

Міністерство освіти і науки України

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

*Кафедра
будівельної механіки*

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт

з дисципліни

«Механіка руйнування»

для студентів денної форми навчання за напрямом
6.060101 «Будівництво»

Тернопіль
2017

УДК 624.04+620.17+539.3

M54

Укладач

Ясній П.В., докт. техн. наук, професор,
Ясній В.П., докт. філософії.

Рецензенти:

М.І. Підгурський, докт. техн. наук., професор.

Методичні вказівки розглянуто й затверджено на засіданні методичного семінару кафедри будівельної механіки Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 10 від 14 червня 2017 р.

Схвалено та рекомендовано до друку методичною комісією факультету інженерії машин, споруд та технологій Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 9 від 26 червня 2017 р.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з M54 дисципліни «Механіка руйнування» для студентів денної форми навчання за напрямом 6.060101 «Будівництво» / Укладач : Ясній П.В., Ясній В.П. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017 – 48 с.

УДК 624.04+620.17+539.3

Методичні вказівки розроблені у відповідності з навчальним планом напрямку 6.060101 «Будівництво».

Посібник складений з врахуванням методичних розробок інших вищих закладів освіти, а також матеріалів літературних джерел, перелічених в списку.

© Ясній П.В., Ясній В.П., 2017

© Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017

ЗМІСТ

ВСТУП	4
Лабораторна робота №1	
ВИЗНАЧЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ КІС ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	5
Лабораторна робота №2	
ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНОПЛАСТИЧНОЇ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ J_{IC} ..	14
Лабораторна робота №3	
ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ І ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ K_{dc}	20
Лабораторна робота №4	
ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ БАГАТОЦИКЛОВОЮ ВТОМОЮ..	27
Лабораторна робота №5	
ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ НА МАЛОЦИКЛОВУ ВТОМУ	35
Лабораторна робота №6	
ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРИЩИНИ	41
ЛІТЕРАТУРА	46

ВСТУП

Ціллю даного лабораторного практикуму є практичне освоєння методів оцінки міцності і довговічності матеріалів і елементів конструкцій з тріщинуватими дефектами. Знання методів оцінки тріщиностійкості матеріалів і тримкості елементів конструкцій дозволяють студентам розробляти найбільш оптимальні будівельні конструкції і технології їх виготовлення з точки зору забезпечення необхідної міцності та довговічності за критеріями механіки руйнування.

В даному лабораторному практикумі розглядаються: основні методи розрахунку напружень і деформації в околі вістря тріщини в пружній і пружно-пластичній постановці; енергетичні, деформаційні та силових критерії руйнування; методи оцінки тріщинотривкості матеріалів і зварних з'єднань при статичному, циклічному і динамічному навантаженні; методи розрахунку тримкості і довговічності елементів зварних конструкцій з тріщинами.

Виконання завдань передбачає, що студенти освоїли теоретичний матеріал. Методичні вказівки призначені для студентів денної форми за напрямком підготовки 6.060101 «Будівництво».

Лабораторна робота №1

ВИЗНАЧЕННЯ ВЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ K_{IC} ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Мета роботи:

освоїти методику визначення вязкості руйнування при статичному навантаженні, вивчити залежність між вязкістю руйнування K_{IC} і границею текучості для вуглецевих сталей.

Теоретичні відомості:

Отримувані при стандартних випробуваннях на гладких зразках характеристики механічних властивостей при статичному та циклічному навантаженні (границя міцності, границя текучості, границя втоми і т.п.) є основними для розрахунків на міцність і довговічність.

Разом з тим для високонавантажених великогабаритних конструкцій практично неможливо позбутись різного роду дефектів типу тріщин, які виникають на стадії виготовлення, а також в процесі експлуатації (розшарування, непровари, пори, холодні та гарячі тріщини при зварюванні, тощо). Тому, поряд із загальноприйнятою методикою оцінки міцності та довговічності елементів конструкцій, необхідно проводити розрахунки по критеріях механіки руйнування.

Для оцінки міцності тіл з тріщинами необхідно, в першу чергу, знати напружено-деформований стан в області вершини тріщини. При навантаженні тіла відбувається взаємне зміщення протилежних берегів тріщини. Виділяють три основних типи переміщень поверхонь тріщини: нормальний відрив, поперечний зсув та поздовжній зсув (рис.1). Розподіл напружень та зміщень в вершині тріщини нормального відриву (рис.2).

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right); \quad \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$
$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \frac{3\theta}{2}; \quad \sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y)$$

$$\tau_{zy} = \tau_{yz} = 0 \quad (1)$$

$$U = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \cos \frac{\theta}{2} \left(k - 1 - 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right); \quad V = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cdot \sin \frac{\theta}{2} \left(k + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right);$$

де σ , τ – відповідно нормальні та дотичні напруження; r – віддаль до вершини тріщини; $G = E/[2(1+\mu)]$ – модуль зсуву; E – модуль пружності I-го роду; μ – коефіцієнт Пуассона; K_I – коефіцієнт інтенсивності напружень для тріщини нормального відриву; θ – кут між розглядуваною точкою та продовженням тріщини. При $\sigma_z = 0$ будемо мати плоский напружений стан, у випадку $U = 0$ – плоску деформацію.

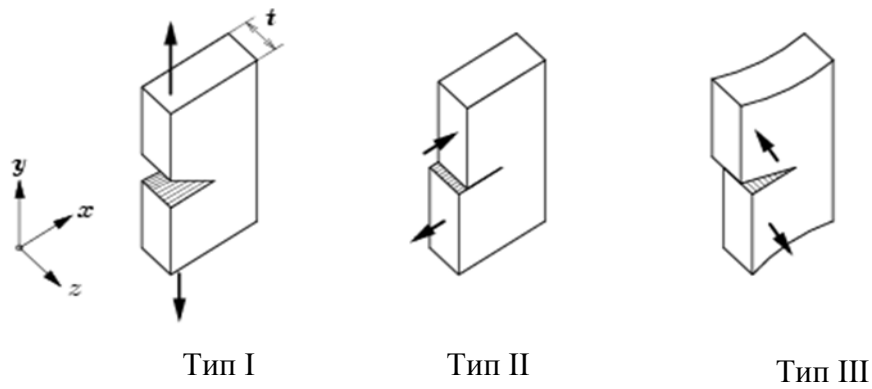


Рис. 1. Основні типи переміщень поверхонь тріщини: тип I (нормальний відрив) - (а); тип II (поперечний зсув) - (б); тип III (поздовжній зсув) - (в).

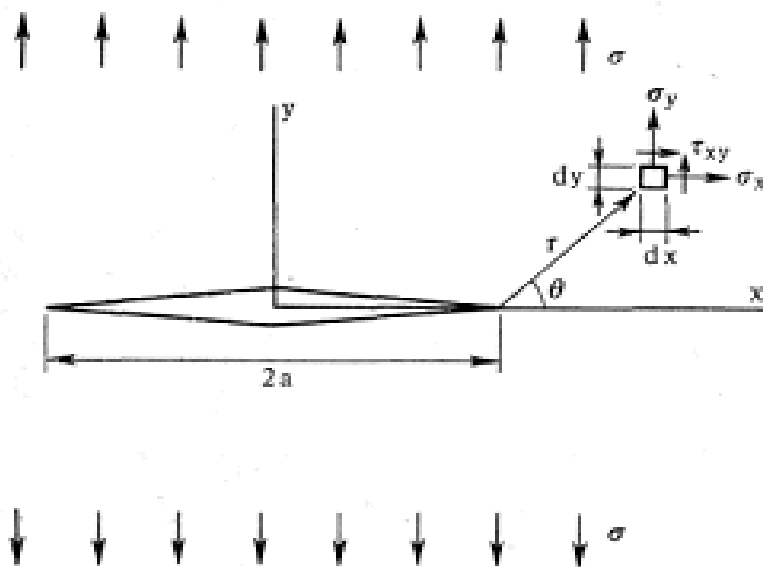


Рис. 2. Компоненти напружень в околі вершини тріщини (нескінченна пластина з напівнескінченною прямолінійною тріщиною)

Для плоского напруженого стану $k = \frac{3-\mu}{1-\mu}$, для плоскої деформації $K = 3-4\mu$. У випадку $\theta = 0$ (на продовженні вершини тріщини) і приймаючи, що $\sigma_y = \sigma$, $r = l$ із (1) маємо для безконечного тіла з тріщиною типу I довжиною $2a$

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi l}, \quad (2)$$

де σ – напруження прикладені на нескінченності.

Для тіла скінченних розмірів коефіцієнт інтенсивності напружень визначають по формулі

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi l} \cdot Y, \quad (3)$$

де Y – безрозмірна функція, яка залежить від геометрії зразка, розмірів тріщини, та схеми навантаження.

Під терміном *тріщиностійкість* розуміють характеристики матеріалу, які визначають його опір руйнування при наявності тріщини.

До основних характеристик тріщиностійкості відносять:

K_{Ic} – критичне максимальне значення коефіцієнту інтенсивності напружень на стадії виникнення руйнування поблизу вершини тріщини, яке встановлюється розрахунком по значеннях критичного напруження чи навантаження, розмаху тріщини і поперечного перерізу зразка;

K_{Ic} – критичне значення коефіцієнту інтенсивності напружень, коли в вершині тріщини реалізується трьохосний розтяг при плоскій деформації.

В області, де справедливі положення лінійної механіки руйнування, є практично одна характеристика тріщиностійкості – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} при максимальному стисненні пластичних деформацій (що звичайно досягається створенням умов плоскої деформації шляхом збільшення випробувального зразка). Величина K_{Ic} є константою матеріалу і в рамках прийнятої точності не залежить від геометрії зразка. K_{Ic} залежить від геометрії зразка і в першу чергу від його товщини. Разом з тим K_{Ic} залежить від температури випробувань, швидкості навантаження, фізико-хімічної дії оточуючого середовища.

Для експериментального визначення K_{Ic} необхідно мати зразок з тріщиною і формулу для визначення КІН цього зразка.

Методи проведення випробувань, а також обробки та аналізу результатів випробувань для визначення характеристик тріщиностійкості при статичному навантаженні регламентуються відповідними стандартами ГОСТ 25.506-85, ASTM E 399 та інші.

В цих стандартах приведено рекомендації по конструкціях зразків, послідовності проведення випробувань, обробці експериментальних даних та експериментальному обладнанні.

Характеристики тріщиностійкості визначають за результатами статичних випробувань спеціальних зразків з попередньо створеною (вирощеною) втомною тріщиною на трьохточковий згин, позацентровий або осьовий розтяг.

Конструкцію прямокутного зразка на позацентровий розтяг показано на рис. 3.

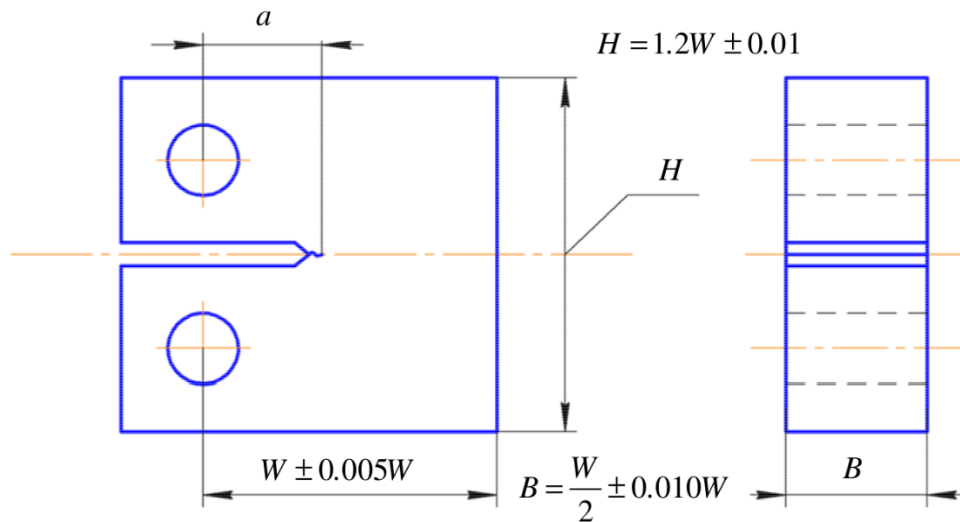


Рис. 3. Прямокутний зразок для випробувань на позacentровий розтяг

Зазки такого типу (рис. 3) застосовують при визначенні K_c для сталей високої, середньої та малої міцності, а також кольорових металів.

Орієнтовно товщину і зразка (крім магнієвих сплавів) встановлюють із використанням модуля пружності E і границі текучості матеріалу (табл. 1).

Втомну тріщину створюють (вирощують) від початкового надрізу. Доцільно застосовувати надріз шевронної форми з $\rho < 0,25$ мм. Для товщини $B < 25$ мм допускається застосовувати пряму форму надрізу з радіусом вершини $\rho < 0,1$ мм.

Таблиця 1

Залежність товщини зразка від $\sigma_{0,2}/E$

$\sigma_{0,2}/E$	B , мм
до 0,005	100
0,005-0,0057	75
0,0057-0,0062	63
0,0062-0,0065	50
0,0065-0,0071	38
0,0071-0,0080	25
0,0080-0,0095	12
понад 0,0095	6

Створення втомних тріщин в прямокутних зразках (рис. 3) рекомендується здійснювати із застосуванням шарнірних елементів і шарових опор в системі передачі навантаження від випробувальної машини до зразка.

Створення (вирощення) початкової втомної тріщини від надрізу слід здійснювати при максимальному зусиллі змінного напруження, якому відповідає

$$K_{fmax} < 0,75 K_{Ic}$$

Кінцева ділянка довжиною не менше 30% від усєї довжини втомної тріщини повинна створюватись при $K_{fmax} < 0,6K_{Ic}$. При створенні втомних тріщин коефіцієнт асиметрії циклу навантаження слід вибирати в межах 0,1-0,25. Якщо неможливо виміряти навантаження, кількість циклів навантаження при створенні втомної тріщини повинно бути не менше 50000.

У випадку, коли втомну тріщину створюють при температурі T_f , а випробування проводять при температурі T , то на кінцевій ділянці нанесення тріщини повинна використовуватись умова:

$$K_{fmax} \leq 0.6(\sigma_{0.2}^f / \sigma_{0.2})K_{Ic},$$

де $\sigma_{0.2}^f$, $\sigma_{0.2}$ – границі текучості матеріалу при температурах T_f і T відповідно.

Випробувальне обладнання

Для визначення характеристик вязкості руйнування (тріщиностійкості) при статичному навантаженні використовують універсальні випробувальні машини та машини для циклічних випробувань необхідної потужності, які забезпечують вимірювання і реєстрацію зусиль та переміщень.

Випробувальна машина повинна бути обладнана динамометром та давачем переміщення (екстензометр), необхідними для запису діаграми "сила (P) – переміщення по осі дії сили" (v). Датчик переміщення повинен мати лінійну характеристику в усьому діапазоні робочого ходу від 1 до 5 мм. Допустима похибка вимірювання та реєстрації зміщення $\pm 2\%$. Тарування датчика виконується з точністю $\pm 0,01$ мм.

Порядок проведення випробувань:

1. Перед проведенням випробувань здійснюють перевірку пристроїв для вимірювання переміщень та реєстрації зусиль.

2. У відповідності з програмою випробувань проводять контроль форми та основних розмірів зразків та втомних тріщин з оформленням протоколів випробувань (табл. 2).

3. Після установки зразка та пристроїв для випробувань встановлюють таку швидкість навантаження, яка б забезпечувала швидкість збільшення коефіцієнту інтенсивності напружень K_{Ic} в межах від 100 до 300 кгс/мм^{3/2}/хв.

4. В процесі випробувань записують діаграми $P - v$: і приріст тріщини. При руйнуванні зразка на цих діаграмах відмічають точки, що відповідають початку руйнування.

5. Після випробувань вимірюють довжину тріщини l_i в перерізах, які відповідають 0,25; 0,5 і 0,75 B з похибкою не більше 0,005 B і визначають середнє значення a (рис. 4)

$$a = (a_1 + a_2 + a_3)/3 \quad (4)$$

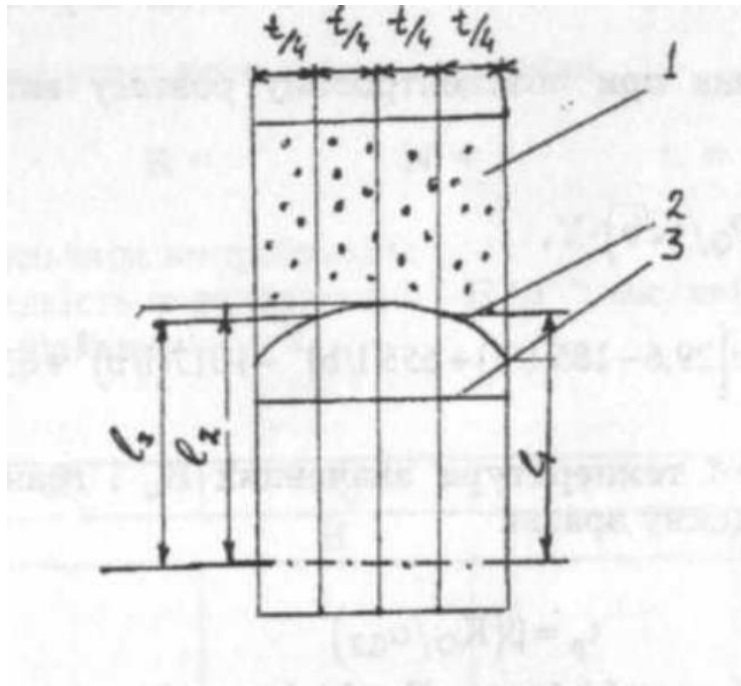


Рис. 4. Схема визначення середньої довжини втомної тріщини. 1 – статичний долом; 2 – фронт втомної тріщини; 3 – границя механічного надрізу

6. Визначення критичних значень коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{Ic} і K_{Ic} . Основні типи діаграм $P-v$ при навантаженні зразка до моменту руйнування представлені на рис. 5

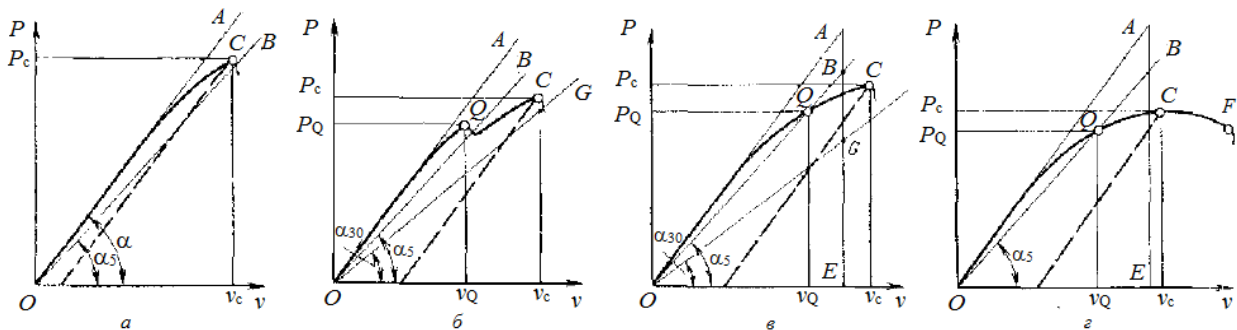


Рис. 5. Основні типи діаграм деформування

Діаграма типу I. Сила P рівна максимальному (руйнуючому) навантаженню P_c , якщо діаграма закінчується всередині кута, утвореного лінією початкової пружної ділянки і лінією, тангенс якої на 5% менше, ніж тангенс кута дотичної до початкової ділянки діаграми (5% - січна). Діаграма такого типу характерна для крихкого руйнування.

Діаграма типу II. Всередині вказаного кута відмічається стрибок сили (внаслідок стрибка тріщини). Силу при стрибку приймають рівною P_Q .

Діаграма типу III. Сила P_Q визначається по точці перетину діаграми з 5%-ною січною. В цьому випадку, якщо відхилення від лінійності відбувається тільки за рахунок збільшення довжини тріщини, то до точки перетину з 5%-ною січною довжина тріщини збільшиться на 2%.

Діаграма типу IV. Може виявитись, що нелінійність діаграми обумовлена пластичними деформаціями, а не ростом тріщини. В цьому випадку слід зафіксувати момент старту тріщини, і якщо це можливо навантаження старту тріщини P_0 прийняти рівним.

Зусилля P_Q і P_c необхідні для підрахунку величини K_{Ic} і K_c . Сила P_Q дорівнює руйнуючому навантаженню, якщо діаграма P - v закінчується всередині кута, тангенс якого на 5% менше, ніж тангенс кута дотичної до початкової частини діаграми.

Для діаграми типу II силу P визначають в точці перетину діаграми з вказаною 5%-ною січною. Величину K_Q для зразка при позацентровому розтягу визначають таким чином

$$K_Q = (P_Q / B\sqrt{W}) \cdot Y, \quad (5)$$

$$Y = \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (6)$$

По отриманих для даної температури значеннях K_Q і границях текучості визначають розрахункову товщину зразка:

$$B_p = \beta (K_Q / \sigma_{0.2})^2$$

де β – безрозмірний коефіцієнт. Коефіцієнт в рівний 2,5 – для маловуглецевих та низьколегованих сталей, алюмінієвих і титанових сплавів; 0,6 – для чавунів; 5 – для аустенітних сталей.

По розрахунковій товщині зразка визначають відносну товщину $B_v = B_p - B$.

По даних вимірювань товщини зразків до і після випробувань визначають максимальне відносне залишкове звуження ϕ_c в зоні руйнування%

$$\phi_c = (B - B_c) 100\% / B \quad (7)$$

Величину K приймають рівною K_{Ic} , якщо $P_c < 1,1P_Q$ і виконуються такі умови $B_e \leq 1 \varphi \leq 1,5$ або $B_e \leq 1 \Delta a < 2,0\%$.

Якщо приведені нерівності не виконуються, то для визначення K_{Ic} при заданій температурі необхідно збільшити товщину зразка.

Таблиця 2

Позначення		Розмірність
K	Коефіцієнт інтенсивності напружень (КІН)	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
K_c	Критичне значення КІН для матеріалу даної	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
K_{Ic}	Критичне значення КІН при максимальному стисненні пластичних деформацій і руйнуванні нормальним відривом	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
K_Q	Передбачувана величина критичного КІН	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
P_Q	Розрахункове навантаження для визначення КІН	Н
P_c	Максимальне навантаження на діаграмі "навантаження-зміщення" $P-v$	Н
ΔK	Розмах КІН при циклічному навантаженні при створенні втомної тріщини	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
K_{fmax}, K_{fmin}	КІН при максимальному і мінімальному зусиллі в $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$	$\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$
R	Коефіцієнт асиметрії циклу навантаження K $R = K_{fmin} / K_{fmax}$	
N	Число циклів навантаження	
a	Довжина тріщини	мм
Δa	Приріст тріщини	мм
B	Товщина зразка	мм
B_c	Товщина зразка в зоні руйнування	мм
σ_B	Тимчасовий опір (границя міцності)	МПа
$\sigma_{0.2}$	Умовна границя текучості	МПа
E	Модуль пружності	МПа
G	Модуль зсуву	МПа
μ	Коефіцієнт Пуассона (поперечної деформації)	
$(P_C$	Відносне залишкове поперечне звуження зразка в зоні руйнування	
Y	Безрозмірна поправочна функція Y у формулах для визначення коефіцієнтів інтенсивності напружень.	

Протокол випробувань:

Марка сталі:

Термообробка:

Таблиця 3

Хімічний склад, %	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu
Механічні властивості	$\sigma_{0.2}$	σ_B	δ	Ψ	HR C	E	μ		

Таблиця 4

B	W	A	d	H

Умови утворення втомної тріщини:

$$K_{fmax} = \quad R = \quad N = \quad t_f =$$

Результати випробувань:
 Швидкість навантаження ($\text{Н/м}^{3/2}$; мм/хв)
 Характеристики діаграми:
 Тип діаграми:

Таблиця 5

t , °C	P_C	P_Q	P_0	Δa , мм	t_c , мм
	кН				

Характеристика руйнування:

Таблиця 6

K_{Ic}			φ_c , %	

Зміст звіту:

Привести в звіті назву роботи, її мету, діаграму навантаження $P - v$, ескізи зразків до і після руйнування, розрахункові формули і розрахунки критичних значень коефіцієнтів інтенсивності напружень, протоколи випробувань.

Контрольні запитання:

1. Які є основні типи взаємного переміщення поверхонь тріщини?
2. Як визначається коефіцієнт інтенсивності напружень для безконечного тіла з тріщиною?
3. Намалювати ескіз прямокутного зразка з тріщиною на позacentровий розтяг.
4. Які умови необхідно витримати при вирощуванні втомної тріщини?
5. Приведіть основні типові діаграми "зусилля-переміщення по лінії дії сили". Як визначається зусилля P_Q і P на цих діаграмах?
6. Що таке тріщиностійкість матеріалу?
7. Основні характеристики тріщиностійкості матеріалу при статичному навантаженні.
8. Як визначається розрахункова товщина зразка при випробуванні на вязкість руйнування?
9. Які основні вимоги виконання умови максимального стиснення пластичної деформації в вершині тріщини?
10. Який зв'язок між вязкістю руйнування K_{Ic} , та характеристиками механічних властивостей ($\sigma_{0.2}$, σ_B , δ)?

Лабораторна робота №2

ВИЗНАЧЕННЯ ПРУЖНОПЛАСТИЧНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ J_{IC}

Мета роботи:

освоїти методику визначення пружнопластичної тріщиностійкості J_{IC} .

Теоретичні відомості:

Для нелінійно-пружного тіла з тріщиною перехід до критичного стану (рис. 1) можна встановити з допомогою інваріантного J -інтегралу за критерієм:

$$J = J_{IC}; \text{ де} \quad (1)$$

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2)$$

U – повна потенціальна енергія, яка складається з енергії пружної деформації та роботи зовнішніх сил; a – довжина тріщини; B товщина зразка.

Оскільки за рахунок пружності матеріалу вся енергія, що виділяється йде повністю на початкове просування тріщини (на одиницю площі), чисельне значення J дорівнює характеристиці J_{IC} .

Якщо тіло пружно-пластичне, то його діаграма руйнування аналогічна діаграмі для нелінійно-пружного тіла (рис. 2.1). В цьому випадку критерій руйнування має такий самий вигляд (1). Однак тепер величина J_{IC} , яка пропорційна площі A під діаграмою, включає і роботу пластичної деформації. Тому J_{IC} називають пружнопластичною в'язкістю руйнування.

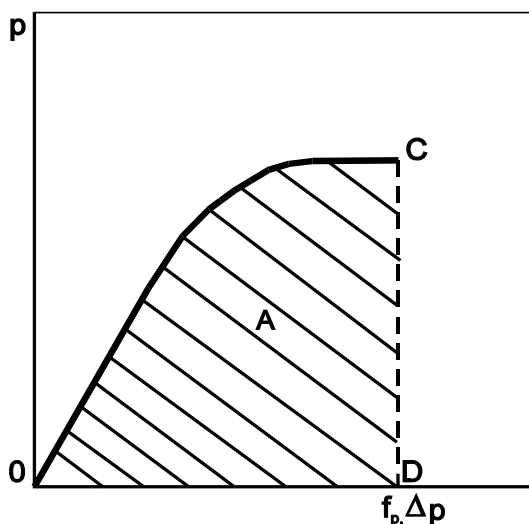


Рис. 1 Діаграма деформування при визначенні пружнопластичної в'язкості руйнування J_{IC}

J -інтеграл складається із пружної і пластичної частин:

$$J = J_{el} + J_{pl} \quad (3)$$

де J_{el} – пружна складова інтегралу; J_{pl} – пластична складова J -інтегралу.

$$J_{el} = \frac{K^2(1 - \mu)^2}{E} \quad (4)$$

Зручно використовувати компактний зразок, для позacentрового розтягування який дозволяє вимірювати зміщення безпосередньо під зусиллям.

Для компактного зразка із тріщиною КІН визначається за формулою:

$$K = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{(2 + \alpha)}{(1 - \alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4) \quad (5)$$

Пластична складова J -інтегралу:

$$J_{pl} = \frac{\eta A_{pl}}{B(W - a_0)} \quad (6)$$

де A_{pl} – енергія пластичної деформації (Рис. 1); a_0 – початкова довжина тріщини; P – зусилля, B – товщина зразка; W – ширина зразка; a – довжина тріщини; $\alpha = a/W$ – відносна довжина тріщини; $\eta = 2 + 0.522b_0/W$.

Випробування на пружнопластичну тріщиностійкість проводять із записом діаграми деформування в координатах P (зусилля) – v_p (зміщення точок прикладання сили або зміщення по лінії її дії). Цю діаграму (рис. 1) використовують для визначення роботи пластичної деформації та руйнування.

Як що використовуються прямокутні і дискові зразки, для позacentрового розтягу, то зміщення v , виміряне поза лінією дії сили можна перерахувати в v_p за формулою:

$$v_p = v \frac{a + a(\eta - 1)}{\eta t + W - a} \quad (7)$$

За одновісного розтягування циліндричних і прямокутних зразків з центральними і краєвими тріщинами у якості v_p можна приймати максимальне зміщення берегів тріщини.

У випадку діаграми деформування типу IV пружнопластична тріщиностійкість J_c визначається шляхом випробування (при заданій температурі) п'яти-шести зразків, первісні довжини тріщин в яких не повинні відрізнятись більше ніж на 3%.

Перший зразок доводиться до руйнування або до спаду навантаження; решту зразків навантажують до ряду послідовно зменшуваних значень P і v , а потім розвантажують. Далі на незруйнованих зразках фіксують повільне

підростання тріщини (яке було при навантаженні) з допомогою нагріву до 300°C сталевих зразків або з допомогою фарб (або циклічного навантаження зразків із металічних сплавів і кольорових металів). Потім ці зразки руйнують і на зламі вимірюють середнє підростання тріщини Δa , довжину фронту тріщини L , і площу підростання тріщини S .

Площу діаграми деформування A визначають до точки розвантаження, потім за формулами (3) або (4) вираховують J -інтеграл; відкладають на графіку $J - \Delta a$. Значення J_c отримується екстраполяцією J на нульовий підріст тріщини. Однак внаслідок пластичного розкриття у вершині тріщини (притуплення) виникає ефект еквівалентного збільшення довжини тріщини. Тому екстраполяцію кривої $J - \Delta a_1$ проводять не на вісь ординат, а на лінію притуплення, що описується рівнянням прямої $J_c = (\sigma_{0.2} + \sigma_B)\Delta a$.

Вкажемо на деяку аналогію між парами величин K_{Ic} , K_c і J_{Ic} , J_c . Знайдене вказаними методами значення J_Q приймається рівним J_{Ic} якщо задовільняється умова:

- Товщина $B > J_Q/\sigma_T$;
- Початкова ширина зразка $b_0 > J_Q/\sigma_T$;

В'язкість руйнування K_{Jc} обчислюють за формулою: $K_{Jc} = \sqrt{E'J_{Ic}}$

Для плоскої деформації $E' = E / (1 - \mu^2)$

Випробувальне обладнання

Для визначення величини критичного розкриття тріщини застосовується універсальна випробувальна машина для циклічних випробувань необхідної потужності та пристрої, які забезпечують вимірювання та реєстрацію зусиль і переміщення.

Для запису вимірювальних величин (зусилля, переміщення) використовується цифровий сервоконтролер з відповідним програмним забезпеченням.

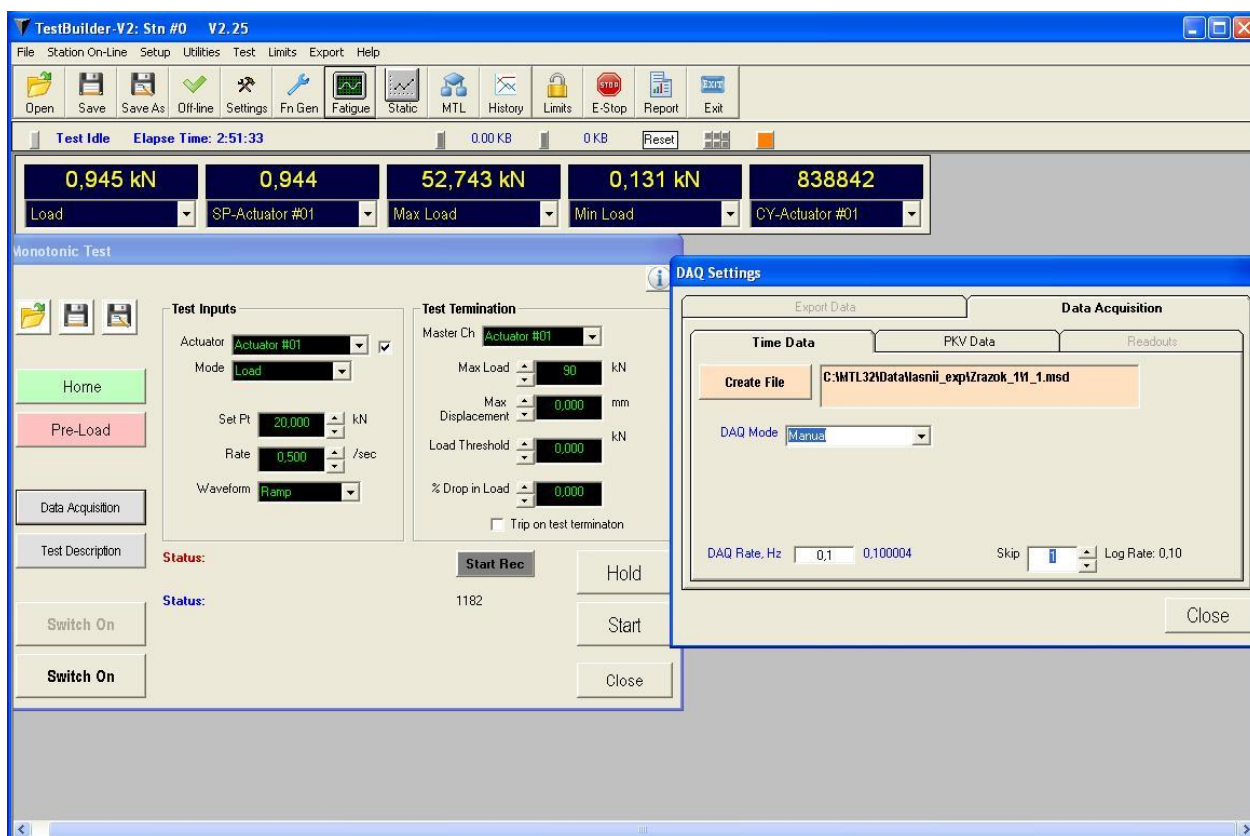


Рис. 2. Інтерфейс програми Test Builder для запису даних на ПК

Давачі (естензометр, енкодер) повинні мати лінійні характеристики в усьому діапазоні робочого ходу. Допустима похибка не повинна перевищувати 1%. Точність тарування повинна бути в межах $\pm 0,01$ мм.

Належним чином підготовлені зразки певного виду із початковими тріщинами.

Порядок проведення випробувань:

1. Зразок встановлюється на випробувальній машині, встановлюються відповідні давачі (екстензометр), проводиться навантаження зразків із записом діаграми $P - v$.

2. За формулою (6) для дискових і прямокутних зразків визначається зміщення v_p .

3. Визначають площу A_c – діаграми деформування до точки розвантаження.

4. Для діаграм I – III типу визначають J за формулою (4).

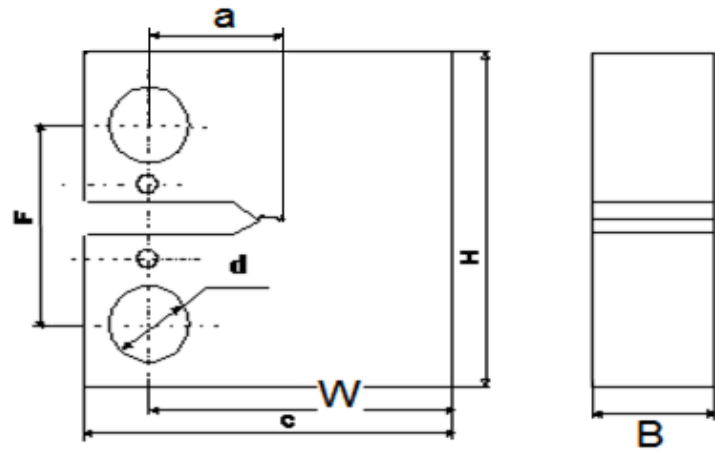
5. Для діаграм IV типу визначають J за формулою (3) або (4) і відкладають на графіку $J - \Delta a$. Екстраполюють J на лінію притуплення, що описується рівнянням $J_c = (\sigma_{0,2} + \sigma_B)\Delta a$. При значному викривленні J визначають за формулою (5).

6. Перевірку достовірності значення J_c здійснюють за формулою (6).

Протокол випробувань

Марка сталі:

Тип зразка:



Таблиця 1

B , мм	W , мм	a , мм	d , мм	F , мм	H , мм	c , мм

Результати випробувань:

Таблиця 2

№	v , мм	K_V	P_V , кН	Δ_p , мм	A_c , мм ²	J_c , Дж	K_{Ic} , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа

Зміст звіту

Зміст повинен включати у себе наступні пункти:

- назва роботи та її мета;
- діаграма $P - v$;
- розрахункові формули;
- протокол випробувань.

Контрольні запитання:

1. Особливості визначення v_p у дискових і прямокутних зразках та циліндричних і плоских.
2. Для чого використовують діаграми $P - v$?
3. Як визначають J -інтеграл для діаграм руйнування I – III типів?
4. Особливості визначення J -інтегралу для діаграми руйнування IV типу.
5. Чому криву $J - \Delta a$ екстраполюють до перетину з лінією притуплення вершини тріщини?
6. Як враховується тунелювання тріщини (нерівномірність її приросту по товщині зразка) при визначенні J -інтегралу?
7. За яким критеріями перевіряють достовірність отриманих результатів – вязкості руйнування J_{Ic} ?

Лабораторна робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ УДАРНОЇ В'ЯЗКОСТІ І ДИНАМІЧНОЇ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ K_{dc}

Мета роботи:

освоїти методику визначення ударної в'язкості.

Теоретичні відомості:

Динамічними називають випробування, при яких швидкість деформування (швидкість навантаження) вища, ніж при статичних випробуваннях.

З допомогою динамічних випробувань визначають схильність сплавів до крихкого руйнування, його схильність витримувати ударні навантаження, чутливість до надрізів (концентраторів напружень). Сплави, які мають достатній запас пластичності за статичного навантаження, можуть руйнуватись крихко при динамічному навантаженні. Схильність металів до крихкого руйнування зростає із збільшенням швидкості навантаження, зниженням температури, збільшенням розміру зерна, збільшенням вмісту шкідливих домішок, таких як фосфор, сірка, кисень, водень та інших.

Найбільш поширені ударні випробування на згин зразків з надрізом. Такі випробування регламентуються державним стандартом. Метод ґрунтується на руйнуванні зразка з концентратором посередині при однократному ударному навантаженні на маятниковому копрі (рис. 1). По результатах випробувань визначають ударну в'язкість, а також відносне звуження зразка після руйнування.

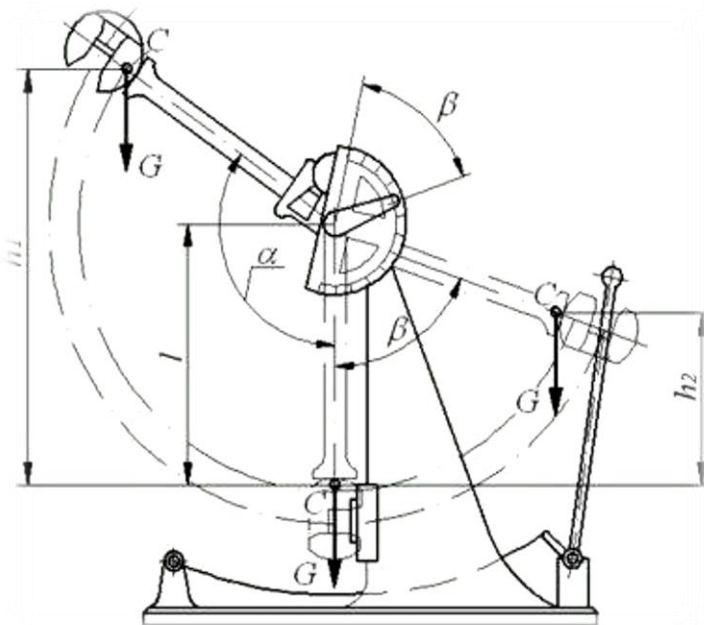


Рис 1. Маятниковий копер

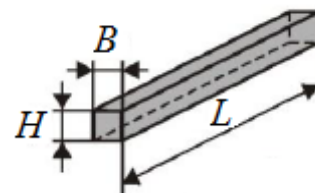


Рис. 2 Зразок для випробувань

Ударна в'язкість – це робота, витрачена на деформацію і руйнування зразка, віднесена до початкової площі поперечного перерізу зразка в місці концентратора. Вимірюється в МДж/м².

$$KC = A/F = \frac{G(h_1-h_2)}{F} = \frac{Gl(\cos\beta-\cos\alpha)}{F}, \quad (1)$$

де F – площа нетто-перерізу зразка; l – довжина маятника, м; G – вага маятника; α , β – кути підйому маятника відповідно до і після удару (руйнування зразка).

Форма і розміри зразків для випробування повинні відповідати зазначеним у таблиці 1 і на рис. 2-4.

Таблиця 1

Розміри зразків, мм

Вид концентратора	Радіус концентратора, R	Довжина, L	Ширина, B	Висота, H	Глибина концентратора	Висота робочого перерізу
U	$1\pm 0,07^*$	65	$10\pm 0,10$	10		$10\pm 0,10$
V	$0,25\pm 0,025$	55	$10\pm 0,10$	10		$10\pm 0,10$
T	Тріщина	55	$10\pm 0,10$	11	1,5	

1. Метод відбору зразків.

1.1. При вирізці заготовок метал зразків повинен оберігатися від наклепу і нагріву, що змінюють властивості металу, якщо не передбачено інше в нормативно-технічній документації на продукцію. Риски на поверхні концентраторів видів U і V , видимі без застосування збільшувальних засобів, не допускаються. Концентратор виду T отримують у вершині початкового надрізу при плоскому циклічному вигині зразка. Спосіб отримання початкового концентратора може бути будь-яким.

1.2. Максимальний залишковий прогин, що утворився при нанесенні на зразках концентратора виду T , не повинен перевищувати 0,25 мм – для зразків довжиною 55 мм. Контроль прогину зразка здійснюється за допомогою індикаторів годинникового типу за ГОСТ 577-68 або інших засобів, що забезпечують похибку вимірювання прогину не більше 0,05 мм на базі довжини зразка.

1.3. Тип і кількість зразків, порядок проведення повторних випробувань повинні бути зазначені в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію, затвердженій в установленому порядку.

1.4. Галузь застосування зразків наведено в таблиці 2.

Вид концентратора	Галузь застосування
U	При виборі, приймально-здавальних випробуваннях металів і сплавів
V	При виборі, приймально-здавальних випробуваннях металів і сплавів для конструкцій підвищеного ступеня надійності (літальні апарати, транспортні засоби, трубопроводи, судинки тиску і т.п.)
T	При виборі і приймальному контролі металів і сплавів для особливо відповідальних конструкцій, для експлуатаційних яких оцінка опору розвитку тріщини має першорядне значення. При дослідженні причин руйнування відповідальних конструкцій.

Якщо в нормативно-технічній документації на металопродукцію не вказаний тип зразка, слід випробовувати зразки типу 1.

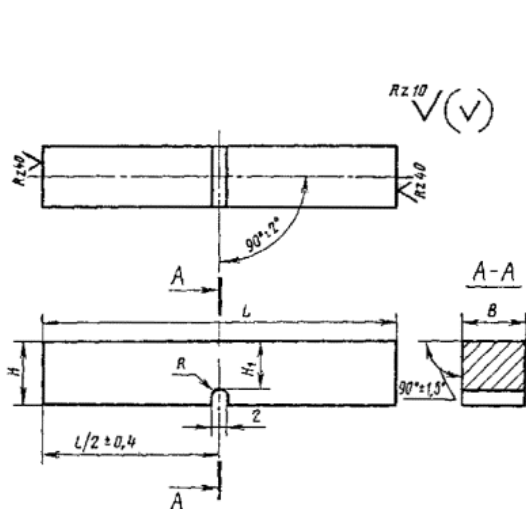


Рис. 3. Зразок з концентратором виду U

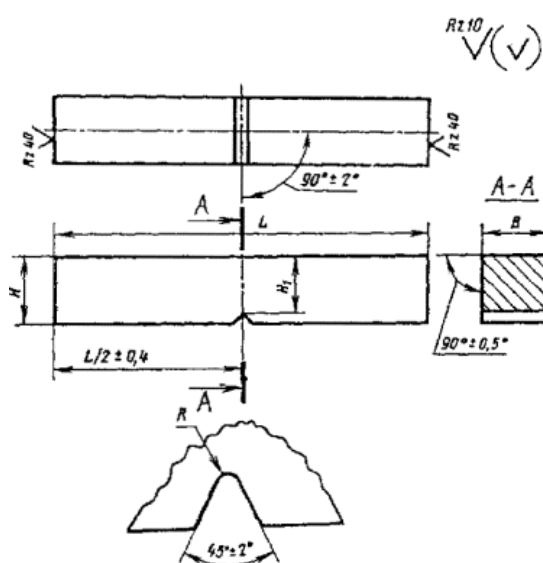


Рис. 4. Зразок з концентратором виду V

2. Апаратура і матеріали.

2.1. Маятникові копри – по ГОСТ 10707-82.

Швидкість руху маятника в момент удару повинна бути:

$5 \pm 0,5$ м/с – для копрів з номінальною потенціальною енергією маятника 50,0 (5,0), 150 (15), 300 (30) Дж (кгс × м);

$4 \pm 0,25$ м/с – для копрів з номінальною потенціальною енергією маятника 25 (2,5), 15 (1,5), 4,5 (0,75) Дж (кгс × м);

$3 \pm 0,25$ м/с – для копрів з номінальною потенціальною енергією маятника 5,0 (0,5) Дж (кгс × м).

Допускається застосовувати копри з іншою номінальною потенціальною енергією маятника. При цьому номінальне значення потенціальної енергії маятника має бути таким, щоб значення роботи удару становило не менше 10% від номінального значення потенціальної енергії маятника.

Номінальне значення потенціальної енергії маятника має бути зазначено в нормативно-технічній документації на конкретну продукцію. Основні розміри опор та ножа маятника повинні відповідати зазначеним на рис. 5.

Для копрів іншої конструкції допускаються інші радіуси заокруглення ребра опори та швидкість руху маятника від 4,5 до 7,0 м/с.

Термостат, що забезпечує рівномірне охолодження або нагрів, відсутність агресивного впливу навколишнього середовища на зразок і можливість контролю температури. Суміш рідкого азоту (ГОСТ 9293-74) або твердої вуглекислоти («сухого льоду») з етиловим спиртом. Застосування в якості охолоджувача рідкого кисню і рідкого повітря не допускається. Масова частка кисню в рідкому азоті в процесі охолодження зразків у термостаті не повинна бути більше 10%. Термометри з похибкою не більше $\pm 1^\circ\text{C}$ для вимірювання температури охолоджуючого середовища. Термометри, включаючи і перетворювачі термоелектричні (термопари) для вимірювання температури нагріву зразків, що забезпечують вимірювання з похибкою, що не перевищує: $\pm 5^\circ\text{C}$ – при температурі нагріву до 600°C ; $\pm 8^\circ\text{C}$ – понад 600°C .

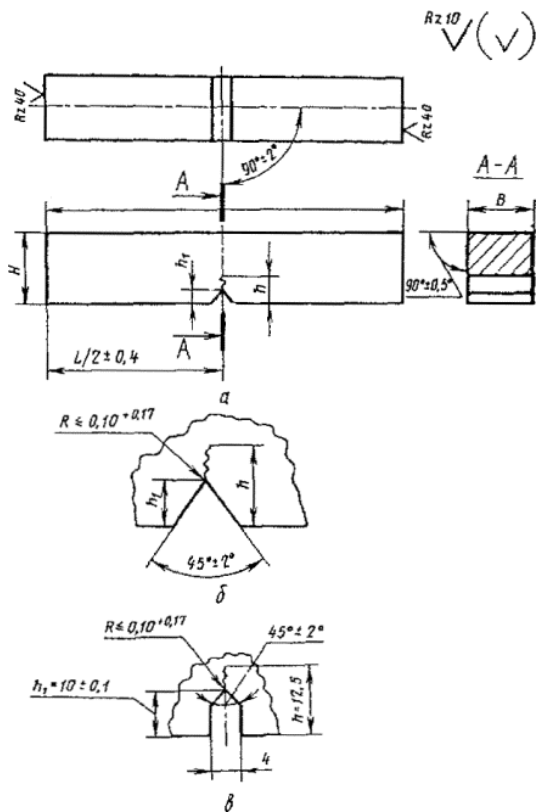


Рис. 5. Зразок з концентратором виду *T* (втомна тріщина)

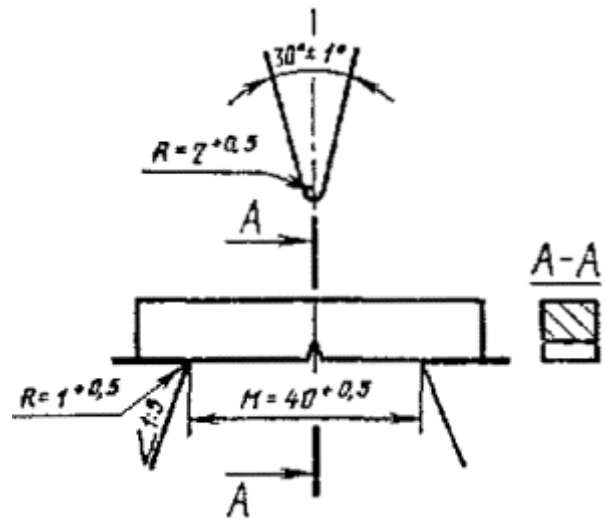


Рис.6. Опори і ножі маятника

Тріщину на зразках отримують на вібраторах, виготовлених за нормативно-технічній документації.

2.7. Штангенциркулі повинні відповідати вимогам ГОСТ 166-80. Допускається застосовувати і інші вимірювальні засоби, що забезпечують вимірювання з похибкою, що не перевищує зазначеної в п. 1.1.

3. Підготовка до випробування.

3.1. Перед початком випробувань необхідно перевірити положення покажчика роботи при вільному падінні маятника. Для маятникових копрів з цифровими відліковими пристроями показчик роботи у вихідному положенні повинен показувати «нуль» при допустиме відхилення в межах ширини штриха шкали по ГОСТ 8.264-77.

3.2. Температурою випробування слід вважати температуру зразка в момент удару. Температуру випробування вказують у нормативно-технічній документації на конкретну продукцію, затверджену в установленому порядку.

3.3. Кімнатною температурою слід вважати температуру $20 \pm 10^{\circ}\text{C}$.

3.4. Для забезпечення необхідної температури випробування зразки перед установкою на копер повинні бути переохолоджені (при температурі випробування нижче кімнатної) або перегріті (при температурі випробування вище кімнатної). Ступінь переохолодження або перегріву повинна забезпечувати необхідну температуру випробування і повинна визначатися експериментальним шляхом. Температура переохолодження або перегріву зразків за умови, що вони можуть бути випробувані не пізніше ніж через 3-5 с після вилучення з термостата, вказана у стандарті ГОСТ 9454-78. Витримка зразків у термостаті при заданій температурі (з урахуванням необхідного переохолодження або перегріву) повинна бути не менше 15 хв.

3.5. Контактуюча із зразком частина пристосування для вилучення його з термостата не повинна змінювати температуру зразка при установці його на опори копра (рис. 6).

4. Проведення випробування.

4.1. Зразок повинен вільно, лежати на опорах копра (див. рис. 4). Установка зразка повинна проводитися за допомогою шаблону, що забезпечує симетричне розташування концентратора щодо опор з похибкою не більше $\pm 0,5$ мм. При використанні торцевих обмежувачів останні не повинні заважати зразкам вільно деформуватися.

4.2. Випробування повинно проводитися при ударі маятника з боку, протилежного концентратора, у площині його симетрії.

4.3. Роботу удару визначають за шкалою маятникового копра або аналогових відлікових пристроїв.

5. Обробка результатів.

5.1. За результат випробування приймають роботу удару або ударну в'язкість для зразків з концентраторами видів U і V і ударну в'язкість для зразків з концентратором виду T .

5.2. Роботу удару позначають двома буквами (KU , KV або KT) і цифрами. Перша буква (K) – символ роботи удару, друга буква (U , V або T) – виду концентратора. Ударну в'язкість позначають поєднанням букви і цифр. Перші дві літери KC позначають символ ударної в'язкості, третя буква – вид концентратора.

Ударну в'язкість (KC) Дж/см² (кгс×мА/см²) обчислюють за формулою (1) Початкова площа поперечного перерізу зразка в місці концентратора обчислюється за формулою

$$F = H_1 B \quad (2)$$

H_1 – початкова висота робочої частини зразка, см; B – початкова ширина зразка, см. H_1 і B вимірюють з похибкою не більше $\pm 0,05$ мм ($\pm 0,005$ см) і округлюють: при ширині зразка 5 мм і менше – до третьої значущої цифри, при ширині зразка більше 5 мм – до другої значущої цифри. Для зразків з концентратором виду T значення H_1 визначають як різницю між повною висотою H , виміряною до випробування з похибкою не більше $\pm 0,05$ м ($\pm 0,005$ см) і розрахункової глибиною концентратора h_p , виміряно. за допомогою будь-яких оптичних засобів із збільшенням не менше 7 на поверхні зламу зразка після його випробування за схемою, наведеною на рис. 6, з похибкою не більше $\pm 0,05$ мм.

5.5. Значення KC записують у протоколі з округленням: до 1 (0,1) Дж/см² (кгс×м/см²) – при значенні KC більше 10 (1) Дж/см² (кгс×мА/см²) до 0,1 (0,01) Дж/см² (кгс×мА/см²) – при значенні KC менше 10 (1) Дж/см² (кгс×м/см²).

5.6. Якщо в результаті випробування зразок не зруйнувався повністю, то показник якості матеріалу вважається не визначеним. В цьому випадку в протоколі випробування вказують, що зразок при максимальній енергії удару маятника не був зруйнований. Результати випробувань не враховують при зламі зразків за дефектів металургійного виробництва.

5.7. При заміні зразка причину вказують у протоколі випробування. Вихідні дані і результати випробування зразка записують у протоколі випробування.

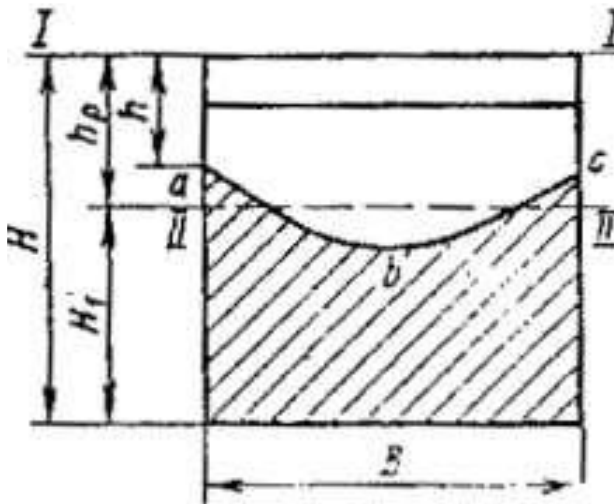


Рис. 6. Схема визначення довжини втомної тріщини: abc – фронт втомної тріщини, I – положення візирної лінії окуляра мікроскопа в початковий момент вимірювання (збігається з межею зразка), II-II – положення візирної лінії мікроскопа при закінченні виміру (положення II-II вибирається так, щоб заштрихована площа вище лінії була б рівновелика не заштрихованій площі нижче візирної лінії)

ПРОТОКОЛ ВИПРОБУВАНЬ НА УДАРНИЙ ВИГИН

Марка копра _____

Максимальна енергія удару маятника при випробуванні _____

Швидкість маятника в момент удару _____

Випробуваний матеріал _____

Маркування зразка _____

Тип зразка _____

Температура випробування _____

Ширина зразка, B	Висота зразка, H	Глибина концентратора, h	Висота робочого перерізу H_1	Площа поперечного перерізу F , см^2	Робота удару K , Дж	Ударна в'язкість KC , Дж/см ²

Лабораторна робота № 4

ВИПРОБУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ БАГАТОЦИКЛОВОЮ ВТОМОЮ

Мета роботи:

оволодіти методикою випробування металів і зварних з'єднань, ознайомитись з обладнанням для виконання експериментів, обробки результатів та їх аналізу.

Основні терміни та визначення (ДСТУ 2444-94):

Втома – процес поступового накопичення пошкоджень, утворення та розвитку тріщин у матеріалі під дією циклічного навантажування.

Втомне пошкодження – необоротна зміна фізико-механічних властивостей матеріалу об'єкта і поява втомної тріщини від дії циклічного навантаження.

Багатоциклова втома – втома матеріалу, за якої втомне пошкодження і руйнування відбувається без виявленого накопичення деформацій.

Малоциклова втома – втома матеріалу, за якої втомне пошкодження і руйнування відбуваються в основному під час пружнопластичного деформування.

База випробувань – попередньо задана найбільша тривалість випробувань на втому об'єкта [зразка].

Цикл напруження [деформації] – сукупність послідовних значень напруження [деформації] упродовж одного періоду їх зміни за регулярного навантажування.

Симетричний цикл напруження [деформації] – цикл, у якому максимальне і мінімальне напруження [деформації] рівні за абсолютними значеннями, але протилежні за знаком. **Асиметричний цикл напруження [деформації]** – цикл, у якому максимальне і мінімальне напруження [деформації] мають різні абсолютні значення.

Віднульовий цикл напруження – знакосталий цикл напруження, що змінюється від 0 до максимуму, чи від нуля до мінімуму.

Коефіцієнт асиметрії циклу напруження – відношення мінімального напруження циклу до максимального напруження циклу.

Жорстке навантажування – циклічне навантажування, що забезпечує задану залежність зміни деформації об'єкта від часу чи іншого параметра.

М'яке навантажування – циклічне навантажування, що забезпечує задану залежність зміни номінального напруження в об'єкті від часу або іншого параметра.

Границя витривалості – максимальне за абсолютним значенням напруження циклу, за якого ще не відбувається втомне зруйнування матеріалу протягом заданої кількості циклів навантажування.

Границя обмеженої витривалості – максимальне за абсолютним значенням напруження циклу, що відповідає згідно з кривою втоми заданій циклічній довговічності.

Руйнування – зародження та розвиток у матеріалі дефектів і (чи) розділення об'єкта на частини.

Витривалість – здатність матеріалів і конструкцій чинити опір дії циклічного навантаження до бази випробувань без втомного руйнування.

Навантаження – чинник або сукупність чинників, дія яких на об'єкт призводить до зміни його напружено-деформованого стану.

Навантажування – процес дії навантаження на об'єкт.

Теоретичні відомості:

Ще в середині XIX ст. на основі досвіду експлуатації машин та конструкцій було виявлено, що міцність їх деталей суттєво знижується в умовах дії змінного навантажування.

Встановлення цього факту стало основою створення нового напрямку в науці про міцність матеріалів і конструкцій, яке одержало назву втоми матеріалів. Цьому напрямку присвячена велика кількість дослідів і він є одним з найбільш важливих в практичному відношенні та найбільш цікавим у пізнавальному плані.

На рис. 1 приведено типову залежність для пластичних металів величин граничного напруження від кількості циклів до руйнування за результатами досліджень при віднульовому циклі, коли навантажування змінюється від нуля до максимального розтягуючого значення. Вивчення процесу деформування та аналіз видів руйнування, що мають місце при цьому, дають можливість розділити приведену на рисі залежність на три ділянки. На ділянці 1 руйнування відбувається в результаті направленої пластичної деформування до величини граничної деформації, яка за величиною близька до граничної пластичної деформації досліджуваного металу при монотонному збільшенні навантажування. Злам у цьому випадку нічим не відрізняється від зламу при статичному руйнуванні. Такий вид руйнування називається квазістатичним.

На ділянках 2 та 3 руйнування відбувається внаслідок утворення та розвитку втомної тріщини. В зламі можна спостерігати дві ділянки, що відрізняються за зовнішнім видом (рис. 2). Перша ділянка має тонковолокнисту будову і є наслідком розвитку втомної тріщини, інша має більш або менш крупнозернистий вид, що мало відрізняється від будови крихкого зламу, і є ділянкою кінцевого руйнування.

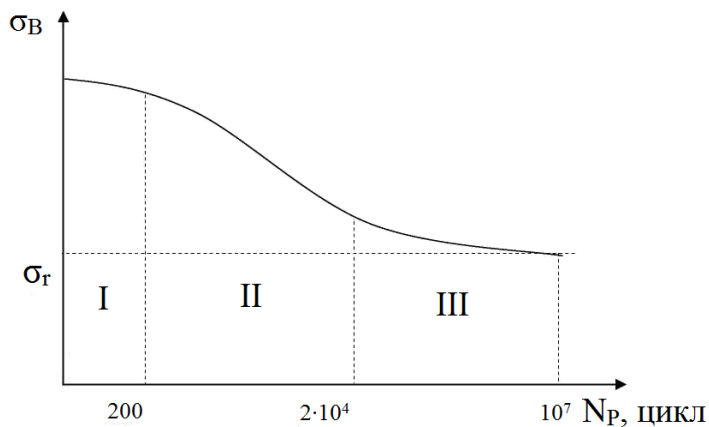


Рис.1 Залежність граничного напруження від кількості циклів до руйнування

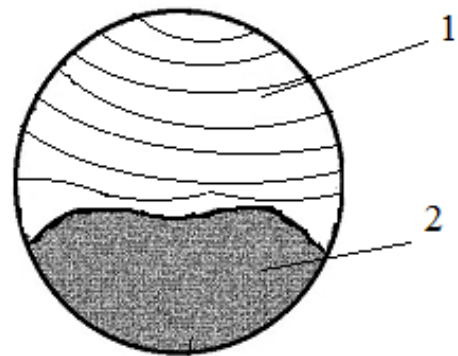


Рис. 2 Злам зразка:
1 – ділянка росту втомної тріщини;
2 – ділянка долому зразка

В обох випадках спостерігається втомне руйнування, яке можна визначити як процес поступового накопичення пошкоджень в матеріалі під дією змінних навантажень, що призводить до утворення втомної тріщини, її розвитку та кінцевого руйнування. Відмінність ділянок 2 та 3 (рис. 1) в тому, що на ділянці 2 зразок руйнується після порівняно невеликої кількості циклів навантажування $N_p < 2 \cdot 10^4$ цикл) і розвиток втомної тріщини відбувається внаслідок високого рівня напружень із значними пластичними деформаціями, які можуть призвести до значних змін форми та розмірів досліджуваного зразка; на ділянці 3 руйнування відбувається після значної кількості циклів навантаження невеликої величини ($N_p > 2 \cdot 10^4$ цикл) без слідів деформації.

Враховуючи сказане, ділянку 2 можна назвати ділянкою малоциклової втоми, а ділянку 3-багатоциклової втоми.

На рис 1 подані орієнтовні значення кількості циклів до руйнування, що відповідають переходу від однієї ділянки до іншої для металів. Для деяких металів, в першу чергу вуглецевих сталей при кімнатній температурі, залежність між напруженнями та кількістю циклів до руйнування, як це показано на рис 1, при $N_p > 2 \cdot 10^7$ цикл виходить на горизонтальну ділянку. Величина напруження в цьому випадку називається границею витривалості.

На рис 1. прийняті наступні позначення: σ_r – границя витривалості, N_p – база дослідів, а саме - кількість циклів навантажування, після якого руйнування зразка не відбудеться, скільки б часу ми його не навантажували.

Для вуглецевих сталей база випробувань складає 10^7 циклів, для кольорових металів – $(5...10) \cdot 10^7$ циклів. При дослідях в умовах високих температур, за дії корозійного середовища і в деяких інших випадках втомне руйнування може відбуватися і після більшої кількості циклів. Результати дослідів представляються у вигляді кривих втоми – графіків, що характеризують залежність між максимальними або амплітудними напруженнями (деформаціями) та кількістю циклів до руйнування, отриманих при дослідженні партії однакових зразків при рівному середньому напруженні (деформації) циклу або при рівному коефіцієнті асиметрії циклу

навантажування (рис. 1). Для аналітичного опису кривих багатоциклової втоми використовуються різні рівняння, зокрема:

$$N_p \sigma_a^{b_1} = C_1 \quad (1)$$

$$N_p \sigma_a^{b_2} = C_2 \quad (2)$$

$$(\sigma_a - \sigma_r) N_p^{b_3} = C_3 \quad (3)$$

$$(\sigma_a - \sigma_r) (N_p + B)^{b_4} = C_4 \quad (4)$$

де $b_1, b_2, b_3, b_4, B, C_1, C_2, C_3, C_4$, – параметри рівнянь. Кожне з цих рівнянь може бути представлено у вигляді прямої лінії в вибраних відповідним чином координатах. Так, для рівняння (1) такими координатами будуть $\lg - \ln(> T_p)$; для рівняння (2) – $\ln(a) - \ln(K_p)$; для рівняння (3) – $\ln(a - \sigma_r) - \ln(K_p)$; і для рівняння (4) – $\ln(a - \sigma_r) - \ln(K_p + B)$. Найчастіше для опису результатів експерименту використовується рівняння.

Основні вимоги до випробувань

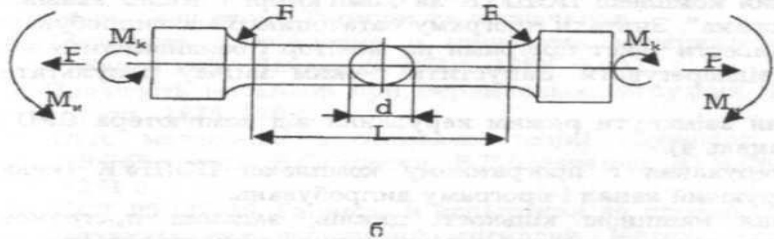
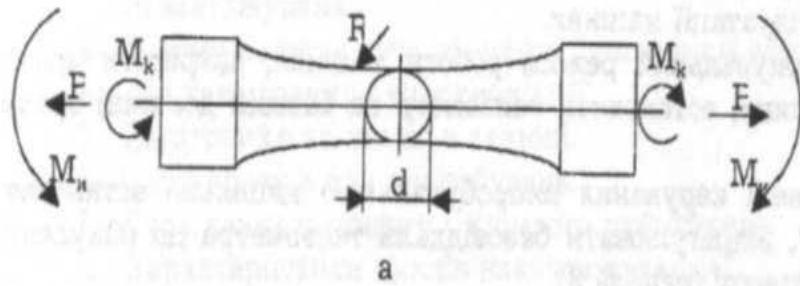
Основними критеріями руйнування для визначення границь витривалості та побудові кривих втоми є повне руйнування або утворення мікротріщини заданого розміру. Для побудови кривої втоми та визначення границі витривалості, що відповідають ймовірності руйнування 50%, проводяться досліди на 10-15 однакових зразках. За базу досліджень для визначення границі витривалості приймаємо:

10·10⁶ циклів – для металів та сплавів, що мають горизонтальний участок на кривій втоми;

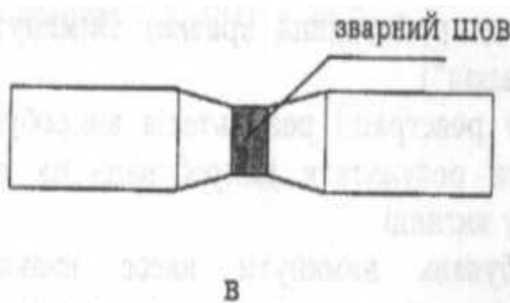
100·10⁶ циклів – для легких сплавів та інших металів, ординати кривої втоми яких по всій довжині неперервно зменшуються зі зростанням числа циклів.

Від 10 до 300 Гц частота навантаження не регламентується, якщо дослідження проводяться в звичайних атмосферних умовах і якщо температура робочої частини зразка не вища за 50°C. Випробування проводять на циліндричних зразках (рис. 3) при циклічному одноісному розтязі-стиску, крученні та згинанні (рис. 3). Конструкції із основного металу представлені на рис. 3 а, б, зі зварного шва на рис 3 в.

Типи зразків:



d, мм	R, мм
5,0	
7,5	
10	
12	>5d
15	
20	
25	



d, мм	L=5d	R, мм
5,0	25	5,0
7,5	37,5	7,5
10	50	10
12	60	12
15	75	15
20	100	20
25	125	23

Рис. 3 Циліндричні зразки для випробувань на багатоциклову втому: з основного металу (а)-(б), зі зварним швом (в); робоча ділянка зразка типу I (а) типу II (б)

Обладнання інструменти та метаріали:

1. Випробувальна машина 1 шт.
2. Мікрометр 1 шт.
3. Штангенциркуль 1 шт.
4. Циліндричні зразки зі сталі 4 шт.

Порядок виконання:

Лабораторна робота по дослідженню матеріалів на багатоциклову втому виконується на сервогидравлічній випробувальній машині СТМ-100. Перед виконанням роботи студент зобов'язаний засвоїти теоретичну частину, інструкцію та правила техніки безпеки при роботі з випробувальною

машиною та отримати допуск до виконання роботи у викладача. Для проведення експерименту необхідно:

- Запустити випробувальну машину в режим роботи помпи низького тиску, ввімкнути контур охолоджувальної води і прогріти масло упродовж 10...15 хв. згідно з інструкцією по експлуатації машини.
- Встановити налагоджувальний режим роботи машини, закріпити зразок (рис. 5,а) в затискачах машини, встановити тензометр на базовій довжині зразка (25 мм) згідно рис. 5, 6.
- На електронній панелі керування випробувальною машиною встановити режим контролю "Мода 3", відрегулювати базовіддаль тензометра до обнулення показів на цифровому вольтметрі (панель 3).
- Для контролю кількості циклів навантажування ввімкнути лічильник (панель 5).
- Встановити режим керування машиною за зусиллям F або за S (панель 7).
- Запустити програмний комплекс ПОШУК на комп'ютері і згідно вказівок меню зайти в каталог "Програма". Зчитати програму багатоциклових випробувань (за вказівкою викладача). Вивести текст програми на монітор і ознайомитись з її змістом, при необхідності відкорегувати. Запустити режим запису результатів випробувань в файл.
- На панелі управління ввімкнути режим керування від комп'ютера CPU і насос високого тиску ON (панель 4).
- Ввійти в режим керування в програмному комплексі ПОШУК (меню "Керування"), запустити керуючий канал і програму випробувань.
- Після відпрацювання машиною кількості циклів, заданих програмою випробувань, на моніторі з'явиться відповідне повідомлення (якщо програмою не передбачені циклічні навантаження до руйнування зразка). Вимкнути канал з клавіатури комп'ютера (меню "Керування").
- Перевірити наявність файлу реєстрації результатів випробувань (меню "Функції"). При необхідності вивести результати випробувань на монітор або принтер в табличному або графічному вигляді.
- Після закінчення випробувань вимкнути насос низького тиску випробувальної машини, електронну панель керування, контур проточної охолоджувальної води.
- Для отримання характеристик матеріалу при малоцикловому навантаженні використати відповідне програмне забезпечення ПЕОМ (за вказівкою викладача). Вивести протокол випробувань, користуючись вказівками меню в програмі обробки, на монітор чи принтер. Ознайомитись з отриманими результатами випробувань і зробити висновки по них.
- На основі протоколу випробувань складається зведений протокол (див. додаток 1).
- Оформити звіт по роботі.

Зміст звіту:

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Структурна схема випробувального комплексу.
4. Ескіз зразка для випробувань.
5. Режимы випробувань
6. Результати випробувань.
7. Висновок.

Контрольні запитання:

1. Що таке втомне пошкодження?
2. Назвати основні ділянки повної діаграми руйнування при циклічному навантаженні.
3. В чому полягає суть втомного багаточиклового зруйнування?
4. Що таке границя витривалості?
5. Багаточиклова втома в техніці.
6. Типи зразків для випробувань.
7. Суть квазістатичного і втомного руйнування.
8. Характеристики циклів навантажування.

Додаток. 1

Зведений протокол. №

Мета досліджень

Матеріал:

матеріал та стан

напрямок волокна

тип заготовки (при складній формі додається план вирізки зразка)

Механічні характеристики

Умови дослідження:

тип навантажування

вид навантажування

температура досліджень

частота навантажування

Зразки:

тип зразка та номінальні розміри поперечного січення

стан поверхні

Випробувальна машина:

Тип , №

Дата дослідження:

початок дослідження першого зразка

закінчення дослідження останнього зразка

Шифр зразка	Число циклів до руйнування	Число циклів до утворення макротріщини	σ_{max} , МПа	N_p , цикл	f , Гц	T , °С	Примітки

Лабораторна робота № 5

ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ НА МАЛОЦИКЛОВУ ВТОМУ

Мета роботи:

ознайомитися з методикою випробувань матеріалів в умовах пружнопластичного деформування, експериментальним обладнанням і отримати практичні навички з проведення експерименту, обробки його результатів та їх аналізу.

Основні терміни та визначення:

Втомне малоциклове зруйнування – зруйнування без виявленого накопичення одnobічних деформацій.

Критерії малоциклового зруйнування – оцінки граничного стану матеріалу під час описування процесів малоциклового руйнування за допомогою деформаційних, енергетичних та силових підходів.

Діаграма циклічного деформування – графік, що характеризує залежність між значенням напруження і значеннями деформації за циклічного деформування.

Матеріали циклічно зміцнювальні – матеріали, в яких ширина петлі гістерезису за м'якого навантажування зменшується, а максимальне напруження циклу за жорсткого навантажування збільшується.

Матеріали циклічно знеміцнювальні – матеріали, в яких ширина петлі гістерезису за м'якого навантажування збільшується, а максимальне напруження циклу за жорсткого навантажування зменшується.

Матеріали циклічно стабільні – матеріали, в яких ширина петлі гістерезису в разі м'якого та жорсткого навантажування залишається практично незмінною.

Теоретичні відомості:

В багатьох інженерних конструкціях спостерігається руйнування після відносно незначної кількості циклів навантажування, що нараховує декілька тисяч повторень. Руйнування після малої кількості циклів навантажування від так званої малоциклової втоми, як правило, відбуваються при значній (близько 1%) пластичній циклічній деформації в макрооб'ємах розглядуваного елемента конструкції. Межа між мало- і багатоцикловою втомою є умовною і зумовлюється головним чином мірою непружності матеріалу в циклі навантажування і наявною пластичністю матеріалу. Для високопластичних сплавів перехідна зона зміщується в бік більших довговічностей, для крихких – у бік менших.

Розрахунки елементів конструкцій на малоциклову втому базуються на експериментальних даних вивчення закономірностей опору руйнуванню і руйнуванню при циклічному пружнопластичному деформуванні, а також дослідженнях кінетики неоднорідного напружено – деформованого стану і

накопичення пошкоджень в зонах концентрацій – місцях ймовірного руйнування.

Систематичне дослідження закономірностей циклічного деформування металів при високих рівнях напружень було розпочато Баушингером в кінці 19 століття. Ним встановлено, що при пульсуючому розтягуванні з напруженням σ_0 , що перевищує межу текучості σ_T , нове значення межі текучості при подальшому навантаженні після повного розвантаження приблизно відповідає напруженню σ_0 (рис. 1а).

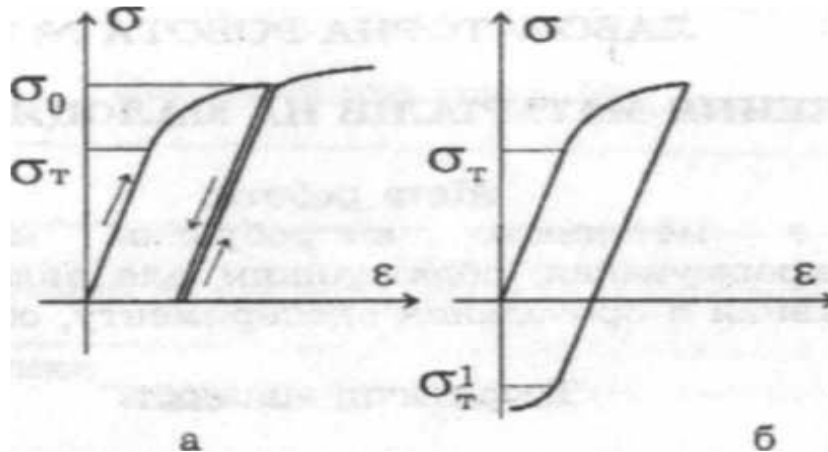


Рис. 1 Схеми деформування матеріалу при повторному (а) і повторно-змінному (б) напруженнях

При повторно-змінному навантаженні напруженням, що перевищує межу текучості σ_{0T} , значення межі текучості в наступному півциклі σ_T^1 , виявляється тим нижче, чим вище першочергове напруження (рис. 1б). Це явище отримало в літературі назву ефекту Баушингера. Пізніше результати Баушингера були підтверджені багатьма дослідниками.

Опір матеріалів циклічному пружно-пластичному деформуванню звичайно вивчають при однорідному напруженому стані, використовуючи два основних види навантажування. При першому в процесі циклічного деформування постійною зберігається амплітуда напружень, при другому – амплітуда деформації. Ці види, відповідно, називають м'яким і жорстким навантажуванням.

Опір руйнуванню при циклічному деформуванні матеріалу суттєво залежить від характеру навантаження (м'яке і жорстке) і циклічних деформаційних властивостей цього матеріалу.

При м'якому навантажуванні циклічно знеміцнювальних матеріалів накопичуються пластичні деформації, які можуть привести до двох типів руйнування – квазістатичного і втомного. Квазістатичне пов'язане зі збільшенням залишкових деформацій до рівня, який відповідає руйнуванню при одноразовому статичному навантаженні. Руйнування втомного характеру пов'язане з накопиченням пошкоджень, утворенням прогресуючих тріщин при суттєво меншій пластичній деформації. Можливі, і проміжні форми руйнування, коли утворюються тріщини втоми на фоні помітних пластичних деформацій.

Циклічно зміцнювальні матеріали руйнуються тільки від втоми. Для них крива втоми в інтервалі довговічності 10^2 - 10^4 циклів досить добре описується емпіричним рівнянням:

$$\sigma_a = N^n = C \quad (1)$$

де σ_a , – амплітуда напруження;
 n, C – сталі матеріалу;
 N – число циклів руйнування.

Для квазістатичного руйнування в якості критерію переходу в граничний стан приймають величину накопиченої деформації ϵ_B , при циклічному навантаженні, що відповідає руйнуванню при одноразовому статичному навантаженні.

При жорсткому навантажуванні немає накопичення деформацій, що виключає можливість квазістатичного руйнування. В цьому випадку всі матеріали руйнуються за механізмом втоми з утворенням тріщини.

Експерименти з різними матеріалами показали, що залежність між розмахом пластичної деформації за цикл $\Delta\epsilon_{пл}$ і числом циклів до руйнування в подвійних логарифмічних координатах близькі до лінійних. Це стало основою для такого емпіричного виразу між циклічною довговічністю N і розмахом пластичної деформації за цикл (формула Менсона-Коффіна):

$$\Delta\epsilon_{пл} N^m = M \quad (2)$$

де m і M – сталі матеріалу

В залежності від режиму випробувань (м'який чи жорсткий) за експериментальними результатами будують криві малоциклової втоми відповідно в координатах максимальне чи амплітудне значення руйнуючих напружень чи навантажень – кількість циклів до руйнування (рис. 2), або в координатах максимальне чи амплітудне значення руйнуючих деформацій чи переміщень – число циклів до руйнування (рис. 3). Криві втоми можуть бути подані в цих випадках в лінійному, напівлогарифмічному або в подвійному логарифмічному масштабі, як це робиться при побудові кривих багатоциклової втоми.

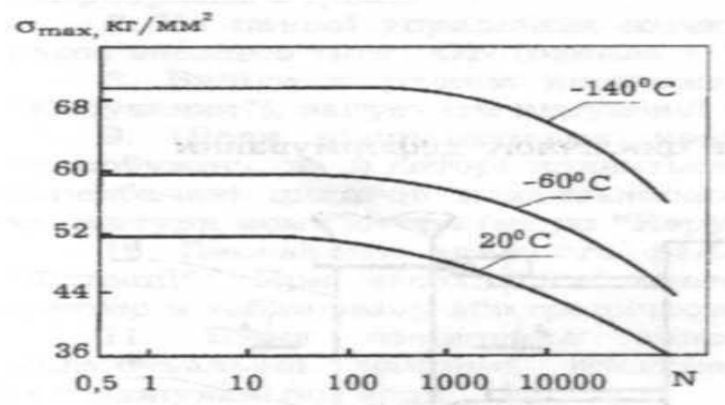


Рис. 2 Крива малоциклової втоми сталі 15Г2АФД при різній температурі

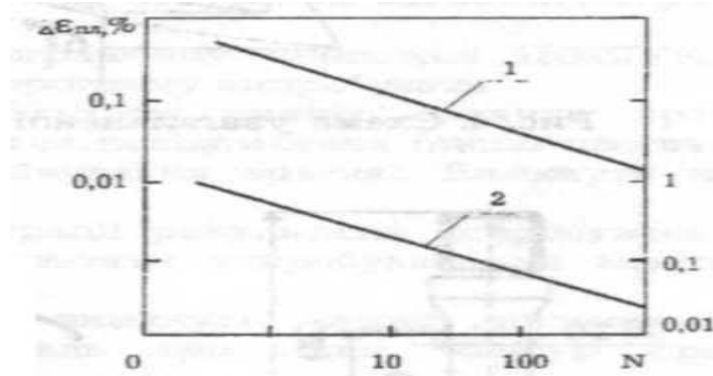


Рис. 3 Крива малоциклової втоми алюмінієвого сплаву (1) і вуглецевої сталі (2)

На основі узагальнення великої кількості експериментальних даних для сталей, жароміцних сплавів, алюмінієвих та титанових сплавів була запропонована така залежність для кривої втоми в координатах:

$$\Delta \varepsilon_{\text{пл}} = \frac{1}{2} \left(\ln \frac{1}{1 - \Psi} \right)^{0,6} N^{-0,6} + 1,75 \frac{\sigma_B}{E} N^{-0,12} \quad (3)$$

де Ψ – відносне звуження поперечного перерізу зразка;
 σ_B – межа міцності матеріалу;
 E – модуль пружності матеріалу.

Перший доданок цього рівняння описує амплітуду граничної пластичної деформації, другий – амплітуду граничної пружної деформації.

За результатами експериментів будують узагальнену діаграму циклічного пружнопластичного деформування (рис. 4). Це графік, що характеризує залежність напруження від деформації за параметром кількості півциклів навантажування, який будується для кожного окремого півциклу навантажування з початком у точці розвантажування та дозволяє всі кінцеві та поточні точки к-того півциклу навантажування розташовувати на тій же кривій для даного півциклу навантажування.

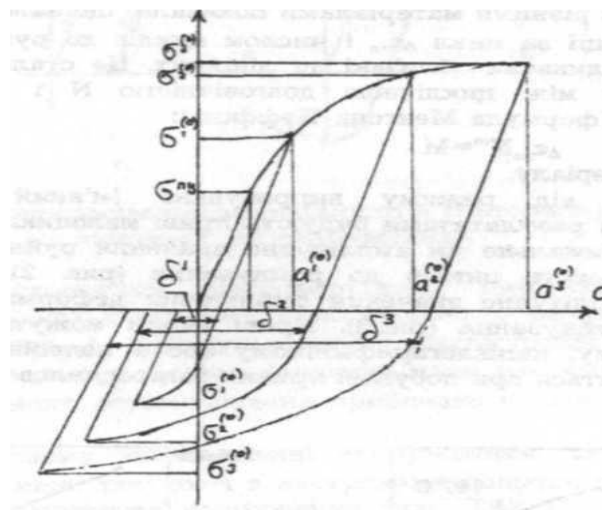


Рис. 4. Схема узагальненої діаграми циклічного деформування

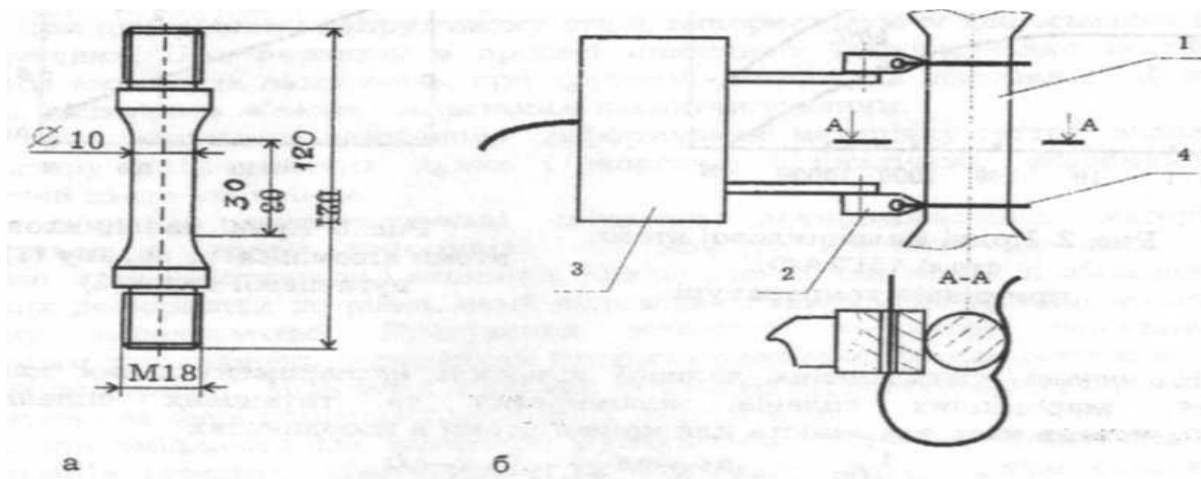


Рис. 5 Зразок для випробувань на малоциклову втому (а) та схема закріплення тензометра на зразку (б)

Порядок виконання роботи:

Лабораторна робота по дослідженню матеріалів на малоциклову втому виконується на сервогідравлічній випробувальній машині СТМ-100. Перед виконанням роботи студент зобов'язаний засвоїти теоретичну частину, інструкцію та правила техніки безпеки при роботі з випробувальною машиною та отримати допуск до виконання у викладача. Для проведення експерименту необхідно:

- Запустити випробувальну машину в режим роботи помпи низького тиску, ввімкнути контур охолоджувальної води і прогріти масло упродовж 10 – 15 хв. згідно з інструкцією по експлуатації машини.

- Встановити налагоджувальний режим роботи машини, закріпити зразок (рис. 5а) в затискачах машини, встановити тензометр на базовій довжині зразка (25 мм) згідно рис. 5,6.

- Для контролю кількості циклів навантажування ввімкнути лічильник.

- Встановити режим керування машиною за зусиллям P або за переміщенням S в залежності від бажаного режиму випробувань (м'який чи жорсткий).

- Зчитати програму малоциклових випробувань (за вказівкою викладача). Вивести текст програми на монітор і ознайомитись з її змістом, при необхідності відкоректувати. Запустити режим запису результатів випробувань в файл.

- На панелі управління ввімкнути режим керування від комп'ютера CPU і насос високого тиску ON (панель 4).

- Запустити керуючий канал і програму випробувань.

- Після відпрацювання машиною кількості циклів, заданих програмою випробувань, на моніторі з'явиться відповідне повідомлення (якщо програмою не передбачені циклічні навантаження до руйнування зразка). Вимкнути канал з клавіатури комп'ютера (меню "Керування").

- Перевірити наявність файлу реєстрації результатів випробувань. При необхідності вивести результати випробувань на монітор або принтер в табличному або графічному вигляді.

- Після закінчення випробувань вимкнути насос низького тиску випробувальної машини, електронну панель керування, контур проточної охолоджувальної води.

- Для отримання характеристик матеріалу при малоциклового навантаженні використати відповідне програмне забезпечення ПЕОМ (за вказівкою викладача). Вивести протокол випробувань, користуючись вказівками меню в програмі обробки, на монітор чи принтер. Ознайомитись з отриманими результатами випробувань і зробити висновки по них.

Зміст звіту:

1. Тема роботи.
2. Мета роботи.
3. Структурна схема випробувального комплексу.
4. Ескіз зразка для випробувань.
5. Режими випробувань.
6. Результати випробувань.
7. Висновок.

Контрольні запитання:

1. В чому полягає суть втомного малоциклового зруйнування?
2. Що являє собою діаграма циклічного деформування?
3. Матеріали циклічно зміцнювальні, знеміцнювальні і стабільні.
4. Малоциклова втома в техніці.
5. Суть ефекту Баушингера.
6. Суть квазістатичного і втомного руйнування.
7. Критерії переходу в граничний стан при квазістатичному руйнуванні.
8. Параметри навантажування при малоциклових випробуваннях.
9. Характеристики циклів навантажування.
10. Жорсткі і м'які режими випробувань.

Лабораторна робота №6

ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РОСТУ ВТОМНОЇ ТРІЩИНИ

Мета роботи:

вивчити загальні відомості про швидкість росту втомної тріщини (РВТ) та освоїти методику визначення швидкості РВТ.

Теоретичні відомості:

Діаграма втомного руйнування матеріалів описує залежність між швидкістю РВТ і відповідним параметром механіки руйнування: розмахом ΔK або найбільшим коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН) K_{max} , розмахом розкриття тріщини, розмахом J -інтегралу.

В межах лінійної механіки руйнування швидкість РВТ в координатах lgV - $lg \Delta K$ (K_{max}) являє собою S-подібну криву (рис. 1) обмежену зліва найбільшим пороговим значенням КІН K_{th} (пороговим КІН ΔK_{th}), а справа критичним КІН K_{fc} (циклічною в'язкістю руйнування). Діаграма складається з трьох ділянок: ділянка I приблизно відповідає діапазону швидкості РВТ $10^{-10} \dots 10^{-8}$ м/цикл, на якій швидкість РВТ значно збільшується за незначної зміни ΔK (K_{max}), ділянка II має вид прямої лінії і знаходяться в межах $10^{-8} \dots 10^{-6}$ м/цикл, ділянка III відповідає значенням $V > 10^{-6}$ м/цикл, коли тріщина прискорено зростає. В літературі ділянки I, II, III отримали назви відповідно: низькоамплітудна, середньоамплітудна і високоамплітудна.

На ділянках I і III спостерігається значний вплив мікроструктури матеріалу, середніх напружень, температури і корозійного середовища. Ділянка II менш чутлива до впливу вказаних чинників.

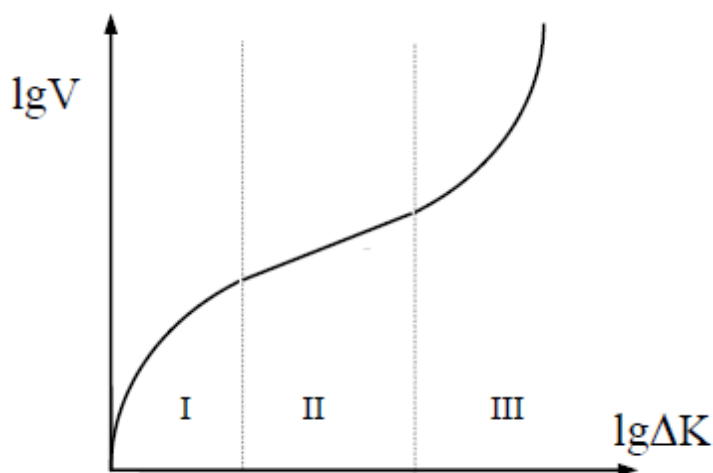


Рис. 1. Графік lgV - $lg\Delta K$

Визначення швидкості РВТ полягає в послідовному вимірюванні через деякі проміжки часу (кількість циклів) характерного розміру a (довжини або глибини) тріщини в зразку та відповідної кількості циклів навантаження N .

За цими даними обчислюють швидкість РВТ, як деякий усереднений приріст тріщини за один цикл навантаження:

$$V = \frac{\Delta a}{\Delta N} \quad (1)$$

І відповідний параметр руйнування – величину, що контролює напружений стан матеріалу біля вершини тріщини (наприклад ΔK).

Якщо використати рівняння Періса:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (2)$$

то для швидкості РВТ отримаємо:

$$V = C \Delta K^n \quad (3)$$

де C , n – відповідно коефіцієнт і показник степені, коотрі визначаються експериментально; $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – розмах КІН; K_{max} і K_{min} – відповідно найбільший і найменший КІН.

Основна мета досліджень – визначення залежності швидкості РВТ від розмаху КІН, який характеризує опір матеріалу РВТ.

Така залежність представляється графоки (рис. 1), де ордината-швидкість РВТ, а абсциса – розмах КІН.

Такі залежності використовуються для оцінювання впливу різноманітних технологічних факторів на швидкість поширення РВТ, з метою оптимізації конструкцій за критеріями механіки руйнування. На їх основі оцінюють працездатність і залишкову довговічність матеріалу і конструкцій під час експлуатації, а також оцінюють допустимість виявлених дефектів, обґрунтовують методи діагностики конструкцій.

Обладнання:

Для визначення швидкості РВТ використовують сервогідрравлічну випробувальну машину, наприклад СТМ-100, яка дозволяє проводити випробування за циклічного навантаження і максимальним зусиллям ± 80 кН і частотою навантаження до 100 Гц.

Для визначення приросту тріщини використовується візуальний метод вимірювання за допомогою мікроскопа або цифрової камери із $\times 40 \dots \times 80$ кратним збільшенням. Для спостереження розвитку тріщини передбачена система, що складається з блоку стробоскопічного освітлення та мікроскопу (цифрові камери) з механізмом переміщення вздовж робочої частини зразка.

Блок стробоскопічного освітлення складається з мікроскопу (цифрові камери) 1, синхронізатора 2, стробоскопу 3, лампи ИСШ-15 4, а також балочки 5 з наклеєними тензодатчиками опору 6, під'єднаними за півмостовою схемою і вузла навантаження балочки 7. Балочка консольно закріплена на нерухомій колоні установки, а вузол навантаження 7 зв'язаний з

рухомою рамою. Лампа ИСШ-15 встановлюється на одному з окулярів мікроскопу МБС 6.

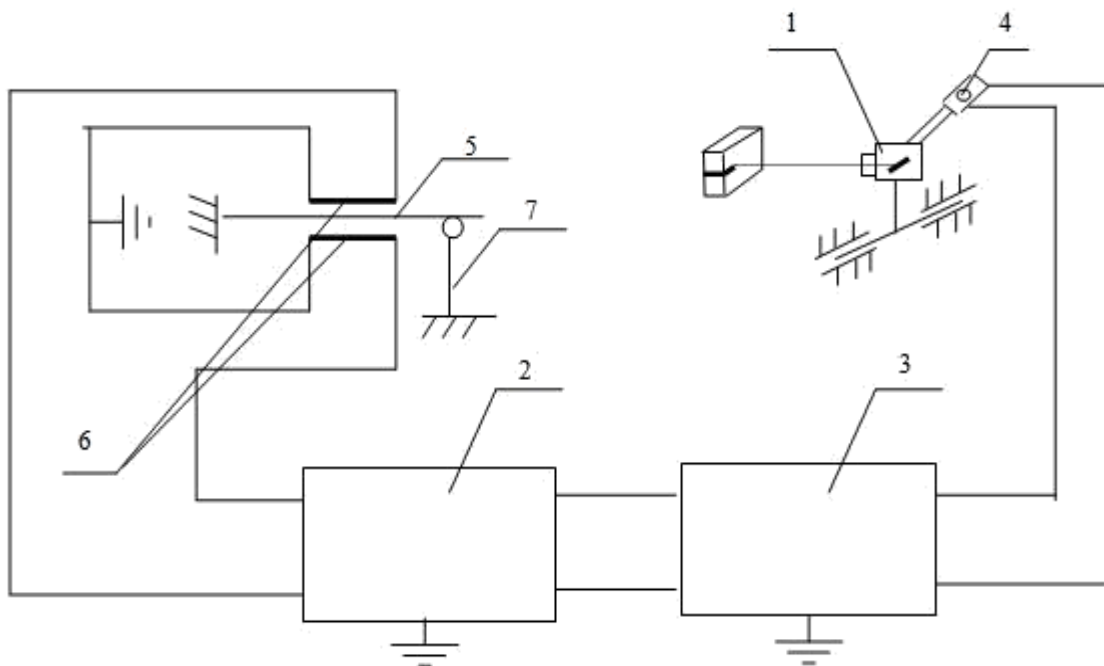


Рис. 2. Схема (система приладів) для вимірювання приросту тріщини

Зразки:

Для виконання лабораторної роботи використовується прямокутний зразок для випробувань за позacentрового розтягу (рис. 3).

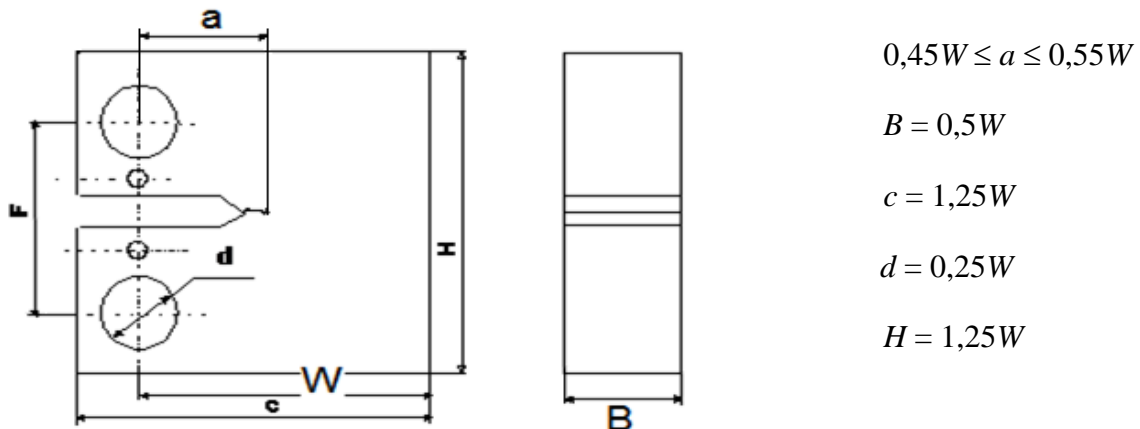


Рис. 3. Прямокутний (компактний) зразок для випробувань на позacentровий розтяг

Для зручності та підвищення точності вимірювання приростів тріщини візуальним методом, на бічній поверхні зразка на шляху її розвитку перпендикулярно до площини тріщини наносять лінії-маркери з кроком 0,5...1,0 мм.

Хід роботи:

1. Зразок закріплюється у затискачах випробувальної машини.
2. Задається циклічне навантаження, під час якого періодично записують дані для побудови діаграм: приріст довжини тріщини Δl_i та відповідно кількість циклів навантаження ΔN_i , а також обчислюється відповідна швидкість РВТ $V_i = \Delta l_i / \Delta N_i$.
3. Для прямокутного зразка при розтягу розмах КІН ΔK обчислюються за формулами

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{t\sqrt{b}} Y \quad (4)$$

де $Y = 13,75(1-3,38\bar{l}^2+5,572\bar{l}^3)$ при $0,45 \leq \bar{l} \leq 0,55$

$Y = (9,172-13,829\bar{l}+11,822\bar{l}^2-3,056\bar{l}^3)(\bar{l}/(1-\bar{l})^3)^{1/2}$ при $0,2 \leq \bar{l} \leq 0,9$

$\bar{l} = l/b$ – відносна довжина тріщини; $\Delta P = P_{max} - P_{min}$ – розмах зусилля; t – товщина зразка; b – ширина зразка.

4. У відповідності з результатами п.2 та п.3 будують графік $lgV-lg\Delta K$.
5. Визначають низькоамплітудну – I, середньо амплітудну – II та високо амплітудну – III ділянки діаграми РВТ.

Для середньоамплітудної ділянки визначають коефіцієнти C та n для рівняння (3) за допомогою методу найменших квадратів.

Зміст звіту:

1. Назва роботи.
2. Мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Протокол випробувань у вигляді таблиці №1.

Таблиця №1

№ з/п	Результати випробування			Результати обчислення	
	ΔP_i , кН	ΔN_i , цикл	Δl_i , мм	V_i , м/цикл	ΔK_i , МПа $\sqrt{м}$

5. Висновок про хід роботи.

Метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів використовується для виведення емпіричної формули для функції $y=f(x)$, представленої в табличному вигляді

$x_i - y_i$ ($i=1..n$). У методі використовується представлення функції у вигляді поліному

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (5)$$

Для визначення коефіцієнтів a_i використовується допоміжна система лінійних однорідних рівнянь

$$\begin{aligned} b_{00}a_0 + b_{01}a_1 + \dots + b_{0n}a_n &= c_0 \\ b_{10}a_0 + b_{11}a_1 + \dots + b_{1n}a_n &= c_1 \\ b_{n0}a_0 + b_{n1}a_1 + \dots + b_{nn}a_n &= c_n \end{aligned} \quad (6)$$

коефіцієнти якої обчислюються за формулами:

$$\begin{aligned} b_{kl} &= \sum_{i=0}^n x_i^{k+1} \\ c_k &= \sum_{i=0}^n x_i^k y_i \quad k, l = 0..n \end{aligned} \quad (7)$$

Підставляючи коефіцієнти a_i в рівняння (5), отримаємо емпіричний вигляд $f(x)$.

Контрольні запитання:

1. Який фізичний зміст швидкості РВТ?
2. У чому полягає ціль досліджень швидкості РВТ?
3. Яке практичне застосування має це дослідження?
4. Яке обладнання використовується у ході лабораторної роботи?
5. Для чого наносять на бічній поверхні зразка лінії-маркери з кроком 0.001м?
6. Привести формулу Періса.
7. Яким чином визначають C та n у формулі Періса?

ЛІТЕРАТУРА

1. ГОСТ 25.506-85. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости при статическом нагружении). – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 622 с.
2. Механика разрушения и прочность материалов: Справ, пособие В У – Т / Под общей ред. Панасюка В.В. // Т.3 : Характеристики кратковременной трещиностойкости материалов и методы их определения / Ковчик С.Е., Морозов Е.М. – 1988. – 436 с.
3. ASTM E 1820-01. Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
4. ГОСТ 9454-78 Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенных температурах.
5. ГОСТ 10708-82 Копры маятниковые. Технические условия.
6. Опір матеріалів. Підручник / Г.С. Писаренко, О.Л. Квітка, Е.С. Уманський. За ред. Г.С. Писаренка – К.: Вища школа, 1993. – 655 с.
7. Державний стандарт України ДСТУ 2444-94. Розрахунки та випробування на міцність. Опір втомі. Терміни та визначення.
8. Опір матеріалів з основами теорії пружності й пластичності. Підручник / В.Г. Піскунов, В.С. Сіпетов, В.Д. Шевченко, Ю.М. Федоренко; Вища школа, 1995. – 271 с.
9. Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій. Механіка і механізми процесів руйнування матеріалів / ред. : В.В. Панасюк; НАН України. Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Л. : Каменяр, 1999. – 352 с.

Навчально-методична література

П.В. Ясній, В.П. Ясній

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни

«Механіка руйнування»

для студентів денної форми навчання за напрямом
6.060101 «Будівництво»

Комп'ютерне макетування та верстка *А.П. Катрич*

Формат 60x90/16. Обл. вид. арк. 1,66. Тираж 10 прим. Зам. № 2895.

Видавництво Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.