворень.

Гартівні тріщини можуть бути дуже різноманітними – від одиничних великих тріщин, що руйнують виріб, до найдрібніших, розсіяних по всій загартованій товщі й пронизуючих всю структуру металу; в останньому випадку може вийти помітний вплив на його пластичність

На шліфах загартованої сталі можна спостерігати у середньому 120 – 130 мікротріщин на 1 мм²; переважаюча довжина тріщин була 2 – 3 мкм (і до 25 мкм); при правильній тепловій обробці (знижена температура відпуску) така сталь різко знижує здатність до пластичної деформації. Достатньо висока температура відпуску (650 – 700 °С), ймовірно, призводить до заліковування таких дрібних тріщин, усуваючи їх шкідливу дію.

2. ОСОБЛИВОСТІ СТАНУ ПОВЕРХНІ ТА ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МАТЕРІАЛУ

2.1. Геометрія поверхні

Останнім часом усе більше значення надається поверхні й поверхневому шару твердих тіл. Цілий ряд досліджень виявив великий вплив геометричних і фізико-хімічних особливостей зовнішніх шарів на багато важливих показників міцності й довговічності. Виявилося, що характер обробки дуже сильно позначається на показниках міцності, на зносостійкості, силі тертя, на опорі корозії та ін.

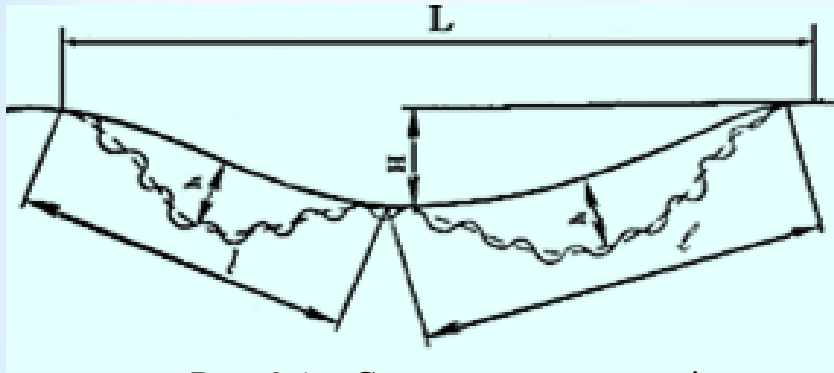
Поверхневі шари значно відрізняються від основної маси матеріалу своєю структурою, хімічним складом, напруженим станом.

Ідеально правильна геометрія поверхні існує тільки в нашій уяві. Насправді поверхня фізичного тіла, не виключаючи і природних кристалів, недосконала; твердження про ступінь недосконалості залежить від масштабу розгляду.

Розділяють порушення правильності поверхні макрогеометричного, мікроскопічного і субмікроскопічного порядку.

Розглянемо одну з існуючих класифікацій (рис. 2.1):

а) макроскопічні відхилення – одиничні випадкові відхилення з малою висотою і великим кроком ($L : H \sim 1000$);



б) хвилястість – відхилення, що одноманітно повторюються, відношення $l : h$ від 50 до 1000;

в) шорсткість, що належить до мікрогеометрії ($l : h$ до 50).

Рис. 2.1 – Схема стану поверхні

Природні поверхні. Для поверхні кристала характерна ступінчаста структура. Висота сходинок змінюється в різних речовинах у дуже широких межах: від одного атомного шару до сотень.

Крім таких нерівностей, природній поверхні кристалів і аморфних тіл властива природна тріщинуватість – наявність сітки найдрібніших тріщин, що йдуть у товщу тіла.

Походження цих тріщин може бути двояке:

1) вихід на поверхню субмікроскопічних порожнин і пор, що пронизують весь об'єм тіла;

2) тріщини чисто поверхневого характеру, що виникають у результаті особливостей взаємодії поверхневого шару атомів.

Дослідження на кристалах кам'яної солі демонструють вплив тріщинуватості поверхневого шару на міцність: тоді як у звичайних зразках солі межа міцності на розтягування становить на повітрі 5 МПа, такі ж самі зразки, перевірені у воді, після розчинення зовнішнього тріщинуватого шару показали межу міцності 1700 МПа, тобто в 340 разів більше.

Оброблені поверхні. Оброблені поверхні порівняно з природними мають нерівності надзвичайно великі за величиною. Форма нерівностей повторює контур оброблювального інструменту тільки у загальних рисах. Наприклад, якщо розглянути контур канавки від проходження токарного різця, то видно, що її правильний увігнутий контур спотворений виступами, задирами і т. д. Це пояснюється тим, що оброблювальний інструмент повинен зруйнувати на своєму шляху різноманітно розміщені кристали металу; для деяких із них завдяки орієнтації створюються умови зрізу, для інших – умови руйнування відривів, з утворенням найдрібніших тріщин.

Таким чином, після обробки матеріалу можна спостерігати його неправильну поверхню, геометрія якої тісно пов'язана з механічними процесами руйнування металу у зоні обробки.

Вивчаючи поверхневий шар, потрібно розрізняти його зовнішню поверхню, в якій відбувається контакт із зовнішнім середовищем, і внутрішню товщину шару. Остання становить основний матеріал деталі, що піддався сильним змінам; на зовнішній же поверхні виникають такі своєрідні хімічні, фізичні й енергетичні умови, які різко виділяють цю область у загальній товщі деталі. Для спрощення термінології надалі говоритимемо про «поверхню» і про «товщину» граничного шару.

Поверхня твердого тіла, що розглядається поза зв'язком з яким-небудь середовищем, має такі особливості в порівнянні із внутрішньою структурою того ж самого тіла.

В ідеально правильній атомній структурі всередині тіла кожен атом знаходиться в стані рухомої стійкої рівноваги, оскільки для нього за всіма напрямками інтенсивність силового поля однакова. Інакше із частинками у поверхні; вони мають тільки односторонні зв'язки – всередині матеріалу, тому стан їх нерівноважний, нестійкий; атоми тут більш активні.

2.2. Дія зовнішнього середовища на поверхневий шар

Поверхня твердого тіла неминуче адсорбує елементи навколишнього середовища. Це викликано підвищеною активністю поверхні. Як правило, вона буває покрита шарами адсорбованих газів, пари води і жирів. При виникненні «свіжої» чистої поверхні (наприклад, при зламі) вже короткочасне зіткнення із звичною атмосферою (година і навіть менше) призводить до утворення на поверхні забруднень і жирної плівки, що часто осідає прямо на повітрі. Подібне явище спостерігається взагалі у твердих тіл. Наприклад, запотівання скла у вологому приміщенні – не що інше, як осад найдрібніших часточок води на жирній плівці, що покриває скло. Молекули рідини, що випадає на поверхні тіла, мають велику енергію, тому рідкий шар дуже рухливий, швидко поширюється по поверхні. У нормальних умовах технічні тіла покриті шаром жирів до декількох сотень мікронів. Плівка водяної пари становить 50 – 100 шарів молекул.

Поверхні твердих тіл більшою мірою адсорбують також гази.

Адсорбовані шари змащування чинять значний вплив на процес пластичної деформації поверхневих шарів і міцність матеріалів.

У неблагородних металах, крім шару адсорбованих газів, утворюється ще плівка окиснення, часто завтовшки всього 10 – 20 шарів молекул.

Відкритий і вивчений механізм розклинювальної дії адсорбованих плівок рідин у поверхневих тріщинах. У глибині, там, де через недостатню ширину щілини молекули не можуть проникнути далі, вони чинять сильну розпираючу дію (рис. 2.2), яка рівноцінна дії докладених до тіла додаткових розтягувальних зусиль.

Вплив ефекту розклинювальної дії рідини у найдрібніших тріщинах поверхні – ілюструватимуть такі дані: плівка води на поверхні розтягнутого сталевого дроту знижує міцність останнього на 14%; платинові нитки після змочування водою подовжуються без зовнішнього навантаження.

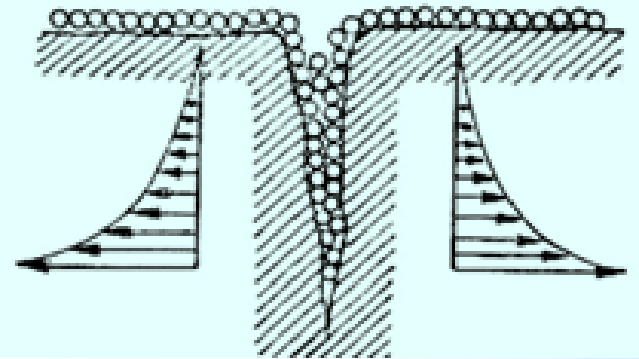


Рис. 2.2 – Ефект розклинювальної дії адсорбованих плівок

2.3. Вплив якості поверхні на міцність

Таким чином, виділемо такі особливості поверхні й приповерхневих шарів металу:

1) поверхня не є геометрично правильною, вона містить виступи і западини більшої або меншої величини залежно від характеру обробки;

2) хіміко-фізичний вплив навколишнього середовища створює умови, що сприяють зародженню осередків руйнувань на поверхні;

3) технологічна обробка – прокатка, обробка тиском, різні види різання та обробки поверхні – призводить до сильних змін у структурі поверхневих шарів. Унаслідок цього вони дуже часто сильно наклепуються, мають підвищену твердість; у них від поєднання дії різних перелічених вище факторів створюється складна картина напружень. У ряді випадків числові значення напружень набагато перевершують ті, що допускаються для даного матеріалу.

Із зазначеного випливає велике значення якості поверхні в питаннях міцності. Вже встановлений сильний вплив якості поверхні на динамічну й ударну міцність і на знос. Подальше вивчення повинне висвітлити роль поверхні при статичних навантаженнях.

Механічні властивості при статичному навантаженні. У поверхневих шарах спотворення структури атомами домішок особливо великі; тут дуже часто спостерігається наклеп. Тому на поверхні метал найчастіше твердіший і крихкіший, ніж у глибині. Дифузійне насичення поверхневих шарів деякими металами породжує крихкість. Аналогічна дія оксидної плівки, що значно підвищує опір деформації, особливо у м'яких металів.

Велика жорсткість зовнішніх шарів перешкоджає розвитку пластичних деформацій. Систему рисок глибиною всього в 1 мкм на поверхню полірованих зразків виявили, що зразки із шорсткою поверхнею давали в 14 разів менший зсув, ніж зразки поліровані; міцність виявилась однаковою.

Операції, пов'язані із процесом електролітичного цинкування, відчутно впливають на механічні властивості сталей: позначається не тільки сам процес цинкування, але і травлення в кислоті; тривале цинкування мало відображається на показниках міцності, але дуже різко знижує пластичність. Так, при тривалості цинкування 1–1,5 год межа текучості та межа міцності знижуються всього на 4–6% порівняно з вихідним матеріалом, а подовження в 3–4 рази, поперечне звуження – в 5–10 разів.

Втома металу. Втоме руйнування найчастіше виникає на поверхні. Це викликано поєднанням ряду несприятливих умов:

1) у складних напружених станах, які характерні для рухомих частин машин, найбільші розрахункові напруження, як правило, виходять на поверхні;

2) на поверхні якнайбільше є концентраторів напруження або у вигляді різких змін у контурах деталі, або у вигляді недосконалості обробки;

3) крім загальних дефектів структури, поверхневим шарам властива специфічна недосконалість, така як тріщинуватість, сліди корозії та інше;

4) у поверхневих шарах дуже часто виникають великі залишкові напруження – іноді сприятливі, іноді – шкідливі.

За даними досліджень, чим вища міцність сталі, тим більшу роль відіграє обробка поверхні; залежно від неї межа втоми може знизитися в 2–3 рази.

Дані дослідів, показують, що для різних марок сталі межа втоми при грубій шорсткій поверхні становить 65–90% від міцності полірованих зразків, при штампуванні – 46–80%.

З технологічних прийомів, що підвищують міцність металів при змінних напруженнях, у яких враховано вплив стану поверхневого шару на механізм втомного руйнування, можна відзначити такі.

1. Зниження концентрації напружень шляхом підвищення якості обробки поверхні.

2. Усунення окремих зон концентрації напружень біля вирізів і отворів.

3. Створення на поверхні сприятливих залишкових напружень. Розтягуючі напруження знижують втомну міцність при повторному вигині; стискні залишкові напруження підвищують втомну міцність.

3. НАПРУЖЕННЯ ТА ДЕФОРМАЦІЯ

3.1. Метод перерізів

Більшість механічних властивостей виражається через величину напружень. Поняття «напруження» запроваджене для оцінки величини навантаження, що не залежить від розмірів тіла, що деформується. Напруження σ , таким чином, питомою величиною і визначається як відношення внутрішніх сил пружності, віднесене до одиниці площі поперечного перерізу, тобто

$$\sigma = \frac{P}{F};$$
 де P – діюча сила; F – площа, перпендикулярна до осі зразка (рис. 3.2).

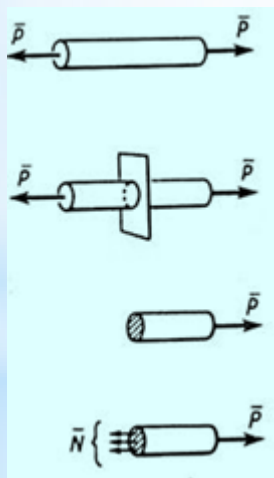


Рис. 3.1 – Визначення внутрішніх сил методом перерізів

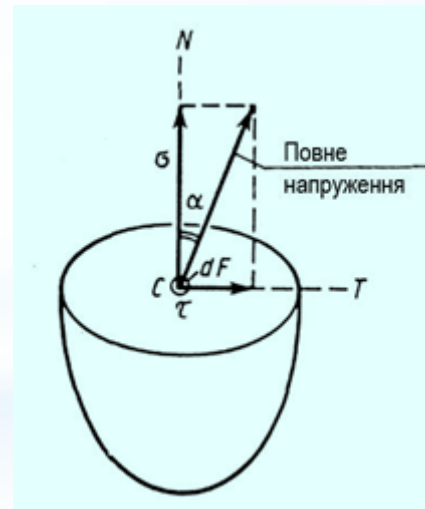


Рис. 3.2 – Схема розкладання напруження на дотичну і нормальну складові

Для визначення величини напружень у якомусь перерізі тіла останнє уявно розтинають на дві частини, потім одну частину тіла відкидають, а її дію на частину, що залишилася, замінюють внутрішніми силами (рис. 3.1).

У загальному випадку сила P не перпендикулярна до площини, на яку вона діє. Тоді, як і будь-який вектор, її можна розкласти на дві складові: нормальну (перпендикулярну до площини), що створює нормальне напруження і дотичну, діючу в площині, що викликає дотичні напруження (рис.3.2).

Розкладання повного зусилля (напруження) на нормальну і дотичну складові широко використовується. У механічних випробуваннях визначають саме ці напруження. Їх же використовують у розрахунках на міцність. Це пов'язано з тим, що одні процеси при деформації і руйнуванні визначаються дотичними напруженнями (пластична деформація, руйнування шляхом зрізу), а інші – нормальними (руйнування відривом). Нормальні напруження ділять на розтягувальні (позитивні) і стисні (негативні).

Напруження, якими оперують у механічних випробуваннях, можуть бути *істинними* й *умовними*. Відомо, що в процесі деформації величина площини, на якій діють напруження (площа перерізу зразка), змінюється. Якщо ці зміни не враховують і напруження розглядають як відношення навантаження в даний момент до вихідної площі перерізу (F_0), то такі напруження називають *умовними*. Якщо ж відносять силу до величини фактичного перерізу в даний момент деформації, то одержують *істинне* напруження. Фізичний сенс мають тільки істинні напруження, проте на практиці часто буває зручніше користуватись умовними. Це особливо виправдано при малому ступені деформації, коли зміни площі перерізу зразка невеликі. Істинні напруження позначаються символами S (нормальні) та t (дотичні), а умовні – σ і τ відповідно.

Під час розв'язання реальних задач не можна обмежуватися знанням величини напружень у якомусь певному перерізі. Для оцінки напруження діючого в будь-якому перерізі тіла використовують положення про тензор напружень.

Деформація. Під дією напружень усі матеріали деформуються, тобто змінюють форму і розміри.

Деформації, що зникають після зняття навантаження, називають *пружними*.

Деформації, що залишаються після зняття навантаження, називають *пластичними* (залишковими).

Процес деформації під дією поступово зростаючого навантаження складається з трьох стадій, що послідовно накладаються одна на одну (рис. 3.3).

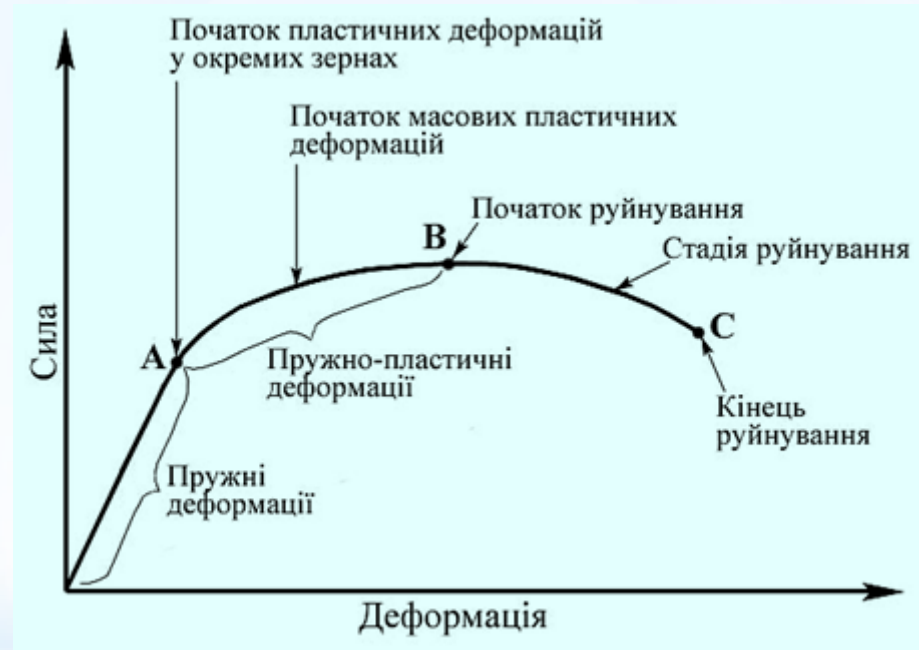


Рис. 3.3 – Схема процесу деформації

Навіть незначне прикладене напруження викликає пружну деформацію і в чистому вигляді спостерігається тільки при напруженнях до точки А. Пружна деформація характеризується прямо пропорційною залежністю від напруження і пружною зміною розмірів міжатомних відстаней.

Вплив пружної деформації на форму, структуру і властивості тіла повністю усувається після припинення дії сил, що викликали її, оскільки під дією прикладених сил відбувається тільки незначне зміщення атомів або поворот блоків кристала. При зсуві атомів з положення рівноваги порушується баланс сил тяжіння й електростатичного відштовхування. Тому після зняття навантаження зміщені атоми під дією сил тяжіння або відштовхування повертаються у початковий рівноважний стан і кристали набувають свою первинну форму і розміри.

При деяких значеннях напружень (вище за точку *A*, рис. 3.3) починається пластична деформація в окремих зернах металу. Подальше збільшення напруження викликає збільшення пружної і пластичної (залишкової) деформацій (ділянка *AB* пружно-пластичних деформацій).

При досягненні напруженнями так званої межі або порога пружності (біля точки *A*) деформація стає необоротною. При знятті навантаження усувається лише пружна складова деформації. Пластична частина деформації залишається.

Пластична деформація, що залишається після зняття навантаження, пов'язана з переміщенням атомів усередині кристалів на відносно великі відстані й викликає залишкові зміни форми, структури і властивостей без макроскопічних порушень суцільності металу.

Пластична деформація в кристалах може здійснюватися ковзанням і двійникуванням.

Ковзання – це зміщення окремих частин кристала (однієї частини щодо іншої) під дією дотичних напружень, коли ці напруження в площині й напрямі ковзання досягають певної критичної величини τ (рис. 3.4 а).

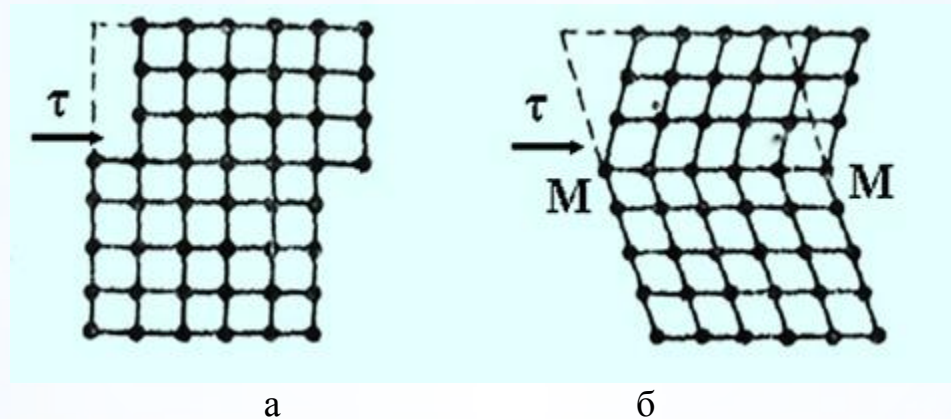


Рис. 3.4 – Схеми деформації:
а – ковзанням; б – двійникуванням

Двійникування – поворот однієї частини кристала в положення симетричне другій його частині. Площиною симетрії є площина двійникування М-М (рис. 3.4 б і 3.5).

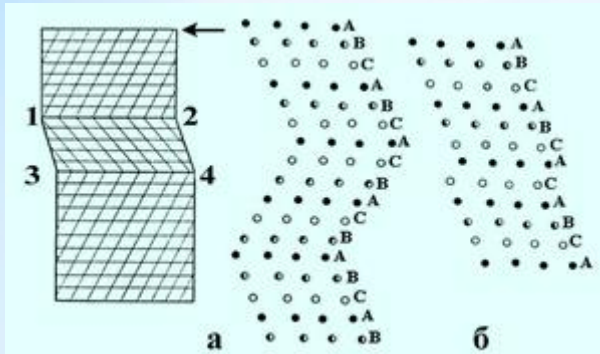
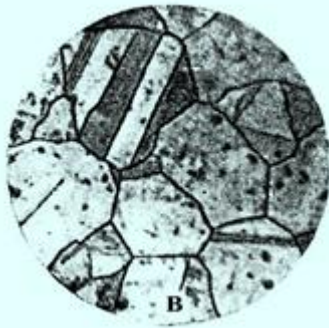


Рис. 3.5 – Схема розміщення атомів при двійникуванні (а) (1, 2, 3, 4 – смуга двійникування) під час утворення дефектів укладання (б) і структура сплаву з двійниками (в)

В обох випадках пластична деформація відбувається по певних площинах і напрямках у кристалічних ґратках.



Ковзання в кристалічних ґратках проходить по напрямках, де величина опору зрушенню τ найменша (рис. 3.6). Це пояснюється тим, що відстань між сусідніми атомними площинами найбільша, а зв'язок між ними найменший.

Чим більше можливих площин і напрямів ковзання, тим вища його здатність до пластичної деформації.

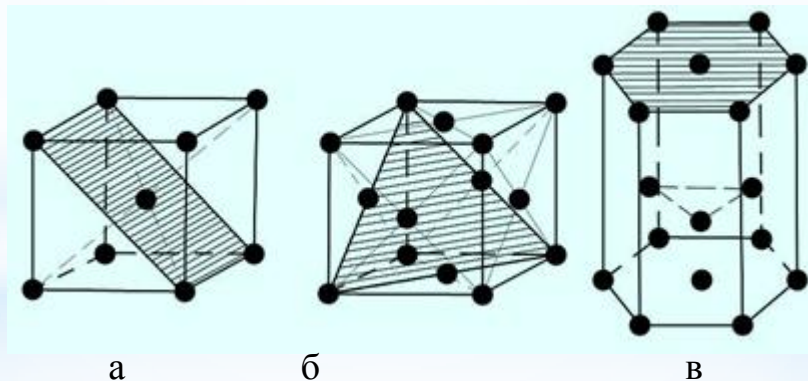


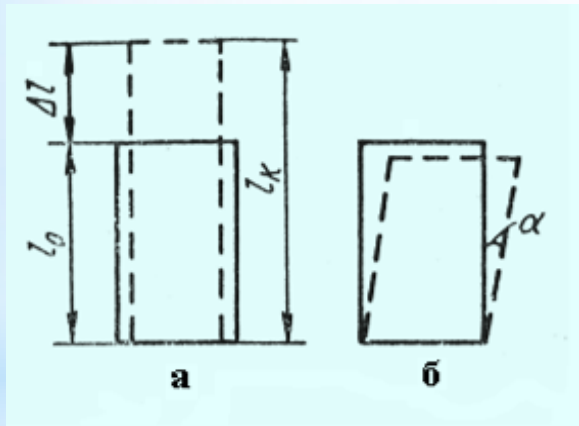
Рис. 3.6 – Кристалографічні площини, по яких відбувається зсув: а – об'ємно центрований куб (ОЦК); б – граніцентований куб (ГЦК); в – гексагональна щільно упакована ґратка (ГЩУ)

За результатами механічних випробувань оцінюють різні характеристики пружної, а частіше – залишкової деформації. Найбільш широко використовують такі характеристики деформації: подовження, зсув, звуження (розширення) зразків.

Збільшення довжини зразка в результаті деформації, як правило, характеризують відносним подовженням:

$$\delta = \frac{l_k - l_o}{l_o} \cdot 100\% = \frac{\Delta l}{l_o} \cdot 100\%$$

l_k – кінцева довжина; Δl – абсолютний приріст подовження (рис. 3.7 а).



Величина δ є умовною характеристикою, оскільки деформація із самого початку розвивається на довжині, що безперервно змінюється.

Припустимо, що зразок довжиною $l_o = 10$ мм подовжили на 1 мм, а потім з 11 до 12 мм, тоді в першому випадку $\delta = ((11-10):10) \times 100 = 10\%$, а в другому при тому самому $\Delta l = 1$ мм $\delta = ((12-11):11) \times 100 = 9,1\%$.

Рис. 3.7 – Подовження (а) і зсув (б)

Очевидно, сумарне істинне подовження $(1/10 + 1/11 + 1/12 + \dots) \cdot 100$ менше за умовне. Це істинне відносне подовження:

$$e = \int_{l_o}^{l_k} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_k}{l_o}$$

Подовження та укорочення зразка, як правило, відбуваються під дією нормальних напружень. Дотичні напруження викликають зсувні деформації, які оцінюють за кутом зсуву α (у радіанах) або за величиною відносного зсуву $g = \operatorname{tg}\alpha$ (рис. 3.7 б).

Відносні подовження і зсув (δ і g) – фундаментальні характеристики деформації, які використовуються в теоріях пружності й пластичності. Сукупність подовжень і зсувів – **тензор деформації** – за аналогією з тензором напружень характеризує будь-який деформований стан у даній точці і дозволяє визначати δ в будь-якому напрямі і g в будь-якій площині. У разі, якщо три головні напрями деформації (у яких зсуви дорівнюють нулю) наперед відомі і їх можна сумістити з координатними осями, тензор деформації характеризується сукупністю трьох подовжень:

$$(g) = \begin{pmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{де } e_1 \text{ – найбільше подовження; } e_3 \text{ – найменше подовження.} \\ \text{Третьою широко використовуваною характеристикою} \\ \text{деформації є відносне звуження:} \end{array}$$

$$\psi = \frac{F_0 - F_k}{F_0} \cdot 100\%,$$

де F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка;

F_k – кінцева площа поперечного перерізу зразка.

Як і δ , це умовна характеристика деформації, оскільки площа перерізу безперервно змінюється в процесі випробування.

Між e , δ і ψ існує функціональний зв'язок в області рівномірної деформації, тобто поки величина відносних змін форми і розмірів в усіх точках робочої частини зразка однакова. Цей зв'язок виходить з умови постійності об'єму при пластичній деформації:

$$F_0 l_0 = F_\kappa l_\kappa \Rightarrow \frac{l_\kappa}{l_0} = \frac{F_0}{F_\kappa}$$

Відносне звуження $\psi = \frac{F_0 - F_\kappa}{F_0} = 1 - \frac{F_\kappa}{F_0}$, отже, $\frac{F_0}{F_\kappa} = \frac{1}{1 - \psi} \Rightarrow \frac{l_\kappa}{l_0} = \frac{1}{1 - \psi}$.

Звідси $e = 1n \frac{l_\kappa}{l_0} = 1n \frac{1}{1 - \psi} = 1n(1 + \delta)$.

Крім трьох описаних характеристик деформації, використовують й інші, більш часткові. Наприклад, величину деформації при випробуванні на вигин можна оцінювати за стрілою прогинання, а на кручення – за кутом скручування і т. д.

3.2. Схеми напруженого стану при механічних випробуваннях

Залежно від характеру дії зовнішніх сил матеріал виробу (зразків) піддаватиметься різним видам напружень (рис. 3.8).

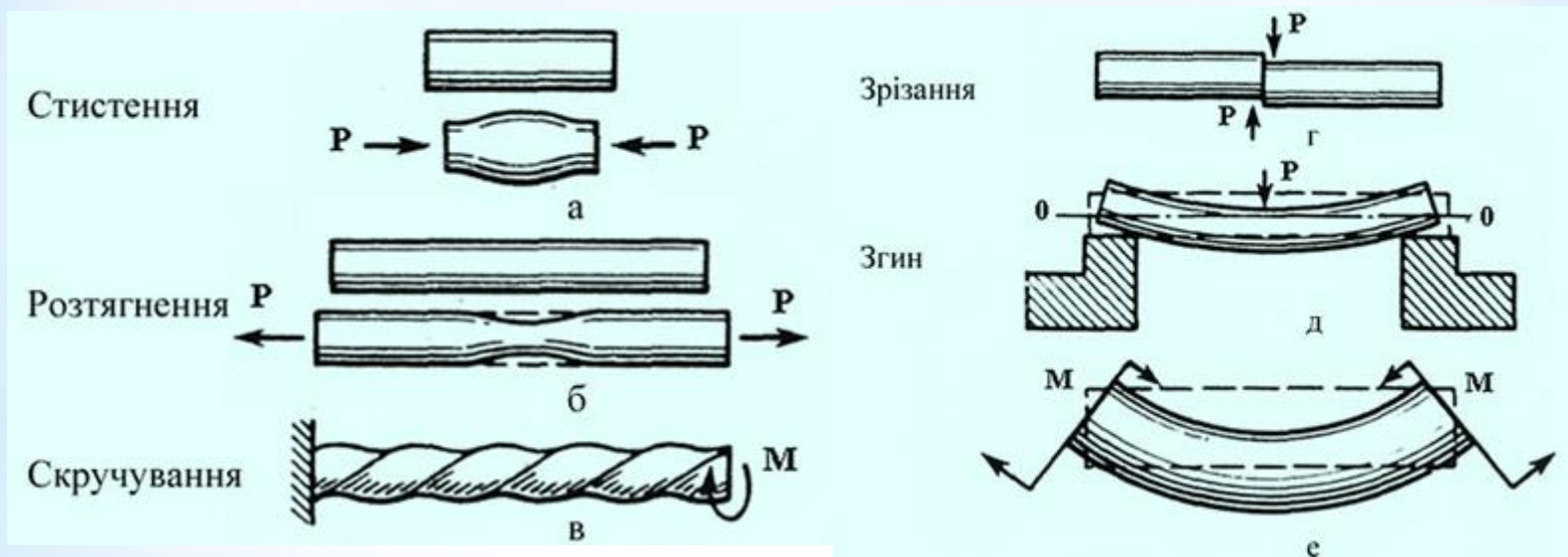
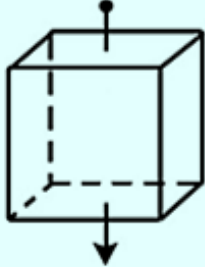
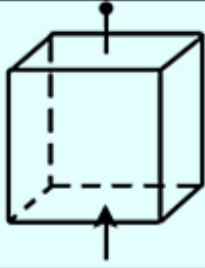
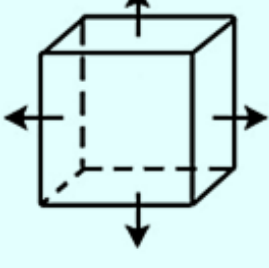


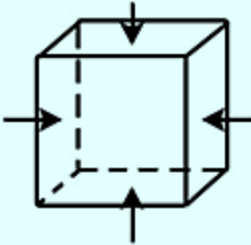
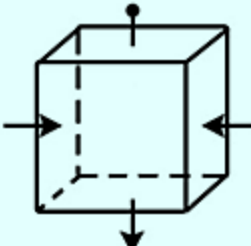
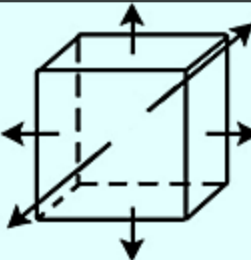
Рис. 3.8 – Схема дії навантажень

Результати механічних випробувань значною мірою визначаються схемою напруженого стану, яка задається в зразку умовами його навантаження. Один і той самий матеріал може проявляти різко різні характеристики міцності й пластичності, якщо його випробовувати при різних схемах напруженого стану. Вони наведені в табл. 3.1 разом із відповідними тензорами напружень і прикладами реалізації в різних випробуваннях та умовах експлуатації.

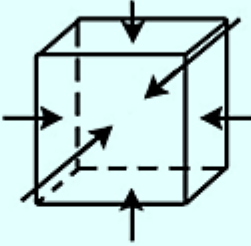
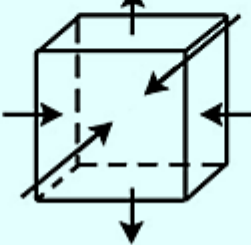
Таблиця 3.1 – Схеми напружених станів (за Я. Б. Фрідманом)

Напружений стан		Схема напруженого стану	Тензор напружень	Приклади реалізації
1	2	3	4	5
Лінійний	Одновісне розтягування		$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0$	Випробування на розтягування зразків без надрізу (до утворення шийки)
	Одновісне стискування		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_3 < 0$	Випробування на стискування (за відсутності тертя на поверхнях торців)
Плоский	Двовісне розтягування		$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_1 & 0 \\ 0 & 0 & S_2 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0; S_2 > 0$	Вигин широкого зразка ($S_1 \approx 4S_2$). Тонкостінний циліндр, що піддається внутрішньому тиску й осьовому розтягуванню

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
Плоский	Двовісне стискування		$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_2 < 0; S_3 < 0$	Кільцеве стискування зразків по боковій поверхні ($S_3 = S_2$)
	Різнойменний плоский напружений стан		$(S) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_3 & 0 \\ 0 & 0 & S_1 \end{pmatrix}$ $S_2 > 0; S_3 > 0$	Кручення циліндрового стрижня ($S_1 = -S_3$)
Об'ємний	Тривісне розтягування		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0; S_2 > 0; S_3 > 0$	Гідростатичне розтягування в центрі кулі, що нагрівається ($S_1 = S_2 = S_3$). Розтягування циліндрового зразка з надрізом (у центральних зонах, де $S_1 > S_2$, $S_2 \approx S_3$)

Продовження табл. 3.1

1	2	3	4	5
Об'ємний	Тривісне стискування		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 < 0; S_2 < 0; S_3 < 0$	Гідростатичне стискування. Випробування на твердість вдавлюванням індентора
	Різнойменний об'ємний напружений стан		$(S) = \begin{pmatrix} S_1 & 0 & 0 \\ 0 & S_2 & 0 \\ 0 & 0 & S_3 \end{pmatrix}$ $S_1 > 0; S_2 < 0; S_3 < 0$	Розтягування зразка з шийкою під гідростатичним тиском

Наведені в табл. 3.1 схеми можна застосувати лише в області пружної і рівномірної деформації. У процесі реальних випробувань, особливо після початку зосередженої пластичної деформації, ці схеми можуть значно змінитися.

Схема напруженого стану впливає на механічні властивості й особливо на характеристики деформації (пластичності) через співвідношення стискних і розтягувальних напружень. Стискні напруження більшою мірою сприяють прояву пластичності, ніж розтягувальні (в умовах гідростатичного стискування руйнування взагалі не відбувається). Тому чим більша роль стискних напружень у схемі напруженого стану, тим вона вважається «м'якшою», оскільки при її реалізації деформаційна здатність матеріалу більша.

Для кількісної оцінки «м'якості» схеми напруженого стану Фрідман запропонував розраховувати спеціальний коефіцієнт м'якості:

$$\alpha = \frac{t_{\max}}{S_{\max}^n}, \quad \text{де } t_{\max} \text{ – максимальне дотичне напруження;}$$

S_{\max}^n – найбільше зведене головне нормальне напруження.

За другою теорією міцності $S_{\max}^n = S_1 - \nu(S_2 + S_3)$, де ν - коефіцієнт Пуассона.

Тоді
$$\alpha = \frac{S_1 - S_3}{2S_1 - 2\nu(S_2 + S_3)}.$$

У багатьох металів коефіцієнт Пуассона приблизно однаковий $\nu \approx 0,25$, і величину α можна розраховувати за рівнянням:

$$\alpha = \frac{S_1 - S_3}{2S_1 - 0,5(S_2 + S_3)}.$$

Значення того, чому відношення t_{\max} / S_{\max}^n повинне характеризувати «м'якість» схеми напруженого стану, зводиться до такого. Величина t_{\max} визначає легкість початку пластичної деформації, а S_{\max}^n – крихкого відриву. Якщо, $t_{\max} > S_{\max}^n$, то при навантаженні зразка, перш ніж відбудеться крихке руйнування, почнеться пластична деформація яка завадить крихкому відриву. Якщо ж $t_{\max} < S_{\max}^n$, то руйнування може відбутися до появи пластичної деформації. Тому чим більше t_{\max} і менше S_{\max}^n (тобто більше α), тим більше сприятливі умови для розвитку пластичної деформації.

У той же час величина α визначається співвідношенням стискних і розтягувальних напружень. У табл. 3.2 наведені значення коефіцієнта м'якості для випробувань декількох видів з різними схемами напруженого стану.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнт «м'якості» α при випробуваннях різних видів

Вид випробування	Головні нормальні напруження			α
	S_1	S_2	S_3	
Тривісне розтягування	S	S	S	0
Одновісне розтягування	S	0	0	0,5
Кручення	S	0	- S	0,8
Одновісне стискування	0	0	- S	2
Тривісне стискування	- S	$-(7/3) S$	$-(7/3) S$	4

В умовах тривісного розтягування, коли стискні напруження відсутні ($\alpha = 0$), ця схема відрізняється максимальною «жорсткістю», тобто здатність матеріалу деформуватися в таких умовах мінімальна. Навпаки, при гідростатичному стискуванні матеріал повинен проявити максимальну пластичність — тут $\alpha = 4$. Тому деякі метали і сплави, що відрізняються крихкістю при малих значеннях α (наприклад, сірий чавун, загартована сталь, інтерметаліди), можуть деформуватись і безпечно служити в умовах м'якших схем напруженого стану.

Абсолютні значення «коефіцієнта м'якості» не дозволяють кількісно оцінювати характеристики деформації (δ , ψ та ін.). Величина α може і повинна застосовуватись лише для порівняльної оцінки «м'якості» різних випробувань.

3.3. Класифікація механічних випробувань

Крім схем напруженого стану, механічні випробування розрізняються за способом навантаження і характером його зміни в часі.

Використовують два способи навантаження зразка:

- 1) шляхом його деформації із заданою швидкістю і вимірюванням сил опору зразка цієї деформації;
- 2) подачею постійного навантаження на зразок з вимірюванням виниклої при цьому деформації.

Найбільш поширений перший спосіб, що забезпечує можливість безперервного вимірювання і запису сили опору зразка деформації. Він використовується практично у всіх різновидах статичних випробувань.

Найважливіші приклади застосування другого способу навантаження – випробування на повзучість і тривалу міцність.

За характером зміни в часі навантаження підрозділяють на *статичні*, *динамічні* й *циклічні*. Статичні навантаження характеризуються відносно повільним зростанням від нуля до деякої максимальної величини. При динамічному навантаженні це зростання відбувається за дуже короткий проміжок часу. Циклічні навантаження характеризуються багатократними змінами за напрямом і величиною.

Відповідно до характеру діючих навантажень розрізняють статичні, динамічні й утомні випробування.

Статичні випробування відрізняються плавною, відносно повільною зміною навантаження зразка і малою швидкістю його деформації, а також такою малою величиною прискорення рухомих частин машини, що виниклими в них силами інерції можна знехтувати. Під час статичних випробувань можна методом простої статичної рівноваги з достатньою точністю визначати зусилля і деформації, а також величини роботи деформації у будь-який момент випробування.

Найбільш важливі такі різновиди статичних випробувань, що відрізняються схемою прикладення навантажень до зразка (тобто схемою напруженого стану): одновісне розтягування, одновісне стискування (надалі – просте розтягування, стискування), згинання, кручення, розтягування і згинання зразків з надрізом і тріщиною (плоскі та об'ємні схеми напруженого стану).

Динамічні випробування характеризуються прикладенням до зразка навантажень з різкою зміною їх величини і великою швидкістю деформації. Тривалість усього випробування не перевищує сотих часток секунди. Динамічне навантаження створюють ударом вільно падаючої важкої маси. У результаті в окремих частинах зразка і випробувальної машини виникають значні сили інерції. Тому для вимірювання зусиль метод статичної рівноваги тут використовувати не можна.

У результаті динамічних випробувань визначають величину повної або питомої роботи динамічної деформації, а також величину залишкової деформації зразка (абсолютної або відносної). Даних про величину напружень і деформацій у процесі цих випробувань, як правило, не одержують, хоча у принципі це можливо. Динамічні випробування найчастіше проводять за схемою вигину.

Для випробувань на втому характерне багатократне прикладення до зразка навантажень, що змінюються. Такі випробування, як правило, дуже тривалі (години – сотні годин). За наслідками втомних випробувань визначають число циклів до руйнування при різних значеннях напружень, а зрештою – те граничне напруження, яке зразок витримує без руйнування протягом певного числа циклів навантаження. При втомних випробуваннях використовують різні схеми прикладення навантажень до зразка: згинання, розтягування – стискування, кручення.

Крім розглянутих статичних, динамічних і втомних, розрізняють ще дві великі специфічні групи випробувань. Перша з них – це випробування на твердість, у яких оцінюють різні характеристики опору деформації або, рідше, руйнуванню поверхневих шарів зразка при взаємодії їх з іншим тілом – індентором (від англійського indentation – вдавлювання). Більшість різновидів випробувань на твердість – статична.

Друга група – випробування на повзучість і тривалу міцність. Їх, як правило, проводять при підвищених температурах для оцінки характеристик жароміцності. Зразки тут протягом усього випробування знаходяться під постійним навантаженням. При випробуванні на повзучість вимірюють величину деформації у функції часу при різних напруженнях на зразку, а в результаті випробувань на тривалу міцність оцінюють час до руйнування під дією різних напружень.

Існує ще ряд методів і різновидів механічних випробувань, які використовують на практиці в більш обмежених масштабах.

Як бачимо, методи проведення випробувань дуже різноманітні. До того ж вони проводяться при різних температурах, починаючи від дуже низьких негативних і кінчаючи температурами в інтервалі плавлення, в різних середовищах і т. д. Усе це цілком природно, оскільки відображає різноманітність умов експлуатації та обробки металів і сплавів, які зрештою намагаються моделювати випробуваннями.

Механічні випробування – це визначення механічних властивостей матеріалів і виробів різними способами.

Механічні випробування матеріалів необхідні для отримання характеристик їх механічних властивостей, які можна було б використовувати не тільки при розрахунках на міцність деталей машин і споруд, але і при оцінці якості продукції.

У зв'язку з тим, що умови роботи матеріалів різні, створені відповідно різноманітні види і методи випробувань.

Як правило, при механічних випробуваннях усі спостереження і розрахунки напруженого стану здійснюються у макроскопічних об'ємах. Як виняток, вдаються іноді і до спостережень у мікроскопічних об'ємах (спостереження за деформаціями в межах окремих кристалів).

Для оцінки напруженого стану допустиме застосування тих самих гіпотез про будову і властивості матеріалів, які вивчаються в курсі «Опору матеріалів».

При всіх видах механічних випробувань відтворюють, по можливості, на зразках такі зовнішні дії, яким він піддається в умовах експлуатації. Одержувані при цьому характеристики механічних властивостей умовні, залежать від умов випробувань. Це викликає прагнення до уніфікації методів механічних випробувань з метою отримання порівнювальних даних. Уніфікація методів випробувань виконана й удосконалюється в рамках державних стандартів і міжнародних рекомендацій.

3.4. Умови подібності механічних випробувань

Більшість характеристик механічних властивостей матеріалів не є їх фізичними константами. Вони великою мірою залежать від умов проведення випробування. Тому не можна робити висновки про властивості матеріалів за даними механічних випробувань, які проводяться різними дослідниками за різними методиками. Необхідне виконання певних умов проведення випробувань, які б забезпечили сталість результатів при багатократному повторенні випробувань, так, щоб ці результати в максимальному ступені відображали властивості матеріалу, а не вплив умов випробування. Крім того, дотримання цих правил повинне гарантувати порівнянність результатів випробувань, проведених у різний час, у різних лабораторіях, на різному устаткуванні, зразках і т. д. Умови, що забезпечують таку сталість і порівнянність результатів, називаються умовами подібності механічних випробувань.

Для дотримання умов подібності зразки необхідно піддавати випробуванням при однаковій схемі напруженого стану і в однакових фізичних умовах. Звідси виникає необхідність дотримання трьох видів подібності:

- 1) геометричної (форма і розміри зразка);
- 2) механічної (схема і швидкість прикладення навантажень);
- 3) фізичної (зовнішні фізичні умови).

Умова геометричної подібності зводиться до того, що випробовувані зразки повинні мати геометрично подібну форму. Наприклад, два зразки геометрично подібні, якщо вони мають якісно однакову конфігурацію, а відношення будь-яких двох відповідних розмірів кожного з них дорівнюють

$$\left(\frac{d_1}{D_1} = \frac{d_2}{D_2}, \frac{l_1}{d_1} = \frac{l_2}{d_2} \right).$$

Форма і розміри зразка впливають на результати випробування через схему напруженого стану, яка залежить від форми тіла і певного розміщення точок прикладення навантажень.

Природно, що ще більший вплив на напружений стан у зразку робить схема навантажень. У загальному вигляді механічна подібність полягає в тому, щоб у подібних перерізах робочої частини зразків виникали тотожний напружений стан і однакова відносна деформація. Якщо можна нехтувати впливом швидкості деформації, то умова механічної подібності зведеться до того, що всі прикладені до зразка зовнішні сили повинні бути подібно напрямлені й прикладені у відповідних його точках. При великих швидкостях деформації дотримання механічної подібності в різних за розміром зразках ускладнюється. Необхідно зазначити, що сформульовані умови геометричної і механічної подібності забезпечують тотожність напружених станів і відносних деформацій не у всіх випадках. Відхилення спостерігаються, зокрема, при крихкому руйнуванні, при дуже великих відмінностях в абсолютних розмірах зразків («масштабний фактор») і ряді інших випадків, кожний з яких має своє пояснення.

Наприклад, вплив масштабного фактора можна пояснити на основі статистичних теорій міцності. Зниження механічних властивостей при збільшенні розмірів зразків пов'язують із збільшенням ймовірності існування небезпечних поверхневих і внутрішніх дефектів – концентраторів напружень, що викликають передчасну деформацію і руйнування.

Необхідність фізичної подібності для отримання відтворювальних і порівняльних результатів випробувань абсолютно очевидна і не вимагає спеціальних роз'яснень.

Коли необхідне отримання порівнянних даних за властивостями різних матеріалів, дотримання фізичної подібності ускладнюється. Наприклад, порівняння механічних властивостей різних металів і сплавів при одній температурі може бути при розв'язанні певних задач позбавлене фізичного значення. Механічні властивості, зокрема зміцнювальні, пов'язані з температурою початку плавлення металу або сплаву за інших рівних умов. Чим вища ця температура, тим вищі зміцнювальні характеристики при заданій температурі випробування. Тому зіставлення властивостей різних металевих матеріалів правильніше проводити при однакових гомологічних температурах, тобто однакових відношеннях абсолютних температур випробування і плавлення $T_{\text{випр}}/T_{\text{пл}}$.

Гомологічною температурою для кожного металу називається температура, що виражається у процентах від абсолютної температури його плавлення, яку беруть за 100%. На рис. 3.8 подана схема, запропонована Фрідманом, на якій по осі абсцис відкладені в масштабі температури стоградусної (верхня) та абсолютної (нижня) шкал, а по осі ординат – відсотки від 0 до 100. Прямі, проведені з початку координат до значення температур плавлення різних металів (Hg, Pb, Cu, Fe), на стоградусній шкалі дозволяють легко переходити від однієї шкали до іншої. Рівність гомологічних температур при фізико-хімічному аналізі сплавів дозволяє встановлювати загальні закони зміни їх властивостей.

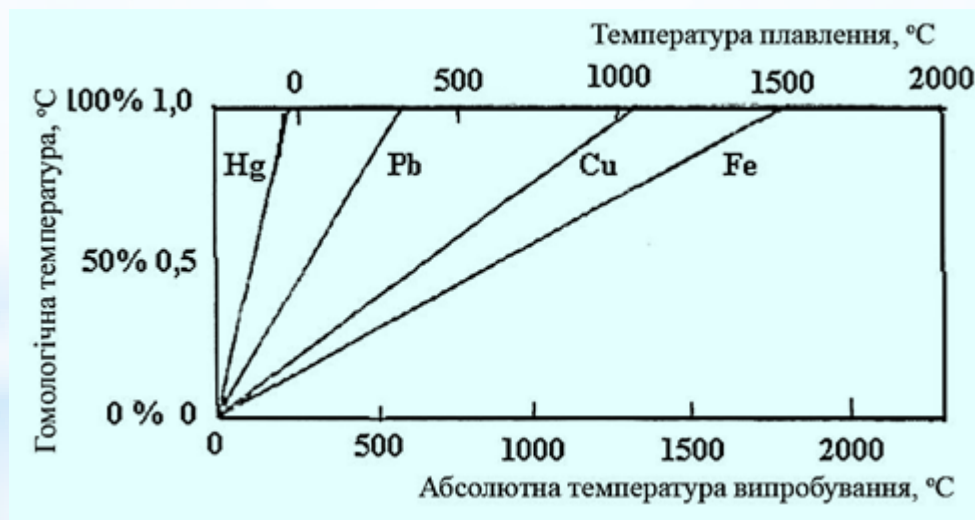


Рис. 3.8 – Гомологічні температури

Для отримання порівняльних результатів і правильного аналізу, крім дотримання трьох перелічених умов подібності, велике значення має методика виготовлення зразків для випробувань. У кожному випадку вона повинна бути чітко обумовлена. Один і той самий матеріал залежно від умов його отримання (швидкості кристалізації під час лиття, ступеня обтискання під час прокатування і т. д.) може мати різко різні властивості. Тому для отримання порівняльних даних завжди необхідно дотримувати ідентичність режимів (а не тільки методів) отримання та обробки заготовок для зразків, виготовляти їх (наприклад, на верстатах) за однією технологією.

Спосіб виготовлення зразка повинен бути таким, щоб в останньому створювалася структура, ідентична структурі відповідної деталі. При виготовленні зразків заданої форми потрібно використовувати такі методи обробки, які не міняють властивостей металу. Тому зразки в процесі виготовлення не можна нагрівати значно вище за кімнатну температуру, піддавати значним пластичним деформаціям (наклеп) і т. д.

Велике значення має якість поверхні зразків. Поверхневі дефекти (подряпини, риски) служать концентраторами напружень й знижують характеристики міцності і пластичності.

Важливість дотримання умов подібності під час проведення механічних випробувань наочно демонструється стандартизацією їх методики в державному, а деяких випробувань і в міжнародному масштабі.

3.5. Вплив масштабного фактора

Структура реальних матеріалів та розподіл її дефектів неоднакові навіть у межах одного зразка. Тому механічні властивості, визначувані цією структурою і дефектами, строго кажучи, різні для різних об'ємів одного зразка. У результаті ті характеристики механічних властивостей, які ми повинні оцінювати під час випробувань, є середньостатистичними величинами, що дають сумарну, математично найбільш імовірну характеристику всього об'єму зразка, який бере участь у випробуванні. Навіть при абсолютно точному вимірі механічних властивостей вони будуть неоднакові у різних зразків з одного і того самого матеріалу. Інструментальні (систематичні й випадкові) помилки визначення характеристик властивостей, пов'язані з вимірюванням навантажень, деформацій, розмірів і т. д., ще більше збільшують розкид експериментальних результатів. Тому необхідна статистична обробка результатів механічних випробувань для оцінки середнього значення властивості й помилки у визначенні цього середнього, а також визначити вибір мінімально необхідного числа зразків (або вимірів) для оцінки середнього із заданою точністю.

Особливо потрібно зазначити дію «масштабного фактора», що має істотний вплив на втомну міцність металів.

У табл. 3.3 наведені дані випробування на знакозмінний згин гладких зразків геометрично подібної форми з вуглецевої сталі. Дані показують, що при зміні діаметра зразка від 7,6 до 149,2 мм, тобто приблизно в 20 разів, межа витривалості σ_{-1} змінюється від 232 до 122 МПа, тобто зменшується приблизно удвічі.

Табл. 3.3. - Вплив масштабного фактора при втомі вуглецевої сталі 0,4% С

Матеріал зразка	Діаметр зразка, мм	Межа витривалості σ_{-1} , МПа
Сталь 40	7,6	232
	38,1	197
	149,2	122

Подібні явища при знакозмінному згині привели до узагальнення даних (рис. 3.9).

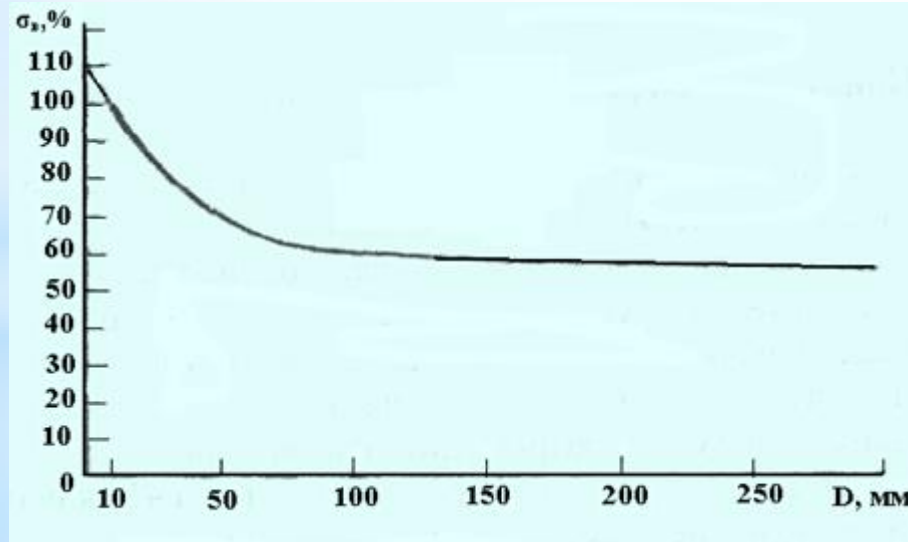


Рис. 3.9 – Вплив масштабного фактора на амплітуду циклів витривалості

Вплив масштабного фактора показаний на рисунку у вигляді відносної зміни амплітуди σ_v граничних циклів витривалості при згині прямих валів з осьової сталі діаметром до 300 мм. Амплітуда витривалості граничного циклу зразків лабораторного типу з перерізом діаметра $D=10$ мм прийнята за 100%. Графік показує, що із збільшенням діаметра D циклічна міцність металу падає приблизно на 40%, коли величина діаметра досягає значення $D = 100$ мм. Подальше збільшення розмірів уже не чинить істотного впливу на циклічну міцність.

Вплив масштабного фактора пояснюють по-різному – переважно у зв'язку зі станом поверхневого шару металу і розподілом напружень по перерізах під навантаженням. Проте найбільш обґрунтоване теоретичне пояснення цьому явищу можна знайти в статистичній теорії. Зі збільшенням розмірів зразка збільшується його поверхня, що знаходиться під дією найбільших напружень при згинанні. Завдяки цьому збільшується і ймовірність появи на ній руйнування від втоми при нижчих напруженнях. Розрахунки співвідношень величини меж витривалості зразків різних перерізів при згинанні на основі статистичної теорії втоми дають задовільний збіг з результатами випробувань на знакозмінний згин.

3.6. Поняття про діаграму механічного стану

Під час випробування на розтягування частинки матеріалу під дією випробувальної машини віддаляються одна від одної в осьовому напрямі. Поки ця відстань збільшується трішки, опір матеріалу продовжує утримувати ці частинки в полі їх взаємодії. Але настає момент, коли зв'язки між частинками порушуються, відбувається руйнування. Розтягування супроводжується зсувом по площині під кутом 45° до осі зразка під впливом дотичних напружень.

Характер руйнування зразка при розтягуванні залежатиме від того, який опір матеріал здатний надати зсуву частинок по площині під кутом 45° і їх віддаленню один від одного в подовжньому напрямі. Якщо матеріал слабо чинить опір зрушенню, то руйнування відбудеться під кутом 45° від дотичних напружень. Якщо ж матеріал добре чинить опір зсуву, то руйнування відбудеться від відриву по поверхні, перпендикулярній до осі зразка.

При стисканні напруження, в площині нормального поперечного перерізу, не зможуть викликати руйнування. Проте дотичні напруження в похилих площинах можуть призвести до руйнування. Руйнування від дотичних напружень називають, як правило, зрізом.

При крученні руйнування відбувається по поверхні розміщеній під кутом 45° до осі зразка, або по поверхні перпендикулярній до його осі, чи по поздовжній радіальній площині. У першому випадку буде руйнування від відриву через нормальні напруження. У другому випадку відбудеться зріз через дотичні напруження.

Той або інший вид руйнування залежить від опору металу відриву або зрізу.

Фрідман Я. Д., розвиваючи теорію М. М. Давиденкова, запропонував схему, що пояснює можливість отримання крихкого або в'язкого зламу при випробуванні металів. Розуміючи під крихким зломом руйнування без помітної пластичної деформації під дією нормальних напружень, а під в'язким зломом – руйнування в основному за рахунок дотичних напружень, з попередньою пластичною деформацією, були введені поняття – «опір металу відриву» таі «опір металу зрізу».

При створенні в матеріалі просторового напруженого стану можна затримати розвиток дотичних напружень при рівномірному тривісному стискуванні або розтягуванні. В останньому випадку злам виходить крихким. Якщо ж дотичні напруження залишаються, то вид зламу залежатиме від властивостей матеріалу.

Фрідман Я. Д. зобразив це схемно у вигляді так званої діаграми механічного стану (рис. 3.10) для сталі з різною величиною зерна.

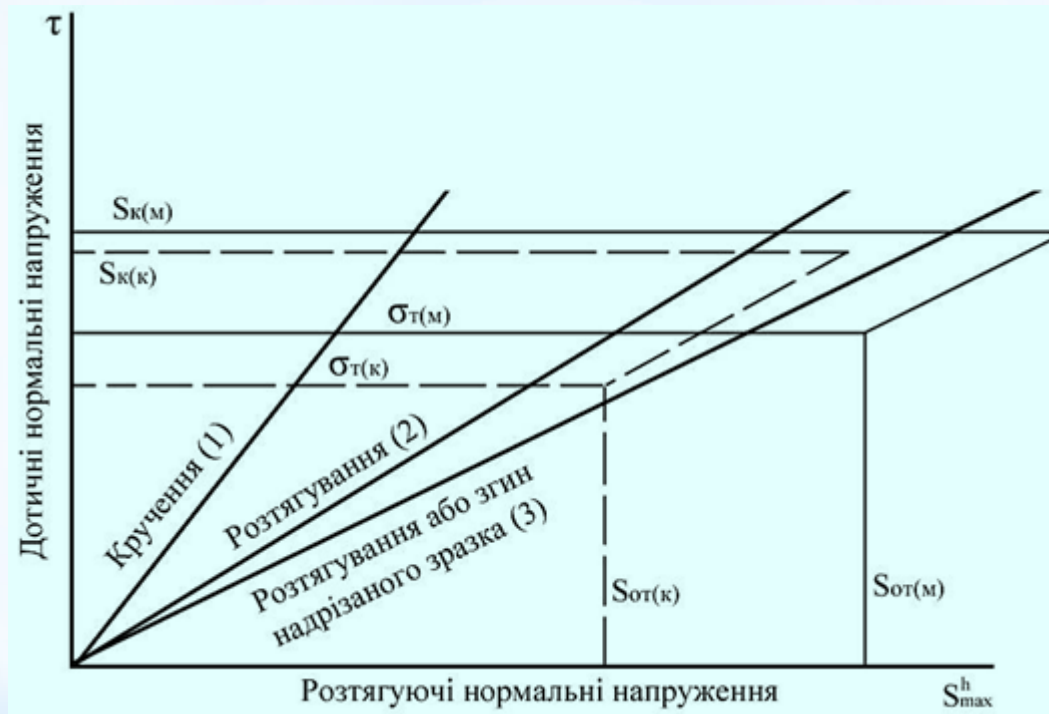


Рис. 3.10 – Схема діаграми механічного стану сталі (для крупнозернистої – пунктирні лінії; для дрібнозернистої – суцільні лінії): $S_{к(к)}$, – опір в’язкому руйнуванню крупнозернистої $S_{к(м)}$ дрібнозернистої сталі; $\sigma_{Т(м)}$, $\sigma_{Т(к)}$ – межі текучості цих сталей; $S_{от(к)}$, $S_{от(м)}$ – опір відриву цих сталей

По осі ординат відкладене найбільше дотичне напруження (τ), а по осі абсцис – нормальні напруження при розтягуванні (S_{\max}^h). Діаграма стану дозволяє визначити, що при розтягуванні надрізаних зразків зразок із дрібнозернистої сталі після досягнення межі текучості σ_T (М) деформуватиметься і по досягненні напруження S_K (М) руйнуватиметься шляхом зрізу. З діаграми Фрідмана Я. Б. також випливає, що крупнозернистий матеріал відрізняється від дрібнозернистого в основному величиною опору крихкому руйнуванню.

Діаграма механічного стану описує схемно перехід від крихкого руйнування до в'язкого (або навпаки) і наведена, щоб пояснити вплив просторового напруженого стану на характер руйнування сталі.

4. ВИПРОБУВАННЯ НА РОЗТЯГУВАННЯ

4.1. Визначення характеристик міцності під час розтягування

Найбільшу кількість інформації про механічні властивості металів дає випробування на розтягування. Для цього випробування з досліджуваного металу виготовляють зразки спеціальної форми (рис. 4.1).

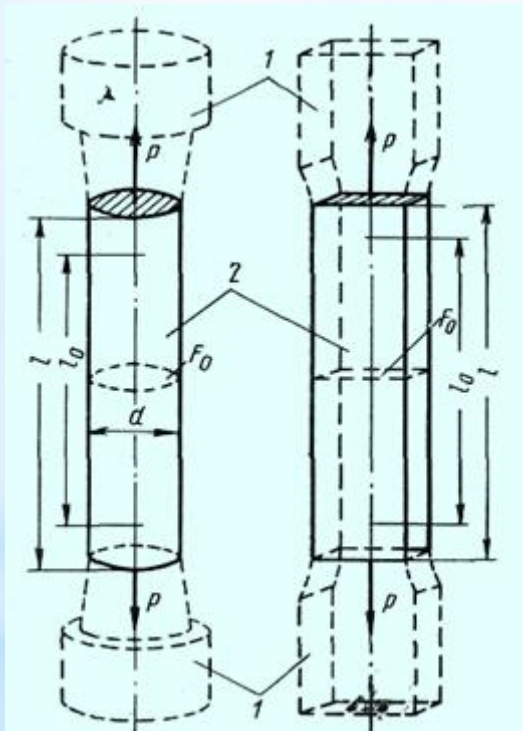


Рис. 4.1 – Зразки для випробування розтягування: 1 – головки; 2 – робоча частина

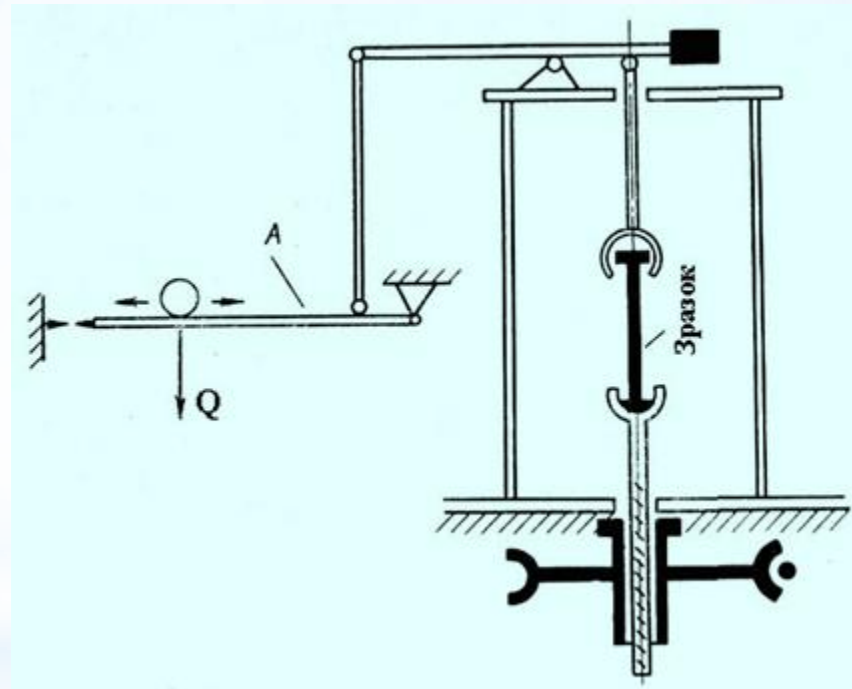


Рис. 4.2 – Схема будови машини з механічним приводом і важільним силовимірником

Зразок закріплюють у захватах випробувальної машини. Робоча частина зразка (l_0) – довжина зразка між головками для захвату. Випробувальна машина простої конструкції подана на рис. 4.2. Нижній захват машини переміщається вниз під дією робочого гвинта машини, захоплюючи за собою нижній кінець зразка. Верхній захват, прямуючи за зразком, також переміщається вниз. При цьому важіль A вагової системи, на якому є пересувний вантаж Q , прямує угору. Пересуваючи вантаж Q вліво, можна примусити важіль A зберегти горизонтальне положення і вся вагова система збереже при цьому своє початкове положення. Елементи вагової системи, як правило, роблять досить потужними і їх деформації будуть незначними.

Тому деформаціями решти елементів випробувальної машини (колон, поперечин, робочого гвинта та ін.) можна знехтувати. У зв'язку з цим положення верхнього захвату залишиться незмінним у процесі випробування зразка на розтягування. Нижній захват, переміщаючись вниз під дією робочого гвинта, деформує зразок, подовжуючи його. Матеріал надає цьому подовженню тим більший опір, чим більша створена деформація. Як правило, спочатку опір пропорційний подовженню, але потім ця залежність стає складнішою і становить предмет особливого розгляду.

У деяких матеріалів ця залежність із самого початку деформації нелінійна. Вантаж Q (див. рис. 4.2), переміщаючись вліво у міру збільшення опору зразка, весь час підтримує важіль A в горизонтальному положенні. Із співвідношення плечей вагової системи і положення вантажу Q на важелі A можна визначити силу опору зразка, створену в ньому деформацією. Таким чином, випробувальна машина деформує зразок і заміряє силу опору матеріалу створеної деформації. Залежність між деформацією і опором зразка дуже зручно подавати графічно у вигляді діаграми розтягування (рис. 4.3).

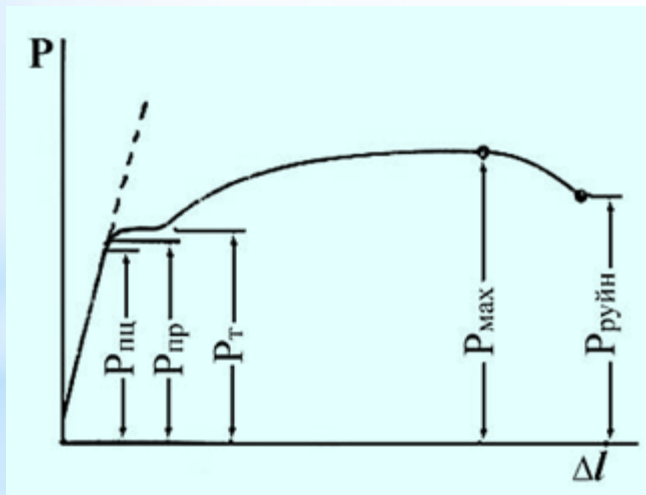


Рис. 4.3 – Діаграма розтягування

По осі абсцис відкладають деформацію Δl (подовження зразка), а по осі ординат – відповідну їй силу P опору. Деформацію Δl вимірюють в одиницях довжини, а опір матеріалу P - в одиницях сили. Форма діаграми залежить від властивостей випробовуваного матеріалу.

Характеристики опору матеріалу деформації, його міцність і здатність витримувати деформацію, що задається, можна встановити за допомогою діаграми розтягування. Більшість конструкційних матеріалів на першій стадії деформації знаходить прямо пропорційну залежність між опором матеріалу і його деформацією:

$$P = k\Delta l,$$

де k – коефіцієнт пропорційності.

Коефіцієнт k залежить від довжини, площі поперечного перерізу зразка і від властивостей матеріалу. Позначимо:

l – довжина зразка сталого перерізу;

F – площа поперечного перерізу;

E – коефіцієнт, залежний від властивостей випробовуваного матеріалу.

Залежність, відому під назвою закону Гука, можна подати у вигляді:

$$\Delta l = \frac{Pl}{EF}. \quad \text{Якщо} \quad \frac{P}{F} = \sigma \text{ і } \frac{\Delta l}{l} = \varepsilon,$$

то закон Гука можна написати в такому вигляді: $\sigma = E\varepsilon$,

де σ – нормальне напруження; ε – відносне подовження.

Коефіцієнт пропорційності E між напруженням σ і відносним подовженням ε , називають модулем нормальної пружності, або модулем Юнга.

Оскільки величина ε - безрозмірна, то модуль пружності E повинен мати ту ж саму розмірність, що і σ .

Як бачимо з діаграми розтягування, пропорційність між P і Δl зберігається лише до деякої межі. Силу $P_{пц}$, до якої зберігається пряма пропорційність між P і Δl , називають межею пропорційності. Після цього залежність між P і Δl стає криволінійною і не піддається опису єдиним математичним рівнянням. У процесі випробування на розтягування сила P опору матеріалу досягає максимуму P_{max} . В цей час у пластичних металів з'являється місцеве звуження – шийка. Завдяки звуженню в шийці опір P при подальшій деформації падає і зразок руйнується при $P_{руйн} < P_{max}$. У крихких металів шийка не утворюється і руйнування відбувається при $P_{руйн} = P_{max}$.

Дуже часто залежність між P і Δl подають у вигляді діаграми, зображеної на рис. 4.3. Характерна на цій діаграмі - поява горизонтальної ділянки після відхилення від закону Гука. Це свідчить про те, що у матеріалі перестає збільшуватися опір деформації, незважаючи на наростання подовження. Описуючи це явище, застосовують вираз «матеріал тече».

Силу, при якій відбувається подовження зразку без значного змінення сили, називають межею текучості.

Точці початку текучості на діаграмі передують ще дві характерні точки. Одна з них, уже зазначена, відповідає відхиленню від закону Гука, – P_{nc} .

Інша характерна точка на діаграмі визначається силою P_{np} – межа пружності. Обидві сили P_{nc} і P_{np} визначають умовно із зазначенням допуску на їх величину деформації. Для визначення P_{nc} указують умовно прийняту величину відхилення від закону Гука. Для визначення P_{np} указують умовно прийняту величину залишкового подовження, яке виявляється після розвантаження зразка. Практично для металів значення P_{nc} і P_{np} з урахуванням допуску при їх визначенні дуже близькі між собою. На цій підставі їх часто ототожнюють, що є лише спрощенням.

Дуже часто по осях координат відкладають відносну деформацію і напруження:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l_0}{l_0}; \quad \sigma = \frac{P}{F_0},$$

де l_0 – первинна довжина зразка; F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка.

Вигляд діаграми не змінюється, оскільки l_0 і F_0 – сталі величини. На рис. 4.4 представлено діаграми розтягування в координатах $\sigma - \varepsilon$. Ці діаграми прийнято називати умовними діаграмами розтягування.

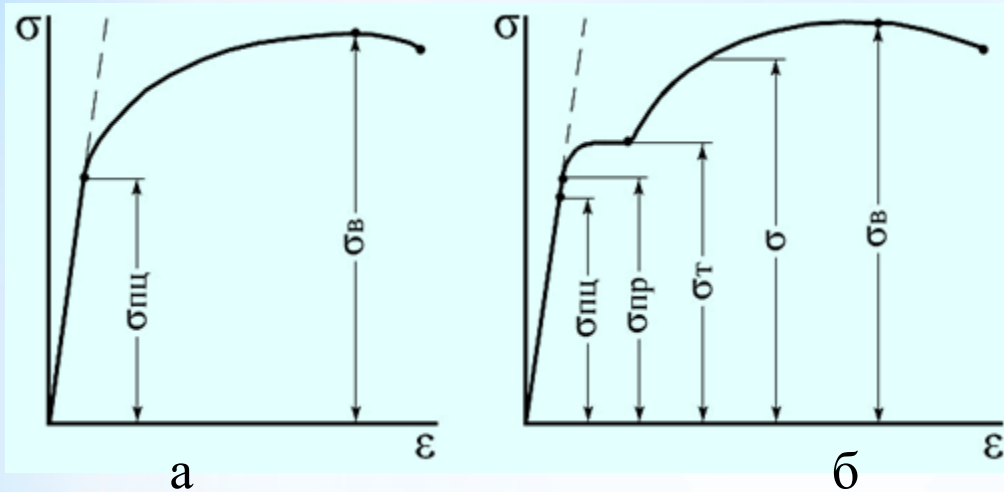


Рис. 4.4 – Умовні діаграми розтягування: а – без полички текучості; б – з поличкою текучості

На умовних діаграмах розтягування, як правило, фіксуються такі характеристики міцності металу: межа пропорційності $\sigma_{пц} = P_{пц} / F_0$, межа пружності $\sigma_{пр} = P_{пр} / F_0$, межа текучості $\sigma_{т} = P_{т} / F_0$, тимчасовий опір $\sigma_{в} = P_{в} / F_0$.

У разі, коли на діаграмі розтягування немає явно вираженої межі текучості, визначають так звану умовну межу текучості. Під умовною межею текучості розуміють напруження, при якому залишкове подовження досягає умовної величини, що задається. Як правило, цей допуск беруть 0,2% від довжини зразка. Умовну межу текучості позначають $\sigma_{0,2}$, де індекс 0,2 означає зазначений допуск на залишкову деформацію. Таке саме позначення беруть і для межі пружності. Наприклад, $\sigma_{0,01}$ – це межа пружності, визначена за допуском на залишкову деформацію 0,01% від довжини зразка.

При визначенні межі пропорційності σ_{nu} необхідно зазначити допуск, при якому одержують цю характеристику. Як допуск беруть відхилення тангенса кута нахилу дотичної до кривої $\sigma - \varepsilon$ від тангенса кута нахилу початкової прямолінійної ділянки діаграми розтягування до осі напруження (рис. 4.5). За ГОСТом це відхилення повинне становити 50% від первинного значення тангенса: $tg\beta' = 1,5tg\beta$.

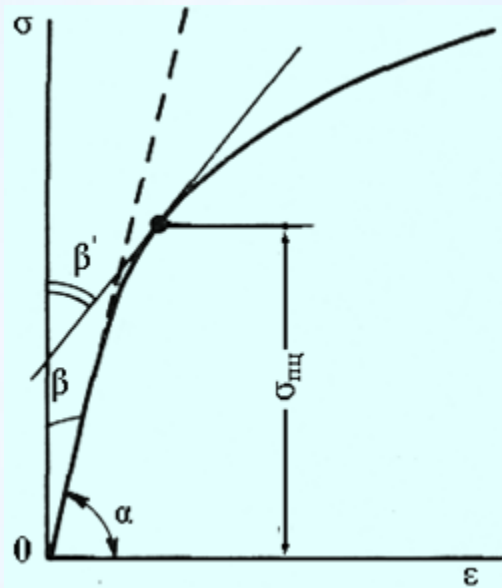
Якщо в стандартах або технічних умовах зазначається інший допуск на відхилення $tg\beta$, то він повинен бути даний у вигляді індексу при позначенні межі пропорційності (наприклад, σ_{nu25} або σ_{nu10}).

Крім характеристик, що оцінюють опір матеріалу деформації, визначають характеристики пружних властивостей при розтягуванні й пластичних властивостей. До характеристик пружних властивостей належать модуль Юнга E і коефіцієнт Пуассона μ . Модуль Юнга E (інакше модуль подовжньої пружності, або модуль пружності I роду) є коефіцієнтом пропорційності між σ і ε в законі Гука: $\sigma = E\varepsilon$.

З діаграми $\sigma - \varepsilon$ (див. рис. 4.5) витікає, що $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = tg\alpha$.

Коефіцієнт Пуассона μ характеризує поперечну деформацію зразка металу при розтягуванні. Так, якщо круглий зразок мав до деформації діаметр d_0 , то після подовження зразка цей розмір скоротиться і дорівнюватиме d'_0 .

Відносне зменшення діаметру буде $\varepsilon' = \frac{d_0 - d_0'}{d_0}$.



У межах області пружних деформацій матеріалу відношення відносної зміни лінійного поперечного розміру до відносного подовжнього ε є характеристикою властивостей металу і називається коефіцієнтом Пуассона:

$$\mu = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

Рис. 4.5 – Визначення межі пропорційності

4.2. Визначення характеристик пластичності

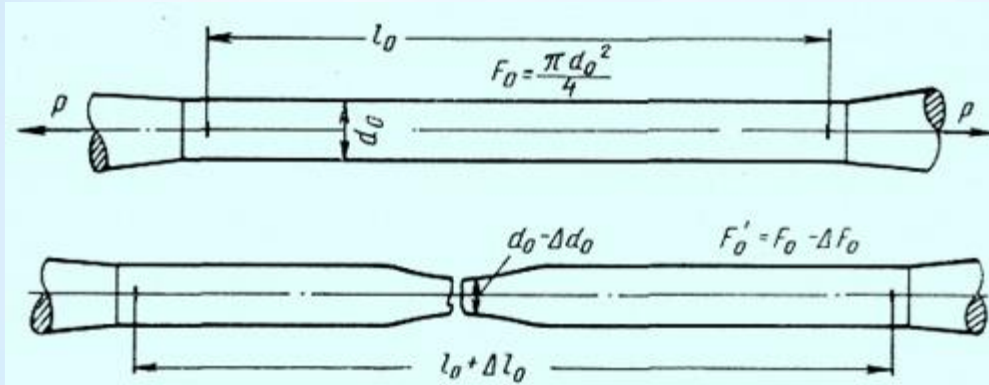
Пластичні властивості металу оцінюються двома характеристиками: подовженням після розриву δ , % і звуженням у шийці ψ , %.

Характеристика ψ не залежить від співвідношення між довжиною зразка і його діаметром:

$$\psi = \frac{\Delta F_0}{F_0} \cdot 100\%$$

Відносне подовження після розриву залежить від такого співвідношення:

$$\delta = \frac{\Delta l_0}{l_0} \cdot 100\%.$$



З рис. 4.6 витікає, що подовження Δl_0 складається з подовження, зосередженого в зоні шийки, $\Delta l_{0\text{зосер}}$, і з подовження, розподіленого рівномірно по решті частини зразка, – $\Delta l_{0\text{рівн}}$.

Рис.4.6 – Визначення характеристик пластичних властивостей

Таким чином, повне подовження $\Delta l_0 = \Delta l_{0\text{рівн}} + \Delta l_{0\text{зосер}}$.

Дослідним шляхом Баушингер встановив, що

$$\Delta l_{0\text{рівн}} = \beta l_0; \quad \text{де } F_0 \text{ – початкова площа перерізу зразка; } \sigma \text{ і } \gamma \text{ – коефіцієнти,}$$

$$l_{0\text{зосер}} = \gamma \sqrt{F_0}, \quad \text{характерні для кожного матеріалу.}$$

Отже,
$$\Delta l_0 = \beta l_0 + \gamma \sqrt{F_0}.$$

Розділивши обидві частини рівняння на l_0 , одержимо відносне подовження після розриву:

$$\frac{\Delta l_0}{l_0} = \delta = \beta + \gamma \frac{\sqrt{F_0}}{l_0}.$$

З рівняння виходить, що характеристика пластичності δ залежить від співвідношення: $\sqrt{F_0} : l_0$.

Якщо взяти два зразки одного й того ж самого матеріалу, але різних розмірів і витримати умову:

$\frac{\sqrt{F_0^I}}{l_0^I} = \frac{\sqrt{F_0^{II}}}{l_0^{II}}$, то значення δ , одержані після розриву цих зразків, будуть однаковими, оскільки β і γ є сталими для даного матеріалу:

$$\delta_I = \beta + \gamma \frac{\sqrt{F_0^I}}{l_0^I} = \beta + \gamma \frac{\sqrt{F_0^{II}}}{l_0^{II}} = \delta_{II}.$$

У цьому виявляється закон подібності, сформульований Барбою і Киком. Цими авторами дослідним шляхом встановлено, ***що тільки в геометрично подібних зразках з одного матеріалу при одних і тих самих напруженнях виходять геометрично подібні абсолютні деформації.*** Справедливий і протилежний висновок: ***тільки при геометричній подібності деформацій напруження, що їх викликають, однакові.***

Із цього випливає, що результати випробувань на розтягування, виконані в різних лабораторіях, братимуться для зіставлення, якщо умови випробувань були однаковими, тобто одержані на геометрично подібних зразках ($l = 10 d$; $l = 5 d$; $l = 2,5 d$).

Решта характеристик механічних властивостей ($\sigma_{m\psi}$; σ_m або $\sigma_{0,2}$, σ_e і ψ) не залежить від співвідношення розмірів зразка. Проте досвід показує, що навіть геометрично подібні зразки (які дуже різняться за своїми розмірами) дають помітну відмінність у характеристиках механічних властивостей, визначуваних за результатами випробування на розтягування.

У табл. 4.1 наведені результати випробування зразків зі сталі марки Ст.3 на розтягування. Малий зразок мав діаметр $d = 10$ мм і розрахункову довжину $l = 100$ мм, а великий $d = 100$ мм і довжину $l = 1000$ мм.

Табл. 4.1 – Характеристики механічних властивостей сталі у малих і великих зразках

Зразок	σ_e	σ_m	δ	ψ
	МПа (кг/мм ²)	МПа (кг/мм ²)	%	
Малий	420 (43)	284 (29)	35	61
Великий	470 (48)	230 (24)	24	32

Порівняння характеристик механічних властивостей показує, що на результати випробування впливають абсолютні розміри зразків. Це явище відоме під назвою масштабного ефекту.

За невеликої різниці розмірів зразків, наприклад, від 5 до 25 мм, масштабний ефект при випробуванні на розтягування мало помітний.

З розгляду механізму різної текучості виходить, що величина фізичної межі текучості визначається тими самими основними факторами, що й значення умовної межі текучості: опором переміщенню дислокацій, розміром зерен і легкістю передачі деформації через їх межі.

Залежність межі текучості від розміру зерна є найважливішою в теорії межі текучості полікристалів. Межі зерен служать ефективним бар'єром для рухомих дислокацій. Чим дрібніше зерно, тим частіше трапляються ці бар'єри на шляху ковзаючих дислокацій, і великі напруження потрібні для продовження пластичної деформації вже на початкових її стадіях. У результаті подрібнення зерна межа текучості зростає. Численні експерименти показали, що нижня межа текучості

$$\sigma_m^H = \sigma_i + K_y \cdot d^{-1/2},$$

де σ_i і K_y – константи матеріалу при певній температурі випробування і швидкості деформації; d – розмір зерна.

Це рівняння Петча-Холу добре описує вплив розміру зерна на будь-яке напруження течії в області рівномірної деформації.

Константа σ_i розглядається як напруження, необхідне для переміщення дислокацій усередині зерна, а доданок $K_y \cdot d^{1/2}$ – як напруження, потрібне для приведення в дію джерел дислокацій у сусідніх зернах.

4.3. Визначення напруження і деформації при розтягуванні

Діаграма розтягування, побудована в координатах $\sigma - \varepsilon$ (рис. 4.7), названа умовною діаграмою, оскільки при визначенні напруження і подовження зусилля та абсолютну деформацію відносили відповідно до початкової площі поперечного перерізу зразка F_0 і до початкової розрахункової довжини зразка l_0 .

$$\sigma = \frac{P}{F_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Фактично переріз і розрахункова довжина зразка під час випробування безперервно змінюються.

Якщо відносити зусилля та абсолютне подовження в кожен момент випробування відповідно до істинної площі перерізу і до довжини зразка у цей момент, то діаграма залежності істинних напружень від істинних деформацій набере іншої форми порівняно з умовною діаграмою розтягування.

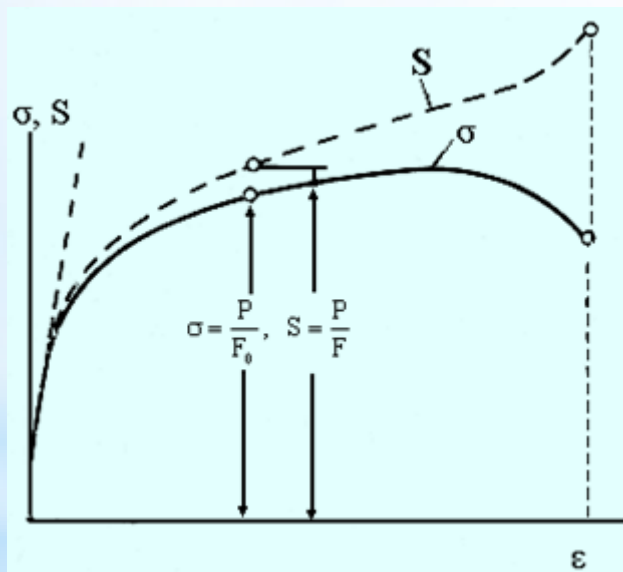


Рис. 4.7 – Діаграма умовних та істинних напружень залежно від умовного подовження

Істинні напруження будуть більші за умовні, оскільки істинна площа перерізу $F < F_0$ (рис. 4.8). Умовне відносне подовження визначають за виразом
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}.$$

Це справедливо доти, поки подовження розподіляється рівномірно по всій розрахунковій довжині зразка. Коли у зразка з'являється шийка, то деформація зосереджується у районі шийки.

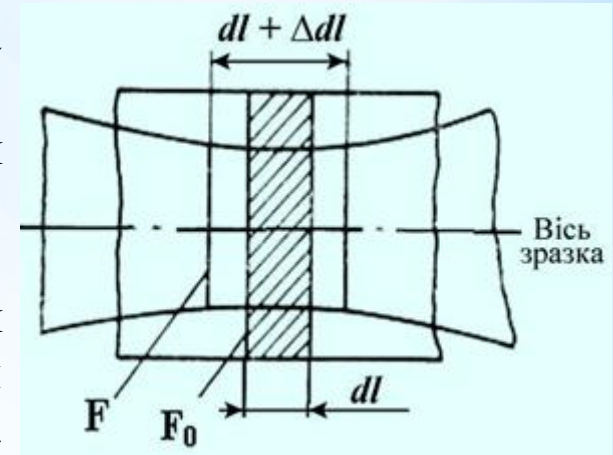


Рис. 4.8 – Зміна форми елемента зразка

Певний інтерес становить визначення відносного подовження у районі шийки, яке, очевидно, буде більше, ніж у решті частини зразка. Цю задачу розв'язують, виходячи з допущення, що об'єм матеріалу, що бере участь у деформації, залишається сталим, а змінюється тільки його форма, тобто приймається умова сталості об'єму.

На рис. 4.8 зображена шийка зразка в процесі її розвитку. Якщо узяти нескінченно малий елемент зразка завдовжки dl , то після деформації довжина цього елемента збільшиться на Δdl , а початковий переріз F_0 зменшиться на ΔF_0 .

Об'єм елемента зразка буде

$$dW = F_0 dl,$$

а після деформації

$$dW = (F_0 - \Delta F_0) (dl + \Delta dl).$$

З умови сталості об'єму

$$F_0 dl = (F_0 - \Delta F_0) (dl + \Delta dl).$$

Розділивши ліву і праву частини рівняння на $F_0 dl$, одержимо

$$1 = (1 - \psi)(1 + \lambda);$$

$$\lambda = \frac{\Delta dl}{dl},$$

де λ – відносне подовження нескінченно малого елемента зразка.

Розв'язуючи рівняння відносно λ , одержимо

$$\lambda = \frac{\psi}{1 - \psi}.$$

4.4. Графічні способи визначення характеристик міцності

На практиці найбільший інтерес становить методика визначення окремих механічних властивостей при розтягуванні: межа пропорційності, межа текучості й межа міцності, тобто технічне руйнування. Ці властивості можуть бути розділені на дві основні групи – міцнісні й пластичні.

Властивості міцності – це характеристики опору матеріалу зразка деформації або руйнуванню. Більшість стандартних характеристик міцності розраховують за положенням певних точок на діаграмі розтягування, у вигляді умовних розтягувальних напружень. У попередньому параграфі аналізувалися діаграми в координатах *істинне напруження – істинна деформація*, які найточніше характеризують деформаційне зміцнення. На практиці механічні властивості, як правило, визначають за первинними кривими розтягування в координатах *навантаження – абсолютне подовження*, які автоматично записуються на діаграмній стрічці випробувальної машини. Для полікристалів різних металів і сплавів усю різноманітність цих кривих можна звести в першому наближенні до трьох типів (рис. 4.9).

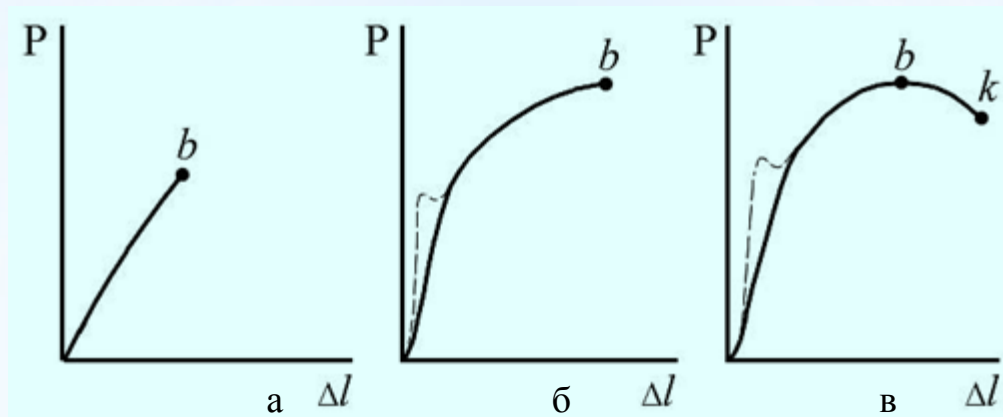


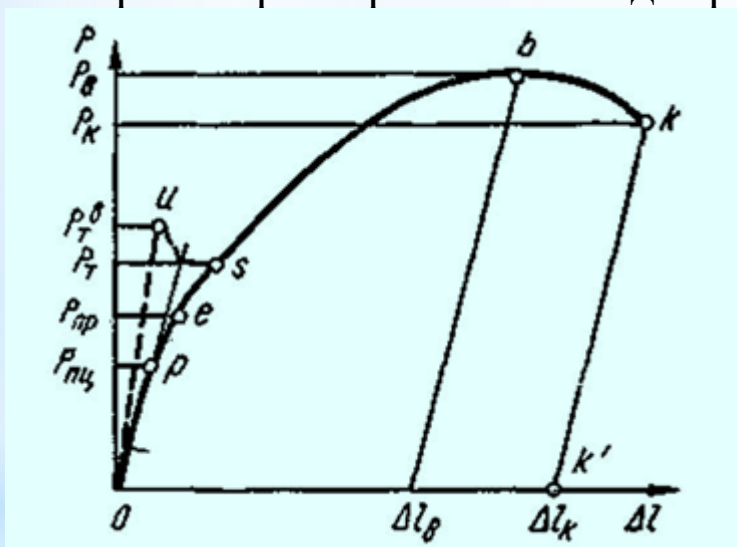
Рис. 4.9 – Різновиди первинних діаграм розтягування: а – крихке руйнування; б – руйнування після рівномірної деформації; в – руйнування після утворення шийки

Діаграма I типу характерна для зразків, що руйнуються крихко, без помітної пластичної деформації. Діаграма II типу виходить при розтягуванні зразків, що рівномірно деформуються аж до руйнування. Нарешті, діаграма III типу характерна для зразків, що руйнуються після утворення шийки в результаті зосередженої деформації. Така діаграма може вийти і без утворення шийки в зразку – при високотемпературному розтягуванні; ділянка bk тут може бути сильно розтягнута і майже паралельна осі деформації. Зростання навантаження до моменту руйнування (рис. 4.9 б) або до максимуму (див. рис. 4.9 в) може бути або плавним (суцільні лінії), або переривчастим. В останньому випадку на діаграмі можуть, зокрема, з'явитися «зуб» і поличка текучості (пунктир на рис. 4.9 б, в).

Залежно від типу діаграми змінюється набір характеристик, які за нею можна розрахувати, а також їх фізичне значення. На рис. 4.10 (діаграма III типу) нанесені характерні точки, за ординатами яких розраховують характеристики міцності $\left(\sigma_i = \frac{P_i}{F_0} \right)$.

Межа пропорційності

Перша характерна точка на діаграмі розтягування – точка P (рис. 4.10).



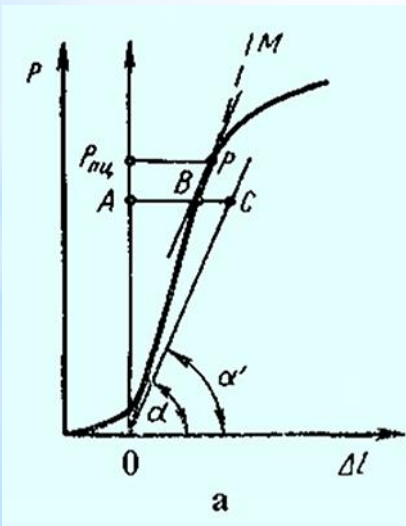
Зусилля P_{nc} визначає величину *межі пропорційності* – напруження, яке матеріал зразка витримує без відхилення від закону Гука. Приблизно величину P_{nc} можна визначити за точкою, де починається розбіжність кривої розтягування і продовження прямолінійної ділянки.

Рис. 4.10 – Характерні точки на діаграмі розтягування

Для того щоб уніфікувати методику і підвищити точність розрахунку межі пропорційності, його оцінюють як умовне напруження (σ_{nc}), при якому відступ від лінійної залежності між навантаженням і подовженням досягає певної величини.

Як правило, допуск при визначенні $\sigma_{нц}$ задають за зменшенням тангенса кута нахилу, утвореного дотичною і кривою розтягування в точці P з віссю деформацій, порівняно з тангенсом на початковій пружній ділянці. Стандартна величина допуску 50%, можливе також використання 10 і 25% іншого допуску. Його величина має вказуватися у позначенні межі пропорційності – $\sigma_{нц50}$, $\sigma_{нц25}$, $\sigma_{нц10}$.

При достатньо великому масштабі первинної діаграми величину межі пропорційності можна визначити графічно прямо на цій діаграмі (рис. 4.11). У першу чергу продовжують прямолінійну ділянку до перетину з віссю деформацій у точці O , яку й беруть за новий початок координат, виключаючи таким чином спотворену через недостатню жорсткість машини початкову ділянку діаграми. Далі можна користуватися двома способами.



За першим із них на довільній висоті в межах пружної області відкладають перпендикуляр до осі навантажень AB (рис. 4.11 а), відкладають уздовж нього відрізок $BC=1/2 AB$ і проводять лінію OC . При цьому $\text{tg}\alpha' = \text{tg}\alpha / 1,5$. Якщо тепер провести дотичну до кривої розтягування паралельно OC , то точка дотику P визначить шукане навантаження $P_{нц}$.

Рис. 4.11 – Графічні способи визначення межі пропорційності

За другим способом з довільної точки прямолінійної ділянки діаграми опускають перпендикуляр KO (рис. 4.11 б) на вісь абсцис і ділять його на три рівні частини. Через точку C і початок координат проводять пряму, а паралельно їй – дотичну до кривої розтягування. Точка дотику P (рис. 4.11 б) відповідає зусиллю $P_{пц}$ ($\operatorname{tg}\alpha' = \operatorname{tg}\alpha / 1,5$).

Точніше, визначення межі пропорційності можливе при використанні спеціальних приладів – тензометрів – для вимірювання малих деформацій.

Межа пружності

Наступна характерна точка на первинній діаграмі розтягування (рис. 4.10) – точка e . Їй відповідає навантаження, за яким розраховують умовну межу пружності – напруження, при якому залишкове подовження досягає заданої величини, як правило, 0,05 %, іноді менше – аж до 0,005%. Використаний при розрахунку допуск указується в позначенні умовної межі пружності: $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,01}$ і т. д.

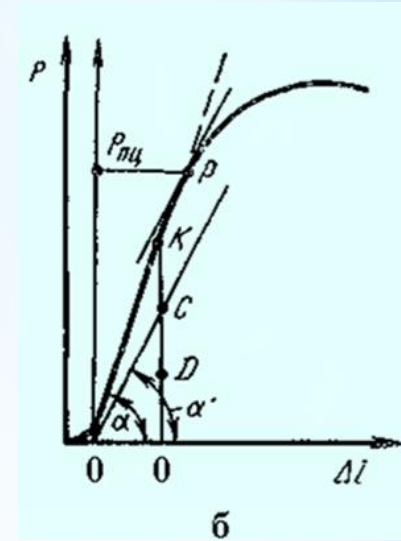


Рис. 4.11 – Графічні способи визначення межі пропорційності

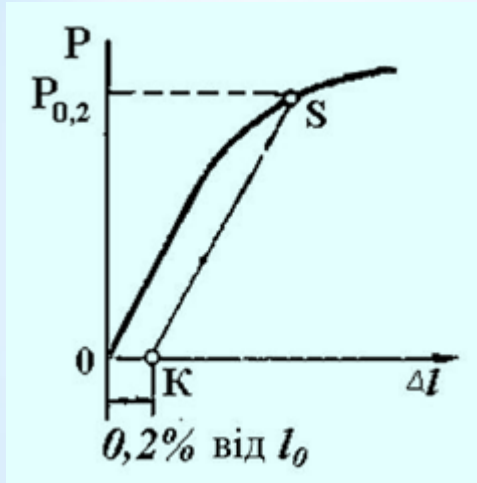
Таким чином, межа пружності характеризує напруження, при якому з'являються перші ознаки макропластичної деформації. У зв'язку з малим допуском по залишковому подовженню навіть $\sigma_{0,05}$ важко з достатньою точністю визначити за первинною діаграмою розтягування. Тому в тих випадках, коли високої точності не вимагається, межу пружності беруть такою, що дорівнює межі пропорційності. Якщо ж необхідна точна кількісна оцінка $\sigma_{0,05}$, то використовують тензometri.

Межа текучості

За відсутності на діаграмі розтягування зуба і полички текучості визначає умовну межу текучості – напруження, при якому залишкове подовження досягає заданої величини, як правило, 0,2%, іноді 0,1 або 0,3% і більше. Відповідно умовна межа текучості позначається $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,1}$ або $\sigma_{0,3}$. Як бачимо, ця характеристика відрізняється від умовної межі пружності тільки величиною допуску. Межа текучості характеризує напруження, при якому відбувається перехід до пластичної деформації.

Найточніша оцінка величини ($\sigma_{0,2}$) може бути виконана при використанні тензометрів. Методика тут повністю аналогічна тій, яка застосовується при визначенні $\sigma_{0,05}$. Оскільки допуск за подовженням для розрахунку умовної межі текучості відносно великий, його часто визначають графічно за діаграмою розтягування, якщо остання записана в достатньо великому масштабі (не менше 10:1 по осі деформацій).

Для цього по осі подовжень від початку координат відкладають відрізок і $OK = 0,2 \frac{l_0}{100}$ через точку K проводять пряму, паралельну прямолінійній ділянці діаграми (рис. 4.12).



Ордината точки S відповідатиме величині навантаження $P_{0,2}$, що визначає умовну межу текучості:

$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0}.$$

Умовні межі пропорційності, пружності й текучості характеризують опір матеріалу малим деформаціям. Величина їх дещо відрізняється від істинних напружень, що відповідають

Рис. 4.12 – Визначення умовної відповідним допускам із деформації.
межі текучості

Технічне значення цих меж зводиться до того, щоб оцінити ті рівні напружень, під дією яких та чи інша деталь може працювати, зовсім не піддаючись залишковій деформації (межа пропорційності) або деформуючись на якусь невелику величину, що допускається, визначену умовами експлуатації ($\sigma_{0,01}$, $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$ і т. д.). Враховуючи, що залишкова зміна розмірів деталей і конструкцій лімітується, стає зрозуміло, що є необхідність точного знання меж пропорційності, пружності й текучості, які широко використовуються в конструкторських розрахунках.

Фізичне значення межі пропорційності будь-якого матеріалу настільки очевидне, що не потребує спеціального обговорення. Дійсно, $\sigma_{\text{пц}}$ для моно- і полікристала, гомогенного металу і гетерофазного сплаву – це завжди максимальне напруження, при якому під час розтягування виконується закон Гука і макропластична деформація не спостерігається. Потрібно, однак, пам'ятати, що до досягнення $\sigma_{\text{пц}}$ в окремих зернах полікристалічного зразка може початися пластична деформація, яка, не приведе до подовження всього зразка, поки деформацією не виявиться охопленим більшість зерен. Самим початковим стадіям цього макроподовження зразка відповідає межа пружності.

Природа умовної межі текучості полікристала загалом аналогічна природі межі пружності. Однак межа текучості є найпоширенішою і важливішою характеристикою опору матеріалів малої пластичної деформації. Тому фізичне значення межі текучості і його залежність від різних чинників необхідно проаналізувати докладніше.

Плавний перехід від пружної до пластичної деформації спостерігається при розтягуванні металів і сплавів, у яких є достатньо велика кількість рухомих, незакріплених дислокацій; у вихідному стані (до початку випробування). Напруження, необхідне для початку пластичної деформації полікристалів цих матеріалів, оцінюване через умовну межу текучості, визначається силами опору руху дислокацій усередині зерен, легкістю передачі деформації через їх межі й розміром зерен.

Ці самі фактори визначають і величину *фізичної межі текучості* σ_T – *напруження, при якому зразок деформується під дією практично незмінного розтягувального навантаження* P_T (поличка текучості на пунктирній кривій – рис. 4.10). Фізичну межу текучості часто називають *нижньою* на відміну від *верхньої* межі текучості, що розраховується за навантаженням, що відповідає вершині зуба текучості u на рис. 4.10:

$$\sigma_T^B = \frac{P_T^B}{F_0}$$

Процес утворення зуба і полички текучості (так зване явище різкої текучості) зовні виглядає таким чином. Пружне розтягування призводить до плавного підйому опору деформування аж до верхньої межі текучості, потім відбувається відносно різкий спад напружень до нижньої межі і подальша деформація (як правило, на 0,1–1%) йде при незмінному зовнішньому зусиллі – утворюється поличка текучості. Під час подовження, відповідного цій поличці, зразок на робочій довжині покривається характерними смугами Чернова-Людерса, в яких локалізується деформація. Тому величину подовження на поличці текучості (0,1–1%) часто називають деформацією Чернова-Людерса.

Явище різкої текучості спостерігається у багатьох технічно важливих матеріалів і тому має велике практичне значення. Воно становить також загальний теоретичний інтерес із погляду розуміння природи початкових стадій пластичної деформації металевих матеріалів.

5. ПРУЖНІ ВЛАСТИВОСТІ Й НЕПОВНА ПРУЖНІСТЬ МЕТАЛІВ

5.1. Константи пружних властивостей

Поведінка матеріалів при пружній деформації описується відомим законом Гука, який визначає пряму пропорційність між напруженням і пружною деформацією.

На рис. 5.1 показані початкові (пружні) ділянки кривих *напруження – деформація* при одновісному розтягуванні, крученні (зсуві) і гідростатичному стискуванні. Нахил кожної з цих трьох кривих, тобто коефіцієнт пропорційності, що зв'язує напруження і деформацію, характеризує модуль пружності:

$$E = S/e; G = t/g; K = P/\alpha.$$

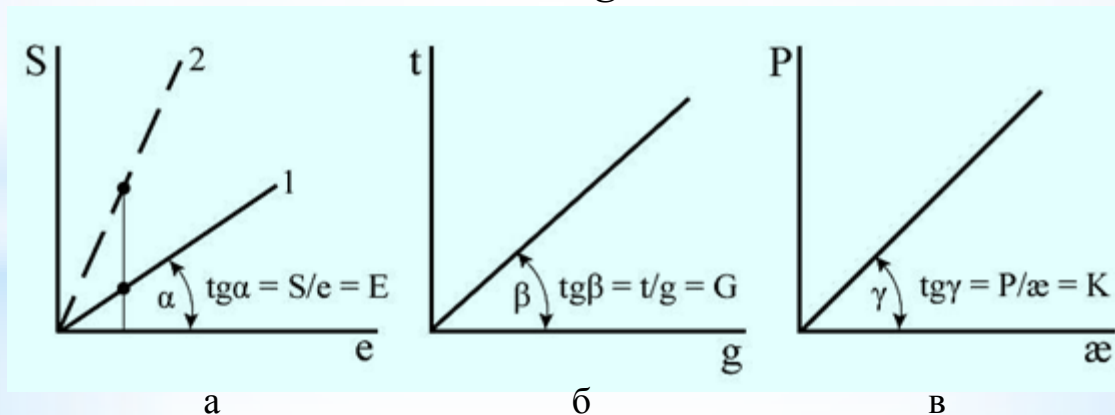


Рис.5.1 – Пружні ділянки кривих напруження – деформація при розтягуванні (а), крученні (б) і гідростатичному стискуванні (в)

Механізм пружної деформації матеріалів полягає в оборотних зміщеннях атомів з положень рівноваги в кристалічних ґратках. Чим більша величина зміщення кожного атома, тим більша пружна макродеформація всього зразка. Величина цієї пружної деформації в металах не може бути великою (відносне подовження в пружній області, як правило, менше 1%), оскільки атоми в кристалічних ґратках здатні пружно зміщуватися лише на невелику частку міжатомної відстані. Фізичне значення модулів пружності якраз і полягає у тому, що вони характеризують опір матеріалів пружній деформації, тобто зміщення атомів з положень рівноваги в ґратках. Якщо порівнювати два матеріали, наприклад, з різними E (рис. 5.1 а, прямі 1 і 2), то для однакового зміщення атомів (рівної пружної деформації) при більшому E потрібне більше навантаження (пряма 2).

Вирази характеризують взаємозв'язок між напруженнями і деформаціями в одному і тому самому напрямі. Проте при складних схемах напруженого стану деформація може не збігатися за напрямом із напруженням. Тоді описаний закон Гука повинен бути замінений узагальненим, який встановлює лінійний зв'язок між напруженнями і деформаціями у будь-яких напрямках, тобто між компонентами тензора напружень і тензора деформацій.

Для ізотропного тіла він має вигляд:

$$e_x = \frac{1}{E} [S_x - \nu(S_y + S_z)], \quad e_y = \frac{1}{E} [S_y - \nu(S_x + S_z)], \quad e_z = \frac{1}{E} [S_z - \nu(S_x + S_y)].$$

$$g_{xy} = \frac{t_{xy}}{G}, \quad g_{xz} = \frac{t_{xz}}{G}, \quad g_{yz} = \frac{t_{yz}}{G}.$$

Тут ν – коефіцієнт Пуассона.

Якщо початковий радіус зразка r_0 , а довжина l_0 , то після деякої деформації вони зміняться відповідно до $r_1 < r_0$ і $l_1 > l_0$. Тоді

$$\nu = \frac{(r_1 - r_0)/r}{(l_1 - l_0)/l_0} = \frac{\Delta r / r_0}{\Delta l / l_0}. \quad \text{Звідси} \quad e_y = e_z = -\nu e_x.$$

Коефіцієнт Пуассона ν – четверта найважливіша константа пружних властивостей після модулів пружності. Ці чотири константи зв'язані між собою:

$$E = 2G(1 + \nu);$$

$$E = 3K(1 - 2\nu).$$

Узагальнений закон Гука записується відносно просто для ізотропного тіла. Проте метали мають кристалічну структуру і є тілами анізотропними. Зокрема, їх пружні властивості в різних кристалографічних напрямках неоднакові. Це легко зрозуміти, якщо врахувати хоча б різну відстань між сусідніми атомами в різних кристалографічних напрямках. Чим менша ця відстань, тим більший у даному напрямі повинен бути модуль пружності.

Анізотропія пружних властивостей експериментально просто виявляється під час дослідження монокристалів. Наприклад, модуль нормальної пружності монокристалів міді може коливатися залежно від напрямку їх деформації від 68000 до 196000 МПа. Для полікристалічних зразків, що складаються з великого числа різно орієнтованих зерен, визначувані середньостатистичні значення пружних констант приблизно сталі й не залежать від напрямку (у міді, наприклад, $E = 121000$ МПа).

Для анізотропного тіла узагальнений закон Гука істотно ускладнюється: він відображає пряму пропорційність між кожним компонентом тензора деформацій і всіма шістьма незалежними компонентами тензора напружень.

Модулі пружності є найважливішими характеристиками міцності міжатомного зв'язку. Їх величина залежить від усіх факторів, що визначають сили міжатомної взаємодії. З підвищенням температури модулі пружності знижуються, але залежність ця, як правило, відносно слабка.

5.2. Фактори, що впливають на пружні властивості

Модуль пружності E є мірою жорсткості. Оскільки сила пов'язана з напруженням, а зміна відстані з деформацією, то модуль пружності матеріалу може бути знайдений за нахилом кривої, що виражає залежність діючої сили від відстані. Значення модуля пружності безпосередньо пов'язані з енергією міжатомних зв'язків, і різні матеріали мають модулі пружності, що різко різняться (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Зв'язок середнього модуля пружності (E) з температурою плавлення (T_s) матеріалу

Матеріал	$E, 10^3$ МПа	$T_s, ^\circ\text{C}$
Карбід титану	315	3140
Вольфрам	400	2996
Карбід кремнію	355	2800
Периклаз (MgO)	246	2800
Корунд (Al_2O_3)	372	2050
Залізо (Fe)	211	1539
Мідь	112	1083
Кам'яна сіль	36	801
Алюміній (Al)	70	660
Магній (Mg)	41	650
Свинець (Pb)	15	327

При підвищенні температури модулі пружності, як правило, зменшуються (рис. 5.2) у зв'язку з тим, що теплова енергія сприяє подоланню міжатомних сил.

В основному всі кристали анізотропні й їх пружні константи залежать від орієнтування. Прикладом можуть служити монокристали металів (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Анізотропія модуля Юнга

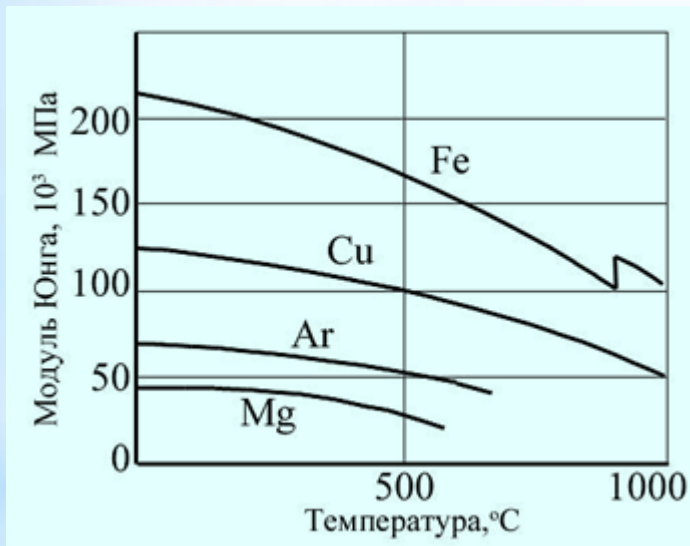


Рис. 5.2 – Залежність модуля Юнга від температури

Метал	Модуль Юнга E , 10^3 МПа		
	максимальний по напрямку [111]	мінімальний по напрямку [100]	при хаотичному орієнтуванні монокристалів
Свинець Pb	28	7	14
Алюміній Al	77	63	70
Золото Au	112	42	84
Мідь Cu	196	70	112
Залізо (о. ц. к.) Fe	287	133	210
Вольфрам W	400	400	400

Зміна напрямку діючого одиничного напруження (рис. 5.3) приведе до зміни деформації, тому що змінюється величина міжатомної відстані.

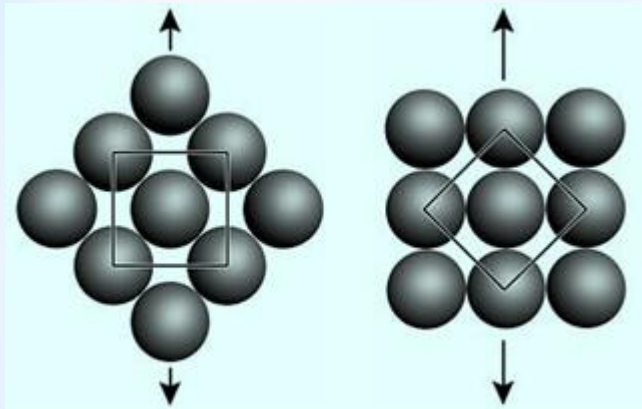


Рис. 5.3 – Залежність напруження від орієнтування кристала

Анізотропія пружних властивостей важлива у двох відношеннях.

По-перше, при використанні матеріалу з переважним орієнтуванням, наприклад листової міді, одержаної холодним прокатуванням, стають неправильними середні значення модуля Юнга з табл. 5.2. Ця обставина може мати істотне значення.

Наприклад, у холодно-тягнутого сталевого дроту з переважним орієнтуванням у подовжньому напрямі модуль Юнга досягає 246000 МПа, тоді як у ізотропної сталі він дорівнює всього 210000 МПа. Проте наведені в табл. 5.2 середні значення модуля Юнга широко використовуються при інженерних розрахунках, тому що більшість полікристалічних матеріалів має практично нерегульоване орієнтування зерен.

По-друге, анізотропія інших властивостей може привести до наслідків, зображених на рис. 5.4. Відповідно до їх орієнтування суміжні зерна міді можуть мати модуль Юнга від 196000 МПа в одному напрямі до 70000 МПа у другому напрямі. У такому разі, якщо середнє напруження в поперечному перерізі дроту 224 МПа, то в першому наближенні всі зерна в полікристалічному матеріалі деформуються однаково (а). Насправді при строгішому розгляді виявляється, що унаслідок анізотропії модуля пружності напруження в зернах різні (б).

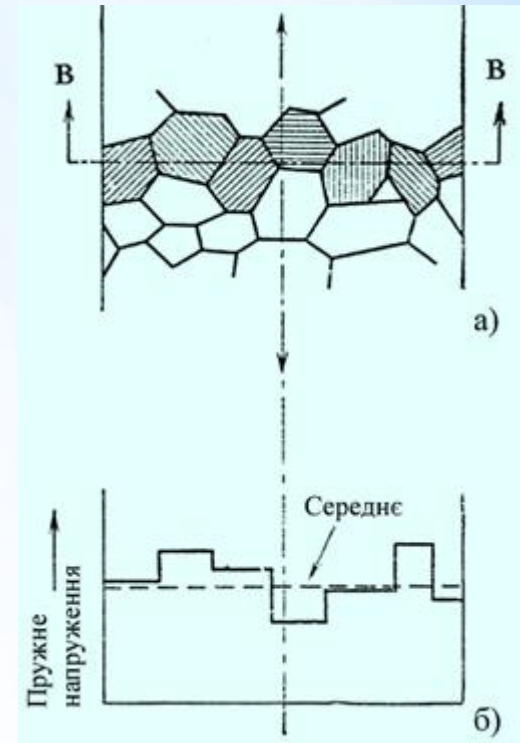


Рис. 5.4 – Схема нерівномірності напружень

У деяких зернах напруження досягає 390 МПа, тоді як в інших воно дорівнюватиме лише 140 МПа. Цей простий розрахунок показує джерело нерівномірності напруження у матеріалі. Інші джерела такої нерівномірності пов'язані з анізотропією теплового розширення або локальними фазовими перетвореннями.

5.3. Непружність і внутрішнє тертя

В області пружної деформації, де діє закон Гука, у металів і сплавів спостерігається ряд відхилень від чисто пружної поведінки. Одним із відомих проявів неповної пружності металів є ефект Баушингера. Він полягає у тому, що при повторному навантаженні пластично слабодетформованого зразка у зворотному напрямі його опір малим пластичним деформаціям знижується. Припустимо, ми розтягнули зразок на 1–2% (до точки α на рис. 5.5).



Рис. 5.5 – Схема ефекту Баушингера

Тепер знімемо навантаження і піддаватимемо його стисканню. Крива напруження – деформація ($o'e$) лежатиме нижче відповідної кривої, яку ми одержали б при повторному розтягуванні. Якщо точка b відповідає тут початку пластичної деформації, то відрізок bc – δ_B становить так звану баушингерівську деформацію, яка є однією з основних кількісних характеристик ефекту Баушингера.

Процес, що визначає цей ефект, полягає у зворотному русі дислокацій, породжених різними джерелами при первинному розтягуванні. На початкових стадіях деформації число петель генерувальних дислокацій, що поступово зростає, рухається відносно легко і на значні відстані аж до зупинки біля яких-небудь бар'єрів. Виникла структура дислокації достатньо стабільна і мало змінюється внаслідок розвантаження. Тому при повторному розтягуванні опір деформації або дещо зростає, або практично не змінюється в порівнянні з первинним. При зміні ж знака напруження дислокації вимушені рухатися назад у напрямку до джерел. У результаті переміщення дислокацій з'являється додаткова баушингерівська деформація.

Після значної попередньої пластичної деформації перерозподіл дислокацій при зворотному навантаженні ускладнюється і баушингерівська деформація наближається до нуля.

Особливо велике практичне значення має ефект Баушингера під час експлуатації і випробувань в умовах циклічного навантаження.

До важливих проявів неповної пружності металів належить пружна післядія. Вона свідчить про те, що не вся зворотна деформація металу є чисто пружною. Візьмемо зразок і створимо в ньому напруження в межах пружної ділянки кривої напруження - деформація.

Після розвантаження такий зразок матиме ті самі розміри, що й до навантаження. Простежимо, як змінюватиметься його подовження в часі під дією прикладеного напруження і після розвантаження. Відповідна діаграма наведена на рис. 5.6.

Виявляється, що зразок деформується чисто пружно, тобто зі швидкістю, близькою до швидкості звуку, лише на величину ОС, а потім подовжується набагато повільніше, згідно із законом, близьким до параболічного. Після розвантаження в точці К відбувається дуже швидке зняття чисто пружної деформації ($КМ \approx ОС$), а потім – відносно повільне – решти деформації.

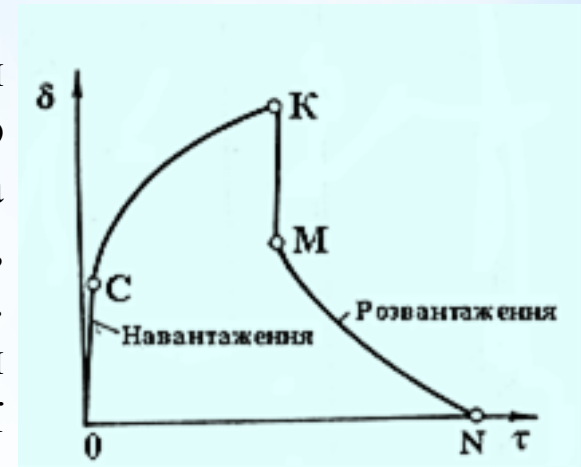
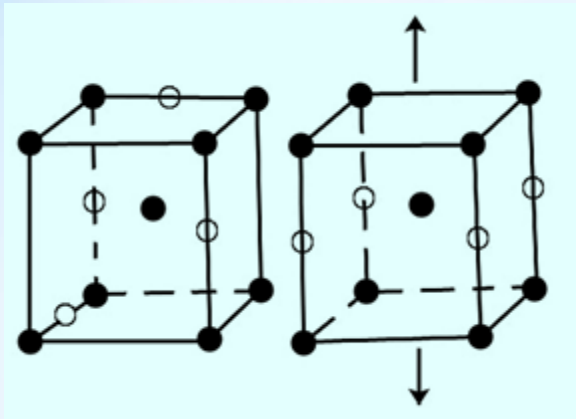


Рис. 5.6 – Схема пружного результату післядії

Врешті $\delta = 0$ (у точці N), зразок має вихідні розміри, однак зрозуміло, що далеко не вся зворотна деформація є чисто пружною.

Механізм пружної післядії може бути пов'язаний з переміщенням точкових дефектів. До навантаження атоми розміщуються у міжвузловинах, наприклад на середині ребер кубічних ґраток, рівномірно (рис. 5.7 а).



а б
Рис. 5.7 – Перерозподіл домішкових атомів під до навантаження (а) і після навантаження (б)

Під навантаженням відбувається поступовий перерозподіл домішкових атомів – вони прагнуть зайняти міжвузловини на ребрах уздовж осі навантаження (рис. 5.7 б), де вони викликають найменші спотворення ґраток. У результаті ґратки і весь зразок залишково подовжуються уздовж напрямку дії навантаження. Причому відбувається це не миттєво. Оскільки перехід домішкових атомів у нове положення вимагає дифузійних перескоків, він триває достатньо довгий час.

Після розвантаження відбувається зворотний перерозподіл домішкових атомів, і зразок набирає вихідних розмірів (ділянка MN, рис. 5.6).

Швидкість пружної післядії, а також його величина залежать від структури матеріалу та умов його випробування. Збільшення гетерогенності структури, неоднорідність пластичної деформації, полегшення її під впливом різних факторів підсилюють ефект пружної післядії. Наприклад, підвищення температури різко збільшує швидкість післядії (у цинку – на 50% при підвищенні температури на 15 °С).

Таким чином, у металах ще до початку макропластичної деформації, на пружній ділянці кривої напруження - деформація можливі непружні явища, такі як рух дислокацій, точкових дефектів, переміщення атомів у області меж зерен і т. д. Ці явища, що супроводжуються місцевими пластичними деформаціями, спостерігаються при дуже низьких напруженнях і мають важливе практичне значення.

Непружні ефекти є причинами внутрішнього тертя, що характеризує необоротні втрати енергії всередині металу. Лінії діаграми напруження - деформація при навантаженні й розвантаженні через неповну пружність металів не збігаються (рис. 5.8), а утворюють петлю гістерезису. Її площа і характеризує енергію, розсіяну за один цикл навантаження.

Знання величини внутрішнього тертя необхідне для вибору матеріалу, що працює в певних умовах. Наприклад, матеріали для різного роду амортизацій, здатні швидко гасити коливання, повинні володіти високим внутрішнім тертям. Навпаки, багато деталей вимірювальних приладів не мають розсіювати пружну енергію.

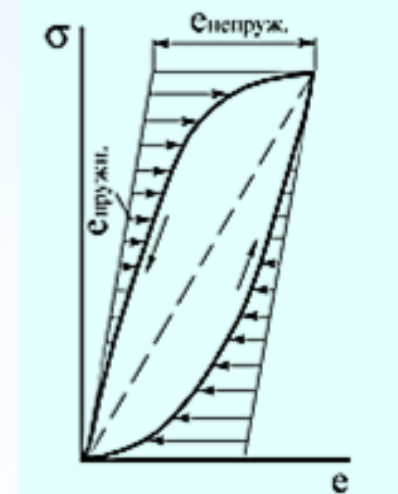


Рис. 5.8 – Утворення петлі гістерезису внаслідок непружних явищ

6. РУЙНУВАННЯ

6.1. Основні поняття

При урахуванні структурної неоднорідності матеріалу субмікро-, мікро- або макроруйнування може розглядатися як порушення суцільності, співрозмірне з прийнятим масштабом структурної неоднорідності. У механіці суцільних середовищ тверді тіла розглядаються як суцільні, як правило, квазіоднорідні й, відповідно, руйнування визначають як порушення суцільності тіла. Повне руйнування твердих тіл, як правило, визначають як розділення тіла на частини під впливом механічних навантажень або напружень, іноді в різних поєднаннях із термічними, корозійними або іншими діями.

Необхідно розрізняти міцність і опір руйнуванню. Визначення міцності, як опору розриву, є неповним, оскільки може належати і до опору пружної та непружної деформації, і до опору руйнуванню. Другий термін стосується тільки руйнування і тому є більш частковим. Руйнування є набагато локальнішим і тому більш структурно чутливішим процесом. Це обумовлено тим, що розвиток тріщини визначається явищами спереду і поблизу її вершини, тобто в об'ємах, які дуже малі.

Процес руйнування, як правило, визначає поведінку твердих тіл при достатніх напруженнях і часом їх дії і може викликатися, крім механічних, термічними, електротермічними, фізико-хімічними та іншими напруженнями. Руйнування є завершальною стадією деформації, що розвивається.

Класифікація руйнування проводиться за найрізноманітнішими ознаками. Найбільш поширені - відповідно до характеру силової дії: статичне короткочасне, тривале, повторне; втомне, ударне; відповідно до орієнтування макроповерхні руйнування відриву або зрізу; за величиною пластичної деформації, що передує руйнуванню; крихке або в'язке.

Будь-який процес деформації після досягнення досить високих напружень закінчується руйнуванням. Процес руйнування починається з утворення тріщин субмікроскопічних розмірів і закінчується макроскопічним розділенням зразка на окремі частини. Як показує практика, тривала і надійна робота деталей, вузлів і виробу в цілому залежить перш за все від опору руйнуванню матеріалу деталей за різних експериментальних умов роботи.

Існує три можливі підходи до вирішення проблеми руйнування.

Перший – вивчення макроскопічних закономірностей руйнування.

Другий шлях – феноменологічний опис мікрокартини руйнування (спостережуваної при оптичних збільшеннях) і пошуки зв'язку між характером процесу руйнування і мікроструктурою матеріалу.

Третій шлях – дослідження процесів пластичної деформації і руйнування з позицій атомної будови. Знання атомного механізму цих процесів є єдиною надійною основою для встановлення кількісних залежностей міцності на рівні мікро- і макроструктур.

6.2. В'язке руйнування

В'язке руйнування відбувається після значної пластичної деформації (десятки відсотків). Це якнайменш небезпечний вид руйнування і йому надають не так багато уваги, як крихкому. Проте аналіз в'язкого руйнування дуже важливий. Він дозволяє, зокрема, краще зрозуміти механізм крихкого руйнування і спланувати заходи щодо його запобігання.

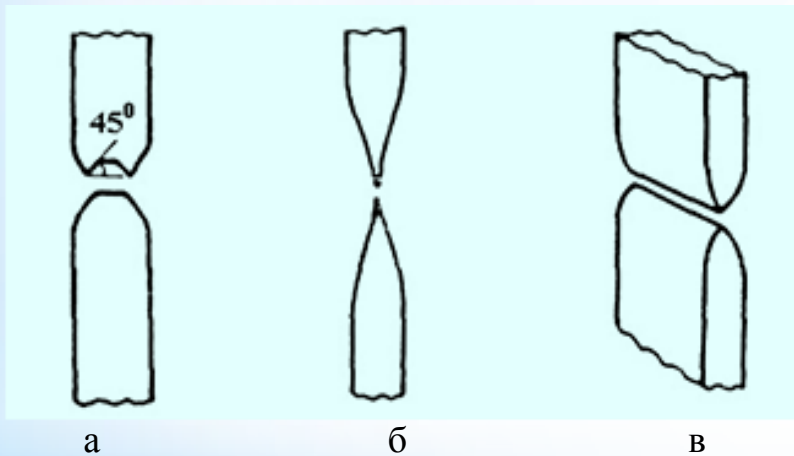


Рис. 6.1 – Форми зламу зразків при в'язкому руйнуванні

Прикладом в'язкого руйнування є утворення «чашкового» зламу в шийці розтягнутого зразка (рис. 6.1 а). Шийка є результатом локалізації деформації в обмеженому об'ємі. Всередині шийки напружений стан ускладнюється в порівнянні з вихідним одновісним розтягуванням.

У цих умовах і відбувається зародження і розвиток в'язких тріщин. Зародкові тріщини виникають і розвиваються в середній частині шийки. Відбувається локалізація напружень, в результаті змінюються швидкість поширення тріщини і напрям її розвитку.

Через локалізацію пластичної деформації в площинах дії максимальних дотичних напружень подальше руйнування йде шляхом зрізу. У результаті центральна частина тріщини утворює «дно», а периферійні – конусні «стілки» чашки зламу (див. рис. 6.1 а). Як бачимо, значна пластична деформація не тільки передуює в'язкому руйнуванню, але і продовжується в процесі його розвитку. Крім розглянутого випадку в'язкого руйнування, можливе утворення зламів іншої форми. Останні визначаються геометрією зразка, характером його деформації і ступенем пластичності. Наприклад, при розтягуванні циліндрових зразків із високою пластичністю, зокрема надпластичних, відносне звуження близьке до 100% і шийка перетворюється на точку (див. рис. 6.1 б). В аналогічних плоских зразків шийка вироджується в лінію (див. рис. 6.1 в), розміщену під кутом $\sim 45^\circ$ до осі розтягування.

6.3. Крихке руйнування

Крихке руйнування - найбільш небезпечний його вид, що йде катастрофічно швидко і під дією порівняно низьких напружень.

Як уже наголошувалося, метали і сплави ідеально крихко, тобто без попередньої пластичної деформації, не руйнуються. Крихка тріщина, так само як і в'язка, виникає внаслідок пластичної деформації.

Крихке руйнування легше піддається кількісному аналізу. Для ідеально крихкого руйнування пружного тіла широко використовується критерій Гріффітса: де σ – найменше розтягувальне напруження, необхідне для поширення крихкої тріщини; E – модуль Юнга; γ – поверхнева енергія стінок тріщини, віднесена до одиниці її площі; c – половина довжини тріщини.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}}$$

Цей критерій виходить з положення про те, що тріщина поширюється, якщо збільшення γ менше енергії деформації, що визволяється внаслідок зростання тріщини.

Аналіз моделей зародження крихких тріщин показує, що відомо декілька механізмів виникнення несучільності. Прояв того або іншого механізму зародження крихких тріщин залежить перш за все від природи матеріалу, критичної густини дислокацій і від умов навантаження.

Загальним для розглянутих моделей є те, що процес зародження тріщин є наслідком концентрації пружної енергії при утворенні скупчення дислокацій і подальшому їх зближенні. Тріщина виникає, досягнувши максимальної концентрації пружної енергії в локальному об'ємі матеріалу, чому відповідає досягнення критичної густини дислокацій.

6.4. Роль концентраторів напружень у крихкому руйнуванні

Різного роду пошкодження цілісності матеріалу – надрізи, тріщини – є концентраторами напружень і завжди викликають занепокоєння у зв'язку з їх здатністю спричинювати передчасне руйнування конструкції при середніх навантаженнях нижче межі текучості або пружності матеріалу. При випробуванні зразків із надрізом виникає нерівномірність розподілу напружень по перетину деталі (рис. 6.2):

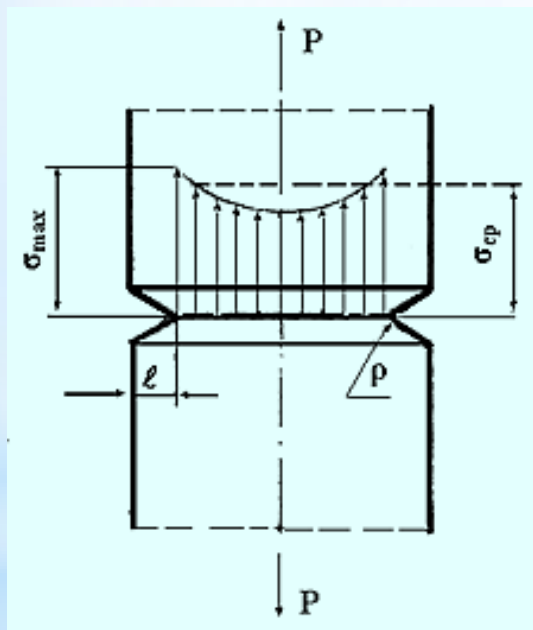


Рис. 6.2 – Концентрація напружень за наявності надрізу

$$\sigma_{\max} = 2\sigma_{cp} \sqrt{\frac{l}{\rho}}, \quad \text{де } l - \text{ глибина надрізу; } \rho - \text{ значення радіуса надрізу.}$$

Усі концентратори можна розділити на два види:

1) макроскопічні, які містять макродефекти – тріщини, конструктивні концентратори напружень (надрізи, виточки, галтелі);

2) мікроструктурні, пов'язані з наявністю різного роду неоднорідностей будови металу – включень, пор і т. п.

Перші відрізняються тим, що наперед відомі конструктору, їх вплив на розподіл напружень може і повинен бути врахований належним чином і при належному розрахунку макроскопічні концентратори не мають викликати несподіваного руйнування. Цим вони принципово відрізняються від мікроструктурних концентраторів, до яких можна віднести також нерівності зовнішньої поверхні виробів, які через свою випадкову природу не можуть бути точно і надійно ідентифіковані та враховані у розрахунку конструкції.

Надріз є типовим конструктивним макроконцентратором, здатним за певних умов викликати крихке руйнування.

Ступінь концентрації напружень у надрізу завглибшки t вимірюється коефіцієнтом концентрації:

$$Kt = \frac{\sigma_{1max}}{\sigma_n},$$

де σ_{1max} – пікове значення найбільшого нормального напруження поблизу вершини надрізу; σ_n – середнє (номінальне) напруження у найменшому перерізі виробу, що містить надріз.

Засобом боротьби з небезпекою концентраторів є ретельно розроблені технічні умови на якість матеріалів і стан їх поверхні. Проте немає абсолютної гарантії у тому, що у структурі матеріалу в ньому не станеться одиничного відхилень за межі норм технічних умов.

Отже, завжди залишається ймовірність того, що в матеріалі може відбутися структурне порушення неприпустимого розміру. Для того щоб забезпечити виріб від згубної дії такого порушення, доводиться вводити деякий коефіцієнт запасу міцності, який неодмінно призводить до перевитрати матеріалу.

Проблема мікроструктурних (неконтрольованих) концентраторів може бути розв'язана так само надійно, як і конструктивних, якщо уважно підійти до вибору структури матеріалу з урахуванням виду напруженого стану.

7. ВИПРОБУВАННЯ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ

7.1. Напружений стан під час випробування

Ударна в'язкість — здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації і руйнування під дією ударного навантаження. Як правило, оцінюється роботою, що виконана для руйнування надрізаного зразка при ударному згині, віднесеною до площі його перерізу в місці надрізу. Вимірюється в Дж/м².

Випробування на ударну в'язкість поєднують три види: випробування на згин, випробування зразка з надрізом і дією ударного навантаження. Тому навіть незначна зміна умов випробувань дозволяє визначати істотно різні характеристики матеріалу.

Цей метод випробувань застосовують в основному для визначення схильності до крихкого руйнування металевих матеріалів. Крім того, випробування на ударну в'язкість дозволяють вивчати процеси старіння, контролювати правильність термообробки і випробовувати зварні з'єднання. Переваги цього методу полягають у швидкості, малій витраті матеріалу, а також у тому, що зразок для випробувань може бути легко виготовлений.

Вирішальний вплив на крихкий або в'язкий злам при деформаціях, що перевищують пружні, чинять три фактори:

- а) розподіл навантажень у зразку;
- б) швидкість деформації;
- в) температура.

При згині зразка з надрізом напруження σ_1 , що діють уздовж зразка, біля основи надрізу концентруються. Їх величина у два – три рази перевищує номінальні напруження, що визначаються за формулою:

$$\sigma = \frac{M}{W}.$$

На об'єм металу, розміщеного біля основи надрізу в середній частині зразка, крім напружень σ_1 , діють ще напруження σ_2 і σ_3 .

Схема напруження цього елемента показана на рис. 7.1.

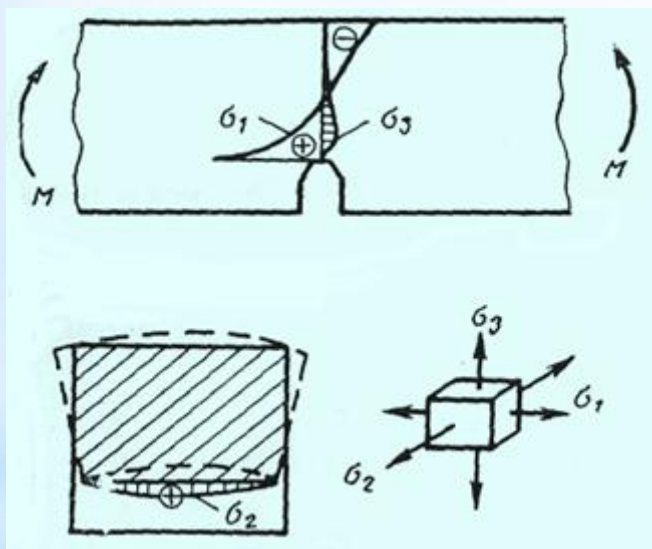


Рис. 7.1 – Напружений стан під час проби на ударний згин зразка з надрізом (заштрихований робочий перетин зразка, пунктиром показана форма цього перетину при згині).

Такий напружений стан і швидкісне навантаження зразка під час дії удару маятника сприяють окрихчуванню металу.

На протилежному боці зразка при згині створюються напруження стискування.

Сприятливий для крихкого руйнування напружений стан металу біля основи надрізу викликає появу першої тріщини саме в цьому місці зразка.

Біля вістря виниклої тріщини створюється аналогічний напружений стан, але з дуже сильною концентрацією напружень, що сприяє просуванню тріщини, що зародилася, в товщину зразка аж до його повного руйнування.

Характеристика напруженого стану після появи тріщини змінюється, відповідно змінюються й умови руйнування. Оцінити кількісно ці зміни не є можливим. Про результати доводиться робити висновки за виглядом зламу. Кристалічні блискучі ділянки у зламі зразка свідчать про крихкий характер руйнування (без істотної пластичної деформації), матові ділянки – про в'язке руйнування, що супроводжується пластичною деформацією металу.

Зниження температури зразка сприяє крихкому зламу, підвищення температури зразка перед випробуванням, як правило, – до в'язкого зламу.

Можна побудувати залежність ударної в'язкості від температури зразка перед випробуванням (рис. 7.2).

Існує температурний інтервал, в якому ударна в'язкість змінює своє значення. Положення перехідного інтервалу по осі абсцис використовується для характеристики «холодноламкості» металу.

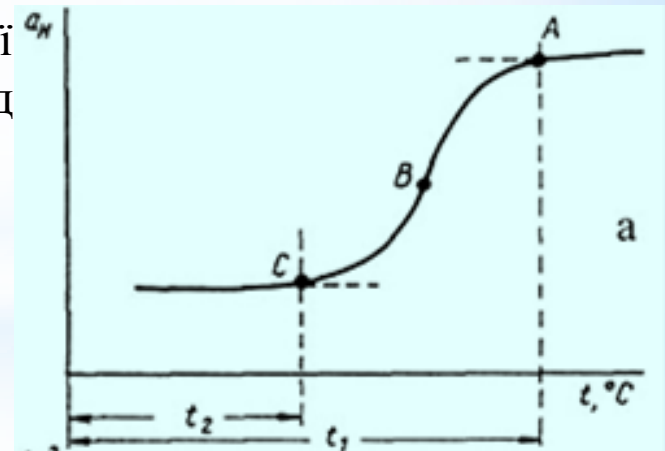


Рис. 7.2 – Залежність ударної в'язкості від температури

Чим нижча температура, при якій спостерігається зміна ударної в'язкості, тим більш стійкий метал проти окрихчування за рахунок зниження температури.

Чисельною характеристикою холодноламкості (або холодостійкості) береться так звана критична температура, залежна від положення перехідного інтервалу. Положення інтервалу (рис. 7.2) характеризується по-різному. Можна брати температуру, при якій ударна в'язкість починає знижуватися (точка *A*), або середину інтервалу (точка *B*), або температуру, при якій ударна в'язкість набуває найменшого значення (точка *C*).

Якщо в межах перехідної ділянки у зламі зразків з'являються ділянки з кристалічною структурою, то за критичну температуру можна взяти ту, при якій кристалічні ділянки становлять 50% усієї площі зламу. Якщо кристалічні ділянки не з'являються, то необхідно взяти яку-небудь іншу умову.

Очевидно, вказуючи критичну температуру крихкості, необхідно вказати й умову, за якою її визначали.

Положення перехідного температурного інтервалу залежить від форми надрізу на зразку. При гострішому надрізі температурний інтервал зміщується у бік вищих температур і навпаки.

7.2. Метод оцінки ударної в'язкості й холодноламкості

Холодноламкість є не властивістю, а станом матеріалу. Температура впливає на рухливість дислокацій. Зі зниженням температури рухливість дислокацій зменшується. Макроскопічно це виявляється у збільшенні критичної напруги зсуву. Критичне нормальне напруження також дещо зростає зі спадом температури, але не в такому ступені, як критичне напруження зсуву. Для настання крихкого зламу вирішальне значення має величина відношення $\sigma_{кр}/\tau_{кр}$, а оскільки це відношення зменшується зі зниженням температури, схильність матеріалу до крихкого зламу підвищується.

Найпоширенішим методом оцінки опору крихкому руйнуванню сталі, прийнятим як у нашій країні, так і за рубежом, є серійні динамічні випробування призматичних зразків (10x10x55 мм) з надрізом радіусом 1 мм (у СНД) і 0,25 мм (у США, Німеччині та інших країнах) при різних температурах.

Метод визначення ударної в'язкості матеріалу базується на руйнуванні зразка одним ударом маятникового копра (рис. 7.3).

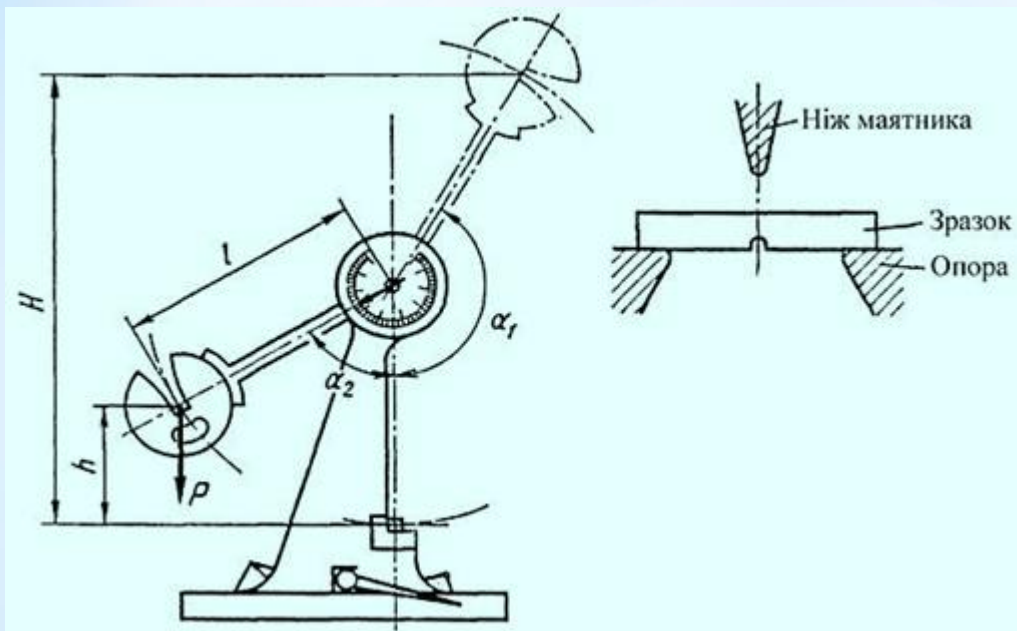


Рис.7.3 – Схема випробувань ударної в'язкості

$$K = mg(H-h) = mgl(\cos\alpha_2 - \cos\alpha_1), \text{ Дж,}$$

де m – маса маятника, кг; g – прискорення сили тяжіння, м/с²; H , h – висота підйому маятника до удару і після руйнування зразка, м; l – довжина маятника; α_1 , α_2 – кути підйому маятника до удару і після руйнування зразка.

Ударна в'язкість K_C – це робота, витрачена на ударне руйнування зразка, віднесена до початкової площі поперечного перерізу зразка в місці надрізу – S_0 :

$$K_C = \frac{K}{S_0}.$$

Основною характеристикою, що показує здатність матеріалів чинити опір ударним навантаженням, є ударна в'язкість, оскільки враховує в'язкість і міцність матеріалу одночасно.

Робота удару K , витрачена на злам зразка, визначається з різниці енергії маятника в положенні його до і після випробування:

Залежно від виду концентратора розрізняють зразки трьох типів (ГОСТ 9454-78):

- тип U (тип Менаже) – з радіусом дна надрізу 1,0 мм;
- тип V (тип Шарпі) – з радіусом дна надрізу 0,25 мм;
- тип Т – з ініційованою тріщиною

Метод ударної в'язкості дозволяє дати порівняльну оцінку властивостей матеріалів. Проте він не є універсальним і не дає відповіді.

Перш за все він не дає інформації, необхідної для розрахунку конструкцій. Інший недолік методу ударних випробувань на згин зразків, якщо він виконується з «м'яким» надрізом, полягає у тому, що цей метод не дозволяє відтворювати в процесі випробування всієї різноманітності видів напруженого стану, який можливий у реальних конструкціях. Результати ударних випробувань на згин зразків належать тільки до даної форми надрізу. Це недостатньо не лише тому, що одна форма надрізу не може охопити всієї різноманітності концентраторів напружень у реальних виробках, а й тому, що форма надрізу, його гострота, змінюючи характер напруженого стану, в деяких випадках може змінити і характер самого руйнування, перевести його із в'язкого в крихкий або навпаки.

Використання у сучасних конструкціях високоміцних матеріалів, що мають достатньо високу загальну ударну в'язкість, тобто вимагають витрати порівняно великої роботи на руйнування, привело до того, що за ударною в'язкістю вже не можна робити висновки про опір крихкому руйнуванню. Така конструкція не завжди застрахована від катастрофічного руйнування, яке відбувається при напруженнях, значно менших за межу текучості (пружності). Саме у високоміцних матеріалів та частина роботи, яка витрачається на деформацію до утворення тріщини в зразку, набагато більше частини роботи, що витрачається на поширення тріщини. Неможливість визначення роботи, необхідної для розвитку тріщин, коли метал знаходиться в окрихченому стані, не дозволяє попередити руйнування багатьох сучасних конструкцій, які працюють в умовах складного напруженого стану.

Метод оцінки холодноламкості за видом зламу дістав останніми роками великого поширення. Це пояснюється тим, що вид зламу визначається характером просування магістральної тріщини і дозволяє якісно оцінити здатність матеріалу до поглинання енергії. Кількісною характеристикою здатності сталі чинити опір крихкому руйнуванню під час аналізу зламу є площа зламу у відсотках, займана волоконною складовою. Деякі дослідники вважають, що для розвитку в'язкого руйнування достатньо, щоб у зламі волокниста складова становила не менше 60%. Дійсно, для деяких сталей, в основному низько- і середньовуглецевих з невисокою міцністю, криві залежності волокнистої складової у відсотках від температури випробування чіткіше визначають температуру переходу сталі в крихкий стан, ніж величина ударної в'язкості, яка нерідко дає розмиті межі перехідної зони.

Проте оцінка в'язкості за видом зламу має істотні недоліки:

- 1) обмеженість візуальної оцінки характеру руйнування за видом зламу, її суб'єктивність і необхідність наявності великого досвіду для аналізу зламу;
- 2) непридатність методу для високовуглецевих сталей і сталей підвищеної міцності, що дають макроскопічно крихкий злам у великому інтервалі позитивних і негативних температур, що вимагають застосування електронно-фрактографічних методів дослідження.

Неуніверсальність значення критичної температури крихкості, її залежність від критерію оцінки, форми і гостроти надрізу зовсім не виключає визначення цього параметра у багатьох випадках порівняльних випробувань сталей і сплавів. Ця характеристика використовується при оцінці схильності матеріалу до окрихчування. Визначення критичної температури крихкості особливо необхідне для матеріалів, що працюють при низьких температурах. У решті випадків більш універсальним і на цей час широко застосовуваним методом є метод окрихчування при випробуваннях зразків з нанесеними гострими надрізами. З цих міркувань зразок Менаже для ударного згину в багатьох країнах витіснений зразком з відносно гострим надрізом ($R = 0,25$ мм) і надрізом типу втомної тріщини.

7.3. Визначення роботи зародження і розвитку тріщини

Ударна в'язкість є інтегральною характеристикою і складається з питомої роботи, яка витрачається на зародження тріщини і її розвиток. У той же час умови поглинання енергії матеріалом у процесі зародження і поширення тріщини різні. До утворення тріщини енергія, що витрачається на руйнування зразка, сприймається значним макрооб'ємом. У зв'язку з цим кількість енергії, споживаної на утворення тріщини, як правило, перевищує ту невелику роботу, яка витрачається на деформацію незначного об'єму матеріалу, прилеглого до вістря тріщини при її поширенні. У міру переходу від утворення до розвитку тріщини змінюється також напружений стан, що викликає руйнування.

Зародження тріщини відбувається під впливом дотичних напружень, що викликають пластичну деформацію, приводять до руху дислокації. Подальше руйнування, тобто поширення тріщини, викликається розтягувальними напруженнями, діючими в її усті.

Складові ударної в'язкості порізноmu залежать від марки сталі та її металургійної якості. Нерідко матеріали, що мають високий опір утворенню тріщини (високоміцні сталі) дуже слабо чинять опір її поширенню.

У зв'язку з необхідністю роздільної оцінки питомих робіт, що витрачаються на зародження і поширення тріщини, було розроблено декілька методів роздільного їх визначення або визначення тільки питомої роботи, що витрачається на поширення тріщини.

Один з них - оцінка схильності до крихкого руйнування за питомою роботою, що витрачається на поширення тріщини в умовах ударних випробувань стандартних зразків з надрізом Менаже.

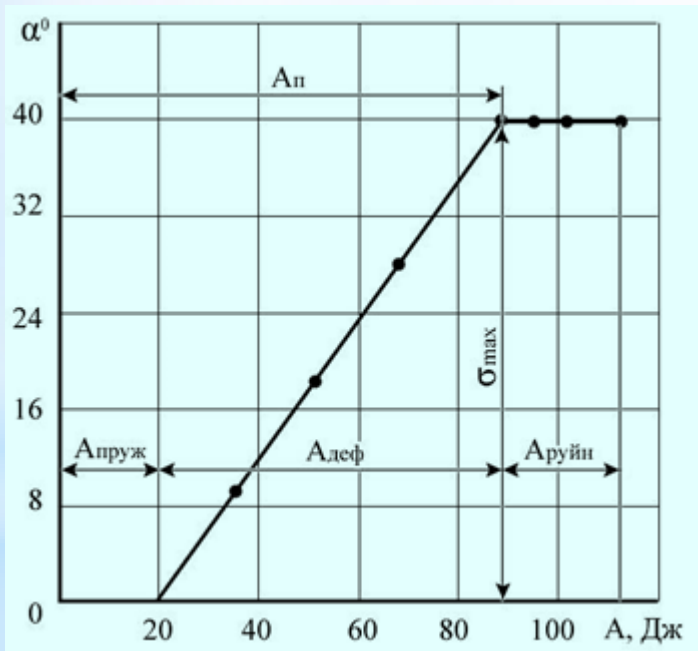


Рис.7.4 – Спосіб розділення роботи, що витрачається на руйнування зразка

Метод полягає у тому, що випробовується серія зразків на копрі із запасом енергії маятника, що постійно збільшується, і будується залежність кута згину зразків α_0 від поглиненої енергії (рис. 7.4).

Дані експерименту показують, що кут згину зростає із збільшенням величини поглиненої енергії до певної межі α_{max} , а потім залишається сталим.

Відрізок прямої, що відсікається, на осі абсцис при $\alpha = 0$ характеризує роботу пружної деформації $A_{\text{пр}}$.

Робота, що витрачається на зародження тріщини, складається із суми робіт пружної і пластичної деформації.

Цей метод зручний для наближеної оцінки роботи поширення тріщини, оскільки він припускає використання стандартних зразків і копрів.

Робота поширення тріщини

$$A_{\text{руйн}} = A_{\text{п}} - A_{\text{пр}} - A_{\text{деф}}$$

де $A_{\text{п}}$ – повна робота, витрачена маятником;

$A_{\text{пр}}$ – робота, витрачена на пружну деформацію;

$A_{\text{деф}}$ – робота, витрачена на пластичну деформацію;

$A_{\text{руйн}}$ – робота, витрачена на поширення тріщини, тобто на залишкове руйнування.

Точність оцінки роботи $A_{\text{руйн}}$ обмежується через суб'єктивність визначення кута згину зразків, одержаного при з'єднанні двох половинок зразка, що зламався. Метод не враховує також, що енергія, яка йде на деформацію зразка, залежить від швидкості навантаження, тобто висоти підняття маятника. Метод не можна застосовувати для сталей високої міцності, у яких унаслідок низької пластичності величина загального прогинання зразків перед руйнуванням менше 1 мм.

За іншим методом випробовують декілька зразків, що мають різний радіус округлення r біля вершини надрізу. Після випробувань і підрахунку ударної в'язкості кожного зразка будується графік (рис. 7.5).

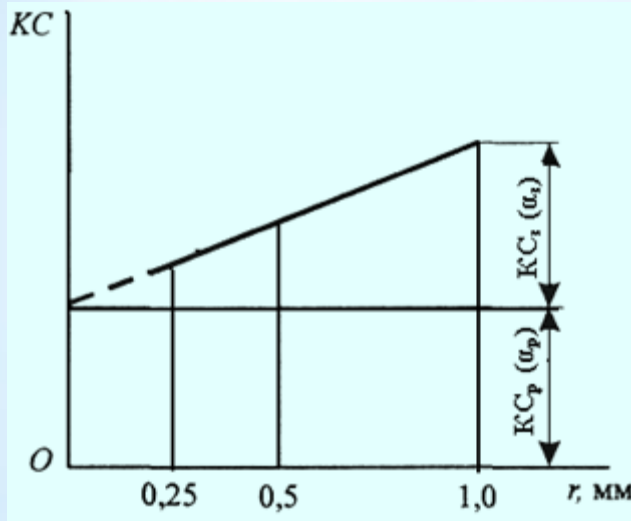


Рис.7.5 — Схема визначення складових ударної в'язкості

Таким чином, для оцінки надійності матеріалу потрібно використовувати якісні параметри (не придатні для розрахунку на міцність):

- 1) ударну в'язкість KCV і KCT ;
- 2) температурний поріг холодноламкості T_{50} .

Екстраполюючи пряму на вісь ординат, одержуємо питому роботу поширення тріщин KC_p (α_p). У цьому випадку зразок із радіусом надрізу близьким до нуля ототожнюється із зразком, що має втомну тріщину.

8. ВИПРОБУВАННЯ ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

8.1. Жароміцність

Для характеристики механічних властивостей матеріалів, що працюють в умовах нагрівання, проводять короточасні й тривалі випробування при підвищених температурах.

Тривале статичне навантаження значно впливає на механічні властивості матеріалів. Тривало діючі навантаження, навіть нижчі за межу пружності, викликають пластичні деформації. Це особливо виявляється при високих температурах. Металеві матеріали, що працюють тривалий час при високих температурах, можуть деформуватися (наприклад, розтягуватися) при постійному навантаженні й напруженнях, значно менших за межу текучості матеріалу при кімнатній температурі. У цих умовах виникають і розвиваються явища повзучості й теплової крихкості. Щоб уникнути цього, необхідно, щоб до деталей, що працюють в умовах високих температур, прикладалося навантаження, не здатне викликати явищ повзучості і теплової крихкості. Отже, матеріали, які застосовуються для виготовлення деталей, що працюють у таких умовах, потрібно перевіряти на повзучість.

8.2. Повзучість

Повзучість – це повільне наростання в часі пластичної деформації матеріалу при силових діях, менших від тих, які можуть викликати залишкову деформацію при випробуваннях звичайної тривалості. Повзучість супроводжується релаксацією напружень, тобто поступовою зміною напружень у тілі при постійній його деформації.

Повзучість мають практично всі конструкційні матеріали. Для сталей і чавунів повзучість істотна лише при підвищених температурах (вище 300 °С) і проходить тим інтенсивніше, чим вища температура. Для металів із низькою температурою плавлення (свинець, алюміній), для бетону, дерева, гуми, пластмаси повзучість помітна і при кімнатних температурах.

Тепловою крихкістю називають явища зменшення пластичності, що визначається за виміром деформації при постійному навантаженні металу при високих температурах.

Необхідно розрізняти дві основні групи механічних властивостей: опір пластичній деформації при тривалих статичних навантаженнях (визначення межі повзучості), опір руйнуванню (тривала міцність) і пластичність при тривалих статичних навантаженнях.

Процес повзучості супроводжується двома взаємно протилежними явищами: зміцненням і знеміцненням. Зміцнення (наклеп) виникає внаслідок пластичної деформації, а знеміцнення є результатом рекристалізації (тобто утворення кристалічних зерен із досконалішою структурою за рахунок вихідних деформованих зерен з менш досконалою структурою), яка проходить при гарячій деформації. У результаті рекристалізації знижуються міцність і твердість металу і збільшується його пластичність.

Короткочасні випробування при високих температурах не характеризують повною мірою метал щодо його повзучості. Для цього проводяться спеціальні випробування (ГОСТ 3248-81).

Випробування на повзучість при розтягуванні полягають у тому, що випробовуваний зразок протягом довгого часу піддається дії постійного розтягувального зусилля і сталої температури. При цьому весь час фіксується деформація зразка (рис. 8.1).

У результаті випробування визначають межу повзучості матеріалу, тобто те найбільше напруження, при якому швидкість або деформація повзучості за певний проміжок часу не перевищує заданої величини.

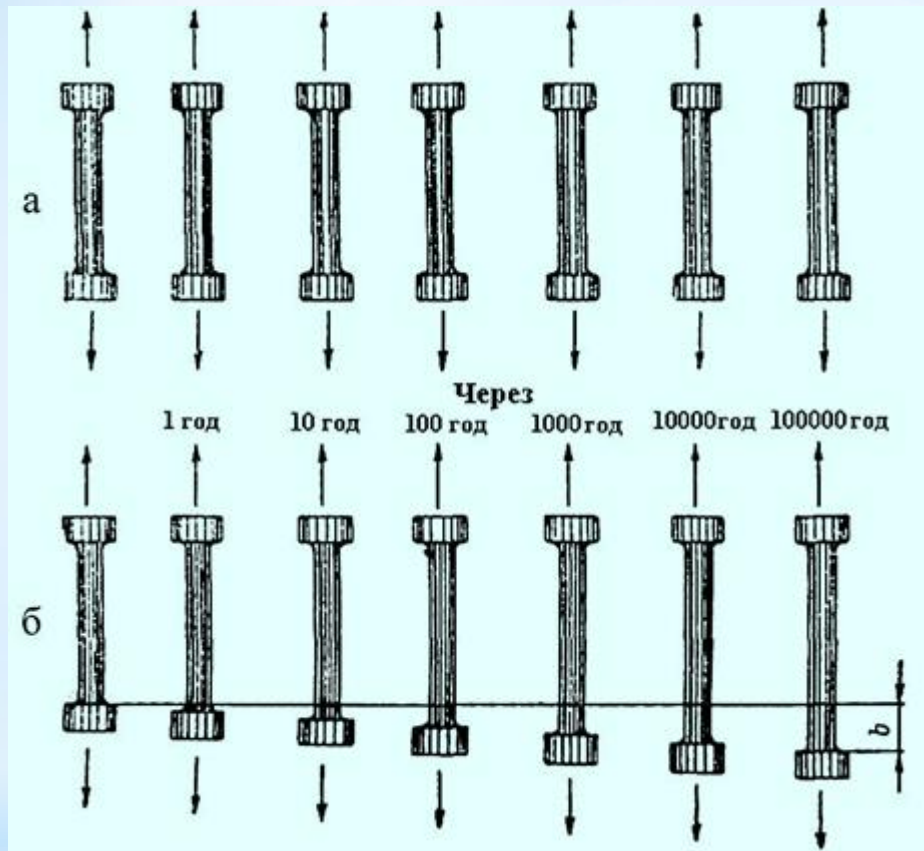


Рис. 8.1 – Зміна довжини навантаженого зразка: а – при кімнатній температурі; б – при температурі 600 °С

Для випробувань застосовують циліндрові зразки діаметром 10 мм, з розрахунковою довжиною 100 мм (нормальний зразок) і з розрахунковою довжиною 200 мм (подовжений зразок). Допускається застосування зразків іншої форми і розмірів.

Розрахункова довжина циліндрових зразків повинна дорівнювати $5d$ або $10d$. Діаметр циліндрових зразків повинен бути не менше 5 мм. Поверхня зразків має бути гладкою, без рисок і пошкоджень.

Зразок, поміщений в електропіч, затиснений у захватах, піддається розтягувальній силі під дією постійного навантаження і температури (що підтримується сталою в межах одного випробування). Величина деформації відлічується за шкалою індикатора (при випробуванні на повзучість) або за міліметровою шкалою (при випробуванні на тривалу міцність).

Для вимірювання навантажень і деформацій використовують тензорезисторні датчики. Частини приладів, що виходять з печі, повинні бути сконструйовані й захищені так, щоб короточасні зміни температури не впливали на показники приладів. Нагрівальний пристрій повинен забезпечувати рівномірне нагрівання зразка до заданої температури і збереження останньої впродовж усього випробування.

Для вимірювання температури на зразках із довжиною до 100 мм включно повинно бути встановлено не менше двох термопар, а на зразках з довжиною понад 100 мм – не менше трьох термопар, розподілених рівномірно по всій довжині. Термопари встановлюють так, щоб гарячі спаї щільно стикалися з поверхнею зразка; гарячий спай термопари повинен бути захищений від дії розжарених стінок печі.

Необхідно періодично не рідше одного разу на годину вимірювати температуру потенціометром. Рекомендується автоматичний запис температури впродовж усього випробування.

Встановлений у захватах випробувальної машини і поміщений у піч зразок нагрівають до заданої температури (час нагрівання, як правило, повинен бути не більше 8 год) і витримують його при цій температурі не менше 1 год. Температура випробування вибирається кратною 50 °С, якщо за умов дослідження не потрібна спеціальна температура.

Після нагрівання зразка до заданої температури і витримки при ній не менше 1 год до зразка плавно прикладають попереднє навантаження, що дорівнює приблизно 10% від заданого загального навантаження і знімають показники приладу для вимірювання деформації. Якщо температура зразка і показники вимірювань подовження залишаються протягом 5 хв незмінними, то зразок плавно навантажують до заданого навантаження.

Одночасно з додаванням навантаження візуально визначається початок деформації зразка, для цього вмикається прилад для автоматичного запису подовження. Інтервали для запису подовження повинні вибиратися з таким розрахунком, щоб у процесі випробування можна було повністю встановити характер зміни подовження.

Після закінчення випробування на повзучість зразок розвантажують до величини попереднього навантаження і визначають абсолютну величину залишкового подовження.

Максимальне тривалодіюче напруження, при якому деформація ще дорівнює нулю, називається *теоретичною межею повзучості*.

Процес випробування зображають у вигляді первинної кривої повзучості в координатах «відносне подовження – час» і визначають напруження, відповідне умовній межі повзучості матеріалу (рис. 8.2).

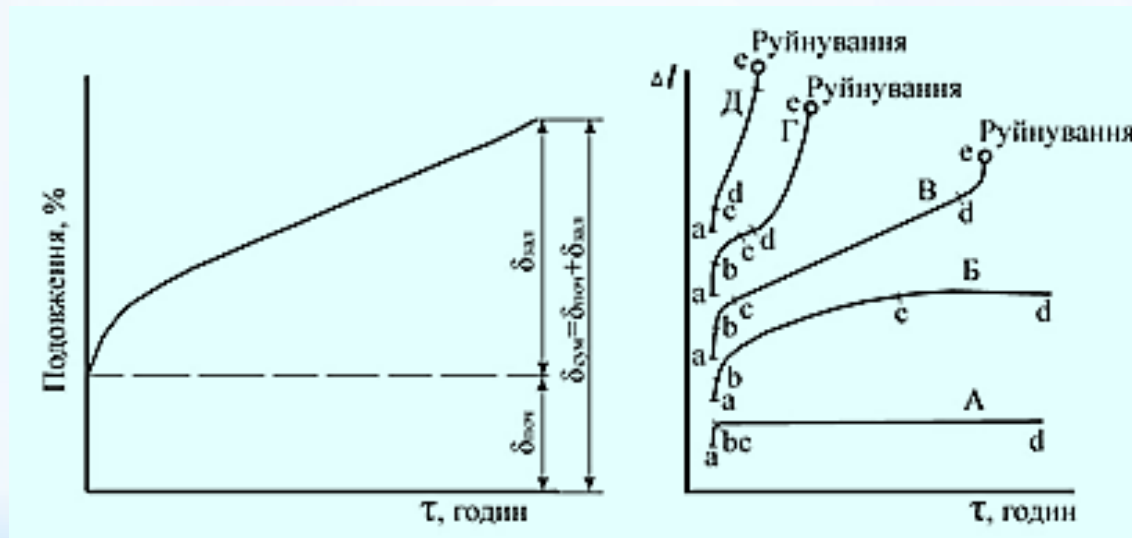


Рис. 8.2 – Криві повзучості: а – для однакових умов випробування, б – для різних умов випробування

Умовною межею повзучості є напруження, яке викликає за встановлений час випробування при даній температурі задане подовження зразка (сумарне δ_c або залишкове δ_0).

Сумарне або залишкове відносне подовження – це зміна довжини зразка щодо первинної довжини, виражена у відсотках.

Первинна довжина L_0 повинна вимірюватися при нормальній температурі перед випробуванням зразка.

Умовну межу повзучості визначають таким чином:

- випробовують не менше чотирьох зразків при даній температурі й різних напруженнях;
- на основі одержаних кривих повзучості (рис. 8.2) будують діаграми залежності між напруженням і подовженням. За цими діаграмами знаходять шукане напруження. Величини меж повзучості потрібно визначати з точністю до 4,9 МПа (0,5 кгс/мм²) і округляти у бік зменшення;
- після того як напруження знайдене не менше ніж при трьох різних температурах випробування, будується діаграма залежності між напруженням і температурою.

При визначенні за величиною деформації межа повзучості повинна позначатися трьома числовими індексами: двома нижніми й одним верхнім. Перший нижній індекс позначає задане подовження (сумарне або залишкове) у відсотках; другий нижній індекс – задану тривалість часу випробування в годинах; верхній індекс – температуру в градусах Цельсія.

Приклад 1. $\sigma_{0,2/100}^{700}$ – межа повзучості при допуску на деформацію 0,2% за 100 год випробування при температурі 700 °С.

При цьому необхідно додатково вказати, за сумарною чи залишковою деформацією визначалася межа повзучості.

У разі визначення за швидкістю повзучості межа повзучості повинна позначатися σ з двома числовими індексами: одним верхнім і одним нижнім. Нижній індекс означає задану швидкість повзучості (%/год), верхній індекс означає температуру випробування в °С.

Приклад 2. $\sigma_{1 \cdot 10^{-5}}^{600}$ – межа повзучості при 1·10⁻⁵ %/год при температурі 600 °С.

При цьому необхідно додатково вказати час випробування, за яке була досягнута задана швидкість повзучості.

Залежно від навантаження, температури випробування і властивостей металу, що перевіряється, деформація при збільшенні тривалості випробування може проходити з невеликою швидкістю (криві *Б* і *В* на рис. 8.2) або, навпаки, швидко збільшуватися до руйнування (криві *Г* і *Д*).

Повзучість визначається при розтягуванні, крученні, згині й при складно напруженому стані. Випробування можна проводити при сталій температурі та постійному напруженні (ізотермічний метод), при змінній температурі і постійному напруженні (дилатометричний метод) і при сталій температурі і змінному напруженні (метод релаксації).

8.3. Тривала міцність

Тривалою міцністю називається опір матеріалу механічному руйнуванню під дією тривало прикладеного постійного навантаження при високій температурі.

Розрізняють тривалу міцність при розтягуванні, крученні й згині, а також у складному напруженому стані, наприклад розтягування і згин, розтягування і кручення.

Тривала міцність характеризується межею тривалої міцності. Межу тривалої міцності найчастіше визначають при розтягуванні. Тривала міцність більшості матеріалів з підвищенням температури знижується; вона залежить також від хімічного складу, мікроструктури (розміру зерна, форми, розміру і характеру розподілу зміцнювальних частинок), стану поверхні зразків (знижується при збільшенні шорсткості), навколишнього середовища (може різко знижуватися при взаємодії з легкоплавкими рідкими металами).

Тривала міцність разом з опором повзучості й жаростійкістю є важливою характеристикою при виборі жароміцних сплавів.

Випробування на тривалу міцність при температурах до 1200 °С полягає у тому, що зразок доводиться до руйнування під дією постійного розтягувального навантаження при сталій температурі.

У результаті випробувань визначають межу *тривалої міцності*, тобто найбільше напруження, що викликає руйнування металу за певний час випробування при сталій температурі, або встановлюють відповідність між часом до руйнування і нормою часу, зазначеною в стандартах або технічних умовах на металопродукцію.

Машини для випробування металів на тривалу міцність, як і на повзучість, повинні забезпечувати постійність навантаження протягом усього процесу випробування, плавність навантаження і розвантаження зразка, точність навантаження до зразка з похибкою не більше $\pm 1\%$, надійне центрування зразка.

Нагрівальний пристрій повинен забезпечувати рівномірне нагрівання зразків до заданої температури і збереження температури впродовж усього випробування. Допускається, якщо цього вимагають умови випробування, застосування нагрівальних пристроїв із захисною або іншою атмосферою. Температуру потрібно вимірювати приладами з похибкою не більше $0,5\%$.

Температуру випробування обирають кратною $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо за умов дослідження не потрібна спеціальна температура.

Після нагрівання зразка і витримки при заданій температурі до нього плавно прикладають навантаження.

Час до руйнування при заданому значенні напруження є основним показником даного виду випробування. Після руйнування зразка визначають відносне подовження δ і відносне звуження зразка ψ .

Тривалість випробування встановлюється для кожного металу залежно від його призначення. Рекомендується визначати межі тривалої міцності на основі випробувань тривалістю 50, 100, 500, 1000, 3000, 5000 і 10000 год, якщо не потрібна інша тривалість випробування.

У результаті випробувань встановлюється залежність між напруженням і часом до руйнування, яка може бути виражена графіками, побудованими в логарифмічній, напівлогарифмічній або іншій системі координат. Межа тривалої міцності позначається σ із двома числовими індексами: верхній – температура випробування, °С; нижній – задана тривалість випробування до руйнування, годин; тривалість випробування можна позначити кількістю годин або цифрою 10 із показником ступеня, наприклад $\sigma_{10^3}^{700}$ або σ_{1000}^{700} – межа тривалої міцності за 1000 год випробування при температурі 700 °С.

Відносне звуження (%) після розриву циліндрових зразків розраховують за формулою

$$\bar{\psi} = \frac{F_0 - F_{\kappa}}{F_0} 100,$$

де F_0 – початкова площа поперечного перерізу робочої частини зразка, виміряна при нормальній температурі перед випробуванням, мм²; F_{κ} – мінімальна площа поперечного перерізу зразка після руйнування, розрахована за середнім арифметичним з результатів вимірювань мінімального діаметра в місці розриву в двох взаємно перпендикулярних напрямках, мм².

9. МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

9.1. Особливості руйнування при втомі

Вивчення втомного процесу і руйнування від втоми має велике прикладне значення, оскільки значне число деталей і конструкцій в експлуатації піддається дії знакозмінних циклічних навантажень. *Втома* – процес поступового накопичення ушкоджень матеріалу під дією повторно-змінних напружень, що призводить до зменшення довговічності, утворення тріщин і руйнування. *Витривалість* – властивість матеріалу протистояти втомі.

Циклічна довговічність характеризує працездатність матеріалу в умовах циклів напружень, що багато разів повторюються. Цикл напруження – сукупність зміни напружень між двома його граничними значеннями σ_{\max} і σ_{\min} протягом періоду (T).

Різні види циклів характеризують різні режими роботи деталей машин.

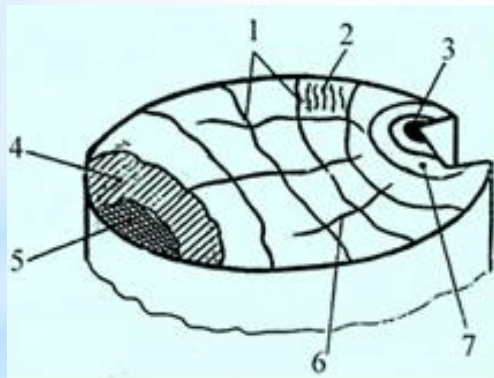
Руйнування від втоми порівняно з руйнуванням від статичного навантаження має ряд особливостей.

1. Воно відбувається при напруженнях, менших, ніж при статичному навантаженні; менших від межі текучості або тимчасового опору.

2. Руйнування починається на поверхні (або поблизу від неї) локально, в місцях концентрації напружень (деформації). Локальну концентрацію напружень створюють пошкодження поверхні внаслідок циклічного навантаження або надрізи у вигляді слідів обробки, дії середовища.

3. Руйнування проходить у декілька стадій, що характеризують процеси накопичення ушкоджень у матеріалі, утворення тріщин втомі, поступовий розвиток і злиття деяких із них в одну магістральну тріщину і швидке залишкове руйнування.

4. Руйнування має характерну будову зламу, що відображає послідовність процесів втоми. Злам складається з осередку руйнування (місця утворення мікротріщин) і двох зон – втомі і долому (рис. 9.1).



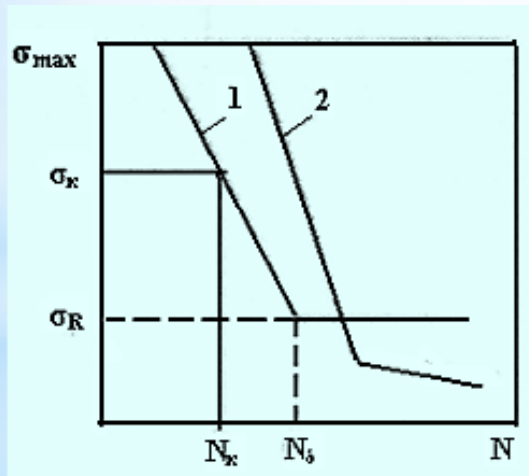
Кожна із зазначених зон має характерні ділянки, які відображають загальний характер утомного руйнування: місце зародження тріщини (3); приосередкова зона (7); втомні борозни (2); втомні лінії (1); сходинки скидання (6); зона прискореного розвитку тріщини (4); зона долому (5)

Рис. 9.1 – Злам втомного руйнування

Осередок руйнування прилягає до поверхні і має невеликі розміри та гладку поверхню.

Зону втоми формує послідовний розвиток тріщини втоми. У цій зоні видно характерні борозни, які мають конфігурацію кілець, що свідчить про стрибкоподібне просування тріщини втоми. Зона втоми розвивається доти, поки в робочому перетині, що зменшується, напруження зростуть настільки, що спричинять його миттєве руйнування. Цю останню стадію руйнування характеризує зона долому.

Про здатність матеріалу працювати в умовах циклічного навантаження роблять висновки за результатами випробувань зразків на втоми. Їх проводять на спеціальних машинах, що створюють у зразках багаторазове навантаження (розтягування - стискування, згин, кручення). Зразки (не менше до 10 шт.) випробовують послідовно на різних рівнях напружень, визначаючи число циклів до руйнування.



Результати випробувань зображають у вигляді кривої втоми Велера (рис. 9.2).

Горизонтальна ділянка визначає напруження, яке не викликає втомного руйнування після необмежено великого або заданого (базового N_b) числа циклів. Це напруження є фізичною межею витривалості σ_R (R – коефіцієнт асиметрії циклу), при симетричному циклі σ_{-1} .

Рис. 9.2 – Криві втоми: 1 – для сталі;
2 – для кольорових металів

Похила ділянка кривої втоми характеризує обмежену межу витривалості, що дорівнює напруженню σ_k , яке може витримати матеріал протягом певного числа циклів (N_k).

Криві з горизонтальною ділянкою типові для сталей при невисоких температурах випробувань. Криві без горизонтальної ділянки (крива 2 на рис. 9.2) характерні для кольорових металів, а також для всіх матеріалів, що працюють при високих температурах або в корозійному середовищі. Такі матеріали мають тільки обмежену межу витривалості.

Криві втоми дозволяють визначити такі критерії витривалості:

- 1) циклічну міцність – фізичну або обмежену межу витривалості. Вона характеризує несучу здатність матеріалу, тобто те найбільше напруження, яке він здатний витримати за певний час роботи;
- 2) циклічну довговічність – число циклів (або експлуатаційних годин), які витримує матеріал до утворення втомної тріщини певної протяжності або до втомного руйнування при заданому навантаженні. Довговічність також може бути необмеженою (при $\sigma_{\max} < \sigma_{-1}$) і обмеженою (при $\sigma_{\max} > \sigma_{-1}$).

Втомні тріщини виникають на певному етапі знакозмінного навантаження після декількох тисяч циклів.

У результаті проведення багатьох досліджень стало можливим зробити такі припущення.

Матеріал, що складається з великої кількості безладно орієнтованих кристалітів, при прикладенні навантаження має нерівномірний розподіл напружень по перерізу (рис. 9.3).

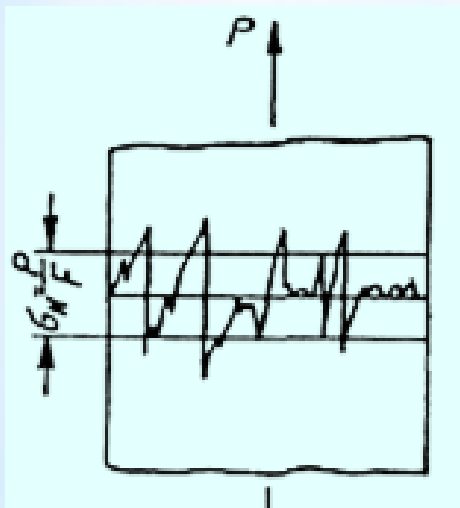


Рис. 9.3 – Неоднорідний розподіл напружень у полікристалічному зразку

У результаті цього по межах кристалітів виникають мікроскопічні концентрації напружень. На ці концентрації напружень, що викликаються прикладенням зовнішнього навантаження, можуть накладатися і власні мікронапруження, що існують між складовими частинами гетерогенної структури. Цим можна пояснити те, що навіть при прикладенні зовнішнього навантаження, яке менше межі текучості якого-небудь матеріалу, в деяких кристалах, що знаходяться під підвищеним навантаженням, відбувається пластична деформація.

При навантаженні відбувається деформація зрушення кристаліту під дією знакозмінних і коливних навантажень уздовж певних площин ковзання. У результаті може відбутися пластична деформація. Коли відбувається пластична деформація матеріалу, то міцність його поступово зростає у міру збільшення величини цієї деформації. Відбувається зміцнення матеріалу.

Під дією знакозмінного навантаження деякі кристаліти можуть досягти такої величини зміцнення, що під дією постійного навантаження вони вже не деформуватимуться пластично, а відбудеться лише пружна деформація. Цей процес називається зміцненням під дією знакозмінного навантаження.

У зв'язку з тим, що пластичність матеріалу знижується у міру збільшення ступеня деформації, зусилля, діючі на окремі кристаліти, можуть перевищити міцність матеріалу на розрив. У результаті цього матеріал руйнуватиметься.

У результаті дії знакозмінного навантаження цей процес призводить до утворення субмікроскопічних тріщин, розміщених уздовж певних ліній або смуг ковзання.

Механізм утомного руйнування пов'язаний з розвитком і накопиченням у поверхневому шарі мікропластичної деформації, утворенням макротріщин, які зі зростанням напружень долають межі зерен, зливаються, утворюючи магістральну тріщину втоми. Ця тріщина росте переривчасто – стрибками, пов'язаними з місцевою пластичною деформацією (наклепом) металу біля її вершини. Для поширення тріщини на деяку довжину необхідно, щоб біля її вершини була вичерпана пластичність. У результаті настає руйнування, пов'язане з утворенням поверхонь розділу.

У табл. 9.1 наведені схеми втомних зломів при знакозмінних напруженнях.

Навантаження зразків		Рівні прутки		Прутки з місцевою концентрацією напружень			
Назва	Схема	сильно-навантажені	слабо-навантажені	значною		незначною	
				сильно-навантажені	слабо-навантажені	сильно-навантажені	слабо-навантажені
		1	2	3	4	5	6
Розтягування (стиснення)							
Односторонній згин							
Двосторонній згин							
Кручення з вигином							

Величина межі втоми матеріалу значною мірою залежить від різних факторів, які можуть чинити і сприятливу, і несприятливу дію.

9.2. Вплив стану поверхні на втомне руйнування

Втомний злам дуже часто починається на незначних поверхневих дефектах, тому стан поверхні чинить великий вплив на втомну міцність. Рис. 9.4 ілюструє вплив стану поверхні на втомну міцність.

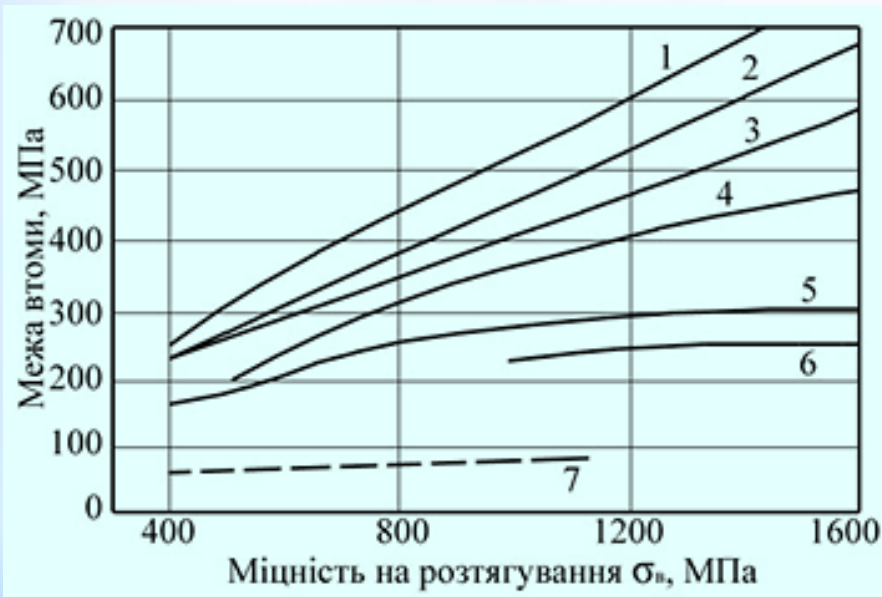


Рис. 9.4 – Вплив якості поверхні на втомну міцність:

- 1 – полірована поверхня; 2 – шліфувана поверхня;
- 3 – точена поверхня; 4 – поверхня з буртиком; 5 – поверхня з надрізом гострого профілю; 6 – поверхня, покрита прокатною окалиною; 7 – корозія, спричинена водою

Найвищу величину межі втоми має полірована поверхня. Тому зразки, які випробовують на втомну міцність згином під час обертання, мають поліровану поверхню. Зі збільшенням шорсткості поверхні величина межі втоми зменшується.

Для сталей, що мають високу міцність на розрив, цей вплив поверхні різкіше виражений, ніж для сталей з меншою міцністю.

Особливо сильно зменшується величина межі втоми матеріалу під дією корозії. Раковини, що утворюються на поверхні, можуть служити причиною утворення втомних тріщин. При випробуванні на втомну міцність кородованих зразків з'ясувалося, що і після того як матеріал витримає встановлене число циклів навантаження, лінія, що виражає залежність навантаження від числа циклів, не стає паралельною осі абсцис (рис. 9.5). Тому при випробуванні кородованих матеріалів можна визначити не межу втоми як таку, а лише обмежену витривалість матеріалу.

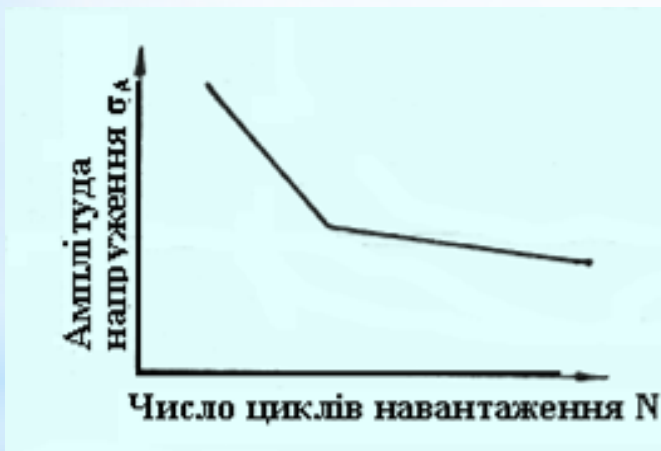


Рис. 9.5 – Схематичне зображення кривої Велера для кородованого зразка

Тому при випробуванні кородованих матеріалів можна визначити не межу втоми як таку, а лише обмежену витривалість матеріалу.

Застосовуючи відповідну обробку поверхні матеріалу, можна підвищити величину його межі втоми. Особливо ефективний наклеп поверхні, який може бути створений піскоструменевою або дробоструменевою обробкою поверхні матеріалу.

Дія останніх двох методів ґрунтується на тому, що на поверхні виникають власні напруження стиснення, які можуть зменшувати концентрації напружень на «дні» різних подряпин.

Підвищення величини межі втоми внаслідок стискних напружень може бути досягнуте також нітрацією поверхні, поверхневим гартуванням або застосуванням гальванопокриттів. Проте поверхнева обробка, хоча і підвищує міцність щодо дії динамічного навантаження, але в той же час знижує міцність матеріалу щодо дії ударного навантаження. Тому перш ніж проводити такого роду обробку матеріалу, потрібно ретельно встановити, якому виду навантаження переважно піддається та або інша деталь конструкції.

При нітрації поверхні можуть виникнути напруження стиснення до 700 МПа. Цементация викликає набагато менші напруження. Зі збільшенням товщини шару поверхневої обробки величина поверхневих напружень зменшується.

Цементацией поверхні можна на 30–20% підвищити міцність щодо дії знакозмінного згинаючого навантаження. Незважаючи на дуже відмінні між собою дані, можна все ж таки вважати, що існує оптимальне співвідношення між глибиною цементации і товщиною матеріалу.

У табл. 9.2 показано вплив глибини цементації на втомну міцність циліндричних сталевих зразків щодо дії знакозмінного згинального навантаження.

Табл. 9.2 – Вплив товщини шару цементації на межу втоми низьковуглецевої сталі

Серія дослідів	Глибина цементації (до шліфування), мм	Товщина шару цементації (після шліфування), мм	Межа втоми, МПа
1	0	0	620
2	0,4	0,3	650
3	0,4	0,2	700
4	0,4	0,1	660

* Цементований шар гартували при 820–840°C масла, відпуск проводили при 200 °C протягом 2 год

10. ВИПРОБУВАННЯ НА ТВЕРДІСТЬ

10.1. Загальна характеристика

Під твердістю розуміють властивість поверхневого шару матеріалу чинити опір пружній і пластичній деформації або руйнуванню при місцевих контактних діях з боку іншого, твердішого і не набуваючого залишкової деформації тіла (індентора) певної форми і розміру.

При цьому можуть бути виміряні:

- 1) пружні властивості металу, наприклад при пружному відскакуванні кульки;
- 2) опір малим пластичним деформаціям, тобто властивості, аналогічні межі текучості;
- 3) опір значним пластичним деформаціям, тобто властивість, аналогічна тимчасовому опору, вимірюваному у металів, що створюють шийку;
- 4) опір руйнуванню, наприклад, при випробуванні на твердість дряпанням, яке для більшості матеріалів є місцевим руйнуванням шляхом зрізу;
- 5) питома робота деформації;
- 6) анізотропія опору пластичної деформації.

Таким чином, фізична природа твердості визначається залежностями, що пов'язують її з характеристиками міцності й пластичності або руйнування.

Специфіка випробування на твердість полягає:

- 1) у місцевій дії на невелику частину поверхні тіла;
- 2) у малому об'ємі випробовуваного металу;
- 3) у невеликій частці розтягувальних напружень і подовжень порівняно з дотичними напруженнями і зрушеннями, що створюються в деформованому матеріалі.

Випробування на твердість правильніше було б називати місцевими механічними випробуваннями поверхневих шарів матеріалу.

Малий об'єм матеріалу, що деформується, можливість проводити випробування на поверхні тіл різної форми та розмірів і не користуватися спеціально виготовленими зразками роблять випробування на твердість незамінним виробничим методом масового випробування. Стовідсотковий контроль матеріалу зварних з'єднань, готових термічно і механічно оброблених деталей був би немислимим без випробувань на твердість, які внаслідок малості поверхневих пошкоджень є практично нешкідливими.

За широтою застосування випробування на твердість, особливо при кімнатній температурі, конкурують з найпоширенішими випробуваннями на статичне розтягування.

При вимірюванні твердості в поверхневому шарі зразка під індентором виникає складний напружений стан, близький до об'ємного стиснення (Рис. 10.1). Тому тут можливі отримання «пластичних» станів й оцінка твердості практично будь-яких, у тому числі й дуже крихких металевих матеріалів.

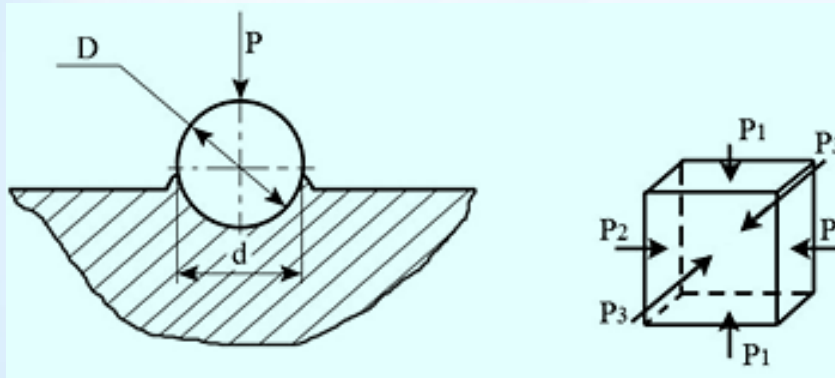


Рис. 10.1 – Схема напруженого стану в зоні пластичної деформації

Існуючі методи вимірювання твердості значно відрізняються один від одного за формою застосовуваного індентора, умовами прикладення навантаження і способом розрахунку чисел твердості.

Вибір методу визначення твердості залежить від різних факторів: твердості матеріалу зразка (деталі), його розмірів, товщини шару, твердість якого потрібно виміряти і т. д.

Способи визначення твердості ділять на статичні й динамічні – залежно від швидкості прикладення навантаження, а за способом її прикладення – на методи вдавлювання і дряпання. Найбільш поширені методи визначення твердості, в яких використовується статичне вдавлювання індентора нормально поверхні зразка.

У всіх методах випробування на твердість дуже важливо правильно підготувати поверхневий шар зразка. Всі поверхневі дефекти (окалина, вибоїни, вм'ятини, грубі риски і т. д.) повинні бути видалені. Вимоги до якості випробовуваної поверхні залежать від застосовуваного індентора і величини прикладеного навантаження. Чим менша глибина вдавлення індентора, тим вища повинна бути чистота поверхні й тим більш відповідально потрібно стежити за тим, щоб властивості поверхневого шару не змінилися внаслідок наклепу або розігрівання при шліфуванні й поліруванні.

Навантаження повинне подаватися по осі вдавлення індентора перпендикулярно до випробовуваної поверхні. Для дотримання цієї умови площина випробовуваної поверхні зразка повинна бути строго паралельна опорній поверхні. Неплоскі зразки кріплять на спеціальних опорних столиках, що входять до комплекту твердомірів.

Результати випробувань на твердість залежать від тривалості прикладення навантаження до вдавлення індентора і тривалості витримки під навантаженням. При постійному навантаженні P лінійний розмір відбитку

$$D = b \cdot \tau^n,$$

де τ – час витримки індентора під навантаженням; b , n – коефіцієнти, залежні, від властивостей матеріалу і величини P .

Залежно від τ розрізняють короткочасну і тривалу твердість. У стандартних методах визначають короткочасну твердість при кімнатній температурі. Тут, як правило, $\tau = 10 - 30$ с. Тривала твердість оцінюється при підвищених температурах і використовується як характеристика жароміцності матеріалу.

При визначенні твердості всіма методами (крім мікротвердості) вимірюють сумарний опір металу впровадженню в нього індентора, усереднююче твердість всіх наявних структурних складових. Відбиток, що виходить після зняття навантаження, повинен бути за розміром значно більшим за розміри зерен окремих структурних складових (діаметр або довжина діагоналі відбитків при вимірюванні твердості змінюється від 0,1 – 0,2 до декількох міліметрів).

10.2. Твердість при вдавлюванні

Найбільше поширення і практичне значення має твердість при пластичному вдавлюванні:

- а) кульки – твердість за Брінеллем і за Роквеллем, шкала В;
- б) конуса – твердість за Роквеллем, шкала С;
- в) піраміди – твердість за Віккерсом.

Вдавлення кульки. За міру твердості за Брінеллем (*НВ*) беруть середнє стискне напруження, обчислюване умовно на одиницю поверхні сферичного відбитка діаметром d . Вимірювання твердості за Брінеллем за наявності відповідного індентора може бути проведене на будь-якій випробувальній машині, придатній для створення і точного вимірювання стискних навантажень. Проте в більшості випадків застосовують спеціальні прилади.

Для усунення небезпеки продавлення зразка наскрізь або випинання країв випробовувані зразки для вимірювання твердості за Брінеллем повинні мати товщину не менше десятиразової глибини відбитку. Відстань від центра відбитка до краю зразка повинна бути не менше $2,5 d$. Відстань між центрами двох сусідніх відбитків повинна бути не менше $4 d$.

Діаметри застосовуваних кульок – $2,5$; $5,0$ і 10 мм. При випробуванні за Брінеллем навантаження зберігається постійним: для кульки діаметром 10 мм – 3000 кгс (30000Н), час витримки під навантаженням – 10 с, число твердості позначається *НВ*. Вплив тривалості витримки під навантаженням при 20 °С у металів на залізній основі невеликий. У м'якших, а особливо у легкоплавких металів (свинець, цинк, антифрикційні сплави), явище повзучості під постійним навантаженням виявляється значно сильніше. У таких матеріалів при кімнатній температурі час витримки під навантаженням доводиться збільшувати до 1 хв.

За інших умов вимірювання твердості для характеристики умов випробування необхідно наводити: діаметр кульки, навантаження і тривалість навантаження, що вказується, як правило, у вигляді дробу.

Наприклад: *HB 10/3000/30* означає випробування кулькою діаметром 10 мм під навантаженням 3000 кгс (30000 Н) протягом 30 с.

Із закону подібності виходить, що для отримання на одному і тому самому матеріалі порівнянних результатів при вимірюванні *HB* необхідно, щоб зберігалася сталим відношення $P/D^2 = \text{const}$ (де D – діаметр кульки). Цим визначається вибір навантажень при переході до іншого діаметра кульки.

Діаметр відбитка вимірюється за допомогою мікроскопів у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Незважаючи на надзвичайну простоту вимірювання, твердість при вдавлюванні кульки є досить складною механічною характеристикою. Перш за все, як це виходить уже з розрахунків за теорією пружності, напружений стан у матеріалі при вдавлюванні кульки неоднорідний і тому за величиною *HB* оцінюють деякий середній опір пластичній деформації. Із збільшенням навантаження P збільшується діаметр лунки, а отже, і поверхня відбитка F . Тому твердість $H = P/F$ одночасно зростає від збільшення P і спадає від збільшення поверхні відбитка F .

Як показують експерименти, збільшення P і збільшення F для багатьох металів спільномірні за величиною і тому для м'яких металів твердість HV у широкому інтервалі навантажень порівняно мало залежить від величини P і дає криву з дуже пологим максимумом (рис. 10.2).

Проте ця залежність у твердіших матеріалів виявляється значно різкіше (рис. 10.3). Правильніше відносити навантаження до площі проєкції відбитка.

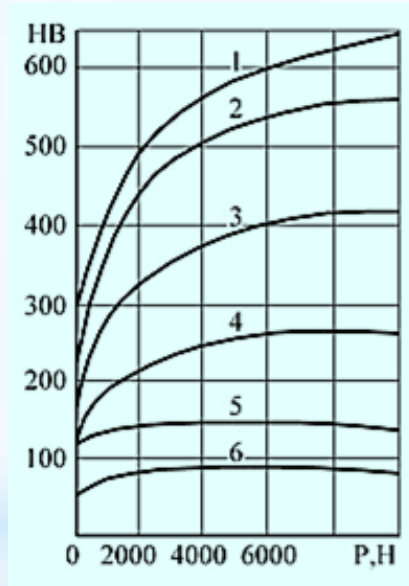


Рис. 10.2 – Залежність твердості HV від навантаження для: 1 – сталь X12M після гартування з 1060 °C; 2 – (те саме) після відпуску при 580 °C; 3 – те саме після відпуску при 600 °C; 4 – сталь U10 відпалена; 5 – сталь 10



Рис. 10.3 – Залежність твердості HV від навантаження: 1 – армко-залізо і дюралюміній; 2 – високохромистий сплав і сталь 35

Основний недолік методу Брінелля – відсутність геометричної ідентичності відбитків. Це призводить до невідповідності кількісного зіставлення чисел твердості різних матеріалів, отриманих при різних значеннях відношення d/D .

Твердість за Брінеллем нерідко вимірюють також при підвищених температурах для характеристик температурного коефіцієнта зміни опору пластичної деформації, а також для визначення тривалої твердості. Іноді при високих температурах застосовують кульки з твердого сплаву та інших високотвердих матеріалів.

Останнім часом випускають удосконалені прилади, в яких діаметр відбитка і відповідне йому число твердості зразу ж зазначають на спеціальній шкалі.

Щоб уникнути істотних помилок унаслідок деформації кульки способом Брінелля, як правило, випробовують метали з твердістю, що не перевищує 450 кгс/мм^2 (4500 МПа). Для випробування твердіших матеріалів потрібно застосовувати інші методи з використанням алмазних наконечників.

Вдавлювання конуса та піраміди. Розвиток серійного виробництва і масового контролю примусив прагнути до подальшого спрощення і прискорення випробувань на твердість. Для цього необхідно було усунути істотний недолік, властивий методу Брінелля, а саме величина НВ хоча і мало, але залежить від величини навантаження, що додає умовного характеру одержуваним результатам. При заміні кульки конусом або пірамідою усувається зазначений недолік. Твердість при вдавлюванні конуса може бути визначена як відношення навантаження до площі відбитка: $H_K = P / (\pi d^2 / 4)$, де d – діаметр відбитка.

Форма відбитка від удавлювання конуса не залежить від збільшення навантаження, а змінюється тільки величина відбитка, і тому згідно із законом подібності твердість H_K не залежить від величини навантаження, що підтверджується досвідом. Таким чином, твердість при вдавлюванні конуса при будь-яких навантаженнях відповідає одному, визначеному для кожного даного кута біля вершини конуса напруженню.

Співвідношення між H_K і σ_B більш стійкі, ніж між НВ і σ_B .

Для одного і того самого матеріалу значення H_K завжди приблизно на 10% більше, ніж величина НВ.

При цьому способі випробування навантаження додається послідовно, у дві стадії: попереднє навантаження, що дорівнює 10 кгс (100Н), та основне, яке дорівнює переважно 90 і 140 кгс (900 – 1400Н), залежно від вибору відповідних шкал приладу. Основне навантаження витримується до закінчення пластичної деформації, що триває декілька секунд. Після отримання відбитка основне навантаження плавно знімають (але попереднє навантаження залишається) і вимірюють залишкову глибину проникнення наконечника під дією основного навантаження. Таким чином, твердість характеризується різницею глибин, на які проникає наконечник під час прикладення і подальшого зняття основного навантаження.

Твердість за Роквеллем виражають в умовних одиницях, що характеризують глибину залишкового занурення наконечника. За одиницю твердості прийнята величина, відповідна осьовому переміщенню наконечника на 0,002 мм. Залежно від твердості випробовуваного матеріалу застосовують два типи наконечників: сталеву кульку діаметром $1,588 \text{ мм} \pm 0,001 \text{ мм}$ для вимірювання твердості при сумарному навантаженні 100 кгс (1000 Н) – шкала В, або алмазний конус із кутом біля вершини $120^\circ \pm 30'$ і радіусом закруглення біля вершини конуса $0,200 \pm 0,005 \text{ мм}$ для вимірювання твердості металів при сумарному навантаженні 150 кгс (1500 Н) – шкала С і 60 кгс (600 Н) – шкала А.

Товщина зразка повинна бути не менше десятиразової глибини відбитка.

При вдавлюванні конуса вимірюють так само, як і при вдавлюванні кульки та піраміди, опір значним пластичним деформаціям, і тому числа твердості HB і HRB, HRC і HV можна перелічувати, хоча залежність між HB і HRB і HRC нелінійна (рис. 10.4 а і б).

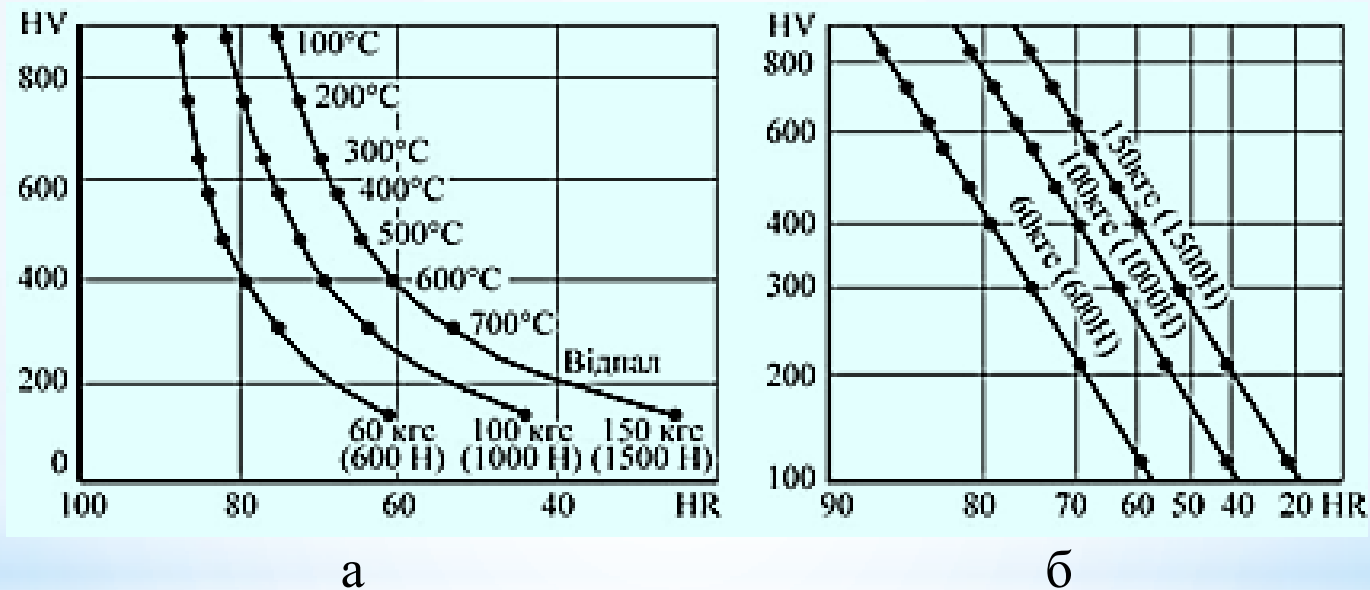


Рис. 10.4 – Залежність між твердістю, виміряною на приладі Роквелла з пірамідальним 136° алмазним наконечником, в одиницях шкали Роквелла і твердістю за Віккерсом для сталі ШХ15, відпущеної при різних температурах: а – в координатах HV – HR; б – та сама залежність у логарифмічних координатах

Вимірювання твердості за Віккерсом HV проводиться шляхом удавлювання правильної чотиригранної алмазної піраміди з кутом між протилежними гранями, що дорівнює 136° . Для цього випробування служить прилад, змонтований на одній станині зі спеціальним окуляр-мікрометром для вимірювання довжини діагоналі відбитка.

Поверхня для випробування повинна бути відполірованою, а для великих навантажень (30 – 100 кгс) і не дуже твердих матеріалів – добре відшліфованою. Твердість визначається розподілом навантаження P на площу бокової поверхні пірамідального відбитка з діагоналлю d :

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2} = 1,8544 \frac{P}{d^2}.$$

Досліди показують, що для сталей різної твердості та кольорових металів HV не змінюється при зміні навантаження від 5 до 100 кгс (50 – 1000 Н). Хоча HV практично не залежить від P , як правило, указують прикладене навантаження для того, щоб характеризувати глибину відбитка. Відстань між центрами відбитків повинна бути не менше ніж три довжини діагоналі і 2,5 до краю зразка.

При вимірюванні твердості за Віккерсом застосовують навантаження 5, 10, 20, 30, 50 і 100 кгс (50, 100, 200, 300, 500 і 1000 Н).

Внаслідок великого кута біля вершини піраміди малій глибині відбитка відповідає велика величина діагоналі відбитка $h/d = 1:7$. Це збільшує чутливість методу й робить його придатним для вивчення властивостей тонких поверхневих шарів металу при знеуглецюванні, поверхневому наклепі, хіміко-термічній обробці поверхні й т. п. При вимірюванні твердості азотованого або цементованого шару найчастіше застосовують навантаження 10 кгс (100 Н). У цьому разі за видом відбитка (наявність або відсутність крихких відколів) можна робити висновок про крихкість шару. Вдавлюванням піраміди при малих навантаженнях можна вимірювати твердість тонких листів завтовшки до 0,3 мм.

10.3. Інші способи визначення твердості

Твердість при дряпанні. При цьому методі поверхню випробовуваного матеріалу дряпають, як правило, алмазним вістрям. Багато мінералів, пластичних при вдавлюванні, дають при дряпанні крихке руйнування. Це свідчить про більшу жорсткість напруженого стану при дряпанні, ніж при вдавлюванні. Як правило, дряпання проводять алмазним конусом з кутом біля вершини 90° на спеціальному приладі.

Останнім часом знайшло застосування дряпання алмазною 136° пірамідою (ребром уперед) для випробування мікротвердості. Твердість дряпанням оцінюють за відношенням вертикального навантаження P до проекції контактної площини, що відповідає середньому контактному тиску

$$H = \frac{P}{d^2 / 4}, \text{ де } d - \text{ширина подряпини.}$$

Точно виміряти ширину подряпини внаслідок нерізких її країв важко, тому доводиться вимірювати ширину великого числа подряпин на кожному зразку. Твердість при дряпанні характеризує вже не опір пластичної деформації, а опір руйнуванню, оскільки при дряпанні відбувається місцеве руйнування. Встановлено, що твердість при дряпанні тісно пов'язана з опором зрізу. Твердість при дряпанні $H_{ц}$, обчислена як величина, обернена ширині подряпини при навантаженні на алмаз 50 г, найтісніше пов'язана з опором руйнуванню при розриві S_k . У більшості металів при дряпанні відбувається руйнування шляхом зрізу. Цим і пояснюються закономірності зміни $H_{ц}$ залежно від різних факторів: наприклад, від наклепу твердість НВ зростає, а твердість $H_{ц}$ не змінюється, що відповідає малій залежності від наклепу опору зрізу. Зі збільшенням твердості матеріалу твердість при дряпанні $H_{ц}$ зростає значно повільніше, ніж твердість при вдавлюванні НВ.

Вимірювання твердості дряпанням раніше застосовувалося головним чином під час вивчення мінералів. Тим часом можливість визначення опору руйнуванню і пов'язаних із ним характеристик щодо випробувань дуже малої ділянки поверхні становить великий практичний інтерес і під час вивчення металів. У зв'язку з цим, а також у зв'язку з великим практичним значенням оцінки анізотропії сплавів останнім часом метод дряпання дістав поширення і для металів. Якщо дряпання проводити не конусом 90° , а тупішим наконечником, наприклад алмазною 136° пірамідою, то може відбуватися не руйнування, а зминання матеріалу з видавлюванням подряпини. У таких випадках не повинно бути принципової відмінності від твердості при вдавлюванні.

Пружний відскок кульки – твердість за Шором. При цьому способі критерієм твердості служить висота пружного відскоку бойка, вагою q , падаючого на плиту з певної висоти H . Якщо робота удару бойка $W_0 = Hq$, а робота відскоку бойка $W_1 = hq$, то $W = W_0 - W_1 = (H - h)q$.

Чим більше W , тим менша твердість. Випробування проводять на спеціальних переносних приладах.

Шкала твердості в цих приладах HS вибрана умовно, так що висота відскоку бойка від поверхні дуже твердої загартованої на мартенсит високовуглецевої сталі прийнята за 100 одиниць.

Як правило, прилади забезпечують еталонами для тарування. Зразки для випробування повинні бути або достатньо масивні – приблизно 2 кг і більше, або дуже жорстко затиснені в опорі, інакше можливі значні помилки. На тонкі зразки великий вплив може чинити твердість опори: чим твердіший матеріал опори, тим більш твердим здається випробовуваний матеріал. Це є одним з недоліків методу пружного відскоку. В ідеально пружного тіла вся робота повертається бойку, отже, $H = h$; $W = 0$ і твердість максимальна. Чим нижчий опір пластичної деформації, тим більша поглинена матеріалом робота деформації, тобто менша твердість.

10.4. Визначення мікротвердості

Метод мікротвердості призначений для визначення твердості дуже малих об'ємів матеріалів (мікроскопічних); тонкої стрічки, дроту, тонких поверхневих шарів після шліфування, пластичної деформації (наклепу), окремих фаз і структурних складових після термічної або хіміко-термічної обробки. Метод мікротвердості стандартизований. Як індентор при вимірюванні мікротвердості використовують правильну чотиригранну алмазну піраміду з кутом біля вершини 136° , як і у разі визначення твердості за Віккерсом.

Ця піраміда плавно вдавлюється в зразок при навантаженнях від 0,5 до 50 Н. Число мікротвердості визначається за формулою

$$H_{\mu} = 1854 P/d^2 \text{ [МПа]},$$

де P – навантаження, Н; d – діагональ відбитка, мкм.

Число мікротвердості записують без розмірності, із зазначенням навантаження у грамах, наприклад $H_{10} - 300$; $H_{20} - 250$. Для визначення мікротвердості використовують стандартний прилад, що серійно випускається, – марки ПМТ-3.

Подібно макротвердості мікротвердість може бути визначена як при вдавлюванні, так і при дряпанні. Мікротвердість вимірюють на металографічних шліфах, виготовлених спеціальним способом. Глибина вдавлювання індентора при визначенні мікротвердості – $d/7$ – становить декілька мікронів.

При вимірюванні мікротвердості відстань між сусідніми відбитками повинна бути не менше двох довжин діагоналі більшого відбитка.

11. КОНСТРУКЦІЙНА МІЦНІСТЬ І МЕТОДИ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

11.1. Конструкційна міцність. Напрями забезпечення конструкційної міцності та критерії її оцінки

Реалізація прогресу в техніці супроводжується формуванням робочих процесів, підвищенням рівня напружень в елементах конструкцій при одночасному підвищенні вимог до забезпечення надійності і ресурсу створюваних виробів.

Виконання зростаючих вимог до ресурсу і надійності може бути досягнуто за рахунок розробки оптимальних конструкцій, усунення надлишкових запасів міцності, максимального використання можливостей матеріалів і технологій.

Забезпечення високої і стабільної конструкційної міцності – одне з напрямків вирішення проблеми.

Конструкційна міцність – це складне поняття, що вміщує як характеристики самого матеріалу, так і надійність і довговічність його роботи в реальній конструкції.

Структурна схема забезпечення конструкційної міцності приведена на рис. 11.1.

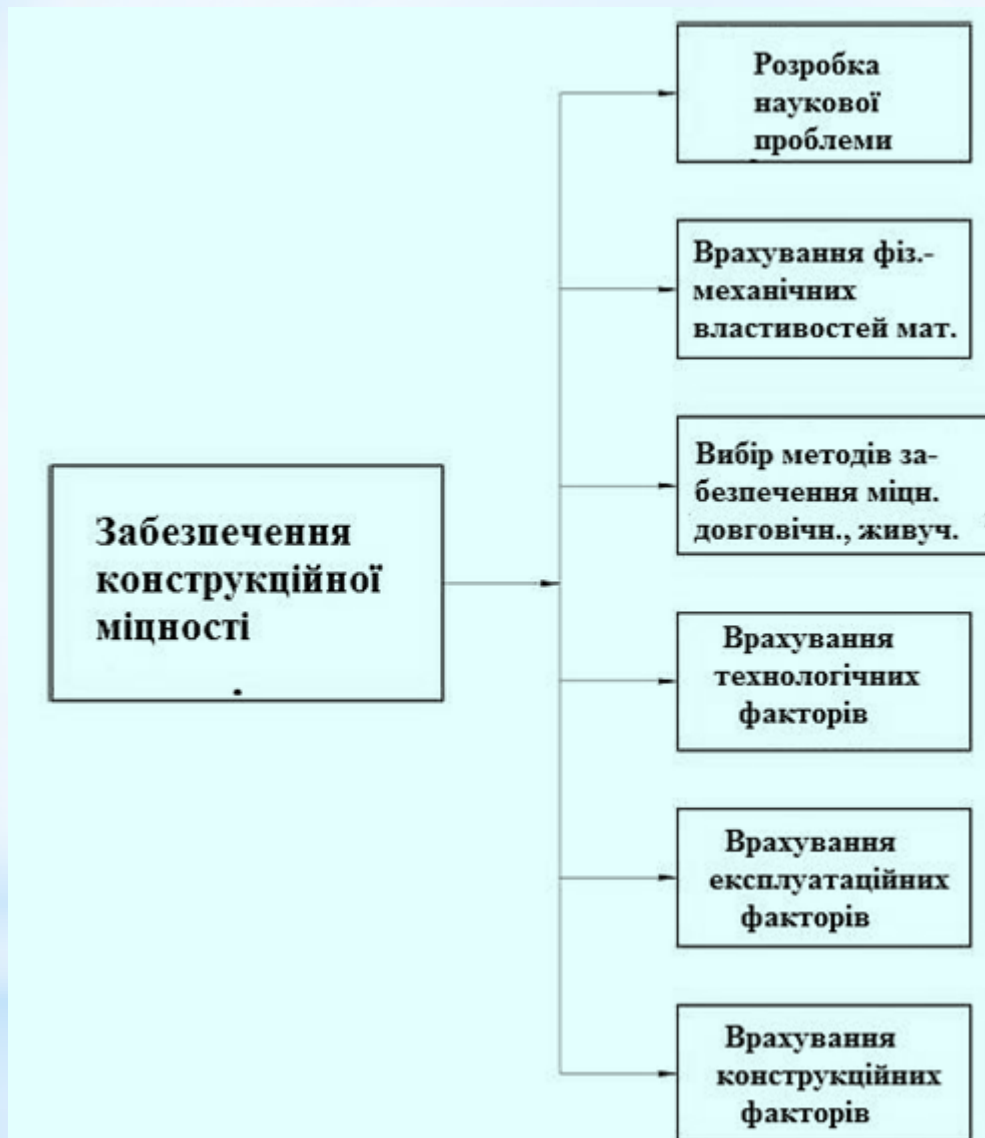


Рис. 11.1 – Структурна схема забезпечення конструкційної міцності

Допомогу при виборі критеріїв оцінки конструкційної міцності надають вивчення видів експлуатаційних руйнувань і зносу, систематичний статистичний облік відносної кількості різних відмов виробів у експлуатації. За наявності повної класифікації пошкоджень в експлуатації та отриманні на її основі інформації про основні, найчастіші причини виходу виробів з ладу можна з великою упевненістю вибрати ті види механічних випробувань, які якнайповніше відтворюють основні типи експлуатаційних руйнувань і, отже, можуть характеризувати конструктивну міцність матеріалу.

Численні критерії, що використовуються для оцінки конструктивної міцності сталі, базуються на визначенні властивостей металевих матеріалів. Оскільки металеві матеріали є одним із видів продукції, то при визначенні цих критеріїв потрібно виходити із загальних положень теорії надійності та якості продукції.

Надійність – це властивість виробу виконувати задані функції, зберігаючи свої експлуатаційні показники в заданих межах протягом необхідного проміжку часу або необхідного напруцювання. Надійність виробу обумовлюється його безвідмовністю, ремонтпридатністю, збереженістю, а також довговічністю його частин.

Довговічність – це властивість виробу зберігати працездатність до граничного стану з необхідними перервами для технічного обслуговування і ремонтів.

Граничний стан виробів визначається неможливістю його подальшої експлуатації з різних причин, обумовлених технічною документацією. З досягненням граничного стану виробу пов'язане і поняття **відмови** – події, що полягає у порушенні працездатності, ознаки якої також обумовлюються технічною документацією.

Показниками довговічності виробів служать напрацювання, ресурс і термін служби. **Термін служби** – календарна тривалість експлуатації виробу до моменту виникнення граничного стану (до ремонту, або списання), а **напрацювання** – тривалість або обсяг роботи виробу, вимірювані в будь-яких одиницях (кілометрах, циклах, кубометрах, тоннах, гектарах і т. д.). **Ресурс** – це напрацювання виробу до граничного стану, обумовленого в технічній документації.

Надійність виробу може бути оцінена як імовірність безвідмовної роботи, тобто ймовірність того, що в заданому інтервалі часу або в межах заданого напрацювання не виникає відмови виробу.

Усі показники надійності виробів є ймовірністю і тісно пов'язані один з іншим.

Наприклад, надійність шестерні коробки передач може бути оцінена таким чином: імовірність безвідмовної роботи шестерні після пробігу (напрацювання) 300000 км дорівнює 0,9. Це свідчить про те, що в процесі пробігу 300000 км у середньому 10% цих шестерень вийде з ладу через знос, контактні пошкодження або зломи зубів. Довговічність цих самих шестерень може бути охарактеризована таким чином: 90% ресурс шестерні дорівнює 300000 км.

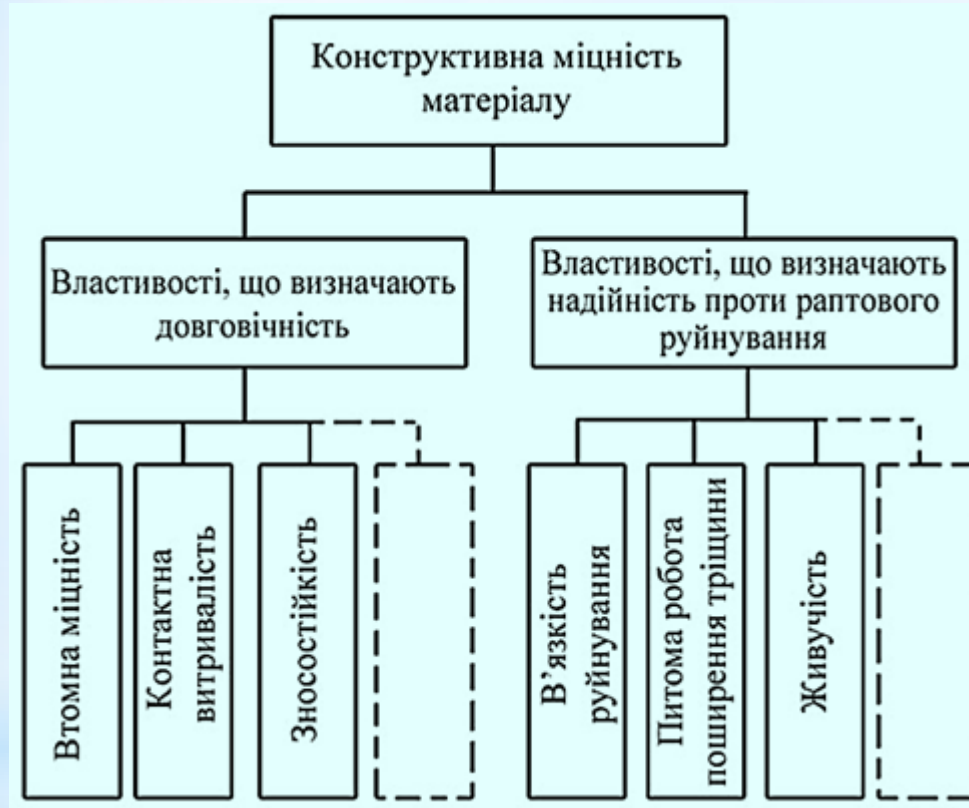
Надійність виробів визначається, з одного боку, властивостями самих виробів (конструктивними факторами, якістю збирання, зварювання, виготовлення, і т. д.) з іншого боку – властивостями матеріалу. Властивості матеріалів чинять вирішальний вплив на надійність виробів.

Визначення числових значень показників надійності виробів (імовірність безвідмовної роботи, середнього напрацювання, інтенсивності відмов) базується на збиранні й статистичній обробці інформації про потік кількості виробів у процесі експлуатації. Для металевих матеріалів такі показники, як надійність, довговічність, оцінюються до виготовлення з матеріалів яких-небудь виробів, на основі результатів лабораторних випробувань. Тому доцільно ввести поняття надійність, довговічність матеріалів як продуктів з урахуванням характеру експлуатаційних відмов виробів, виготовлених із цих матеріалів.

Усі експлуатаційні відмови можуть бути розділені на поступові й раптові. Поступові відмови – це відмови, при настанні яких вироби замінюються без загрози будь-яких аварійних наслідків. До поступових відмов належать різноманітні види зносу, корозійні й втомні пошкодження. Втомні руйнування можуть мати аварійні наслідки і виявлятися під час експлуатації як раптові тільки в тому разі, якщо не розроблена система контролю і дефектоскопіювання, яка повинна забезпечити надійне виявлення всіх виниклих втомних тріщин на тій стадії їх розвитку, на якій втомна тріщина не досягла критичного розміру і не призвела до раптового руйнування. Те саме стосується до руйнувань деталей, що працюють в умовах повзучості.

До раптових відмов металевих виробів в експлуатації відносять крихкі руйнування, які відбуваються при напруженнях, менших від розрахункових, визначених по межі текучості. Ймовірність крихких руйнувань, що виникають раптово і не піддаються якому-небудь прогнозуванню, контролю і попередньому дефектоскопіюванню, різко збільшуються зі зниженням температури експлуатації, підвищенням швидкості навантаження і наявністю в виробках концентраторів напружень. Крихкі руйнування різних деталей і конструкцій часто спричиняють аварійні наслідки і повинні бути виключені шляхом застосування матеріалів, що володіють достатньо високим опором крихкому руйнуванню.

Критерії, що використовуються для оцінки конструктивної міцності металевих матеріалів, можна розділити на дві групи (рис. 11.2).



До першої відносять ті властивості матеріалів, які чинять вирішальний вплив на довговічність виробів (втомна міцність, витривалість, зносостійкість і т. д.), до другої – властивості, що визначають надійність матеріалів проти раптових руйнувань (в'язкість руйнування, робота, поглинальна при поширенні тріщини, живучість та ін.).

Рис.11.2 – Класифікація критеріїв, використовуваних для оцінки конструктивної міцності сталі

11.2. Параметри довговічності металів

Основним параметром, що характеризує опір металу втомному руйнуванню, є межа витривалості, що визначається за наслідками випробування на втому десяти зразків.

Для оцінки втомної міцності використовують криву втоми з достатньо достовірною побудовою її гілки, що обмежує область циклічного руйнування. Залежно від завдань дослідження доцільно будувати або усереднену криву втоми, або сім'ю кривих втоми для різної ймовірності руйнування.

Випробування надрізаних зразків дозволяють оцінити не тільки втомну міцність за наявності концентраторів напружень, але і її чутливість до концентрації напружень, тобто здатність металу реагувати на складність форми виробу або наявність внутрішніх концентраторів напружень. **Чутливість** металу до надрізу при циклічному навантаженні найчастіше оцінюється коефіцієнтом

$$q = \frac{K_{\sigma} - 1}{\alpha_{\kappa} - 1},$$

де K_{σ} – ефективний коефіцієнт концентрації напружень, $K_{\sigma} = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1\kappa}}$,

α_{κ} – коефіцієнт концентрації напружень, визначуваний аналітичним шляхом або спеціальними експериментами.

Контактно-втомна міцність визначає довговічність металу (сталі), з якого виготовляють підшипники, рейки, колеса, а також різноманітні котки, бігунки, фрикційні варіатори та інші деталі, що виходять з ладу. Процес контактної втоми, крім ознак, характерних для будь-якого виду втоми (руйнування у результаті утворення і поступового розвитку тріщин, наявність у деяких випадках фізичної межі втоми, однакового впливу концентрації напружень, такої самої залежності довговічності від навантаження), має і деякі специфічні фактори. До них належать напружений стан при контактному навантаженні, значна пластична деформація поверхневого шару, явища тертя і зносу, що проходять паралельно контактній втомі, а також поступовий характер відмов, що призводить до деякої умовності критерію руйнування.

Для напруженого стану при контактному навантаженні характерні об'ємність, неоднорідність із великим градієнтом зміни напружень по глибині, а також велика м'якість. М'якість, пов'язана з великим значенням відношення дотичних напружень до нормальних розтягувальних напружень. Це дозволяє деформуватися і тим матеріалам, які за звичайних жорсткіших умов навантаження не можуть пластично деформуватися. Високий градієнт зміни напружень по глибині призводить до поширення пластичної деформації при контактному навантаженні на невелику глибину.

Контактно-втомна міцність залежить від прослизання: спочатку знижується з його зростанням, а потім збільшується. Зниження контактно-втомної міцності при збільшенні прослизання пов'язане з підвищенням дотичних напружень під дією сили тертя, що зростає, яка мінімальна при коченні й різко зростає за наявності ковзання. Наявність сили тертя в контакті є причиною зниження контактно-втомної міцності відстаючих поверхонь у порівнянні з випереджаючими. Ці особливості явищ контактно-втомної міцності, а також вплив другої контактуючої поверхні, перерви в роботі, шорсткості поверхні й масштабний фактор повинні враховуватися методикою випробувань на контактно-втому, розрахунками контактно-втомної міцності й усіма дослідженнями контактно-втомної міцності матеріалів. Необхідно мати на увазі, що для правильного моделювання явищ, що проходять у місцях реального контакту деталей машин, на зразках-роликах необхідно добитись аналогії за кінематичними і геометричними параметрами навантажень.

У міжгалузевій методиці за основну характеристику контактно-втомної міцності матеріалу прийнята фізична або обмежена межа контактно-втомної витривалості σ_k , під якою розуміють максимальне нормальне напруження циклу σ_{\max} (обчислене за формулами теорії пружності), при якому не спостерігається руйнування поверхневих шарів випробовуваного матеріалу при даній базі випробування.

На основі аналізу великого числа кривих контактної втоми вибрана така база для визначення межі контактної витривалості: $5 \cdot 10^7$ циклів для сталей і сплавів, що мають горизонтальну ділянку на кривих контактної втоми, і $2 \cdot 10^8$ циклів для матеріалів, що не мають горизонтальної ділянки на кривих. У разі порівняльних випробувань допускається зменшувати базу відповідно до 10^7 і $5 \cdot 10^7$ циклів. Для зіставності результатів випробувань у методиці прийняті єдині критерії руйнування. При всіх видах кочення критерієм руйнування є початок прогресуючого викришування, яке згодом може призвести до утворення викришувань по всій поверхні. Важливою вимогою методики є збереження постійності контактних напружень у процесі випробувань. Тому методика може бути застосована до металів і сплавів, що мають твердість не менше HB 250, у яких у процесі контактного навантаження не відбувається помітної макропластичної деформації в зоні контакту, що призводить до сильної зміни форми поверхні.

Опір матеріалу утворенню поверхневих викришувань дуже чутливий до навіть невеликих змін у структурі металу та його якості. Випробування металів і сплавів на контактну міцність не можуть бути замінені іншими випробуваннями, оскільки дають найважливішу інформацію про матеріали, що працюють в умовах контактного навантаження і необхідні для дослідження найраціональніших шляхів підвищення контактної-втомної міцності.

Зносостійкість. Різноманітні види зношування, стирання і змінання поверхні деталей машин є поширеними причинами виходу їх із ладу і лімітують таким чином їх довговічність. Характер і механізм зносу дуже різняться не тільки у різних деталей, але і навіть одних і тих самих деталей, що працюють у різних умовах. Оскільки зносостійкість пов'язана з проявом не одного, а декількох властивостей у певних умовах тертя, тому неможливо створити єдиний спосіб випробування на знос усіх матеріалів, призначених для виготовлення деталей, що працювали в різних умовах. При лабораторних випробуваннях матеріалів на знос потрібно відтворювати не весь комплекс експлуатаційних умов роботи матеріалу, а тільки типові умови, які вважаються істотнішими для прояву виду зносу, що вивчається.

Необхідне і можливе спрощення випробувань за умови, що будуть відібрані й відтворені головні, визначальні фактори, від яких залежить довговічність виробів (особливості навантаження, напружений стан, температура, середовище і т. д.).

З викладеного виходить, що:

1) схема навантаження, форма зразків й інші особливості методики повинні бути простими і повинні дозволити одержати той самий механізм зносу, що й в експлуатації;

2) матеріали, види обробок при лабораторних та експлуатаційних випробуваннях повинні розміщуватися в однаковий ранговий ряд за зростанням опору зносу.

11.3. Параметри надійності та методи їх визначення

В'язкість руйнування. Останнім часом механічні випробування не обмежується тільки параметрами, що використовуються для оцінки довговічності, але і поширюється на оцінку надійності матеріалу в експлуатації. Це дозволяє забезпечити необхідну надійність виробів проти крихкого руйнування, не вдаючись до необґрунтованого збільшення ваги або додаткових витрат на підвищення якості металу.

Випадки руйнування конструкцій, що відбуваються внаслідок катастрофічного поширення тріщин при напруженнях нижчих за межу текучості, стали траплятися частіше у зв'язку з використанням нових високоміцних матеріалів, збільшенням розмірів і ускладненням умов роботи конструкцій. Подібні руйнування показують недостатність класичних розрахунків на міцність і необхідність введення в розрахунки локальних характеристик опору матеріалів руйнуванню.

Процес руйнування складається із стадії виникнення тріщини, зростання її до критичного розміру і швидкого просування тріщини за рахунок накопичення енергії в матеріалі внаслідок пружної деформації.

Центральне місце серед цих критеріїв займає в'язкість руйнування, що характеризується коефіцієнтом інтенсивності напружень в умовах плоскої деформації при об'ємному напруженому стані K_{Ic} (індекс I означає, що коефіцієнт визначається при руйнуванні шляхом відриву, а індекс c – що відрив відбувається у момент досягнення тріщиною критичних розмірів).

Розроблені Ж. Ірвіним положення механіки руйнування дозволяють оцінити вплив тріщин на конструктивну міцність матеріалів з погляду опору їх крихкому руйнуванню. Ці положення випливали з робіт А. Гріффітса, який показав, що крихке руйнування обумовлене наявністю тріщин, що викликають локальну концентрацію напружень, і відбувається за рахунок енергії, накопиченої в матеріалі внаслідок пружної деформації. Енергія пружної деформації в об'ємі, прилеглому до тріщини, витрачається на збільшення вільної поверхневої енергії поверхонь розділу, що знов утворилися, внаслідок зростання довжини тріщини і на локальну пластичну деформацію, що відбувається поблизу крихкої тріщини. Найбільший вплив на поширення крихкої тріщини чинить різке підвищення напружень поблизу її вершини. Згідно з Ірвіним явища, що відбуваються біля вершини тріщини, можуть бути описані за допомогою коефіцієнта K , локального підвищення пружних напружень біля вершини тріщини, і параметра G , що характеризує силу, необхідну для збільшення тріщини, що є функцією на одиницю довжини.

Параметри K_c (K_{Ic}) і G_c (G_{Ic}) однозначно зв'язані між собою такими залежностями:

$$G_c = \frac{K_c^2}{E}; \quad G_{Ic} = \frac{1-\mu^2}{E} K_{Ic}^2,$$

де μ – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності.

Найбільше значення для крихкого руйнування має зсув поверхонь тріщин під дією розтягувальних напружень. При досить великій товщині зразка руйнування відбувається в умовах плоскої деформації, процеси перебігу пластичної деформації пригнічені максимально, і внаслідок руйнування виходить плоский злам (рис. 11.3, г).

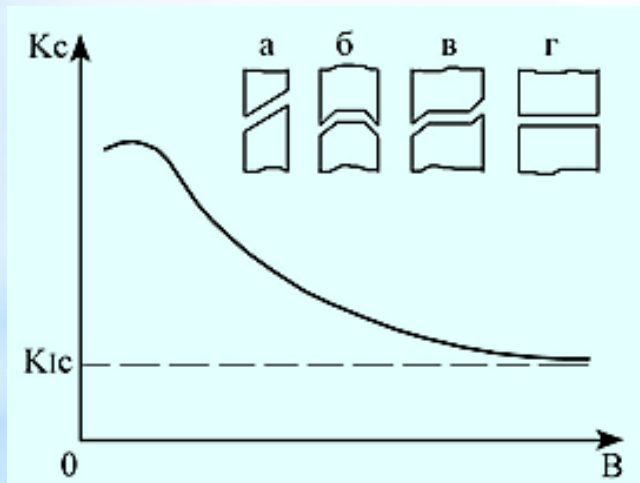


Рис.11.3 – Залежність в'язкості руйнування K_c і форми зламу від товщини зразка B

При випробуванні такого зразка параметри G_{Ic} і K_{Ic} можна розрахувати. При зменшенні товщини зразка ступінь стиснення пластичної деформації в зовнішніх шарах зменшується, а зона перебігу пластичної деформації зростає. При цьому внаслідок руйнування одержують злам, де разом із плоскими ділянками є більш-менш значні губи зрізу (б, в).

Подальше зменшення товщини зразка за умови досить високої в'язкості руйнування матеріалу призводить до значного зростання губ зрізу, внаслідок чого косий злам, що утворюється при зрушенні, поширюється на всю поверхню руйнування (рис.11.3, а). Подібне руйнування відбувається в умовах плоского напруженого стану, і за наслідками випробувань таких зразків можуть бути визначені параметри G_c і K_c .

Необхідно мати на увазі, що для оцінки опору матеріалів крихкому руйнуванню частіше використовують параметри в'язкості руйнування в умовах плоскої деформації (K_{Ic}, G_{Ic}), а не при плоскому напруженому стані коли руйнування відбувається шляхом змішаного або тільки косоного зламу при істотному докритичному підростанні тріщини.

При визначенні в'язкості руйнування для випробування на розтягування можна використовувати зразки із центральною тріщиною, з однією боковою і з двома боковими тріщинами (рис. 11.4). Основними розмірами зразка є довжина тріщини l , товщина t і ширина перерізу ($b - l$).

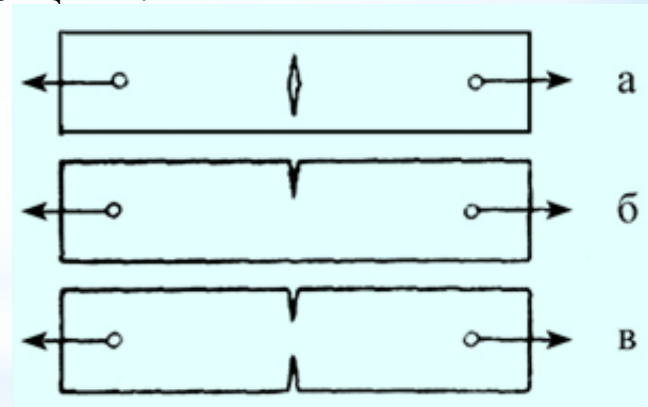


Рис. 11.4 – Зразки для визначення в'язкості руйнування: а – центральна тріщина; б – бокова тріщина; в – дві бокові тріщини

Випробування на в'язкість руйнування дають достовірні результати лише за умови , що форма і розміри зразків задовольняють певним обмеженням. Вимоги до мінімально допустимих розмірів зразків для визначення в'язкості руйнування впливають з того, що коефіцієнт інтенсивності напружень в умовах плоскої деформації K_{Ic} може бути визначений тільки при достатньому ступені пригнічення пластичної деформації. Можливість використання коефіцієнта K_{Ic} як параметра, що визначає процес руйнування, тим більша, чим менш пластично деформована зона біля вершини тріщини порівнянно з розмірами зразка і тріщини. Оскільки розміри пластично деформованої зони визначаються параметром $(K_{Ic}/\sigma_{0,2})^2$, де $\sigma_{0,2}$ – межа текучості при одновісному розтягуванні, то щодо цього параметра і встановлюють мінімально допустимі розміри зразків для визначення в'язкості руйнування. Раніше вважалось, що розміри зразка достатні, якщо відношення номінальної міцності в перетині σ_n до межі текучості $\sigma_{0,2}$ не перевищує деякого певного значення. Для зразків із центральним прорізом або двома боковими надрізами, випробовуваних на розтягування, для оцінки K_{Ic} повинне виконуватися таке співвідношення: $\sigma_n \leq 0,8 \sigma_{0,2}$. Для зразків з одним боковим надрізом, випробовуваних на згин або розтягування, було прийняте $\sigma_n \leq \sigma_{0,2}$.

Для правильного визначення коефіцієнта K_{Ic} рекомендовані такі співвідношення розмірів зразків:

$$l \geq 2,5(K_{Ic} / \sigma_{0,2})^2; \quad t \geq 2,5(K_{Ic} / \sigma_{0,2})^2.$$

При випробуванні на в'язкість руйнування важливо, щоб випробувальна машина мала електричний пристрій для вимірювання навантаження з точністю $\pm 1\%$ з тим, щоб записувати діаграму «навантаження – зрушення» на двокоординатному самописці. Зрушення вимірюють на базі, що не перевищує 15 мм між точками, розміщеними у кінці надрізу на різних його сторонах. Для цього використовують тензодатчики, наклеєні на пружні елементи, які деформуються при розкритті вихідного надрізу з тріщиною. При випробуванні автоматично реєструється зміна розкриття тріщини (зрушення) залежно від навантаження. Коефіцієнт K_{Ic} обчислюють при навантаженні, відповідному початку нестабільного розвитку тріщини. Під час випробування будують діаграму навантаження-зрушення, за якою знаходять необхідне навантаження. В'язкість руйнування при плоскій деформації можна обчислити за наведеними нижче формулами, виведеними з аналізу напружень поблизу вершини тріщини в зразках даного типу.

Величину K_{Ic} розраховують за такими формулами:

для плоского зразка з одним боковим надрізом при зосередженому згині на двох опорах (відстань між ними $2L = 4b$):

$$K_{Ic} = \frac{P_Q V_1}{tb^{1/2}}, \quad V_1 = 1,93 \left(\frac{l}{b}\right)^{1/2} - 3,07 \left(\frac{l}{b}\right)^{3/2} + 14,53 \left(\frac{l}{b}\right)^{5/2} - 25,11 \left(\frac{l}{b}\right)^{7/2} + 25,80 \left(\frac{l}{b}\right)^{9/2};$$

для прямокутного зразка з боковим надрізом при позацентровому розтягуванні:

$$K_{Ic} = \frac{P_Q V_2}{tb^{1/2}}, \quad V_2 = 29,6 \left(\frac{l}{b}\right)^{1/2} - 185,5 \left(\frac{l}{b}\right)^{3/2} + 655,7 \left(\frac{l}{b}\right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{l}{b}\right)^{7/2} + 638,9 \left(\frac{l}{b}\right)^{9/2}.$$

Набуті значення коефіцієнтів в'язкості руйнування можуть бути використані не тільки для розміщення у ряд порівнюваних варіантів, але і для розрахунків елементів конструкцій, що містять тріщину відомих розмірів, при якій ще не відбувається крихкого руйнування цього елемента.

При оцінці міцності, що проводиться на основі коефіцієнта K_{Ic} , передбачається високий ступінь стиснення пластичної деформації біля вершини тріщини в умовах об'ємного напруженого стану. Коефіцієнт в'язкості руйнування матеріалу при даній температурі не може бути менше коефіцієнта K_{Ic} , визначеного в умовах тривісного розтягування. Тому коефіцієнт K_{Ic} можна розглядати як основний, певною мірою «страхувальний» показник в'язкості, властивий матеріалу.

Якщо коефіцієнт K_{Ic} для даного матеріалу відомий, можна розв'язати дві задачі:

1) визначити допустимі робочі напруження з урахуванням наявності можливих дефектів або тріщин;

2) передбачити критичну довжину тріщини (і відповідно максимальний безпечний розмір дефекту), яка може викликати крихке руйнування при заданому рівні напружень.

Розв'язання останньої задачі має велике значення для вибору найкращої системи дефектоскопії та оглядів виробів, що експлуатуються, оскільки мінімальний розмір тріщини, що знаходиться неруйнуючим методом контролю, повинен бути істотно меншим за критичний розмір тріщини.

11.4. Розкриття тріщини. Оцінка в'язкості руйнування пластичних матеріалів

Для пластичних і в'язких матеріалів, у яких не вдається достатньо коректно визначити значення K_{Ic} , розроблена ще одна локальна характеристика опору матеріалу руйнуванню – критичне розкриття тріщини δ_c . Критерій руйнування при цьому формулюється таким чином: ***граничний стан настає, коли виконується умова $\delta \geq \delta_c$*** , де δ – відстань між поверхнями тріщини біля її вершини (розкриття тріщини); δ_c – критичне розкриття тріщини, при якому починається зростання тріщини.

На відміну від коефіцієнтів K_{Ic} і K_c (G_{Ic} і G_c), які є силовими критеріями руйнування, параметр δ_c є деформаційним критерієм, який можна розглядати як локальну пластичність особливих точок зразка з тріщиною. Таким чином, величина δ_c передбачає наявність зони пластичної деформації біля вершини тріщини, що має форму вузького клину з шириною, що не перевищує товщини матеріалу. Характер руйнування (прямий або косий злам) не впливає на визначення величини δ_c . Це пояснюється тим, що величина критичного розкриття визначається на початковій тріщині до початку її просування. Величина δ_c на відміну від параметра K_{Ic} не є константою матеріалу. Вона залежить не тільки від температури і швидкості навантаження, але і від товщини зразка.

Експериментально критичне розкриття тріщини визначають шляхом точного вимірювання відносного зміщення Δ_c у процесі згинального навантаження двох зручних для вимірювання точок зразка, розміщених по обидві сторони від попередньо вирощеної в гострому надрізі втомної тріщини. За значенням Δ_c визначають величину істинного розкриття тріщини біля її вершини δ_c , припускаючи, що тріщина розкривається шарнірним поворотом матеріалу навколо осі, що проходить через середину висоти непошкодженої частини перетину.

Точність визначення δ_c , як правило, невелика, проте вона достатня для порівняльної оцінки матеріалів.

Перевага параметра δ_c перед коефіцієнтами K_{Ic} і K_c полягає у тому, що він може бути визначений для ширшого кола матеріалів і розмірів зразків. Незважаючи на те, що локальна пластичність біля вершини тріщини не може повністю характеризувати надійність матеріалу, критичне розкриття тріщин є однією з корисних характеристик, використовуваних у поєднанні з іншими для комплексної оцінки надійності пластичних матеріалів. Цей критерій найбільш доцільно використовувати для оцінки схильності до крихкого руйнування тих матеріалів, які руйнуються після проходження деякої загальної пластичної деформації (не дуже значної), відповідно ділянці AA' на кривій деформації (рис. 11.5).



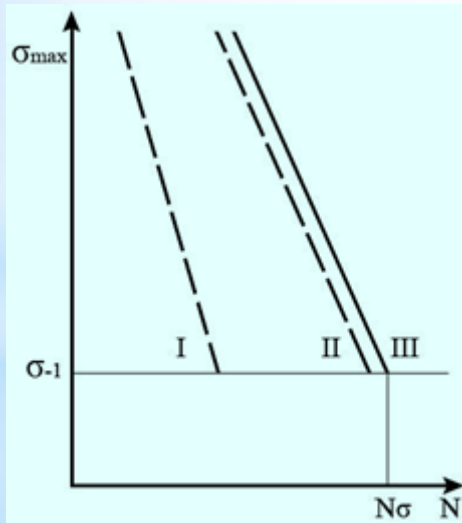
Рис. 11.5 – Области використання критеріїв K_{Ic} і критичного розкриття тріщини

Однією з головних переваг методу визначення критичного розкриття тріщин є можливість прогнозувати поведінку матеріалу в конструкції, де за заданих умов навантаження руйнування відбувається при тому самому критичному розкритті тріщин, що і в лабораторних зразках аналогічної товщини.

11.5. Поняття про живучість матеріалу

Криві втоми характеризують стадію руйнування і не відображають процеси, передуючі руйнуванню. Більш показова узагальнена діаграма втоми (рис. 11.6). Вона містить додаткові лінії (штрихові), що виділяють у процесах втоми три стадії.

Узагальнена діаграма дозволяє встановити додаткові критерії витривалості. З них найважливіше значення має живучість, що визначається швидкістю росту тріщини втоми (СРТУ). Живучість характеризує здатність матеріалу працювати в пошкодженому стані після утворення тріщини (в області II на рис. 11.6).



Живучість (СРТУ) – критерій надійності матеріалу. За його допомогою прогнозують працездатність деталі, розраховану на циклічну міцність за обмеженою межею витривалості. При високій живучості (малій СРТУ) можна своєчасно шляхом дефектоскопії знайти тріщину, замінити деталь і забезпечити безаварійну роботу.

Рис. 11.6 – Узагальнена діаграма втомного руйнування: I – стадія поступового накопичення пошкоджень до виникнення тріщини втоми; II – стадія поширення тріщини; III – стадія долому

Циклічна довговічність і міцність залежать від великого числа факторів, з яких вирішальне значення мають структура і напружений стан поверхневого шару, якість поверхні та дія корозійного середовища. Наявність на поверхні залишкових напружень стиснення перешкоджає утворенню і розвитку тріщин втоми і, як наслідок, сприяє збільшенню межі витривалості. Різко негативний вплив роблять напруження розтягування і численні концентратори напружень:

- конструктивні – зміна форми перетину деталі: галтелі, отвори, канавки, проточки і т. п.;
- технологічні – мікронерівності поверхні, риски та інші сліди механічної обробки;
- металургійні – внутрішні дефекти у вигляді пор, раковин, неметалічних включень (оксидів, сульфідів, силікатів та ін.).

Довговічність деталей, що працюють при високих температурах (деталі енергетичних установок, реактивних двигунів), визначається швидкістю повзучості – швидкістю розвитку пластичної деформації при постійному (нижчий за межу текучості) напруженні. Обмеження швидкості повзучості досягається застосуванням жароміцних матеріалів.

Таким чином, працездатність матеріалу деталі в умовах експлуатації характеризують такі критерії конструкційної міцності:

- 1) критерії міцності σ_B , $\sigma_{0,2}$, σ_{-1} , які при заданому запасі міцності визначають допустимі робочі напруження, масу і розміри деталей;
- 2) модуль пружності E , який при заданій геометрії деталі визначає величину пружних деформацій, тобто її жорсткість;
- 3) пластичність δ , ψ , ударна в'язкість КСТ, КСV, КСУ, в'язкість руйнування K_{1c} , температурний поріг холодноламкості T_{50} , які оцінюють надійність матеріалу в експлуатації;
- 4) циклічна довговічність, швидкості зношування, повзучість, корозійна стійкість, що визначають довговічність матеріалу.

11.6. Методи підвищення конструкційної працездатності

Висока міцність і довговічність конструкцій при мінімальній масі й найбільшій надійності досягаються технологічними, металургійними та конструкторськими методами.

Найбільшу ефективність мають технологічні й металургійні методи, мета яких – підвищення механічних властивостей і якості матеріалу.

З механічних властивостей найважливіші – міцність матеріалу, підвищення якої при достатньому запасі пластичності й в'язкості приводить до зниження матеріаломісткості конструкції і до певної міри до підвищення її надійності та довговічності.

Рівень міцності (опір пластичної деформації) залежить головним чином від легкості переміщення дислокацій. У зв'язку з цим сучасні методи підвищення міцності матеріалу базуються на створенні такого структурного стану, який забезпечував би максимальну затримку (блокування) дислокацій. До методів зміцнення належать легування, пластична деформація, термічна, термомеханічна і хіміко-термічна обробки. Підвищення міцності методами зміцнення ґрунтується на ряді структурних факторів.

1. *Збільшення щільності дислокацій.* Силкові поля навколо дислокацій є ефективними бар'єрами для інших близько розміщених дислокацій. У зв'язку з цим чим більша щільність дислокацій, тим вищий опір пластичній деформації.

Доцільно збільшувати щільність дислокацій до 10^{12} см⁻². При більшому значенні через нерівномірний розподіл структурних дефектів окремі об'єми матеріалу пересичуються дислокаціями. Це викликає порушення суцільності у вигляді субмікроскопічних тріщин і зниження міцності.

2. *Створення бар'єрів дислокацій* у вигляді меж зерен, субзерен, дисперсних частинок вторинних фаз. Подібні перешкоди на шляху руху дислокацій вимагають додаткового підвищення напруження для їх просування і тим самим сприяють зміцненню.

Роль ефективного бар'єра виконують межі зерен і субзерен (блоків мозаїки). Ковзаюча дислокація вимушена зупинитися біля цих меж, оскільки в сусідніх зернах (субзернах) площина ковзання має іншу орієнтацію.

Важлива особливість цього фактора зміцнення полягає у тому, що подрібнення зерна супроводжується підвищенням ударної в'язкості. Пояснюється це зменшенням розмірів зародкових тріщин і утрудненням їх розвитку. Тріщина вимушена змінювати напрям руху при переході від одного зерна до іншого; в результаті її траєкторія і опір руху збільшуються.

3. *Утворення полів пружних напружень*, що спотворюють кристалічні ґратки. Такі поля утворюються поблизу точкових дефектів (вакансій), домішкових атомів і атомів легуючих елементів.

Зміцнення при легуванні зростає пропорційно концентрації легуючого елемента у твердому розчині й відносної різниці атомних радіусів компонентів. Атоми проникнення (C, O, N, N) можуть вносити великий внесок у зміцнення, якщо вони скупчуються на дислокаціях і блокують їх.

Комбінацією різних структурних факторів зміцнення можна значно підвищити характеристики міцності (σ_B , σ_T , НВ, σ_{-1}). Проте міцність, що досягається, залишається все ж таки значно нижчою за теоретичну. Разом з тим підвищення міцності, що базується на зменшенні рухливості дислокацій, супроводжується зниженням пластичності, в'язкості й тим самим надійності.

Задані міцність, надійність, довговічність досягаються формуванням певного структурного стану. Він повинен поєднувати ефективно гальмування дислокацій з їх рівномірним розподілом в об'ємі матеріалу або, що особливо сприятливе, допускати певну рухливість дислокацій, що скупчуються біля бар'єрів. Ці вимоги виходять з того, що крихке руйнування ініціюють скупчення дислокацій критичної щільності, наприклад біля непроникних бар'єрів, де виникають небезпечні локальні напруження. Їх релаксація йде двома шляхами:

- 1) утворенням зародка крихкої тріщини;
- 2) проривом і естафетною передачею дислокацій у суміжні області.

Формуванню сприятливої структури і забезпеченню надійності сприяють раціональне легування, подрібнення зерна, підвищення металургійної якості.

Раціональне легування передбачає введення у сплави декількох елементів при невисокій концентрації кожного з них, щоб підвищити пластичність і в'язкість. Подрібнення зерна здійснюється легуванням і термічною обробкою, особливо при використанні високошвидкісних способів нагрівання – індукційного і лазерного.

Найефективніше подрібнення субструктури досягається при високотемпературній термомеханічній обробці (ВТМО). У субструктурі, що утворюється, дислокації зв'язані в стабільні конфігурації, а субмежі відіграють роль напівпроникних бар'єрів. У результаті ВТМО забезпечує найсприятливіше поєднання високої міцності з підвищеною пластичністю, в'язкістю й опором руйнуванню.

Надійній роботі деталей сприяє підвищення чистоти металу. Підвищення чистоти сталі пов'язане з видаленням шкідливих домішок – сірки, фосфору, газоподібних елементів – кисню, водню, азоту і залежних від їх вмісту неметалічних включень-оксидів, сульфідів та ін. Неметалічні включення, сірку і газоподібні домішки видаляють з металу у процесі переплавки. При однаковій міцності чистіший метал володіє вищим опором в'язкому руйнуванню і нижчим порогом холодноламкості.

Для підвищення циклічної міцності й зносостійкості важливо утруднити деформацію матеріалу поверхні деталей. Це досягається технологічними методами поверхневого зміцнення: поверхневим гартуванням, хіміко-термічною обробкою (азотуванням, цементацією), поверхневою пластичною деформацією (дробоструменевою обробкою, обкаткою роликками).

Конструкторські методи передбачають забезпечення рівномірності високонавантажених деталей. При їх проектуванні уникають різких перепадів жорсткості, глибоких канавок, галтелей малого радіуса та інших конструктивних надрізів. Якщо цього уникнути не можна, то для пом'якшення концентрації напружень застосовують місцеве зміцнення для формування залишкових напружень стиснення.

Розглянуті вище технологічні й металургійні методи підвищення конструкційної міцності сталей і сплавів передбачають:

- 1) методи зміцнення, що викликають збільшення щільності дислокацій і зменшення їх рухливості;
- 2) методи забезпечення необхідного запасу пластичності й в'язкості, що передбачають більш рівномірний розподіл дислокацій, а також очищення від окрихчующих матеріал домішок;

3) оптимізацію процесу зміцнення сталі, що полягає в узгодженій зміні міцності (σ_T) і запасу в'язкості ($K_B = \sigma_{кр}/\sigma_T$), що досягається засобами термічної обробки (поліпшення) і регулюванням складу сталі (варіювання вуглецем і легуючими елементами).

Конструкційна міцність може бути підвищена шляхом використання місцевої (локальної) термічної обробки для запобігання появі початкового макроруйнування і заміряного розвитку тріщини.

Принципово інший спосіб досягнення високої конструкційної міцності використаний у композиційних матеріалах нового класу високоміцних матеріалів. Такі матеріали є композицією з м'якої матриці й високоміцних волокон. Волокна армують матрицю і сприймають усе навантаження. У цьому полягає принципова відмінність композиційних матеріалів від звичайних сплавів. У композиційних матеріалах навантаження сприймають високоміцні волокна, зв'язані між собою пластичною матрицею. Матриця навантажена слабо і служить для передачі й розподілу навантаження між волокнами. Композиційні матеріали відрізняються високим опором поширення тріщин, оскільки при її утворенні, наприклад, через руйнування волокна, тріщина «в'язне» у м'якій матриці. Крім того, композиційні матеріали, що використовують високоміцні й високомодульні волокна і легку матрицю, можуть володіти високими питомою міцністю і жорсткістю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів : навч. посіб. / В. О. Пчелінцев, А. І. Дегула. – Суми : Сумський державний університет, 2012. – 247 с.
2. Золотаревский В. С. Механические свойства материалов. – М. : Metallurgiya, 1983. – 352 с.
3. Бернштейн М. А. Механические свойства материалов. / М. А. Бернштейн, В. С. Займовский – М. : Metallurgiya, 1979. – 495 с.
4. Тимощук Л. Т. Механические свойства металлов. – М. : Metallurgiya, 1971. – 224 с.