

Механічні властивості матеріалів

Механічні властивості характеризують опір матеріалу деформації, руйнуванню або особливість його поведінки в процесі руйнування. Ця група властивостей включає показники міцності, жорсткості (пружності), пластичності, твердості та в'язкості. Основну групу таких показників складають стандартні характеристики механічних властивостей, які визначають в лабораторних умовах на зразках стандартних розмірів. Отримані при таких випробуваннях показники механічних властивостей оцінюють поведінку матеріалів під зовнішнім навантаженням без урахування конструкції деталі та умов їх експлуатації. Крім того, додатково визначають показники конструкційної міцності, які знаходяться в найбільшій кореляції зі службовими властивостями конкретного виробу і оцінюють продуктивність матеріалу в умовах експлуатації.

Статичні випробування передбачають повільне та плавне наростання навантаження, що прикладається до досліджуваного зразка. За способом прикладання навантажень розрізняють статичні випробування на розтяг, стиснення, вигин, кручення, зсув або зріз.

Найбільш часто проводять *випробування на розтяг* (ДСТУ 1497 – 84). Зазвичай застосовують малий п'ятикратний зразок круглого перерізу (діаметр 5 мм, розрахункова довжина 25 мм). На рис. 1 наведені три види діаграм розтягу: з площадкою текучості (*а*), без площадки текучості (*б*) та діаграма істинних напружень (*в*) в координатах навантаження P – видовження Δl . Діаграма просто перетворюється в діаграму у координатах напруження σ – відносна деформація δ . При цьому $\sigma = P/F_0$; $\delta = (\Delta l/l_0) \cdot 100\%$, де F_0 , l_0 – початкова площадка перерізу та довжина зразка до випробування.

Діаграма розтягу складається з трьох ділянок: пружної деформації OA , рівномірної пластичної деформації AB та зосередженої деформації шийки BC .

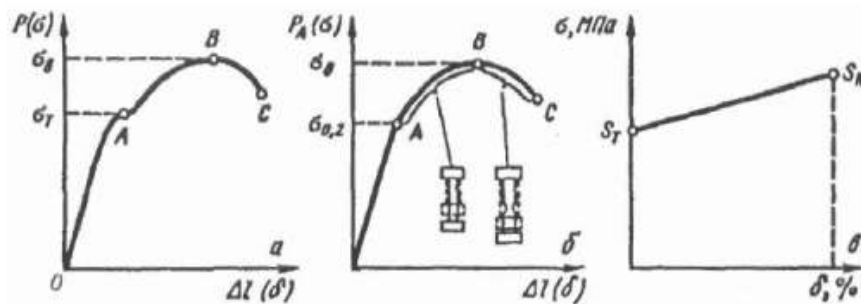


Рис. 1 – Діаграми розтягу: а – з площадкою текучості; б – без площадки текучості; в – діаграма істинних напружень

При розтягуванні зразок подовжується, а його поперечний переріз безперервно зменшується. Істинне напруження визначається діленням діючого у певний момент навантаження на площу, яку зразок має на той момент. Істинне напруження у повсякденній практиці не визначають, а користуються умовними напруженнями, вважаючи, що поперечний переріз F_0 зразка залишається незмінним. Напруження $\sigma_{\text{пруж}}$, σ_T та $\sigma_{\text{тимчас}}$ – стандартні характеристики міцності. Кожна отримується діленням відповідного навантаження $P_{\text{пруж}}$, P_T та P_{max} на початкову площу поперечного перерізу F_0 .

Межею пружності $\sigma_{\text{пруж}}$ називають напруження, при якому пластична деформація досягає заданого значення, що встановлене умовами. Зазвичай використовують значення залишкової деформації 0,005; 0,02 та 0,05 %. Відповідні межі пружності позначають $\sigma_{0.005}$, $\sigma_{0.02}$, $\sigma_{0.05}$. Межа пружності – важлива характеристика пружинних матеріалів, які використовують для пружних елементів приладів та машин.

Умовна межа текучості – це напруження, якому відповідає пластична деформація 0,2 %; її позначають $\sigma_{0.2}$. Фізичну межу текучості σ_T визначають за діаграмою розтягу, коли є площадка текучості. Однак при випробуваннях на розтяг більшості сплавів площадки текучості на діаграмі немає. Обрана пластична деформація 0,2 % достатньо точно характеризує перехід від пружних деформацій до пластичних, а напруження $\sigma_{0.2}$ неважко визначити при

випробуваннях незалежно від того, є або немає площадки текучості на діаграмі розтягу.

Тимчасовий опір характеризує максимальну несучу здібність матеріалу, його міцність, яка є попередньою перед руйнуванням,

$$\sigma_{\text{в}} = P_{\text{max}} / F_0. \quad (1)$$

Пластичність характеризується відносним видовженням δ та відносним звуженням ψ :

$$\delta = [(l_{\text{к}} - l_0) / l_0] \cdot 100\%, \quad \psi = [(F_0 - F_{\text{к}}) / F_0] \cdot 100\%, \quad (2)$$

де $l_{\text{к}}$ – кінцева довжина зразка; l_0 та F_0 – початкова довжина та площа поперечного перерізу зразка; $F_{\text{к}}$ – площа поперечного перерізу у місці розриву.

Допустиме напруження, яке використовують у розрахунках, обирають менше $\sigma_{0,2}$ (зазвичай у 1,5 рази) або менше $\sigma_{\text{в}}$ (у 2,4 рази).

Для мало пластичних матеріалів випробування на розтяг викликають значні труднощі. Незначні перекоси при встановленні зразка вносять суттєву похибку у визначення руйнівного навантаження. Такі матеріали, як правило, піддають випробуванню на вигин.

При *випробуванні на вигин* в зразку виникають розтягуючі або стискаючі напруження. За цією причиною вигин – більш м'який спосіб навантаження, ніж розтягування. На вигин випробовують малопластичні матеріали: чавуни, інструментальні сталі, сталі після поверхневого зміцнення, кераміку. Випробування проводять на зразках великої довжини ($l : h \geq 10$) циліндричної або прямокутної форми, які встановлюють на дві опори (рис. 2). Використовують дві схеми навантаження: зосередженою силою (цей спосіб застосовують частіше) та двома симетричними силами (випробування на чистий вигин). Визначальними характеристиками служать межа міцності та стріла прогину.

Межу міцності при вигині розраховують за формулою:

$$\sigma = M / W, \quad (3)$$

де M – найбільший вигинаючий момент; W – момент опору перерізу, для зразків круглого перерізу $W = \pi d^3/32$ (де d – діаметр зразка), а для прямокутного перерізу $W = bh^2/6$ (де b, h – ширина та висота зразка).

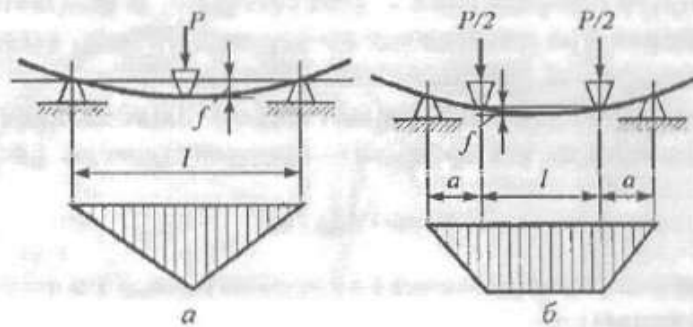


Рис. 2 – Схема випробувань на зосереджений (а) та чистий (б) вигин

Для пластичних матеріалів випробування на вигин не застосовують, так як зразки вигинаються без руйнування до стику обох кінців.

Випробування на твердість. Найбільш простим методом випробування властивостей є вимірювання твердості. *Твердістю* називають властивість матеріалу чинити опір деформації у поверхневому шарі при місцевих контактних впливах. Розрізняють наступні методи визначення твердості: за Брінеллем (за діаметром відбитку кульки); за Роквеллом (за глибиною вдавнення алмазного конусу або загартованої кульки); за Віккерсом (для деталей малої товщини або тонких поверхневих шарів твердість визначають за діагоналями відбитку алмазної піраміди). Схеми цих методів наведені на рис. 3.

Твердість за Брінеллем. При цьому стандартному (ДСТУ 9012 – 59) методі вимірювання твердості у поверхню зразка вдавлюють загартовану кульку діаметром 10,5 або 2,5 мм при дії навантаження від 5000 Н до 30000 Н. Після зняття навантаження на поверхні утворюється відбиток у вигляді сферичної лунки діаметром d (рис. 3, а). Діаметр лунки вимірюють лупою, на окулярі якої нанесена шкала з поділками. Число твердості за Брінеллем НВ визначають шляхом поділу навантаження P на площу поверхні сферичного відбитку:

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}, \quad (4)$$

де D – діаметр кульки, що вдавлюється, мм.

Число твердості за Брінеллем за ДСТУ 9012 – 59 записують без одиниць вимірювання. На практиці при вимірюванні твердості розрахунок за вказаною вище формулою не здійснюють, а використовують завчасно складені таблиці, що вказують на значення HB в залежності від діаметру відбитку та обраного навантаження. Чим менше діаметр відбитку, тим вище твердість.

Спосіб вимірювання за Брінеллем не є універсальним. Його використовують для матеріалів малої та середньої твердості: сталей з твердістю ≤ 200 HB. Для них встановлений кореляційний зв'язок між тимчасовим опором (у МПа) та числом твердості HB: $\sigma_s \approx 3,4$ HB – для гарячекатаних вуглецевих сталей, $\sigma_s \approx 4,5$ HB – для мідних сплавів, $\sigma_s \approx 3,5$ HB – для алюмінієвих сплавів.

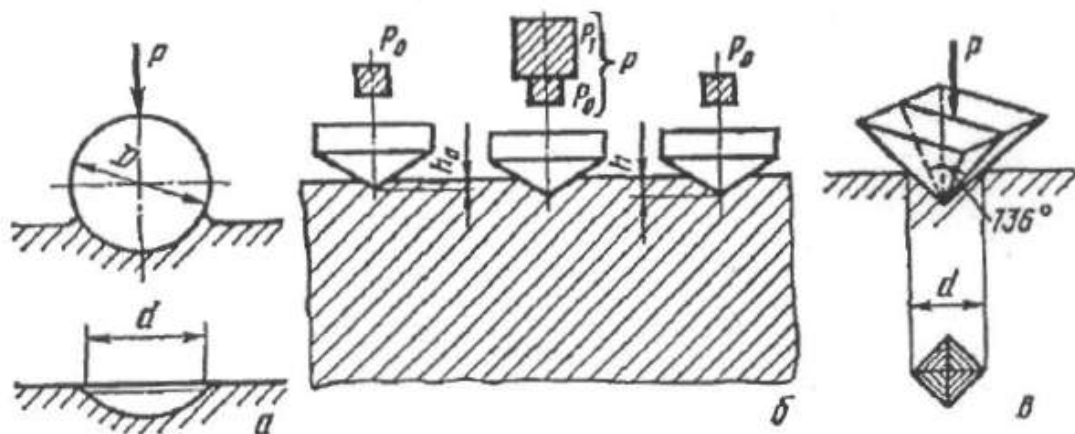


Рис. 3 – Схема визначення твердості: а – за Брінеллем; б – за Роквеллом;
в – за Віккерсом

Твердість за Роквеллом. Цей метод вимірювання твердості (ДСТУ 9013 - 59) найбільш універсальний та найменш трудомісткий. В цьому методі не треба вимірювати розміри відбитка, так як число твердості відраховують безпосередньо за шкалою твердоміра. Число твердості залежить від глибини вдавлювання індентору, в якості якого використовують алмазний конус з кутом при вершині 120° або сталеву кульку діаметром 1,588 мм. Навантаження

обирають в залежності від матеріалу індентору. Для різних комбінацій навантажень і інденторів прилад Роквелла має три вимірювальні шкали: А, В, С. Твердість за Роквеллом позначають цифрами, що визначають рівень твердості, та літерами HR з зазначенням шкали твердості, наприклад: 70 HRA, 58 HRC, 50 HRB. Одиниця твердості за Роквеллом – безрозмірна величина, що відповідає осьовому переміщенню індикатора на 0,002 мм.

Шкала А (індентор – алмазний конус, загальне навантаження 600 Н). Цю шкалу застосовують для особливо твердих матеріалів, для тонких листових матеріалів або тонких (0,5 – 1,0 мм) шарів. Виміряну твердість позначають HRA. Межі вимірювання твердості за цією шкалою 70 – 85.

Шкала В (індентор – стальна кулька, загальне навантаження 1000 Н). За цією шкалою визначають твердість порівняно м'яких матеріалів (< 400 HB). Межі вимірювання твердості за шкалою В 25 – 100.

Числа твердості за Роквеллом не мають точних співвідношень з числами твердості за Брінеллем та Віккерсом.

Шкала С (індентор – алмазний конус, загальне навантаження 1500 Н). Цю шкалу використовують для твердих матеріалів (> 450 HB), наприклад загартованих сталей. Вимірювану твердість позначають HRC. Межі вимірювання твердості за цією шкалою 20 – 67.

Твердість за Віккерсом. За стандартним методом вимірювання твердості за Віккерсом (ДСТУ 2999 – 75) у поверхню зразка вдавлюють чотирьохгранну піраміду з кутом при вершині 136°. Відбиток отримують у вигляді квадрату (рис. 3, в), діагональ якого вимірюють після зняття навантаження, число твердості розраховують за формулою

$$HV = 0,189 \frac{P}{d^2}, \quad (5)$$

де P в Н, d у мм. На практиці число твердості визначають за спеціальними таблицями за значенням діагоналі відбитка при обраному навантаженні.

Метод Віккерса застосовують головним чином для матеріалів, що мають велику твердість, а також для випробування на твердість деталей малих

перерізів або тонких поверхневих шарів. Як правило, використовують невеликі навантаження: 10, 30, 50, 100, 200, 500 Н. Чим тонше переріз деталі або досліджуваний шар, тим менше обирають навантаження.

Числа твердості за Віккерсом та за Брінеллем для матеріалів, що мають твердість до 450 НВ, практично співпадають.

Мікротвердість. Мікротвердість визначають вдавллюванням у поверхню зразка алмазної піраміди при невеликих навантаженнях (0,05 – 5 Н) ті вимірюванням діагоналі відбитка. Число твердості Н визначають за тією ж формулою, що і число твердості за Віккерсом. Цей метод використовують для вимірювання твердості окремих зерен, дуже тонких шарів або тонких деталей.

Механічні властивості при змінних навантаженнях

Основним динамічним випробуванням є метод *випробування на ударний вигин* (ГОСТ 9454-78) з визначенням ударної в'язкості металу. Метод оснований на руйнуванні зразка з надрізом одним ударом маятникового копра (рис. 4).

Стандартний зразок встановлюють на опорах копра і наносять удар зі сторони зразка, протилежної надрізу, що призводить до руйнування зразка. За шкалою маятникового копра визначають роботу K , що витрачена на руйнування зразка, і розраховують головну характеристику, яку отримують в результаті цих випробовувань – ударну в'язкість:

$$KC = K/S_0', \quad (6)$$

де S_0' – площа поперечного перерізу зразка у місці надрізу.

Одиниця вимірювання ударної в'язкості – МДж/м².

У відповідності з ДСТУ 9454 – 78 передбачені випробовування зразків з концентратором напружень трьох видів: U-подібним (радіус надрізу $r = 1$ мм); V-подібним ($r = 0,25$ мм) і Т-подібним (тріщина втоми, створена в основі надрізу). Відповідно ударну в'язкість позначають: KCU, KCT, KCV.

Загальним критерієм ударної в'язкості є KCU. Вона складається з двох складових:

$$KCU = KC_s + KC_p, \quad (7)$$

де KC_3 – робота зародження тріщини; $KC_p \approx KCT$ – робота поширення тріщини. Чим гостріший надріз, тим менше KC_3 . Критерій KCT є критерієм тріщиностійкості, що оцінює опір матеріалу поширенню тріщини.

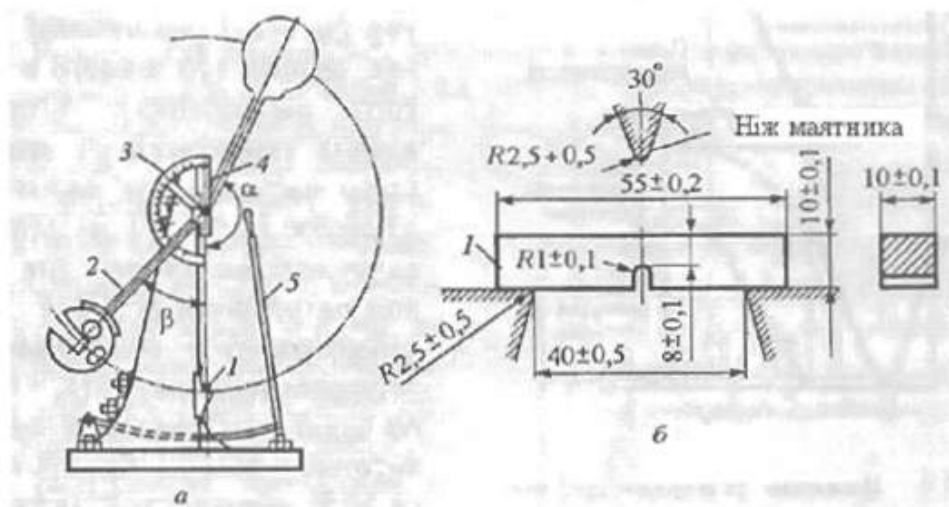


Рис. 4 – Схема маятникового копра (а) та випробовування під удар (б):

1 – зразок; 2 – маятник; 3 – шкала; 4 – стрілка шкали; 5 – гальма

Ударна в'язкість з усіх характеристик властивостей найбільш чутлива до зниження температури. Тому випробування на ударну в'язкість при низьких температурах використовують для визначення порогу *холодноламкості* – температури або інтервалу температур, в якому відбувається зниження ударної в'язкості.

Холодноламкість – властивість металічного матеріалу втрачати в'язкість, окричуватись при зниженні температури. Холодноламкість проявляється у заліза, сталі, металів та сплавів, що мають ОЦК або ГП решітку. Вона відсутня у металів з ГЦК решіткою.

На перехід від в'язкого руйнування до крихкого вказують зміни будови злому та різке зниження ударної в'язкості (рис. 5) в інтервалі температур $(t_n - t_{кр})$ (граничні значення температур в'язкого та крихкого руйнування).

Будова злому змінюється від волокнистого матового при в'язкому руйнуванні $(t \geq t_n)$ до кристалічного блискучого при крихкому руйнуванні $(t \leq t_{кр})$. Поріг холодноламкості позначають інтервалом температур $(t_n - t_{кр})$ або

однією температурою t_{50} , при якій в зломі зразка 50 % волокнистої складової та КСТ знижуються наполовину.

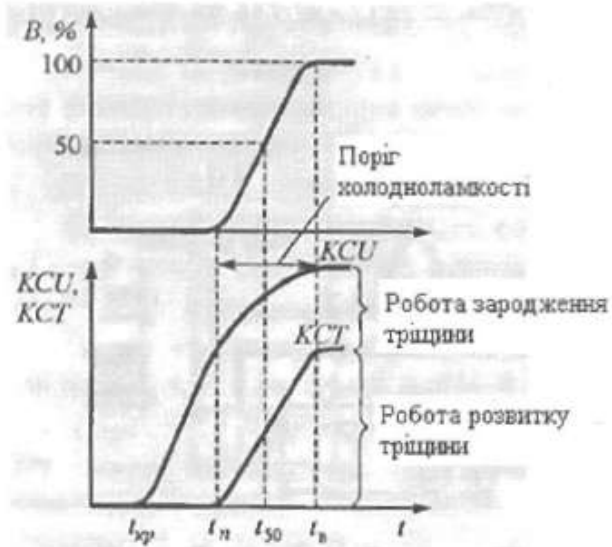


Рис. 5 – Вплив температури випробування на процент в'язкої складової у зломі (B) та ударну в'язкість матеріалу KCU, KCT

Механічні властивості при змінних навантаженнях

Чимало деталей машин (вали, шатуни, зубчаті колеса) зазнають під час роботи циклічних напружень, що повторюються. Цикл напруження – сукупність зміни напружень між двома його крайовими значеннями σ_{max} та σ_{min} впродовж періоду T . При експериментальному дослідженні опору втомі матеріалу за основний прийнятий синусоїдальний цикл зміни напруження (рис. 6). Він характеризується коефіцієнтом асиметрії циклу $R = \sigma_{max} / \sigma_{min}$; амплітудою напруження $\sigma_m = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2$.

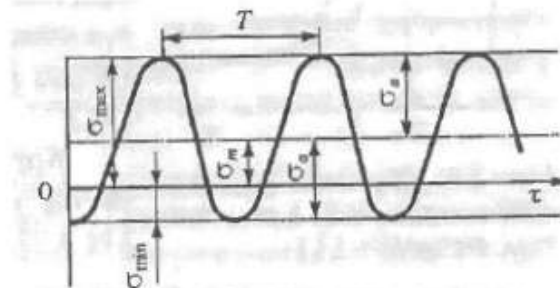


Рис. 6 – Синусоїдальний цикл зміни напружень

Розрізняють симетричні цикли ($R = -1$) та асиметричні (R змінюється у широких межах). Різні види циклів характеризують різні режими роботи деталей машин.

Процеси поступового накопичення пошкоджень в матеріалі під дією циклічних навантажень, що призводять до зміни його властивостей, утворення тріщин, їх розвитку і руйнуванню, називають *втомою*, а властивість протистояти втомі – *витривалістю* (ДСТУ 23207 – 78).

Руйнування від втоми у порівнянні з руйнуванням від статичного навантаження має ряд особливостей.

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

2. Руйнування починається на поверхні (або поблизу від неї) локально, у місцях концентрації напружень (деформації). Локальну концентрацію напружень утворюють пошкодження поверхні в результаті циклічного напруження або надрізи у вигляді слідів обробки, впливу середовища.

3. Руйнування протікає у декілька стадій, що характеризують процеси накопичення пошкоджень у матеріалі, утворення тріщин втоми, поступовий розвиток та злиття деяких з них в одну магістральну тріщину та швидке остаточне руйнування.

4. Руйнування має характерну будову злому, що відображає послідовність процесів втоми. Злом складається з осередку руйнування (місця утворення мікротріщин) та двох зон – втоми та долому (рис. 7). Осередок руйнування межує з поверхнею та має невеликі розміри та гладку поверхню.

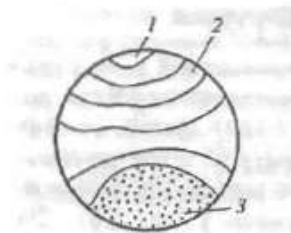


Рис. 7 – Злом втомного руйнування: 1 – осередок зародження тріщини; 2 – зона втоми; 3 – зона долому (схема)

Зону втоми формує послідовний розвиток тріщини втоми. В цій зоні помітні характерні борізки, які мають конфігурацію кілець, що свідчить про стрибкоподібне просування тріщини втоми. Зона втоми розвивається до тих пір, доки у зменшуваному робочому перерізі напруження зростають настільки, що викличуть його миттєве руйнування. Цю останню стадію руйнування характеризує зона долому.

Про здатність матеріалу експлуатуватись в умовах циклічного напруження судять за результатами випробувань зразків на втому (ДСТУ 25.502 – 79). Їх проводять на спеціальних машинах, що створюють у зразках багатократне навантаження (розтяг, стискування, вигин, крутіння). Зразки випробувань зображують у вигляді кривої втоми, яка у логарифмічних координатах: максимальне напруження циклу σ_{max} (або σ_a) – число циклів навантажень N складається з ділянок прямих ліній (рис. 8). Горизонтальна ділянка визначає напруження, яке не викликає втомного руйнування після необмеженого великого або заданого (базового N_0) числа циклів. Це напруження представляє собою *фізичну межу витривалості* σ_R (R – коефіцієнт асиметрії циклу), при симетричному циклі σ_{-1} . Похила ділянка кривої втоми характеризує *обмежену межу витривалості*, рівна напруженню σ_K , яке може витримати матеріал протягом певного числа циклів N_K .

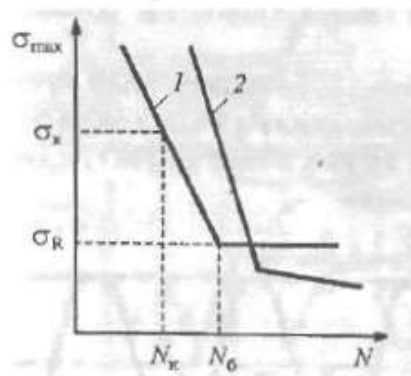


Рис. 8 – Крива втоми сталі (1) та кольорових металів (2)

Криві з горизонтальними ділянками типові для сталей при невисоких температурах випробувань. Криві без горизонтальної ділянки (крива 2 на рис.

8) характерні для кольорових металів, а також для усіх матеріалів, що працюють при високих температурах або у корозійному середовищі. Такі матеріали мають тільки обмежену межу витривалості.

Криві втоми дозволяють визначити наступні критерії витривалості:

1) *циклічну міцність* – фізична або обмежена межа витривалості. Вона характеризує несучу здатність матеріалу, тобто те найбільше напруження, яке він здібний витримати за визначений час роботи;

2) *циклічну довговічність* – число циклів (або експлуатаційних часів), які витримують матеріал до утворення втомленої тріщини певної протяжності або до втомленого руйнування при заданому напруженні. Довговічність також може бути необмеженою (при $\sigma_{\max} < \sigma_{-1}$) та обмеженою (при $\sigma_{\max} > \sigma_{-1}$).

Криві витривалості в області обмеженої довговічності визначають на основі статичної обробки результатів випробувань. Це пов'язано зі значним розкидом довговічності через її високу чутливість до стану поверхні зразків.

Крім визначення розглянутих вище критеріїв багатоциклової витривалості, для деяких спеціальних випадків застосовують випробування на *малоциклову втому*. Їх проводять при високих напруженнях (вище $\sigma_{0,2}$) та малій частоті навантаження (зазвичай не більше 5 Гц). Ці випробування імітують умови експлуатації конструкцій (наприклад, літакових), які сприймають рідкісні, але значні циклічні навантаження. База таких випробувань не перевищує $5 \cdot 10^4$ циклів, тому мало циклова втома матеріалу характеризує ліву верхню гілку кривої втоми (рис. 8).

Криві втоми характеризують стадію руйнування та не відображають попередні процеси. Більш показова узагальнена діаграма втоми (рис. 9). Вона містить додаткові лінії (штрихові), що виділяють в процесах втоми три стадії.

Узагальнена діаграма дозволяє встановити додаткові критерії витривалості. З них найбільш важливе значення має живучість, яка визначається швидкістю зростання тріщини втоми. *Живучість* характеризує здібність матеріалу експлуатуватись у пошкодженому стані після утворення тріщини (в області II на рис. 9). Живучість (швидкість зростання тріщини

втоми) – критерій надійності матеріалу, за допомогою якого прогнозують працездатність деталі, яка розрахована на циклічну міцність. При високій живучості можна своєчасно шляхом дефектоскопії виявити тріщину, замінити деталь та забезпечити безаварійну роботу конструкції.

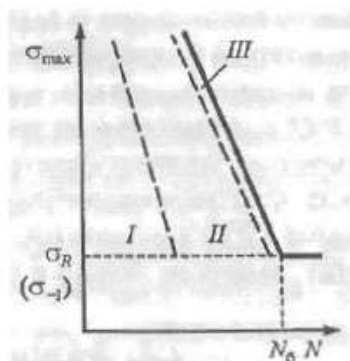


Рис. 9 – Узагальнена діаграма втомленого руйнування (схема): *I* – стадія постулового накопичення пошкоджень до виникнення тріщини втоми; *II* – стадія поширення тріщини; *III* – стадія долому