

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Кафедра будівельної механіки

Конспект лекцій

з дисципліни

Механіка руйнування будівельних конструкцій

для студентів денної форми навчання
за спеціальністю

192 «Будівництво та цивільна інженерія»

Тернопіль
2018

УДК 539.3:621.01
К 65

Укладачі:
Ясній П.В., докт. техн. наук, професор,
Ясній В.П., докт. філос.

Методичний посібник розглянуто й затверджено на засіданні
кафедри будівельної механіки
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 1 від 27 серпня 2018 р.

Схвалено та рекомендовано до друку на засіданні методичної ради
факультету по інженерії машин, споруд та технологій
Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.
Протокол № 1 від 31 серпня 2018 р.

К 65 Конспект лекцій з дисципліни «Механіка руйнування будівельних
конструкцій» для студентів денної форми навчання за спеціальністю
192 «Будівництво та цивільна інженерія» / Укладачі: П.В. Ясній,
В. П. Ясній. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя, 2018. – 72 с.

УДК 539.3:621.01

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

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ТЕМА № 1. МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ЗА СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	5
ТЕМА № 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНУ ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ	14
ТЕМА № 3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИТИВ І ПЛАСТМАС	20
ТЕМА № 4. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	28
ТЕМА № 5. СПЛАВИ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ, МІЦНІСТЬ ТА ЗАСТОСУВАННЯ.....	37
ТЕМА № 6. РОЗКИД І ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ, РОЗМІРІВ І ГЕОМЕТРІЇ КОНСТРУКЦІЙ І ВИРОБІВ.....	47
ТЕМА № 7. ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ	54
ТЕМА № 8. РОЗКИД І ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛІЧНОЇ ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ МАТЕРІАЛІВ.....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	69

ВСТУП

Мета курсу полягає у вивченні основних положень механіки руйнування будівельних матеріалів і конструкцій, застосування їх для розрахунку міцності і довговічності.

Завдання курсу полягає у:

- вивченні методів оцінки характеристик тріщиностійкості конструкційних будівельних матеріалів, зокрема бетону і залізобетону, дерев'яних і пластмасових виробів, зварних з'єднань;
- вивченні методів діагностування дефектів у будівельних матеріалах та конструкціях;
- вивченні методів розрахунку тримкості і довговічності елементів будівельних конструкцій, що містять тріщини;
- отриманні навичок для проведення оцінки міцності і залишкової міцності будівельних матеріалів і елементів конструкцій за статичного навантаження;
- отриманні навичок для проведення оцінку довговічності і залишкової довговічності елементів конструкцій за циклічного навантаження;
- отриманні навичок вибору раціональних форм елементів будівельних конструкцій та необхідних матеріалів при проектуванні.

Курс тісно пов'язаний з іншими дисциплінами і є одним із базових для підготовки магістрів. Знання отримані в даному курсі дозволяють розробляти найбільш оптимальні конструкції і підбирати матеріал з точки зору забезпечення необхідної міцності і довговічності за критеріями механіки руйнування.

Методичні вказівки призначені для студентів денної і заочної форми навчання за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія».

Тема № 1

МІЦНІСТЬ БЕТОНУ ЗА СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Міцність бетону за статичного навантаження.

Бетон (фр. *béton*, від лат. *Bitumen* – «гірська смола») – штучний каменеподібний матеріал, результат раціонально підбраної суміші в'язучого, заповнювачів, води і, при потребі, спеціальних добавок. До затвердіння цю суміш називають бетонною. Один з основних будівельних матеріалів, що застосовується для виготовлення збірних залізобетонних та бетонних конструкцій і бетонних виробів, а також для будівництва монолітних бетонних і залізобетонних споруд.

Бетони класифікуються за основним призначенням, видом в'язучого, видом заповнювачів, структурою та умовами твердіння:

За видом в'язучого матеріалу (основна класифікація):

Цементні (найпоширеніші); *асфальтові* (найпоширеніші у будівництві доріг); *вапняні*; *гіпсові*; *глиняні* тощо.

Додатково використовується наступна класифікація:

1. За об'ємною масою бетони поділяють на:

- *важкий* або *звичайний* (питома вага $> 1\ 800\text{кг/м}^3$), із заповнювачами із щебеню або гравію з щільних порід, застосовується в залізобетонних та бетонних конструкціях, де потрібна висока міцність і щільність;
- *особливо важкий* ($> 2\ 700\text{ кг/м}^3$) із заповнювачами з бариту (мінерал барію з класу сульфатів BaSO_4), залізних руд або металів; застосовується для захисту від γ -променів на атомних електростанціях, в лабораторіях і т. п.;
- *легкий бетон* ($< 1\ 800\text{ кг/м}^3$) – арболіт, шлакобетон, пемзобетон та ін. – з легкими заповнювачами. Має малу теплопровідність і застосовується для огорожувальних конструкцій та покриттів;
- *особливо легкий* – ніздрюватий бетон (пінобетон, газобетон)- питома вага $800 - 600\text{ кг/м}^3$.

2. За матеріалом арматури:

- бетон зі *сталеву* арматурою (ненапруженою, попередньо напруженою) – залізобетон (найпоширеніший);
- *деревобетон*;
- *очеретобетон*;
- бетон, армований *синтетичним волокном*;
- *дисперсне* армування (*фіброю*) тощо.

3. За консистенцією бетонної суміші:

- *Жорсткий* – застосовується для масивних монолітних конструкцій;

- *пластичний* – для тонкостінних густоармованих конструкцій.

4. За властивостями:

- *водонепроникний бетон* (не пропускає воду при 0,2МПа і вище). Застосовується в шахтному, гідротехнічному, транспортному будівництві.
- *морозотривкий бетон* – має підвищену морозостійкість (розрахований на більшу кількість циклів замерзання-відмерзання у порівнянні з неморозостійкими бетонами).
- *вогнетривкий бетон* – має підвищену вогнетривкість порівняно з невогнетривкими бетонами).

Види випробовувань бетону на міцність.

Визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона .

Визначення міцності за контрольними зразками.

Ультразвуковий метод визначення міцності.

Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю.

Визначення призмової міцності, модуля пружності і коефіцієнта Пуассона.

Суть методу полягає у випробуванні шляхом поступового (ступенями) навантаження зразків-призм або зразків-циліндрів стандартних розмірів осьовим стискальним навантаженням

- до руйнування, при визначенні призмової міцності;
- до рівня 30 % руйнівного навантаження з вимірюванням у процесі навантаження зразків їх деформацій, при визначенні модуля пружності і коефіцієнта Пуассона.

Призмova міцність, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона обчислюються за визначеними під час випробування навантаженнями N_u і $0,3 N_u$, поздовжніми і поперечними відносними пружно миттєвими деформаціями ε_{1el} і ε_{2el} .

Призмova міцність $f_{cm, prism}$ – відношення руйнівної осьової стискальної сили зразка призми стандартних розмірів до площі його перерізу, нормального до цієї сили.

Модуль пружності E_c – коефіцієнт пропорційності між нормальним напруженням і відповідною йому відносною поздовжньою пружно-миттєвою деформацією при $\sigma_1 = 0,3 f_{cm, prism}$ за осьового стискання зразка.

Коефіцієнт Пуассона ν – коефіцієнт пропорційності між абсолютним значенням відносної поздовжньої ε_{1el} і поперечної ε_{2el} пружно-миттєвих деформацій при $\sigma_1 = 0,3 f_{cm, prism}$ за осьового стискання зразка.

Збільшення абсолютної поздовжньої/поперечної деформації зразка $\Delta l_1, \Delta l_2$ – повне вкорочення/подовження лінійних абсолютних розмірів зразка в межах бази вимірювання деформації уздовж/поперек твірної, спричинене осьовою стискальною силою.

Відносна поздовжня/поперечна деформація зразка $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – повне вкорочення/подовження лінійних розмірів зразка в межах бази вимірювання деформації

уздовж/поперек твірної, спричинене осьюою стискальною силою.

Відносна пружно-миттєва поздовжня/поперечна деформація зразка $\varepsilon_{1el}, \varepsilon_{2el}$ – пружно-миттєве вкорочення/подовження лінійних відносних розмірів зразка в межах бази вимірювання деформацій уздовж/поперек твірної, що викликане осьюою стискальною силою під час приростів сходинок навантаження.

Відносна поздовжня/поперечна деформація швидкоплинної повзучості $\varepsilon_{1c1}, \varepsilon_{2c1}$ – укорочення/подовження лінійних відносних розмірів зразка в межах бази вимірювання деформацій уздовж/поперек твірної, що викликане осьюою стискальною силою під час витримки сходинок навантаження.

База вимірювання поздовжньої/поперечної деформації зразка (l_1, l_2) – фіксована відстань між закріпленими опорами, у межах якої вимірюється поздовжня/поперечна деформація зразка.

Призмову міцність, модуль пружності і коефіцієнт Пуассона визначають на зразках-призмах квадратного перерізу або циліндрах круглого перерізу з відношенням висоти до ширини (діаметра), що дорівнює чотирьом.

Ширина (для циліндрів – діаметр) = 70 мм, 100 мм, 150 мм, 200 мм, 300 мм залежно від призначення та виду конструкцій і виробів.

За базовий приймають зразок розмірами 150 мм x 150 мм x 600 мм.

Пристосування для кріплення індикаторів до зразка для вимірювання поздовжніх і поперечних деформацій зображено на рис. 1.1.

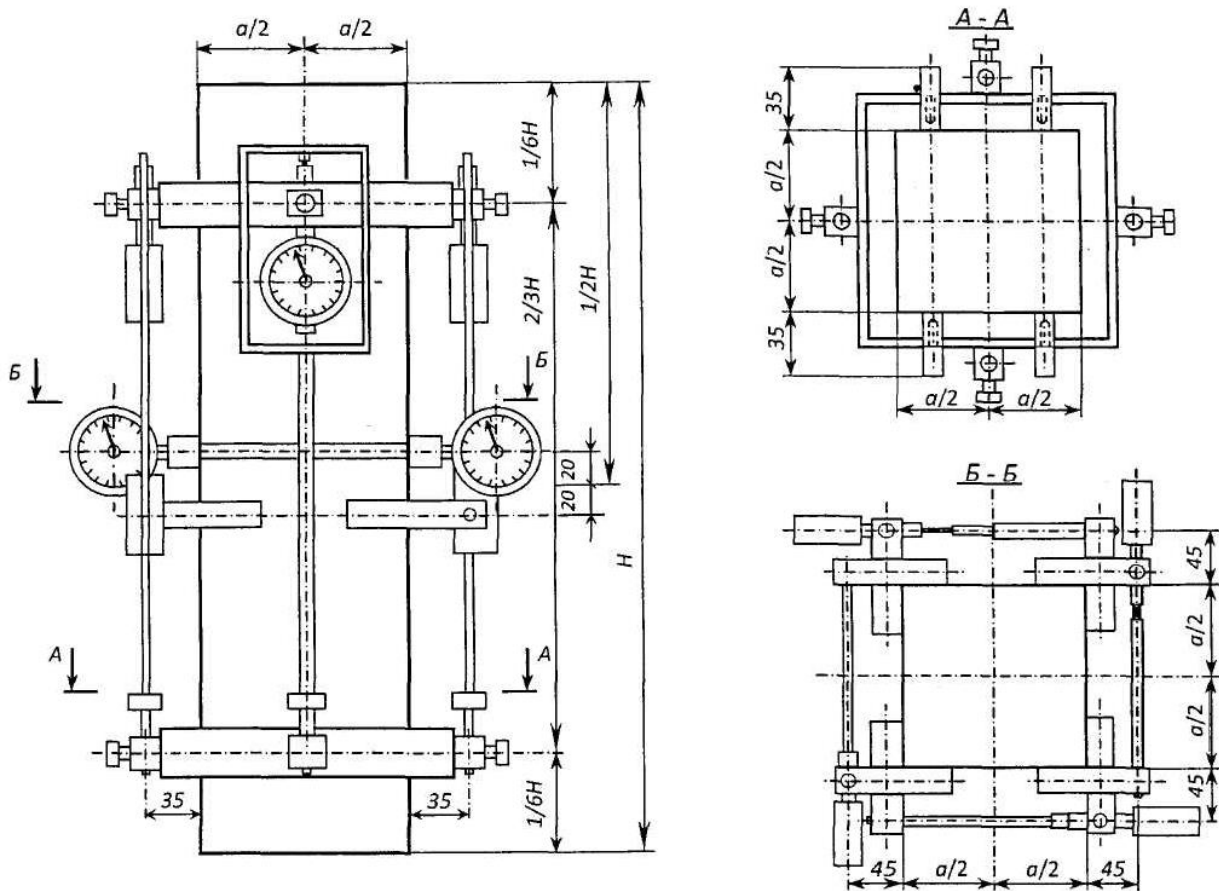


Рис. 1.1. Схема установки пристосувань для кріплення індикаторів при вимірюванні поздовжніх і поперечних деформацій зразка

Схеми руйнування зразків (нормальне та дефектне), випробовуваних стисканням зображені на рис. 1.2.

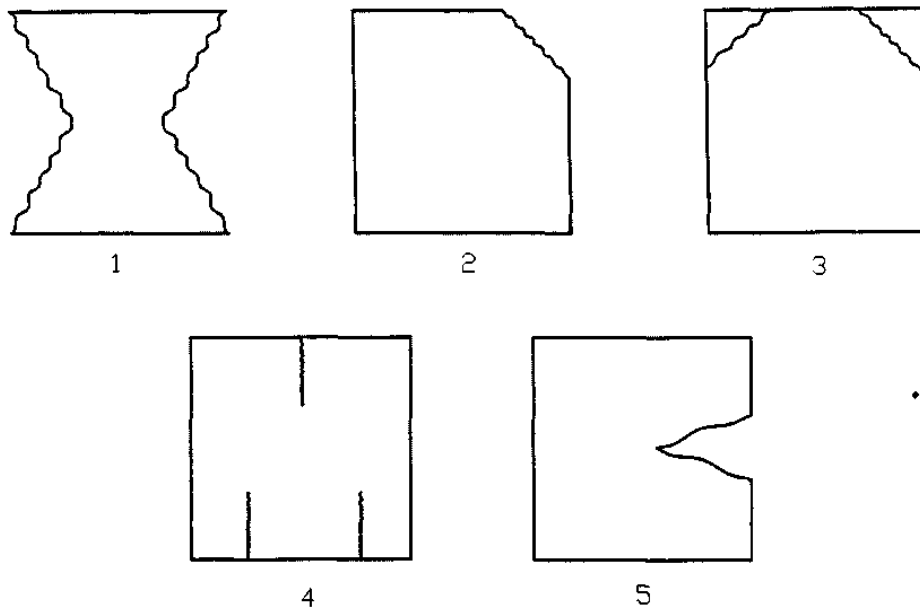


Рис. 1.2. Види руйнування зразків: 1 – нормальне руйнування; 2 – 5 - дефектне руйнування

Призмову міцність $f_{c,prism}$ обчислюють для кожного зразка за формулою

$$f_{c,prism} = N_u/A \quad (1.1)$$

де N_u – руйнівне навантаження, виміряне за шкалою силовимірювача преса (машини); A – середнє значення площі поперечного перерізу зразка, визначене по його лінійних розмірах.

Модуль пружності E_{cm} обчислюють для кожного зразка при рівні навантаження, що становить 30% від руйнівного, за формулою

$$E_{cm} = \sigma_1/\varepsilon_{1el} \quad (1.2)$$

де $\sigma_1 = N_1/A$ – збільшення напружень від умовного нуля до рівня зовнішнього навантаження, яке дорівнює $(30\pm 5)\%$ від руйнівного; N_1 – відповідне збільшення зовнішнього навантаження до рівня $(30\pm 5)\%$ від руйнівного N_u ; ε_{1el} – збільшення пружно-миттєвої відносної поздовжньої деформації зразка, що відповідає рівню навантаження N_1 і виміряне на початку кожного ступеня його прикладання, що визначається за (1.4).

У межах ступеня навантаження деформації визначають за лінійною інтерполяцією.

Коефіцієнт Пуассона бетону обчислюють для кожного зразка при рівні навантаження, що становить $(30\pm 5)\%$ від руйнівного за формулою

$$\nu = -\varepsilon_{2el}/\varepsilon_{1el} \quad (1.3)$$

де ε_{2el} – збільшення пружно-миттєвої відносної поперечної деформації зразка, що

відповідає рівню навантаження N_1 і виміряне на початку кожного ступеня його прикладання, яке визначається за (1.5).

Значення ε_{1el} і ε_{2el} визначають за формулами,

$$\varepsilon_{1el} = \varepsilon_1 - \Sigma\varepsilon_{1c1} \quad (1.4)$$

$$\varepsilon_{2el} = \varepsilon_2 - \Sigma\varepsilon_{2c1} \quad (1.5)$$

де ε_{1el} і ε_{2el} – збільшення повних відносних поздовжніх і поперечних деформацій зразка, що відповідають рівню навантаження N_1 і виміряні наприкінці ступеня його прикладання; $\Sigma\varepsilon_{1c1}$ і $\Sigma\varepsilon_{2c1}$ – збільшення відносних поздовжніх і поперечних деформацій швидкоплинної повзучості, отримані при витримках навантаження на ступенях навантаження до рівня навантаження N_1 .

Збільшення відносних поздовжніх і поперечних деформацій обчислюють як середнє арифметичне показань приладів по чотирьох гранях призми або трьох-чотирьох твірних циліндра.

Відносні деформації визначають за формулами:

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l_1 \quad (1.6)$$

$$\varepsilon_2 = \Delta l_2 / l_2 \quad (1.7)$$

де Δl_1 і Δl_2 – абсолютні збільшення поздовжньої і поперечної деформацій зразка, викликані відповідним збільшенням напружень; l_1 і l_2 – фіксовані бази вимірювання поздовжньої й поперечної деформації зразка.

Визначення міцності за контрольними зразками.

Визначення міцності бетону полягає у вимірюванні мінімальних зусиль, що призводять до руйнування спеціально виготовлених контрольних зразків бетону при їх навантаженні з постійною швидкістю зростання навантаження і наступному розрахунку напружень при цих зусиллях.

Форма і номінальні розміри зразків залежать від методу визначення міцності бетону і повинні відповідати визначеним у таблиці 1.

Форма і номінальні розміри зразків для визначення міцності бетону

Метод	Форма зразка	Розміри зразка	
		Параметр розміру	Довжина ребра
Визначення міцності на стиск і на розтяг при розколюванні	Куб	Розмір, мм	100; 150; 200; 300
	Циліндр	Діаметр d	100; 150; 200; 300
		Висота h	$2d$
Визначення міцності осьовим розтяганням	Призма	Переріз $a \times a$	100×100; 150×150; 200×200
		Висота h	$4a$
	Циліндр	Діаметр d	100; 150; 200; 300
		Висота h	$2d$
Визначення міцності на розтяг за вигину та розколювання	Призма	Переріз $a \times a$	100×100; 150×150; 200×200
		Висота h	$4a$

Допускається застосовувати: вісімки згідно з рис. 1.3 і розмірами за таблицею 1.2 при визначенні міцності на осьовий розтяг; призми розміром 70 мм х 70 мм х 280 мм (рис. 1.4); куби з ребром завдовжки 70 мм (рис. 1.5в); циліндри висотою, що дорівнює відповідному діаметру при визначенні міцності на розтяг при розколюванні (рис. 1.5а) і висотою, що дорівнює від двох до чотирьох діаметрів при визначенні міцності на осьовий розтяг; половинки зразків-призм, отримані після випробувань на розтяг при вигині зразків-призм (рис. 1.4), для визначення міцності бетону на стиск (рис. 1.5в); куби, що виготовлені у нероз'ємних формах з технологічним ухилом.

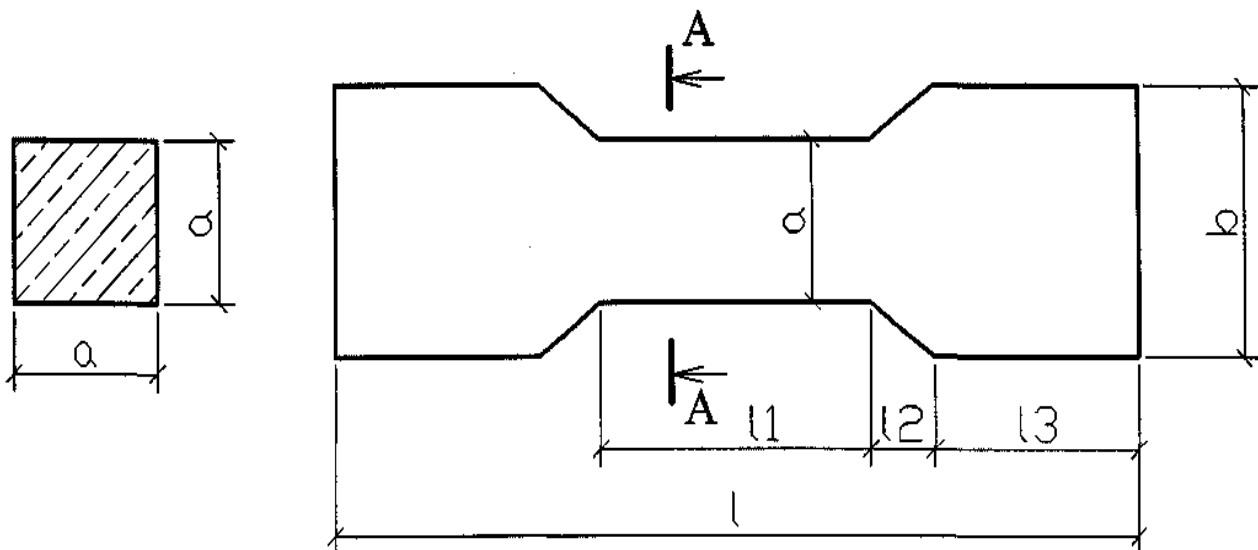


Рис. 1.3. Вісімка для визначення міцності бетону на осьовий розтяг

Таблиця 1.2

Розміри вісімок (рис. 1.3) для визначення міцності бетону на осьовий розтяг

Позначення розміру	Значення при поперечному перерізі зразка, мм			
	70×70	100×100	150×150	200×200
a	70	100	150	200
b	100	150	250	350
l	490	700	1050	1400
l_1	210	300	450	600
l_2	45	65	110	160
l_3	95	135	180	250

Розміри зразків залежно від найбільшого розміру фракції крупного заповнювача в пробі бетонної суміші повинні відповідати наведеним у таблиці.

Таблиця 1.3

Розміри зразків у пробі бетонної суміші

Найбільший розмір фракції заповнювача, мм	Найменший розмір зразка (ребро куба, бік поперечного перерізу призми або вісімки, діаметр і висота циліндра), мм
20	100
40	150
80	300

Випробування на розтяг за вигину.

Зразки-призми встановлюють у пристрій для випробування за схемою, що зображена на рис. 1.4 і навантажують до руйнування.

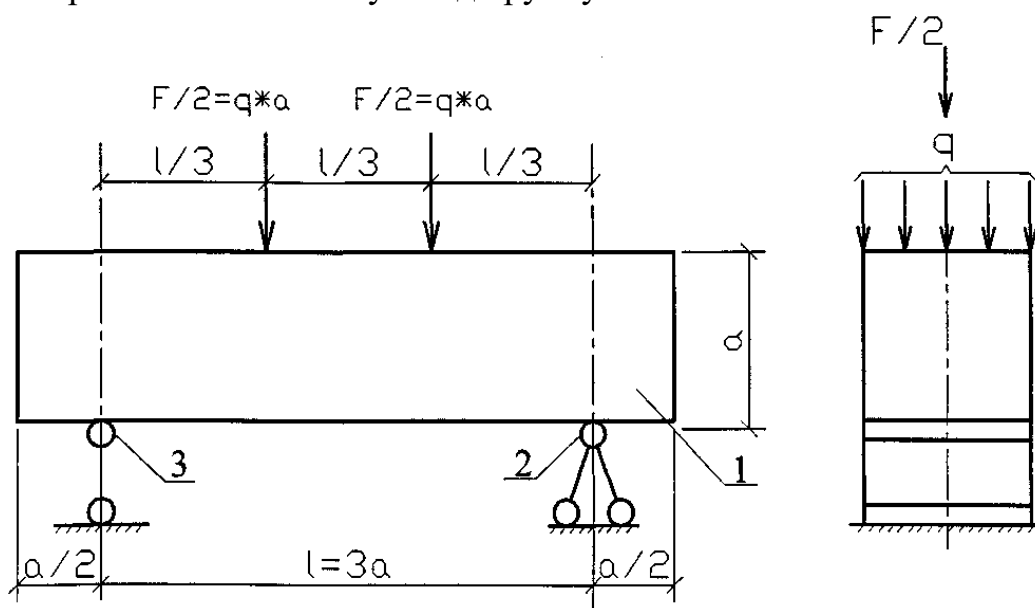


Рис. 1.4. Схема випробувань на розтяг при згині:

1 – зразок-призма; 2 – нерухома опора; 3 – рухома опора

Якщо руйнування зразка сталося не в середній третині прогону або площина руйнування зразка має нахил до вертикальної площини більше ніж 15° , то при визначенні середньої міцності бетону серії зразків цей результат випробувань не враховують.

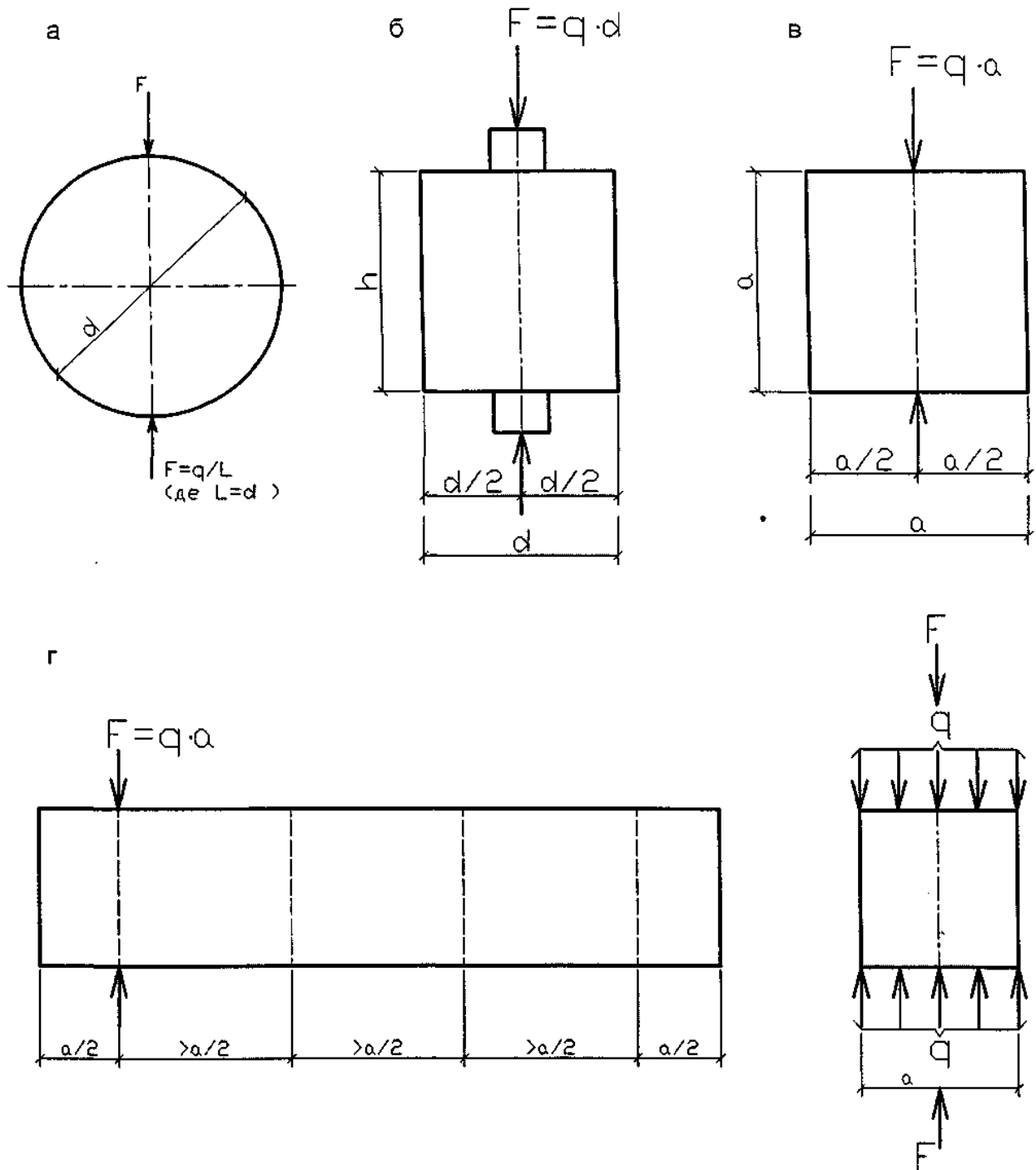


Рис. 1.5. Схеми випробування на розтяг при розколюванні:
 а – зразки-циліндри з бетонів усіх видів крім ніздрюватого бетону;
 б – зразки-циліндри з ніздрюватого бетону;
 в – зразки-куби з бетонів усіх видів;
 г – зразки-призми з важкого бетону

Міцність бетону, МПа (кгс/см²), розраховується з точністю до 0,1 МПа при випробуваннях на стиск і до 0,01 МПа (0,1 кгс/см²) при випробуваннях на розтяг для кожного зразка за формулами:

– на стиск $f_{c,cube} = (\alpha \cdot F \cdot k_w) / A$ (1.8)

– на осьовий розтяг $f_{c,tk} = (\beta \cdot F \cdot k_w) / A$ (1.9)

– на розтяг при розколюванні $f_{c,m} = (\gamma \cdot 2F \cdot k_w) / (\pi \cdot A)$ (1.10)

– на розтяг при згині $f_{c,tf} = (\delta \cdot F \cdot l \cdot k_w) / (a \cdot b^2)$ (1.11)

де F – руйнівне навантаження, Н; A – площа робочого перерізу зразка, мм²; a – ширина поперечного перерізу призми, мм; b – висота поперечного перерізу призми, мм; l – відстань між опорами при випробуваннях зразків-призм на розтяг при згині, мм; $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – масштабні коефіцієнти для приведення міцності бетону до міцності бетону в зразках базового розміру та форми; k_w – поправочний коефіцієнт для ніздрюватого бетону, який враховує вологість зразків на момент випробування.

Визначення середнього внутрішньосерійного коефіцієнта варіації міцності бетону.

Середній внутрішньосерійний коефіцієнт варіації міцності бетону V_{cm} , %, визначають за результатами випробувань будь-яких послідовностей 30 серій зразків бетону одного класу. Для цього визначають розмах W_{cj} у кожній серії, а також середній розмах W_{cm} МПа, і середню міцність f_{cm} , МПа, за всіма серіями за формулами:

$$W_{cj} = f_{j \max} - f_{j \min} \quad (1.12)$$

$$W_{cm} = \frac{\sum_{j=1}^{30} W_{cj}}{30} \quad (1.13)$$

$$f_{cm} = \frac{\sum_{j=1}^{30} f_{cmj}}{30} \quad (1.14)$$

$$v_{cm} = W_{cm} / df_{cm} \quad (1.15)$$

де $f_{j \max}$ та $f_{j \min}$ – максимальне і мінімальне значення міцності бетону в кожній серії зразків, МПа; f_{cmj} та W_{cj} – середня міцність та розмах міцності бетону в кожній серії зразків, МПа; d – коефіцієнт, що приймається залежно від кількості зразків n у серії:

при $n = 2$	$d = 1,13$
при $n = 3$	$d = 1,69$
при $n = 4$	$d = 2,06$
при $n = 6$	$d = 2,50$

Тема № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ БЕТОНУ ПРИ СТАТИЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Позначення величин та терміни.

Тріщиностійкість (в'язкість руйнування) бетону, це здатність бетону чинити опір початку руху і розвитку тріщин при механічних та інших впливах.

Тріщина, це порожнина, утворена без видалення матеріалу двома сполученими усередині тіла поверхнями, які за відсутності в ньому напружень віддалені один від одного на відстані, у багато разів менше протяжності самої порожнини.

Магістральна тріщина, це тріщина, протяжність якої перевершує розміри структурних складових матеріалів і ділянок самоурівноважених напружень і по поверхнях якої відбудеться поділ зразка на частини.

Коефіцієнт інтенсивності напружень K (МПа $\sqrt{м}$), це величина, що визначає напружено-деформований стан і зміщення поблизу вершини тріщини, незалежно від схеми навантаження, форми і розмірів тіла і тріщини.

K_C – критичний коефіцієнт інтенсивності напружень при максимальному навантаженні, МПа $\sqrt{м}$.

*Умовний КІН K^** (МПа $\sqrt{м}$), значення K , обчислене через діюче на зразок навантаження і вихідну довжину тріщини a_0 за формулами для пружного тіла.

Питомі енерговитрати G (МПа $\sqrt{м}$), величина, що характеризує питомі (щодо ефективної робочої площі поперечного перерізу зразка) енерговитрати на різні етапи деформування і руйнування.

J-інтеграл (МДж/м²), величина, що характеризує роботу пластичної деформації і руйнування, а також поле напружень і деформацій за пружно-пластичного деформування поблизу вершини тріщини (аналогічно коефіцієнту інтенсивності напружень K).

*Умовний критичний КІН K_c^** (МПа $\sqrt{м}$), це значення K^* , яке визначається при нерівноважних випробуваннях зразків типів 1-4 за зусиллям F_c і початковому надрізу зразка a_0 , і умовно характеризує критичний стан матеріалу при динамічному початку руху магістральної тріщини.

Статичний критичний КІН K_i (МПа $\sqrt{м}$) це значення K , яке визначається при рівноважних випробуваннях зразків типів 1, 5, 6 за величинами G_i і E_b , , що характеризує критичний стан матеріалу при статичному початку руху магістральної тріщини.

Критичний КІН K_c (МПа $\sqrt{м}$), це значення K , яке визначається при рівноважних випробуваннях зразків типу 1 через G_{ce} і E_b і інваріантно характеризує стан матеріалу при динамічному початку руху магістральної тріщини.

Питомі енерговитрати на початок статичного руйнування G_i (до моменту початку розвитку магістральної тріщини) (МДж/м²), значення G , визначене при

рівноважних випробуваннях зразків типу 1 з діаграми $F-v$, що характеризує питомі енерговитрати на початок статичного руйнування.

Питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування G_F (МДж/м²), значення G , визначене при рівноважних випробуваннях зразків типу 1 з діаграми $F-v$, що характеризує питомі енерговитрати для статичного руйнування.

Повні питомі пружні енерговитрати на статичне деформування зразка до поділу на частини G_{CE} (МДж/м²), значення G , визначене при рівноважних випробуваннях зразків типу 1 з діаграми $F-v$, що характеризує питомі енерговитрати для руйнування.

Статичний джей-інтеграл J_i (МДж/м²), значення J , визначене при рівноважних випробуваннях зразків типу 1 з діаграми $F-v$, що характеризує поле напружень і деформацій поблизу вершини магістральної тріщини на початок її руху.

Критерій крихкості χ_F , характеристика крихкості матеріалу.

Види випробувань бетону на тріщиностійкість.

Характеристики тріщиностійкості бетону визначають за *рівноважних та нерівноважних* механічних випробувань.

За рівноважних випробувань на стадії локального деформування зразка забезпечується адекватність зміни зовнішніх сил внутрішнім зусиллям опірності матеріалу з відповідним статичним розвитком магістральної тріщини.

Нерівноважні випробування характеризуються втратою стійкості процесу деформування зразка в момент локалізації деформації за досягнення максимального навантаження, з відповідним динамічним розвитком магістральної тріщини.

Для визначення характеристик тріщиностійкості випробовують зразки з початковим надрізом. При рівноважних випробуваннях записують діаграму $F-v$; при нерівноважних – фіксують максимальне значення. Допускається проведення рівноважних випробувань з фіксацією поточних розмірів рухомої магістральної тріщини (a_{ij}) і відповідних значень навантаження (F_{ij}). За результатами випробувань визначають наступні основні силові – в термінах коефіцієнтів інтенсивності напружень (K), енергетичні – в термінах питомих енерговитрат (G) і джей-інтеграла (J), характеристики тріщиностійкості: $K_c, K_i, G_F, G_i, G_{ce}, J_i$.

Характеристики тріщиностійкості (поряд з іншими характеристиками механічних властивостей) використовують для:

- порівняння різних варіантів складу, технологічних процесів виготовлення і контролю якості бетонів;
- зіставлення бетонів при обґрунтуванні їх вибору для конструкцій;
- розрахунків конструкцій з урахуванням їх дефектності та умов експлуатації;
- аналізу причин руйнувань конструкцій.

Типи зразків і схеми навантаження.

Для визначення характеристик тріщиностійкості при рівноважних випробуваннях застосовують зразки типу 1 – для випробувань вигином (рис. 2.1).

Для визначення характеристик тріщиностійкості при нерівноважних випробуваннях застосовують зразки типу: 1 – для випробування вигинанням (рис. 2.1); 2 – для випробування осьовим розтяганням (рис. 2.2); 3 – для випробування позацентровим стисканням (рис. 2.3); 4 – для випробування розтягом при розколюванні (рис. 2.4). Співвідношення розмірів і схем навантаження зразків представлені на рис. 1 – 4.

Мінімальні розміри зразків і розміри початкових надрізів приймають за таблицею в залежності від розміру зерна заповнювача d_{am} .

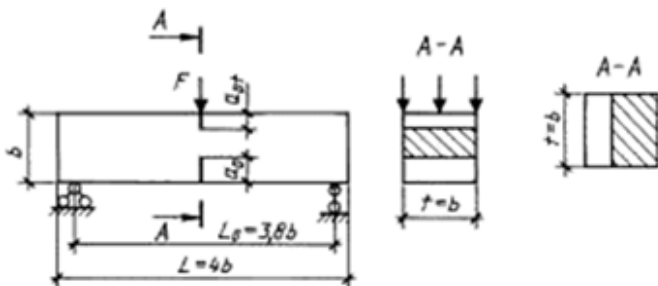


Рис. 2.1. Зразок – призма квадратного поперечного перерізу для випробування вигином (Тип 1)

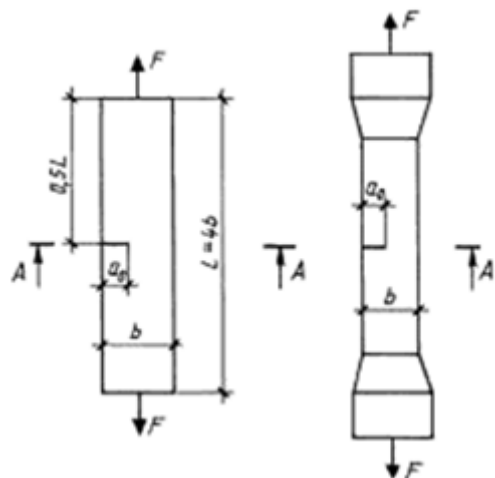


Рис. 2.2. Зразок – призма квадратного поперечного перерізу для випробування осьовим розтяганням (Тип 2)

Початкові надрізи наносять за допомогою різального інструменту або при формуванні зразків шляхом закладання фольги або латунної (чи сталевий) пластини. Ширина початкового надрізу не повинна перевищувати $0,5 d_{am}$ і бути не більше 2 мм. Зразки для випробувань виготовляють згідно з ГОСТ 10180 серіями не менше ніж з чотирьох зразків-близнюків кожна, або висвердлюють (випилюють) з виробів, конструкцій чи споруд згідно з стандартом.

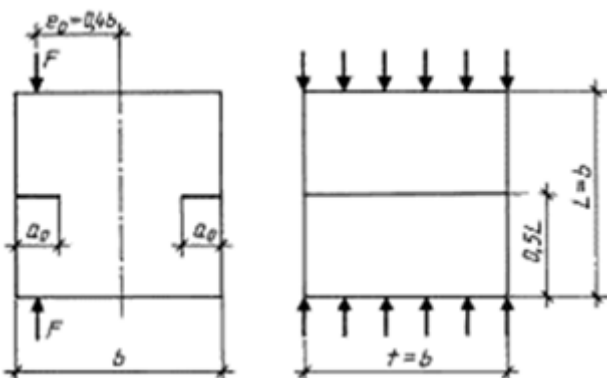


Рис. 2.3. Зразок – куб для випробувань позацентровим стисканням (Тип 3)

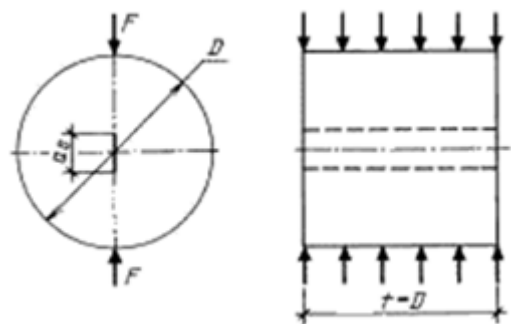


Рис. 2.4. Зразок – циліндр для випробування розтяганням при розколюванні (Тип 4)

Для визначення характеристик тріщиностійкості при рівноважних випробуваннях застосовують також зразки типу 5 у вигляді призми прямокутного поперечного перерізу з наскрізним отвором для випробувань осьовим стисканням і зразки типу 6 у вигляді призми прямокутного поперечного перерізу для випробувань розтягом при позацентровому стисканні (рис. 2.5 і рис. 2.6). Під час випробувань фіксують розміри рухомої макротріщини і відповідні значення прикладених напружень.

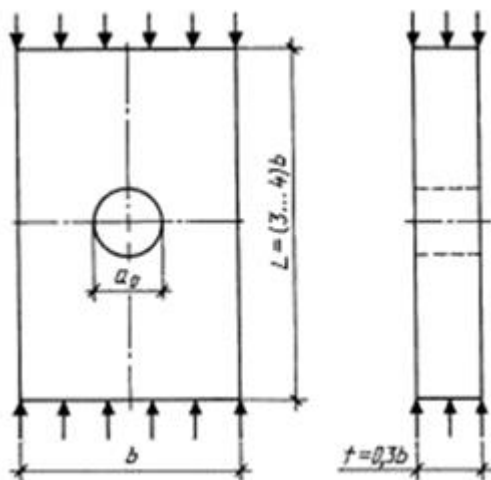


Рис. 2.5. Зразок – призма прямокутного поперечного перерізу для випробувань осьовим стисканням (Тип 5)

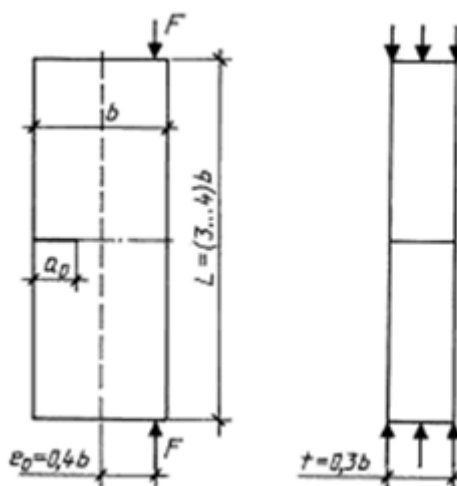


Рис. 2.6. Зразок – призма прямокутного поперечного перерізу для випробувань розтягом при позацентровому стисканні (Тип 6)

Випробувальне обладнання для визначення характеристик тріщиностійкості.

Рівноважне випробування зразків типу 1. Для визначення характеристик тріщиностійкості при рівноважних випробуваннях зразків типу 1 використовують спеціальні випробувальні машини із системою стеження і швидкодіючим зворотним зв'язком або випробувальні машини високої жорсткості (не менш ніж у два рази перевищує початкову жорсткість зразка (рис. 2.7)), або стандартні випробувальні машини, обладнані додатковим перерозподільчим пристроєм (рис. 2.8) типу «кільце», що складається із силового елемента – кільця; навантажувального силівимірювача – шток; давача переміщення та опорної плити з шарнірною і роликовою опорами.

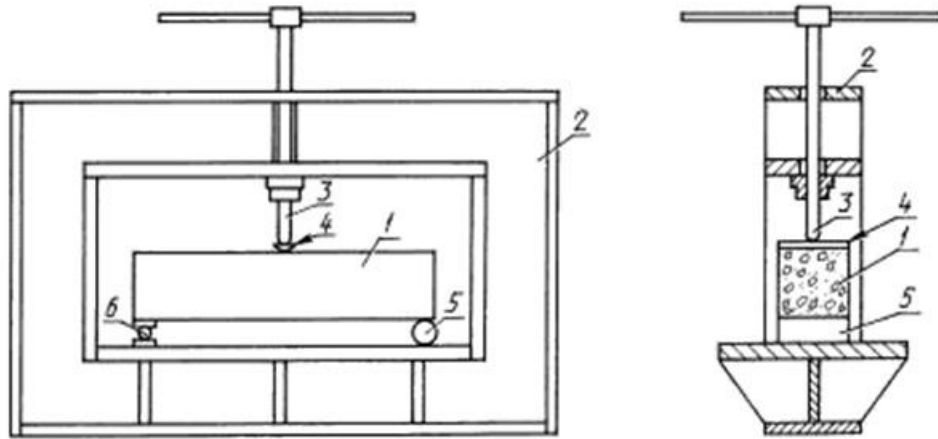


Рис. 2.7. Пристрій для визначення характеристик тріщиностійкості: 1 – зразок; 2 – навантажувальний пристрій; 3 – навантажувальний гвинтовий силовимірювальний шток; 4 – розподільна балка, 5 – роликівна опора; 6 – шарнірна опора

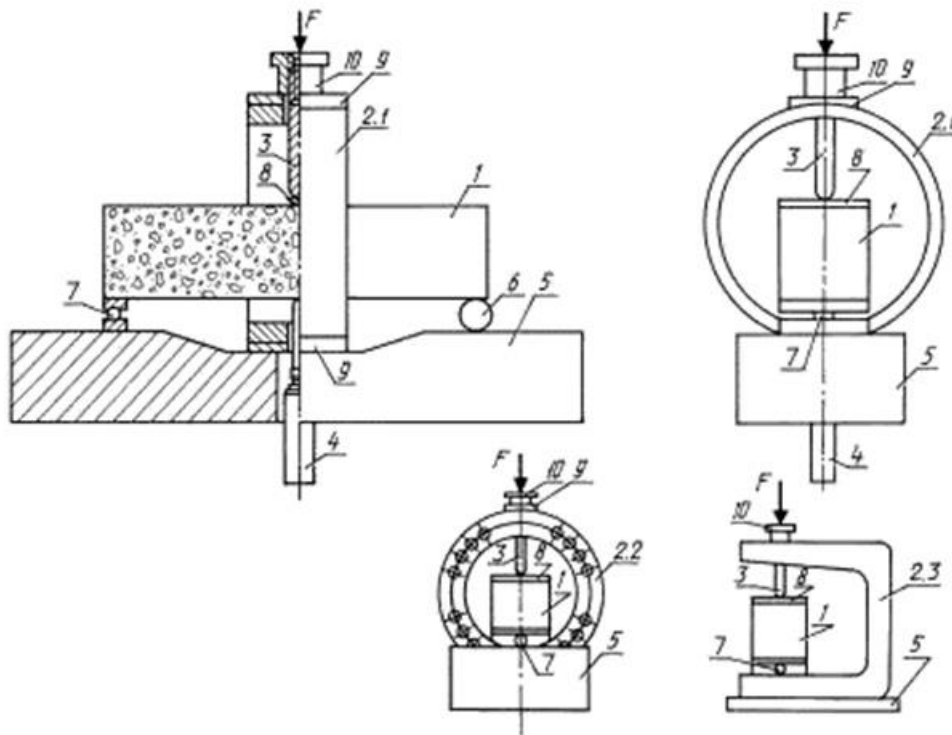


Рис. 2.8. Пристрій для визначення характеристик тріщиностійкості 1 – зразок; 2 – додатковий перерозподільчий пристрій типу: «кільце» (2.1), «кільце в кільці» (2.2), «скоба» (2.3); 3 – навантажувальний силовимірювальний шток; 4 – давач переміщень; 5 – станина; 6 – роликівна опора; 7 – шарнірна опора; 8 – розподільча балка; 9 – фіксуючі накладки; 10 – фіксатор навантажувального силовимірювального штока

Проведення випробувань.

При випробуванні температура навколишнього середовища повинна складати $(20 \pm 5) \text{ C}$, а відносна вологість – не менше 50%. Перед початком випробувань слід провести два цикли навантаження – розвантаження до величини зусилля, що складає

10% очікуваної максимальної сили. Швидкість навантажування зразків встановлюють за швидкістю переміщення навантажувальної плити преса в межах 0,02 – 0,2 мм/с; при цьому час випробувань має становити не менше 1 хв.

При рівноважних випробуваннях зразки типу 1 навантажують безперервно до їх поділу на частини з фіксацією повної діаграми стану матеріалу $F-v$ (рис. 2.9, крива OTCDE).

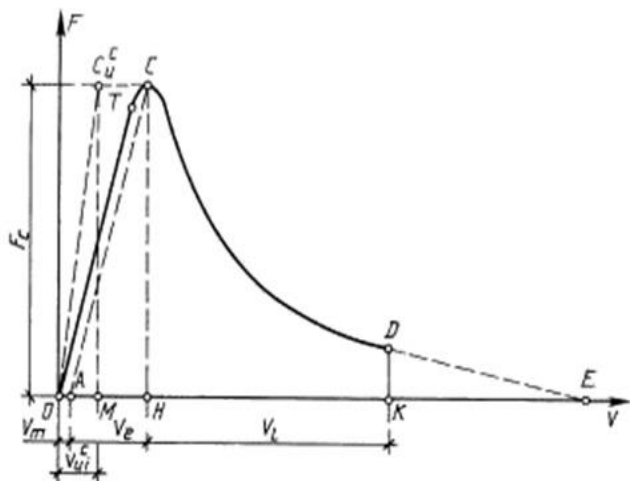


Рис. 2.9. Діаграма стану матеріалу $F-v$

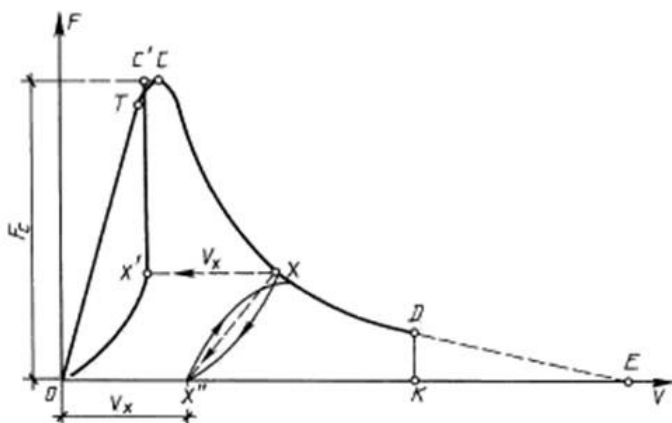


Рис. 2.10. Діаграма стану матеріалу $F-v$ з розвантаженням

Для визначення K_c , G_{ce} на стадії локального деформування проводять 5 – 7 короткочасних розвантажувальних зразків для визначення напрямків ліній розвантаження (наприклад, лінія XX'' на рис. 2.10) з фіксацією повної діаграми стану матеріалу $F-v$ (рис. 2.10, крива OTCXDE). При рівноважних випробуваннях зразків типу 1 висотою $b \geq 200$ мм враховують поправку на вагу зразка і вагу розподільної балки. При нерівноважних випробуваннях зразки типів 1 – 4 навантажують безперервно аж до їх поділу на частини з фіксацією значення.

Тема № 3

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ КОМПОЗИТІВ І ПЛАСТМАС

Визначення і класифікація полімерних композитів).

Композиційними називають матеріали, що отримані з двох або більше компонентів і складаються з двох або більше фаз. Один компонент (матриця) утворює безперервну фазу, інший є наповнювачем.

Композиційні матеріали є гетерогенними системами і можуть бути розділені на три основні класи:

1. Матричні системи, що складаються з безперервної фази (матриці) і дисперсної фази (дискретних частинок).
2. Композиції з волокнистими наповнювачами.
3. Композиції, що мають взаємнопроникну структуру двох або більше безперервних фаз.

Переваги гетерогенних полімерних композицій у порівнянні з гомогенними полімерами:

1. підвищена жорсткість, міцність, стабільність розмірів;
2. підвищена робота руйнування і ударна міцність;
3. підвищена теплостійкість;
4. знижена газо- і паропроникність;
5. регульовані електричні властивості;
6. нижча вартість.

Для рівномірної передачі зовнішнього впливу через матрицю і розподілу його на всі частинки наповнювача необхідно міцне зчеплення на межі матриця – наповнювач, що досягається за рахунок адсорбції або хімічної взаємодії.

Матриця може бути металевою, керамічною, вуглецевою. Наповнювач представлений у вигляді частинок і волокон, що мають значно вищі фізико-механічними властивості, ніж матриця. Частинки зазвичай називають дисперсним наповнювачем, вони мають невизначену, кубічну, кулясту або лускату форму з розмірами від часток від мм до мікронних і нанорозмірних величин. Інертний наповнювач практично не змінює властивості композиції. Активний наповнювач істотно змінює властивості композиції. Наприклад, волокна мають пружноміцнісні характеристики які на два порядки вище властивостей матриці. Вони можуть бути безперервними і короткими. Діаметр тонких волокон 5-15 мкм, товстих (борних або карбідокремнієвих) – 60-100 мкм. Довжина коротких волокон від 1-2 до 20-50 мм. Назва композитів відповідає природі волокон: скло-, вугле-, органо-, борпластики та інші. Для гібридних варіантів – скловуглепластики, органоборопластики тощо.

Орієнтація волокон визначає перехід від наповнених пластмас до армованих пластиків. Це система орієнтованих волокон, скріплених полімерною матриці.

До пластиків відносять матеріали, неодмінним компонентом яких є полімер, що перебуває в період формування виробів в пластичному або в'язкотекучому стані, а при експлуатації – в склоподібному або кристалічному.

Плаستي можуть бути гомогенними або гетерогенними. Плаستي ділять на термопласти і реактопласти.

Класифікація композитів:

1. За природою матриці:

— термореактивна (отримана ствердінням епоксидних, ефірних, кремнійорганічних та інших олігомерів в процесі виготовлення композитів);

— термопластична (розплавляється для просочення наповнювача, а потім охолоджується);

— гібридна (поєднує термореактивні і термопластичні компоненти).

2. За структурою полімерних композитів

— матрична – для матеріалів на основі дисперсних і коротких волокнистих частинок,

— шарувата (двомірна) і об'ємна для армованих пластиків на основі тканих і нетканих матеріалів.

— градієнтні матеріали із змінною структурою.

3. За ступенем орієнтації наповнювача, анізотропії матеріалу:

— з хаотичним розташуванням часток і волокон, з ізотропною структурою;

— з односпрямованої орієнтацією волокон, з різко вираженою анізотропією,

— з перехресною, ортотропною орієнтацією (0 , 90°), із заданою анізотропією;

— з косокутною орієнтацією волокон під кутами, відмінними від 90° ;

— з віяловою структурою, що складається з шарів з різною орієнтацією волокон.

4. За кількістю компонентів:

двокомпонентні, трикомпонентні ПКМ, що суміщають дисперсні частки і короткі волокна, поліволоконні гібридні ПКМ, що суміщають волокна з близькою (склоорганічні пластики) або істотно різною (скловуглепластики) деформативністю, поліматричною структурою, наприклад, на основі поєднання термореактивних і термопластичних зв'язуючих.

5. За вмістом наповнювача:

— з неорієнтованою структурою – вміст наповнювача – 30-40%;

— з орієнтованою структурою – 50-75%;

— високо-і гранично наповнені органоволокніти – 75-95%.

Механізм взаємодії компонентів ПКМ.

У найпростішому варіанті, коли полімер армований однонаправленими безперервними волокнами і розтягується в напрямку їх орієнтації, деформація компонентів однакова і напруження пропорційні модулю пружності волокон і матриці. Якщо в цій же моделі волокна будуть дискретними, то розподіл напружень вздовж волокна є неоднорідним. Напруження на кінцях волокна відсутні, але виникають дотичні напруження на межі волокно-матриця, які поступово втягують волокно в роботу. Зростання розтягуючих напружень у волокті продовжується до тих пір, поки вони не досягнуть середнього рівня напружень, що спостерігаються в безперервному волокті. Довжину волокна, на якій це відбувається, називають «неефективною». Із збільшенням деформації «неефективна» довжина зростає і досягає максимального значення при напруженні, що дорівнює міцності волокна. У цьому випадку «неефективну» довжину називають «критичною».

Вона є важливою характеристикою взаємодії композитів і може бути розрахована за формулою Келлі

$$l_{\text{кр}} / d_{\text{вол}} = \sigma_{\text{вол}} / 2\tau_{\text{мат}}, \quad (3.1)$$

де $d_{\text{вол}}$ і $\sigma_{\text{вол}}$ – діаметр і міцність волокна; $\tau_{\text{мат}}$ – межа плинності матриці або адгезійна міцність системи.

Залежно від міцності волокон і типу полімерної матриці співвідношення $l_{\text{кр}} / d_{\text{вол}}$, може змінюватися від 10 до 200; при $d_{\text{вол}} \approx 10$ мкм, $l_{\text{кр}} = 0,15-2,0$ мм. З наведених міркувань випливає, що при переході від безперервних волокон до дискретних частина довжини кожного волокна не сприйматиме повного навантаження. Чим коротше армувальне волокно, тим менше його ефективність. При $l < l_{\text{кр}}$ матриця ні за яких обставин не може передати волокну напруження, достатнє для його руйнування. З цього випливає, що армувальна здатність коротких волокон (збільшення пружнопластичних характеристик полімеру) дуже невисока. Особливо якщо врахувати орієнтацію волокон, яка в таких матеріалах не буває ідеальною. Структура матеріалів на основі коротких волокон швидше хаотична. Перевага коротковолокнистих наповнювачів визначається можливістю високошвидкісної переробки матеріалів у виробі. Однак у процесі лиття або екструзії відбувається додаткове руйнування волокон, довжина яких зазвичай зменшується до 0,1-1 мм. При переході до дисперсного порошкоподібного наповнювача можливість передачі напруження від матриці до наповнювача настільки знижується, що його внесок у збільшенні міцності композиту починає конкурувати зі зниженням міцності матриці через виникаючу нерівномірність напружень і розвиток дефектів. Через це міцність такого композиту зазвичай не збільшується в порівнянні з міцністю матриці (іноді навіть дещо знижується).

При збільшенні жорстких наповнювачів у в'язких термопластах вище 20% спостерігається перехід від пластичної течії до крихкого руйнування: значно знижується ударна в'язкість та робота руйнування. Модуль пружності зростає із збільшенням кількості наповнювача, але при цьому збільшуються розмір і кількість тріщин та «псевдопор», що виникають підчас навантаження при відшаруванні матриці від дисперсних частинок у момент, коли напруження досягають адгезійної міцності системи. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що шляхом зменшення розмірів часток наповнювача і розкиду їх діаметрів можна істотно знизити ймовірність появи великих дефектів.

Основна причина зміцнення – зміна напрямку росту тріщин при їх зіткненні з твердими частинками наповнювача. Найбільш ймовірний напрямок зростання тріщини перпендикулярно напрямку дії прикладеної сили. Якщо в цьому напрямку знаходиться частинка наповнювача, то тріщина повинна змінювати своє напрямку по дотичній до поверхні частинки. Отже, якщо частинки мають форму волокон і витягнуті в напрямку діючої сили, то поширення тріщини вздовж частинок наповнювача не буде.

При використанні монолітного волокна круглого перерізу показники механічних властивостей досягають максимуму зазвичай при $\varphi_2 = 0,65 - 0,7$. При використанні прецизійних способів укладання профільних волокон вдається підвищити φ_2 до 0,85, після чого міцність композицій починає більшою мірою залежати від міцності зчеплення на кордоні волокно-сполучна, ніж від міцності волокна.

При однаковій мірі наповнення ($\varphi_2 = 0,7$) і відношенні модулів пружності ($E_2/E_1 = 21$) жорсткість пластика з волокнами трикутного перерізу в поперечному напрямку перевищує жорсткість пластику з волокнами круглого перерізу в 1.5 рази. Заміна монолітного волокна порожнистим дає можливість різко збільшити питомі значення міцності і жорсткості виробів при стисненні і вигині, оскільки при тій же масі волокон зростає момент інерції.

Неефективно використовувати порожністі волокна в композиціях, що працюють розтяг із-за низької міцності профільних волокон. При зсуві краще використовувати профільні волокна. Іншим напрямком у створенні дисперсно-наповнених полімерів є їх модифікація частинками каучуку для зниження крихкості і підвищення ударостійкості.

Позитивні результати були отримані для ударостійкого полістиролу, епоксидних та інших матриць. Механізм зміцнення матеріалів, мабуть, дуже складний, але головна роль відводиться гальмуванню розвитку тріщини каучуковими частинками. Багато досліджень вказують на доцільність створення в цілях підвищення міцності перехідного шару, що володіє високою адгезією до матричних полімеру та каучукової фази.

Мікромеханічні моделі руйнування однонаправленого композиту.

Окремі волокна мають характеристиками міцності, що на порядок вищі міцності об'ємних зразків. Наприклад, міцність об'ємного скла дорівнює 50-70 МПа, а у вигляді волокон – 2,5-3,0 ГПа; аналогічна картина спостерігається для органічних і вуглецевих волокон, міцність яких досягає 4-6 ГПа. Таке відмінність пояснюється або впливом масштабного фактора (величина поверхні волокон визначає розмір можливого дефекту), або орієнтувальним ефектом, досить характерним для органічних волокон.

При випробуванні елементарних волокон спостерігається великий розкид експериментальних значень міцності. Тому зазвичай випробовують не менше 50 зразків, знаходять середнє значення напруження σ і його дисперсію.

Для оцінювання ймовірності руйнування застосовують рівняння ймовірності руйнування Вейбулла $P(\sigma)$ зразка при нарузі σ і довжині зразка L :

$$P(\sigma) = 1 - \exp(-L\alpha\sigma^\beta), \quad (3.2)$$

де α і β – сталі, що визначають із експериментально отриманого розподілу міцності елементарних волокон. Параметр P характеризує дефектність зразків. $\beta = 3-5$ для звичайних волокон, $\beta = 10-12$ – для «непошкоджених» скляних волокон.

Зниження міцності пучка незв'язаних між собою волокон в порівнянні з середньою міцністю $\sigma_{\text{вол}}$ визначається дисперсією їх міцності. Під час навантаження при досягненні межі міцності якогось волокна воно розривається і більше не бере участі в роботі. Зусилля перерозподіляється на цілі волокна, процес триває до моменту лавиноподібного руйнування більшої частини, а потім і всіх волокон в нитці (пучку). При $\beta = 10$ міцність нитки σ_n становить приблизно 80% середньої міцності елементарного волокна.

Аналіз діаграми навантаження нитки $\sigma - \varepsilon$ дає можливість простежити весь процес поступового розриву волокон. Він дозволяє також виявити деякі дефекти нитки, зокрема, різномірність (різну натягнутість) волокон, підсилюючи неодноразність їх руйнування. Взаємодія (зв'язаність) волокон, обумовлена скрученістю або частковим зклеєнням, проявляється у характері діаграм $\sigma - \varepsilon$, які стають більш лінійними. Значення коефіцієнта Вейбулла β для незв'язаного пучка волокон співпадає із значенням для елементарних волокон, проте для зв'язаного пучка волокон β має тенденцію до збільшення.

Полімерна матриця, що зв'язує пучок в єдине ціле – мікропластик – підвищує його міцність. При цьому міцність практично не залежить від довжини зразка ($\beta = 30-50$), що свідчить про зміну механізму руйнування. Розірване в якому-небудь місці волокно не перестає сприймати навантаження, як в нитки, а продовжує роботу при тому ж рівні напруг, що і в сусідніх волокнах. Це відбувається на відстані $l_{\text{кр}}$ від

місця руйнування відповідно до механізму, який розглядався вище для матеріалів на основі коротких волокон.

Згідно статистичної теорії міцності Гурланда і Розена, руйнування односпрямованого композиту при розтягання відбувається шляхом накопичення розривів, дроблення волокон в полімерній матриці. У цьому випадку теоретична міцність волокон $\sigma_{тр}$ в композиті дорівнює міцності незв'язаного пучка волокон «критичної» довжини $l_{кр}$.

$$\sigma_{тр} = (\beta l_{кр} E)^{-1/\beta} \quad (3.3)$$

На практиці процес дроблення волокон не вдається довести до кінця. Зазвичай він переривається виникненням і розвитком магістральної тріщини через перенапруження в перерізі, де накопичується найбільша кількість дефектів, або розшаруванням на межі розділу волокно-матриця. Цей механізм дозволяє отримувати найбільші значення міцності, оскільки пов'язаний з дисипацією енергії для утворення вільних поверхонь. Тому при оцінюванні міцності волокон в композиті доцільно зіставляти експериментальні значення $\sigma_{вол}$ з міцністю $\sigma_{тр}$, яка могла б бути при реалізації механізму дроблення волокон:

$$K_p = \sigma_{вол} / \sigma_{тр}, \quad (3.4)$$

де K_p – коефіцієнт реалізації міцності.

Реальні його значення досягають 60-80% для односпрямованих скло-, органо-і вуглепластиків на основі суперміцних волокон.

Аналогічний підхід запропоновано також для вивчення реалізації міцності склопластиків при поздовжньому стисканні. Є два основні механізми руйнування:

- руйнування внаслідок втрати стійкості волокон на пружній основі;
- розшарування матеріалу від впливу зсувних напруг.

Основна залежність, яка впливає з розгляду першої моделі руйнування, пов'язує міцність матеріалу при стисненні $\sigma_{тст}$ з модулем зсуву матриці G_m і її об'ємним вмістом φ_m :

$$\sigma_{тст} = G_m / V_m \quad (3.5)$$

Підрахунки за формулою (5), дають дуже високі теоретичні значення $\sigma_{тст}$. Наприклад, при модулі зсуву $G_m = 1-1,5$ ГПа, характерному для епоксидних смол, і $\varphi_m = 30\%$ міцність при стисненні $\sigma_{тст}$ могла б скласти 3-5 ГПа, в той час як для реальних матеріалів вона не перевищує 1,5 ГПа.

Можна стверджувати, що у всіх випадках спостерігається пропорційність між міцністю склопластиків при стисненні $\sigma_{тст}$ і зсуві $\tau_{зс}$:

$$\sigma_{\text{тст}} = K\tau_{\text{зс}}, \quad (3.6)$$

що говорить про те, що другий механізм є домінуючим. Це можна пояснити дефектами структури зразків і неоднорідним полем напружень, що виникають при випробуванні. Спеціальні методи приготування і дослідження однонапрямлених склопластиків дозволили збільшити $\sigma_{\text{тст}}$ до 2-3 ГПа, а коефіцієнт реалізації міцності з 30-40 до 60-70%.

При стисненні органопластиків руйнування відбувається площиною зсуву, орієнтованою під кутом 45° до осі волокна, що характерно для пластичних волокон.

Найбільш слабким місцем композиційних матеріалів є їх низька міцність і деформівність при зсуві. Тому технологічні та експлуатаційні напруження найчастіше призводять до розтріскування матеріалу.

Тріщиностійкість композиту характеризують питомою в'язкістю руйнування G_c – енергією, що розсіюється при утворенні нової поверхні. Чим більше питома в'язкість руйнування, тим вище стійкість композиту до розшаровування. Міжшарова в'язкість руйнування зростає при збільшенні деформівності матриці, адгезії між волокном і матрицею, а також товщини прошарків зв'язного між волокнами.

Мікромеханічні моделі полімерних композитів дозволяють виявити аналітичні залежності, показують вплив властивостей волокон, матриці, їх адгезійного взаємодії, структури матеріалу і механізмів руйнування на макроскопічні пружнопластичні характеристики односпрямованого шару. Найбільш успішно вони описують граничний модуль пружності і міцність композиту при розтягуванні. У тому випадку, коли деформації волокон і матриці однакові, внесок кожного компонента пропорційно його об'ємному вмісту

$$E_k = E_v \varphi_v + E_m \varphi_m, \quad (3.7)$$

$$\sigma_k = \sigma_v \varphi_v + \sigma_m \varphi_m, \quad (3.8)$$

Ці рівняння називають «правилом суміші». Оскільки внесок полімерної матриці зазвичай не перевищує 2-5%, то можна його не враховувати:

$$E_k (\parallel) = E_v \varphi_v, \quad (3.9)$$

$$\sigma_k (\parallel) = \sigma_v \varphi_v, \quad (3.10)$$

Подовження композиту при розтягуванні в поперечному напрямку складається з деформації волокон і зв'язки. Модуль пружності $E (\perp)$ можна обчислити за формулою

$$1 / E_k (\perp) = \varphi_v / E_v + \varphi_m / E_m, \quad (3.11)$$

При цьому слід враховувати, що модуль пружності самих волокон в поперечному напрямку збігається з модулем пружності в поздовжньому напрямку тільки для ізотропних скляних і борних волокон. Для вуглецевих і органічних волокон поперечний модуль істотно нижче поздовжнього. Аналогічна залежність має місце для модуля зсуву односпрямованого композиту «в площині» волокон.

Міцність композитів при поперечному розтягуванні-стисненні і зсуві залежить від властивостей матриці, адгезійного взаємодії, структури матеріалу - наявності пор і інших дефектів.

Механізм взаємодії компонентів ПКМ.

Важливість для інженерної практики полімерних композитів та виробів із них обумовлені високою питомою міцністю, жорсткістю, малою питомою вагою, корозійною стійкістю, високими діелектричними показниками полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), які значно знижують матеріалоємність і підвищують надійність деталей, вузлів та агрегатів найрізноманітніших машин і конструкцій, роблять їх практично незамінними в авіабудуванні, кораблебудуванні, автотранспорті, в хімічному апарато- й машинобудуванні, електроніці і багатьох інших галузях промислового виробництва та будівельній індустрії.

Як свідчать інженерна практика та аналіз літературних джерел, в основі руйнування композиційних матеріалів найчастіше лежить механізм зародження і розвитку тріщин або магістральних, або в одній із складових (матриці, наповнювачі) чи на межі поділу фаз. При цьому виріб із ПКМ може втратити свої службові властивості через порушення герметичності у місцях локального руйнування, або ж, якщо розгерметизація не призводить до втрати утримувальної здатності виробу, таке руйнування може спричинити зміни у подальшій поведінці конструкції під час її експлуатації.

Для прийнятої програми випробувань технологія виготовлення зразків із однотипних матеріалів повинна бути однаковою. Причому зразки слід вирізувати із одного і того ж самого напівфабрикату або проби. Як виняток допускається виготовлення зразків із декількох одночасно виготовлених ідентичних за складом і технологією листів напівфабрикатів зі здійсненням додаткових випробувань для виявлення кореляції між властивостями вихідних напівфабрикатів. Із напівфабрикатів, товщина яких утричі перевищує товщину зразка, останні треба вирізувати так, щоб можна було виявити зміну характеристик тріщиностійкості по товщині листа.

Зразки, якщо дають можливість це зробити розміри напівфабрикату, слід вирізувати з урахуванням необхідності визначення характеристик тріщиностійкості у різних напрямках.

Тема № 4

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ МІЦНОСТІ І ТРИЩИНОСТІЙКОСТІ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Міцністю називається здатність деревини чинити опір руйнуванню під дією механічних навантажень. Міцність деревини залежить від напрямку діючої навантаження, породи дерева, щільності, вологості, наявності вад. Вона характеризується межею міцності - напруженням, при якому руйнується зразок.

Істотний вплив на міцність деревини має вологість, що міститься в клітинних оболонках. При збільшенні вологи міцність деревини зменшується (особливо при вологості 20...25 %). Подальше підвищення вологості за межі гігроскопічності (30 %) не впливає на показники міцності деревини. Показники меж міцності можна порівнювати тільки при однаковій вологості деревини.

Крім вологості на показники механічних властивостей деревини впливає і тривалість дії навантажень. Тому при проведенні випробувань деревини дотримується заданої швидкості навантаження на кожен вид випробування. Розрізняють основні види дій сил: розтяг, стиск, вигин, сколювання.

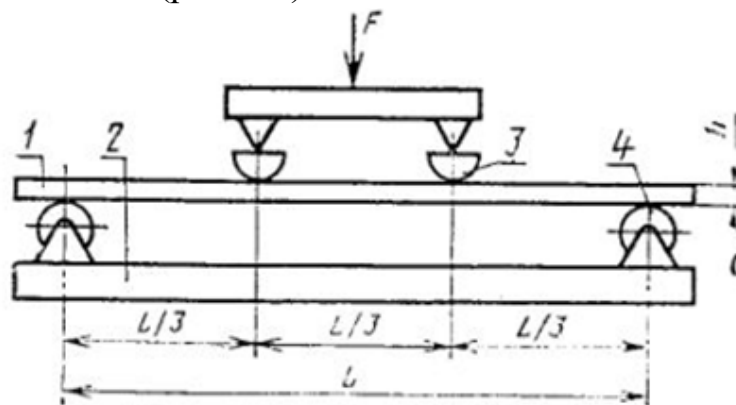
Міцність деревини при статичному вигині.

Для визначення міцності деревини при статичному вигині використовують зразки натурних розмірів, що відрізняються від пиломатеріалів і заготовок тільки довжиною. Довжина зразка повинна бути від 21 до 22 висот зразка. За висоту зразка приймають розмір поперечного перерізу в вздовж напрямку навантаження.

Кожен зразок випилюють таким чином, щоб досліджувана ділянка була розташована в середній третині довжини.

Кількість зразків обирають залежно від виду випробування в нормативно-технічній документації на пиломатеріали та заготовки.

Пристосування, для випробування складається з основи з опорами і двох навантажувальних елементів (рис. 4.1).



1 - зразок; 2 - основа; 3 - навантажуючий елемент;
4 - опора

Рис. 4.1. Пристосування для випробування статичним вигинанням

Пристосування має забезпечувати симетричний відносно опор вигин зразка. Висота опор і навантажувальних елементів повинна бути не менше ширини випробовуваних зразків. Радіус закруглення опор і навантажувальних елементів повинен бути не менше 1,5 висоти зразка.

Відстань між центрами опор має становити 18 висот зразка. Відстань між центрами навантажувальних елементів повинне складати 1/3 відстані між центрами опор. Ці відстані визначають з похибкою не більше 1 мм.

Прилад для вимірювання відстані між центрами опор і між центрами навантажувальних елементів з похибкою вимірювання не більше 1 мм.

Навантаження на зразок прикладають безперервно при постійній швидкості росту напруження або постійній швидкості переміщення навантажувальних елементів. Швидкість повинна бути такою, щоб тривалість навантаження до моменту руйнування зразка становила не менше 2 хв. та не більше 5 хв.

Випробування продовжують до руйнування зразка. Навантаження ($F_{\text{разр}}$), при якому відбулося руйнування, визначають за максимальним показом силовимірювача випробувальної машини з похибкою не більше ціни поділки шкали. Граничне значення шкали не повинно перевищувати найбільше руйнівне навантаження більш ніж у три рази.

Після випробування визначають вологість зразка відповідно до стандарту.

Межу міцності ($\sigma_{\text{зр}}$) кожного зразка при статичному вигині в мегапаскалях обчислюють за формулою

$$\sigma_{\text{зр}} = \frac{F_{\text{р}} \cdot L}{2bh}, \quad (4.1)$$

де $F_{\text{р}}$ – руйнівне навантаження, Н; L – відстань між центрами опор, мм; b – ширина зразка, мм; h – висота зразка, мм. Результати обчислення округлюють до 0,1 МПа.

Міцність деревини при поздовжньому стисканні

Для визначення міцності деревини при поздовжньому стисканні потрібно виміряти навантаження руйнування зразка при поздовжньому стисканні. Зразки відрізняються від пиломатеріалів і заготовок довжиною, яка повинна бути у 5 разів більше від товщини.

Для визначення мінімальної міцності зразок випилюють так, щоб він включав найбільш ослаблений сортовизначальними вадами, перетин пиломатеріалу або заготовки. Цей перетин має бути розташований в середній частині зразка не менше однієї товщини від кожного торця.

Кількість зразків залежить від цілей випробування. Зокрема, для дослідницьких цілей вибірку формують відповідно до стандарту в кількості не менше 50 зразків.

Для передавання рівномірного навантаження на зразок використовують пристосування зображене на рис. 4.2.

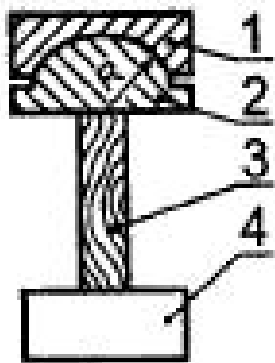


Рис. 4.2. Пристосування для рівномірного навантаження зразка

- 1, 2 – самовстановлювальні пластини;
3 – зразок; 4 – нижня платформа випробувальної машини

Зразок навантажують безперервно при постійній швидкості росту напружень або постійній швидкості переміщення захоплювачів. Швидкість повинна бути такою, щоб тривалість навантаження до руйнування зразка становила не менше 2 хв. та не більше 5 хв. Допускається випробування зі швидкістю зростання напруження $(0,15 \pm 0,05)$ МПа/с.

Межу міцності кожного зразка при поздовжньому розтягуванні (σ) мегапаскалях обчислюють з округленням до 0,1 МПа за формулою (1).

Міцність при поздовжньому розтяганні

Для визначення міцності деревини при поздовжньому розтяганні необхідно виміряте навантаження руйнування зразка та обчислити напруження при цьому навантаженні. Зразки відрізняються від пиломатеріалів і заготовок довжиною.

Загальна довжина зразка повинна бути такою, щоб довжина його робочої частини, вільної від захоплень, перевищувала ширину не менше ніж у 8 разів. Для визначення мінімальної міцності зразок випилюють так, щоб він включав найбільш ослаблений вадами сорту, перетин пиломатеріалу або заготовки. Цей перетин має бути розташований в межах ділянки, що поширюється на 1,5 ширини по обидві сторони від центру зразка. Вологість зразків повинна відповідати вимогам нормативно-технічної документації на пиломатеріали та заготовки. Кількість зразків залежить від цілей випробування. Зокрема, для дослідницьких цілей вибірку формують у кількості не менше 140 зразків. У кожного зразка на середині довжини вимірюють товщину t і ширину b з округленням до 0,1 мм.

Зразок навантажують безперервно при постійній швидкості росту напружень або постійній швидкості переміщення захоплювачів. Швидкість повинна бути такою, щоб тривалість навантаження до руйнування зразка становила не менше 2 хв. та не більше 5 хв. Допускається випробування зі швидкістю зростання напруження $(0,15 \pm 0,05)$ МПа/с.

Межу міцності кожного зразка при поздовжньому розтягуванні (σ) у мегапаскалях обчислюють з округленням до 0,1 МПа за формулою

$$\sigma = \frac{F_p}{bt}, \quad (4.2)$$

де F_p – руйнівне навантаження, Н; b – ширина зразка, мм; t – товщина зразка, мм.

Для передавання розтягувального зусилля на зразок використовують пристосування зображене на рис. 4.3.

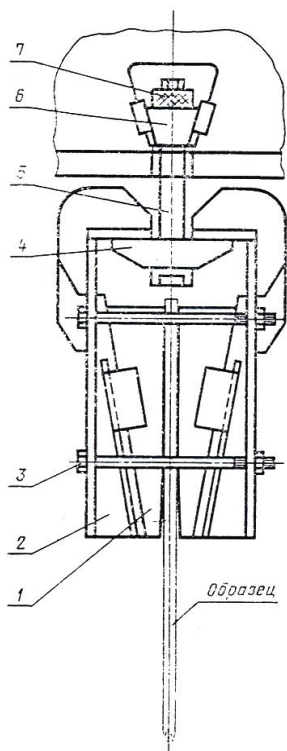


Рис. 4.3. Пристосування для передачі розтягувального зусилля на зразок
1 – губка; 2 – скоба, 3 – болт, 4 – основа, 5 – тяга; 6 – сухар; 7 – гайка

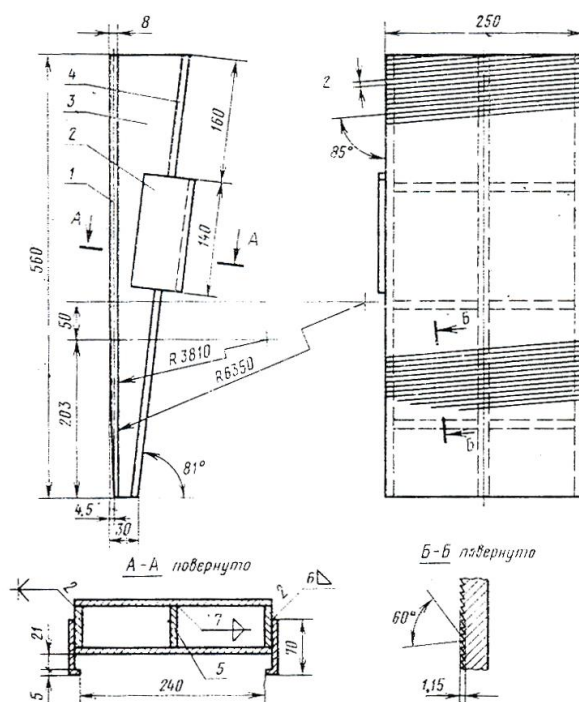


Рис. 4.4. Клиновидна губка, що використовується в захоплювачах для випробування на розтягання пиломатеріалів і заготовок

Зразки, що зруйнувалися в захоплювачах, при розрахунках не враховують. За результат випробувань приймають середню арифметичну величину межі міцності відібраних зразків.

Міцність при сколюванні вздовж волокон

Визначення полягає у вимірюванні навантаження руйнування зразка при сколюванні вздовж волокон, і обчисленні напруження при цьому навантаженні.

Стандарт не поширюється на авіаційні пиломатеріали та заготовки а також на випробування малих чистих зразків.

Форма і розміри зразка представлені на рис. 4.5. Товщина визначається товщиною випробуваних пиломатеріалів і заготовок. Зразки відбирають із вершинних кінців пиломатеріалів і заготовок, або їх непошкоджених частин, що залишилися після інших випробувань.

Для проведення експериментальних досліджень використовують пристосування зображене на рис. 4.6.

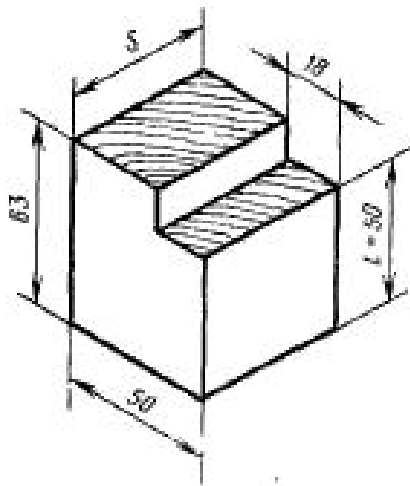


Рис. 4.5. Зразок для випробувань сколюванням вздовж волокон

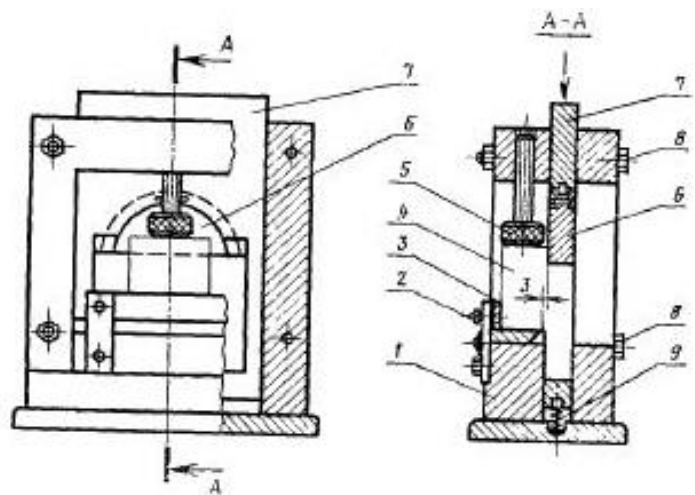


Рис. 4.6. Пристосування для випробувань

- 1 – корпус; 2 – встановлюючий гвинт;
- 3 – поперечна планка; 4 – зразок;
- 5 – стопорний гвинт;
- 6 – самоцентрувальна опора; 7 – пуансон;
- 8 – болт; 9 – пружина

Вологість зразків повинна відповідати вимогам нормативно-технічної документації на пиломатеріали та заготовки. Кількість зразків залежить від цілей випробування. Зокрема, для дослідницьких цілей вибірку формують згідно з стандартом у кількості не менше 60 зразків. Товщину S і товщину виступу l вимірюють площиною очікуваного сколювання з похибкою не більше 0,1 мм.

Межу міцності зразка при сколюванні вздовж волокон (τ) обчислюють в мегапаскалях (з округленням до 0,1 МПа) за формулою

$$\tau = \frac{F_{\max}}{Sl}, \quad (4.3)$$

де F_{\max} – руйнівне навантаження, [Н]; l – довжина виступу, [мм]; s – товщина зразка, [мм].

В'язкість руйнування деревини.

В'язкість руйнування, за нормального відриву, хвойних (рис. 4.7а) та листяних (рис. 4.7б) порід деревини навантаженням поперек волокон. Початковий нахил і критичний коефіцієнт інтенсивності напружень істотно залежать від щільності в межах усіх порід, так і між хвойними і листяними породами. Відмінності між системами тріщин можна пояснити більш високою об'ємною часткою радіально орієнтованих тканини (променів) з листяних порід.

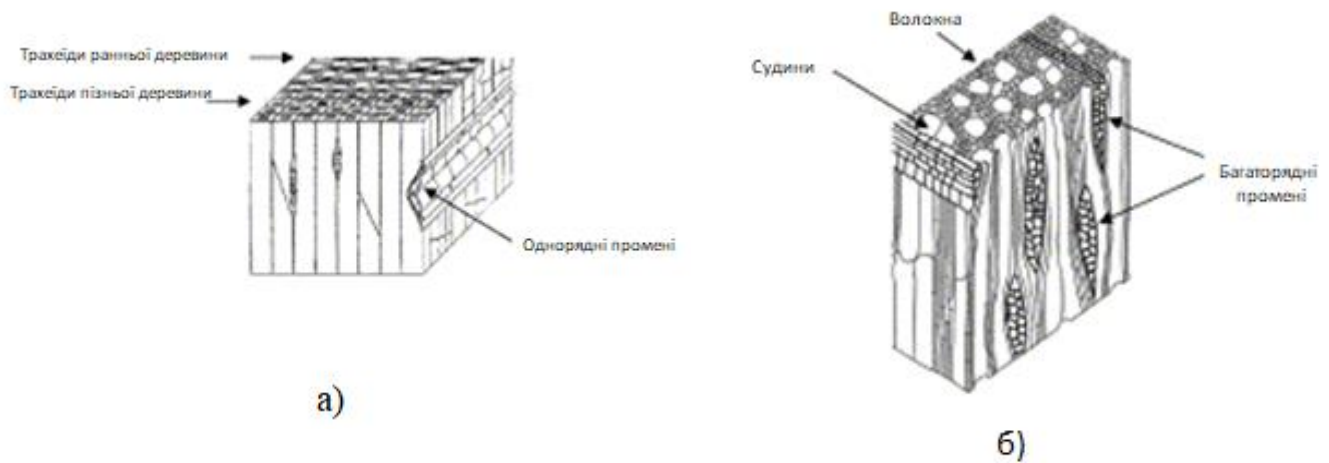


Рис. 4.7. Структура дерева:

(а) хвойних порід, що складається з ранніх трахеїдами дерева, і пізньої деревини трахеїдами однорядні промені; (б) листяних порід, що складаються з судин, волокон і багаторядних променів

Деревина є анізотропним матеріалом. Стовбур дерева приблизно є ортотропним циліндром. Коли стовбур розрізати на пиломатеріали, то дошки, які досить далеко від серцевини будуть приблизно плоско ортотропні з трьома площинами симетрії, що мають нормальні вектори в радіальному (R), тангенціальному (T), і поздовжньому (L) напрямках оригінального дерева.

У кожній площині тріщина може розвиватися в двох інших ортогональних напрямках. Згідно зі стандартом поширення руйнування ці шість напрямів росту тріщини визначаються двома літерами, а саме, RL, PT, TL, TR, LT і LR, показано на рис. 4.8.

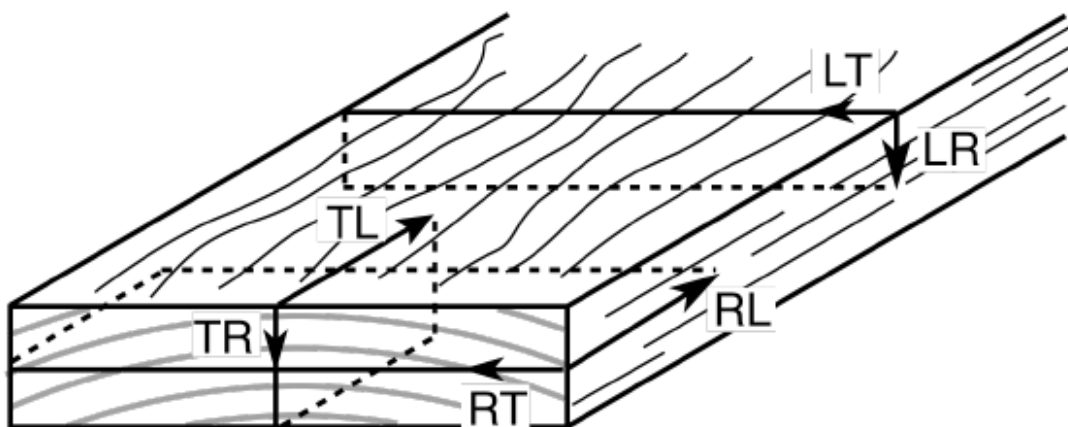


Рис. 4.8. Напрями росту тріщини RL, PT, TL, TR, LT і LR

Перший символ є напрямком вектора нормалі до площини тріщини, друга буква є напрям поширення тріщин. Для повної характеристики руйнування деревини необхідно випробувати усі напрямки поширення тріщини, хоча LT або LR тріщини

не можуть бути вивчені при поширенні тріщини тому, що такі тріщини завжди можуть стати RL чи TL тріщинами, а не поширюватися як LT або LR тріщин.

Розглянемо RL і TL тріщини (рис. 4.9).

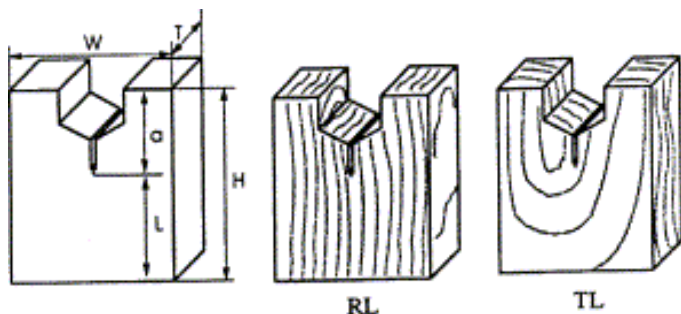


Рис. 4.9. Геометрія зразків та їх орієнтація

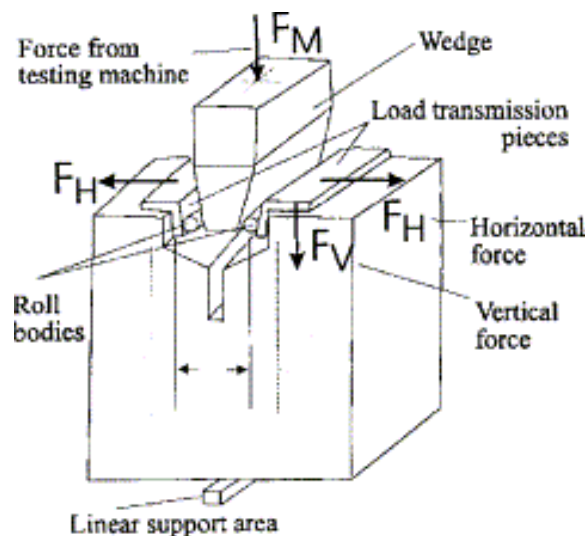


Рис. 4.10. Схема випробування розклиненням

Обидві ці тріщини паралельні до напрямку волокон деревини, і найбільш ймовірно буде проявлятися ефект сполучення волокон. RL тріщини дотичні до кілець росту, отже, потенційно тріщини у площині будуть обмежені одним або кількома кільцями росту і переважатимуть тріщини зростання в ранніх шарах деревини. На противагу цьому TL тріщини перпендикулярні до кілець росту, отже фронт тріщини завжди буде «мостом» через кілька кілець росту і буде поширюватися як і в ранніх так і в пізніх зонах деревини. Після того як дані зусилля, переміщення і довжина тріщини записані дані, зменшуються наступним чином.

Для оцінки в'язкості деревини, необхідно побудувати повну $R -$ криву. Такі криві забезпечують важливі характеристики руйнування. Початкове значення визначає в'язкість при ініціюванні руйнування. Зростання кривої визначає внесок механіки процесу зони у в'язкість або відсутність зростання вказує на відсутність у зоні процесу механізмів посилення. На жаль, традиційні методи для визначення в'язкості руйнування не передбачають побудову $R -$ кривої і зосереджені на ініціюванні тріщини. Наприклад ASTM E-399 передбачає створення початкового надрізу, визначення початку руйнування, а потім обчислення в'язкості руйнування. Цей метод був використаний для дерева і композитів із нього, але тому, що цей метод контролює тільки початок руйнування, всі ці результати є неповними.

Рис. 4.11a показує залежність сили від довжини тріщини в залежності від переміщення при випробуванні зразків з хвойних дерев.

Затінена площа під кривою зусилля-переміщення (рис. 4.11a) дорівнює кумулятивній енергії реалізованій до заданого переміщення d . Для розрахунку

необхідні дані про те, як зразок розвантажується починаючи з переміщення d . Якщо спробувати виміряти зворотну лінію шляхом розвантаження, волоконно-місткова зона буде протидіяти розвантаженню, а не повертатися до початкового положення (тобто, волокна не ковзатимуть назад в їх початкове положення і, ймовірно, замість цього волокно буде розчавлене). Але будь-яка енергія, пов'язана з такою взаємодією площини тріщини під час розвантаження не є частиною енергії, що виділяється при монотонному поширенні тріщини, отже, не повинна бути складовою розрахунку кумулятивної енергії, що виділяється. Методика передбачає, що за відсутності в площині тріщини перешкод, розвантаження буде повертатися до початкового значення d_0 , знайденого шляхом екстраполяції початкової лінійної ділянки навантаження до нульового значення сили.

Таким чином сукупна виділена енергія, $U(d)$, визначається за формулою

$$U(d) = \int_{d_0}^d F(x) dx - \frac{1}{2} F(d)(d - d_0), \text{ і дорівнює затіненій площі на рис 4.11а.}$$

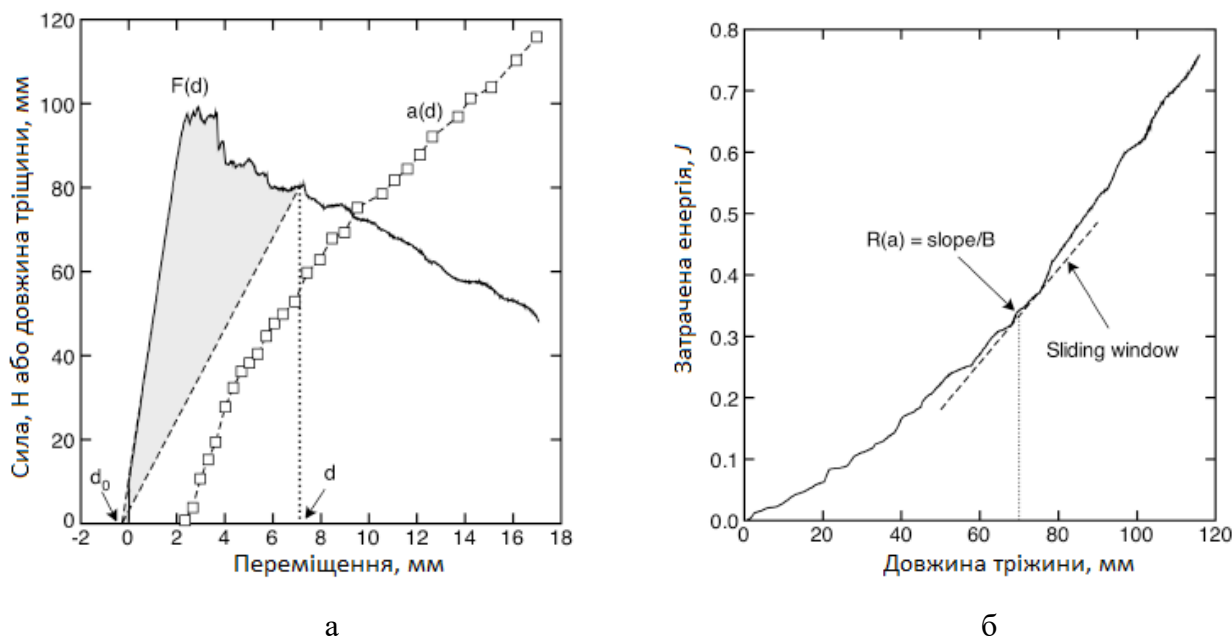


Рис. 4.11. Метод площ прямого розрахунку R – кривої з синхронними силою і довжиною тріщини як функції переміщення: а – сила – довжина тріщини. Заштрихована площа під кривою сила – зміщення від початкового зміщення (d_0) до зміщення d ; б – графік затіненої області, як функції довжини тріщини при відповідному зміщенні

На рис. 4.12. представлені порівняльні дані опору поширення тріщини в деревині різних порід, отримані за статичного розклинення RL (а) і TL (б) зразків (Рис. 4.8, 4.9). Найбільший опір ініціюванню тріщини має ясен, найменший – ялина, а дуб займає проміжне положення.

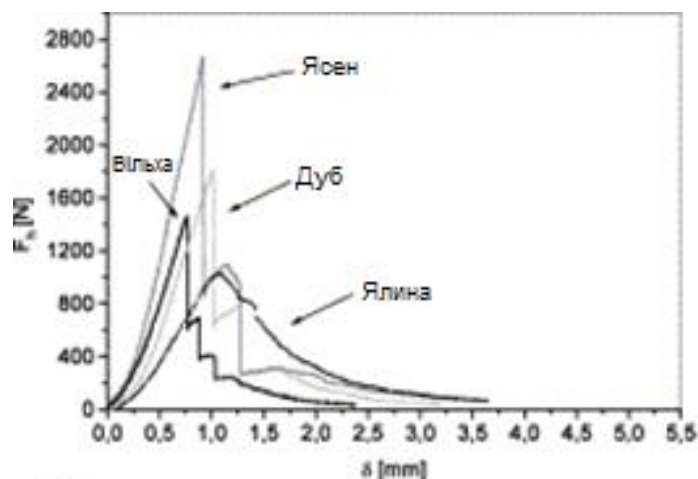


Рис. 4.12. Типові криві зусилля-переміщення отримані при випробуванні розклинням RL зразків

Вплив орієнтації тріщини (RL і TL) на залежності початкового КІН K_{init} , критичного коефіцієнту інтенсивності напружень K_{Ic} і енергії руйнування G_F від густини деревини подані на рис. 4.13.

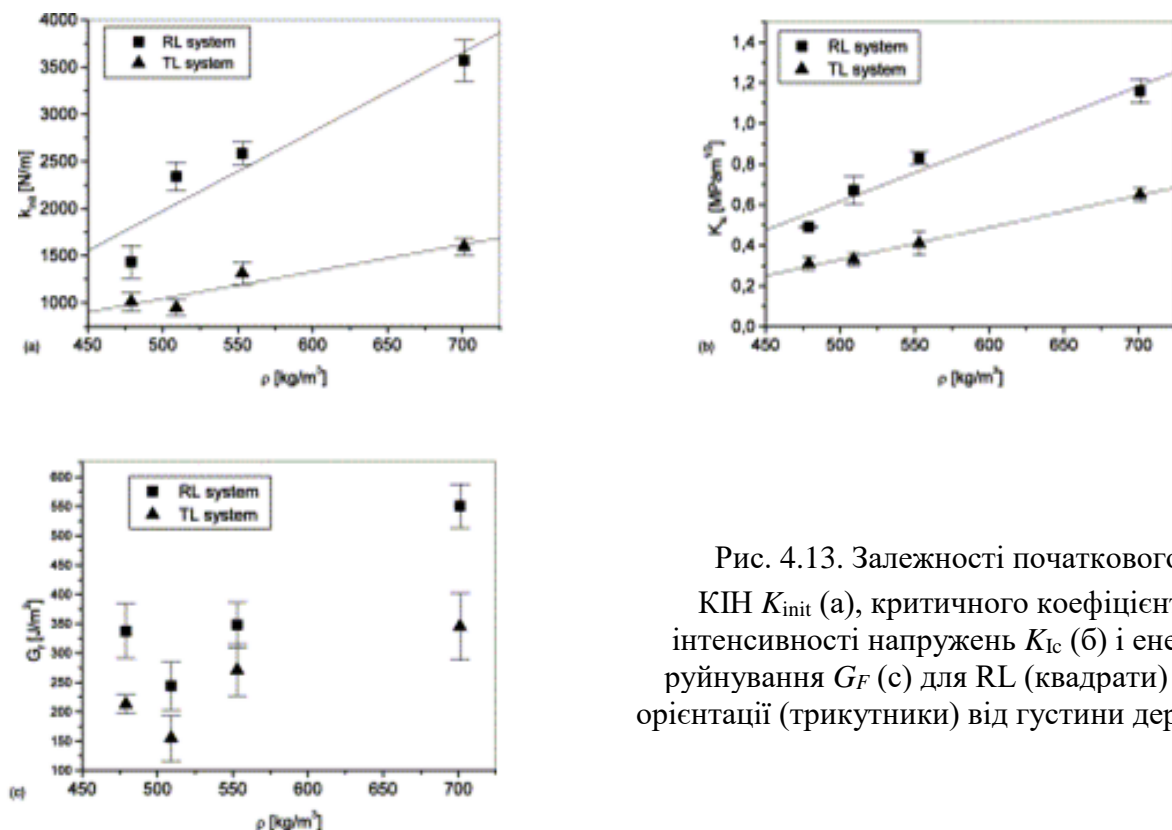


Рис. 4.13. Залежності початкового КІН K_{init} (а), критичного коефіцієнту інтенсивності напружень K_{Ic} (б) і енергії руйнування G_F (с) для RL (квадрати) і TL орієнтації (трикутники) від густини деревини

У всіх випадках, характеристики опору руйнуванню є більшими для RL орієнтації, незалежно від значення густини деревини. Загалом, із зростанням густини деревини, незалежно від орієнтації тріщини, початковий коефіцієнт інтенсивності напруження K_{init} , критичний коефіцієнт інтенсивності напружень K_{Ic} і енергія руйнування G_F збільшуються.

Тема № 5

СПЛАВИ З ПАМ'ЯТТЮ ФОРМИ, МІЦНІСТЬ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

Вступ. Застосування матеріалів з СПФ

Сплави з пам'яттю форми (СПФ) – це клас металевих матеріалів, які можуть відновлювати великі деформації через термічно контрольовану або контрольовану напруженнями фазову трансформацію. Коли відновлення відбувається через зміну температури, це називається ефект пам'яті форми, тоді як псевдопружність (ЕП) - відновлення, яке відбувається після знімання навантаження. Ці ефекти обумовлені перетвореннями високосиметричної аустенітної фази в одну з декількох конфігурацій мартенситу. Причому кожен з ефектів виникає внаслідок перетворення за різними термомеханічними схемами. У нікель-титановому сплаві аустеніт має кубічну структуру B2, а мартенситні варіанти мають моноклінну кристалічну ґратку B19'. Перетворення між цими двома фазами може спричинити деформацію вздовж деяких кристалографічних напрямків до 10%.

ЕПФ та ЕП, висока демпфувальна здатність визначають функціональні властивості СПФ. Зокрема, завдяки їх механічним властивостям, біосумісності, пластичності, стійкості до корозії і особливо через НП і ЕПФ, СПФ широко використовують в будівництві, авіації, біомедичних пристроях та інших високотехнологічних галузях піддаючися інтенсивній дії циклічних навантажень.

СПФ проявляють високі пружні властивості, здатні змінювати свою форму за зміни температури, деформуватися на 7...8% (майже в сорок разів перевищує деформівну здатність нержавної аустенітної сталі) і не руйнуватися за знакозмінних навантажень. Найбільш поширеним є нікелід титану (нітинол). Складний характер фазових перетворень мартенситного типу, що відбувається в сплавах на його основі, яскраво проявляється в пористих структурах. Фазові переходи в таких сплавах характеризуються пружним гістерезисом і широким температурним інтервалом, в якому матеріал проявляє ЕПФ і НП. Крім сплавів на основі Ni-Ti, мартенситні перетворення відбуваються, наприклад, в таких системах, як Pt-Ti, Pt-Ga, Pt-Al. Залежно від температури мартенситного перетворення і механічних властивостей СПФ мають широкий діапазон застосування.

У будівництві космічних об'єктів, існує ряд складнощів із здійсненням доставки і монтажу різних громіздких конструкцій у відкритому просторі. З нітинола створюють антени, конструкція яких складається з листів і стрижнів, скручених у спіраль і поміщених в спеціальний люк у супутнику. Коли він виходить на орбіту, антена нагрівається сонячним випромінюванням і розкривається.

Окремою складністю є з'єднання громіздких космічних об'єктів у просторах космосу, доставка яких можлива виключно окремими частинами. З огляду на цю специфіку, була розроблена технологія з'єднання деталей у космосі з використанням муфт з металу ТН-1. Її використовували в процесі з'єднання конструкції ферми з алюмінієвих сплавів довжиною 14,5 м з квадратним поперечним перерізом зі сторонами 0,5x0,5 метра. Ферма була виконана з відокремлених трубчастих елементів Ø28 мм, з'єднаних нітиноловою муфтою, що володіє ЕПФ.

Також СПФ використовують у пристроях для гасіння вібрацій, які запобігають руйнуванню будівель при землетрусах. Також проведено досліджень, що підтверджують ефективність використання таких матеріалів як для з'єднання балок з колонами. Це зумовлено високою здатністю СПФ до дисипації енергії. Є успішні спроби застосування попереднього зміцнення прутками із СПФ бетонних балок для аварійного відновлення їх пошкодження (закриття тріщин відриву зсуву), спричиненого землетрусом або вибухом.

Таким чином СПФ перспективно використовувати для демпфування коливань будівельних споруд і елементів конструкцій при дії експлуатаційних та сейсмічних впливів, а також в технологіях відновлення пошкоджених будівельних конструкцій.

Кристалічна будова сплавів з ефектом пам'яті форми

Загалом ефект пам'яті пов'язують з термопружним мартенситним перетворенням, яке відбувається за бездифузійним механізмом. При цьому об'ємноцентрована кубічна вихідної фази (умовно названої аустенітною) трансформується за механізмом зсуву в гранецентровану орторомбічну, а потім в моноклінну, властиву мартенситу (рис. 5.1). Цей процес може також відбуватися шляхом формування проміжної тетрагональної фази (R-фаза).

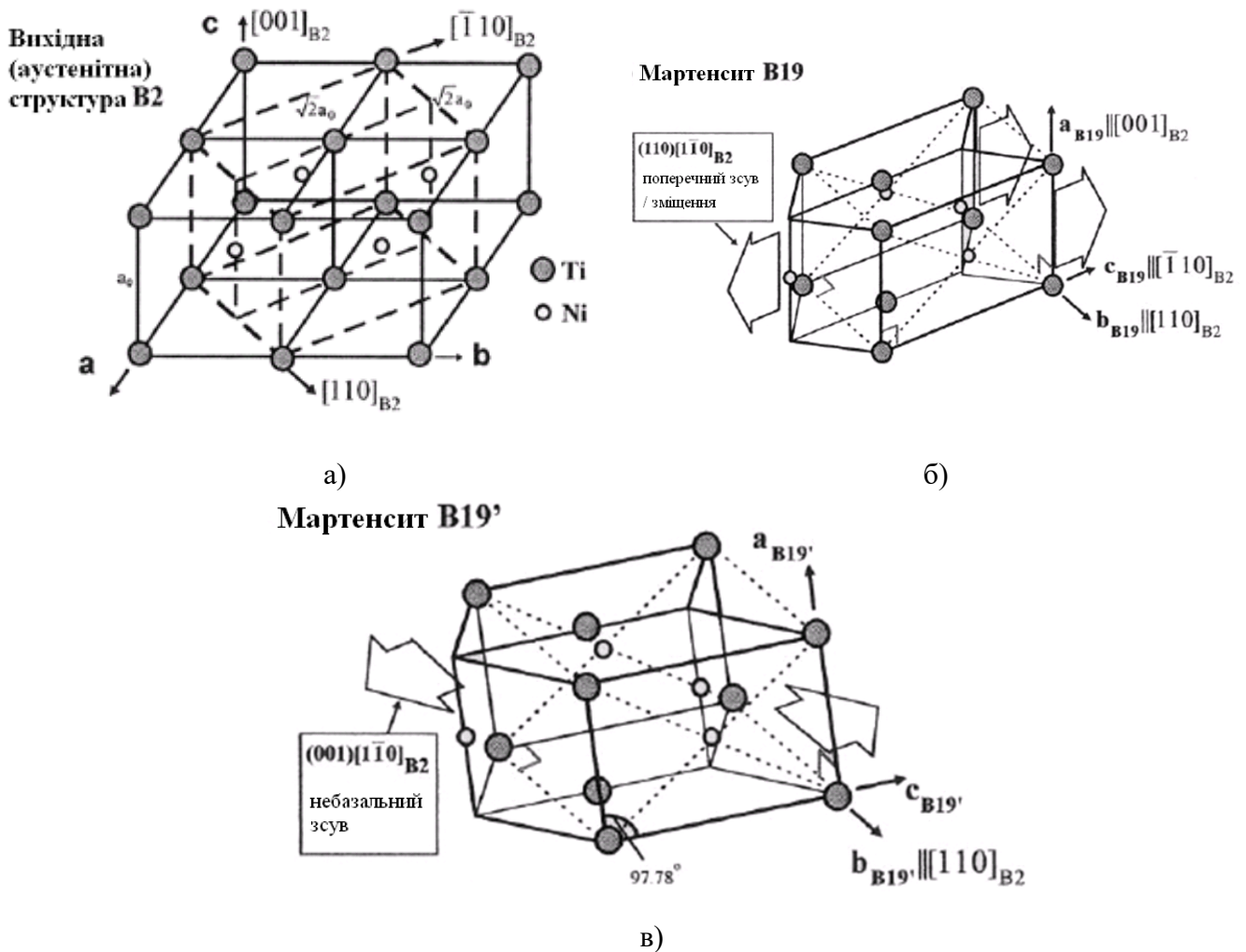


Рис. 5.1. Розташування атомів у кристалічній ґратці Ni-Ti сплаву з ефектом пам'яті форми в об'ємноцентрованій ґратці типу B2, яку умовно вважають за аустенітну, (а), гранецентрованої орторомбічній типу B19, що відповідає двійниковому мартенситу, сформованому внаслідок поперечного зсуву кристалу B2 в площині (110) вздовж напрямку $[11\bar{0}]$ (б) та моноклінній B19', що також відповідає мартенситу, але бездвійниковому (в)

Під час фазових перетворень усі сплави з ефектом пам'яті форми змінюють форму і розташування атомів у ґратці і цей процес відбувається з поглинанням або виділенням теплової енергії. Критичну деформацію і відновлення форми сплавів пояснюють відповідно зміною параметра ґратки внаслідок фазового перетворення аустеніту в мартенсит і характеристиками новоутвореної кристалічної структури.

За підвищеної температури Ni-Ti сплав має об'ємноцентровану кубічну ґратку і характеризується стабільним її параметром. Внаслідок зміни сили міжатомних зв'язків під час охолодження Ni-Ti сплавів в критичному для перетворення температурному діапазоні їх модуль пружності (жорсткість), границя плинності і електроопір також змінюються. Так під час охолодження сплаву у діапазоні мартенситного перетворення змінюється його кристалічна будова (внаслідок мартенситного перетворення). Глибина завершеності такого перетворення залежить від температури, за якої воно розпочинається (M_s) і завершується (M_f) (рис. 5.2).

Після такого перетворення фізичні властивості сплаву змінюються і виникають передумови для використання ефекту пам'яті форми.

Це змінює тип ґратки NiTi сплавів з високотемпературної впорядкованості об'ємноцентрованої кубічної ґратки аустеніту (форма B2 або вихідна фаза) в низькотемпературну орторомбічну гранецентровану кубічну ґратку мартенситу (форма B19) або моноклінну гранецентровану кубічну ґратку мартенситу (B19'). В кристалічній ґратці моноклінної фази B19' немає ні рівних сторін, ні прямих кутів, оскільки вона нахилена або стиснута. Проміжна між аустенітом і мартенситом тригональна фаза, яку назвали R-фазою, може виникати в результаті ромбоедричного спотворення вихідної кубічної ґратки. Тонкі пластини R-фази, зародки яких виникають від переміщень (B2-R), ростуть і об'єднуються. Водночас формується багато інших пластин R-фази аж поки весь сплав не перетвориться в R-фазу. Коли пластини стискаються, то починають зникати і до сплаву повертається його аустенітна структура. Зворотність процесу спричинена нагріванням сплаву вище температури перетворення (рис. 5.2 і рис. 5.3).

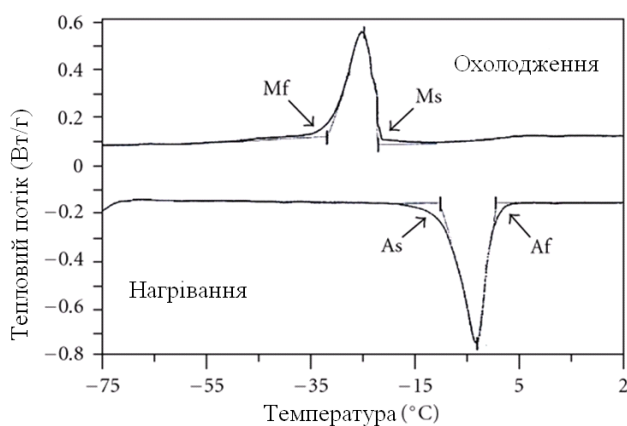


Рис. 5.2. Типові криві, отримані методом сканувальної калориметрії для сплаву з ефектом пам'яті форми, на яких піками показані температури фазових перетворень, а також позначені початок і завершення утворення фаз мартенситу (M_s , M_f) і аустеніту (A_s , A_f) під час нагрівання та охолодження зразка

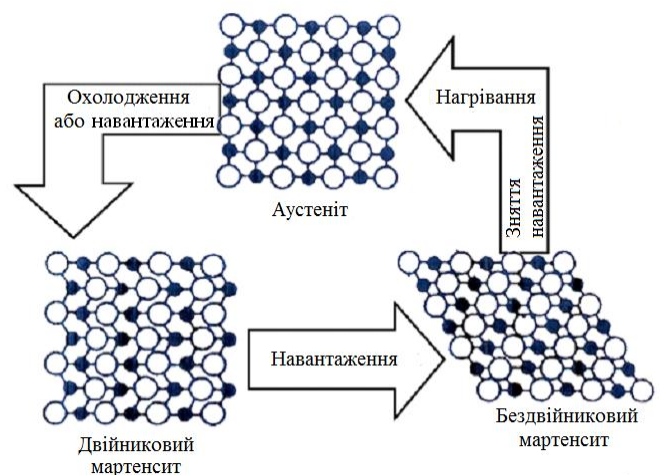


Рис. 5.3. Трансформації кристалічної ґратки сплаву з пам'яттю форми, що спричиняють його наделастичність (спричинену напруженнями) і пам'ять форми (спричинену нагріванням)

Структура сплаву повертається до початкової кристалічної будови аустеніту з об'ємноцентрованою кубічною ґраткою, яка стабільніша за високотемпературних умов.

Ефект пам'яті форми

Під час нагрівання елементів із сплавів із ЕПФ забезпечується повернення їх колишньої форми внаслідок усунення високих деформацій. Повернення переміщених атомів в структурі сплаву на колишні позиції спричинене

формуванням спрямованих і сильних міжатомних зв'язків. Всі сплави з ЕПФ змінюють тип кристалічної ґратки або розташування атомів в ній внаслідок фазових перетворень з поглинанням або вивільненням теплової енергії.

ЕПФ можна краще зрозуміти з діаграми фазових перетворень від зміни напружень чи температури, експериментально проілюстрований у просторі в координатах σ - ε - T на рис. 5.4, рис. 5.5. Діаграми показують шлях, за яким відбуваються структурно-фазові перетворення в NiTi-сплаві. На початку навантаження (точка А на рис. 5.4, рис. 5.5) сплав з пам'яттю форми має вихідну структуру аустеніту. Під час охолодження зразка (навіть без прикладання напружень) відбувається перетворення кристалічної об'ємноцентрованої ґратки аустеніту в ґратку двійникового мартенситу (точка В на рис. 5.4, рис. 5.5). Коли зразок з такою структурою навантажити, то відбувається переорієнтація ґратки двійникового мартенситу в повністю бездвійникову. При цьому за доволі невисокого і незмінного рівня напружень відбувається значна макроскопічна деформація зразка (точка С на рис. 5.4, рис. 5.5). Для деяких сплавів NiTi величина цієї деформації досягає 8%. При розвантаженні зразка пружна частина від загальної деформації відновлюється, а непружна деформація, пов'язана з деформуванням бездвійникового мартенситу, залишається через його стабільність у розвантаженому стані (точка D на рис. 1.5, рис. 1.6). Під час нагрівання зразка без прикладеного навантаження за певної температури починається фазове перетворення бездвійникового мартенситу в аустеніт. Воно розпочинається за температури A_s (точка E) і завершується за температури A_f (точка F, рис. 5.4). Псевдопружна деформація, обумовлена перетворенням в аустеніт, відновлюється і, таким чином, відновлюється первісна форма (перед деформацією В-С). При цьому нехтують будь-якою невідновленою пластичною деформацією під час перетворення. Отже, стан матеріалу в точці А відповідає його стану в точці F (рис. 5.4). Завдяки ефекту повернення до вихідної або «запам'ятованої» форми сплави і назвали сплавами з ЕПФ. Подальше охолодження зразка без прикладення до нього навантаження повторно спричинить виникнення двійникового мартенситу без істотної зміни форми зразка, яку він вже відновив під час перетворення бездвійникового мартенситу в аустеніт.

Тепер розглянемо інший шлях навантаження, позначений на рис. 5.5 як α - β - γ - δ - ε , а також експериментально підтверджений на рис. 5.6. Такий шлях перетворень аналогічний описаному раніше, але в цьому випадку зразок був під постійним навантаженням на протязі всього теплового циклу. Для цього до дроту із сплаву з ЕПФ підвісили гирьку. Якщо навантажений дріт з аустенітною структурою (α) охолодити, в ньому відбувається мартенситне перетворення (β - γ), внаслідок якого він сильно деформується. Така деформація є наслідком як зміни кристалічної будови (від аустеніту до двійникового мартенситу), так і зміною модуля пружності внаслідок фазового перетворення (попри незначну зміну пружних характеристик).

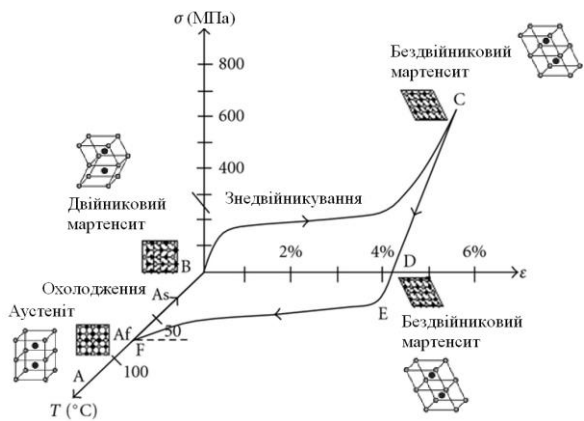


Рис. 5.4. Вплив напружень, деформації та температури, які проявляють ефект пам'яті форми NiTi сплаву та схематичне представлення змін структури кристалічної ґратки, пов'язані з температурою і напруженнями.

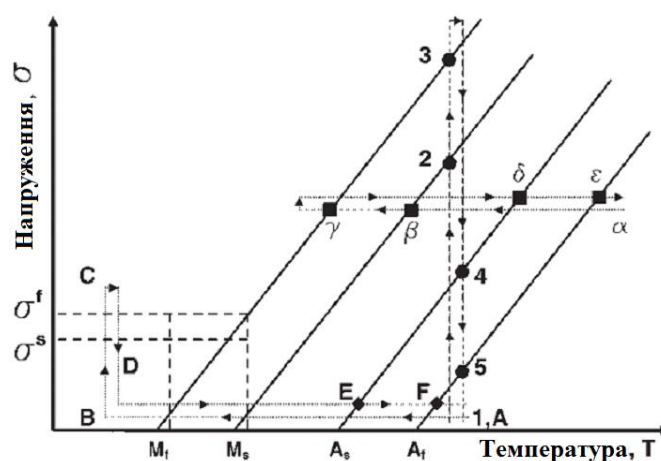


Рис. 5.5. Схематичне представлення діаграми фазових перетворень, на якій показано можливі варіанти їх перебігу у сплавах із пам'яттю форми: за відсутності навантаження на зразку, за ізобарного та ізотермічного псевдопружного шляху навантаження

Нагрівання зразка в діапазоні зворотного перетворення (δ - ϵ) супроводжується поверненням до ґратки аустеніту і відновленням його здатності до значних макроскопічних деформацій під час мартенситного перетворення (за винятком будь-яких невідновлювальних пластичних деформацій). Прояв пластичної деформації очевидний вкінці нагрівання рис. 5.6. Оскільки здатність деформуватися використовується для забезпечення переміщення під дією деякої сили, її іноді також називають істинною деформацією (ϵ_{act}).

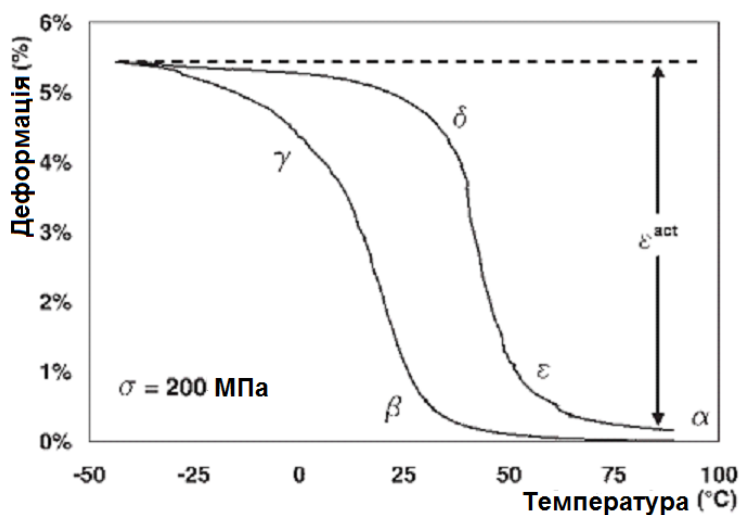


Рис. 5.6. Перебіг фазових перетворень у зразку з Ni-Ti сплаву з пам'яттю форми за постійного рівня напружень 200 МПа

Відновлення форми зразка припиниться, якщо прикладене до нього напруження перевищить деякий максимальний рівень. Це характерне максимальне

напруження спрацьовування часто називають блокувальним напруженням і його легко можна визначити експериментально.

Ефект надпружності

Інший ефект, який властивий СПФ є так званий ефект псевдопружності (ЕП). Під цим розуміють ефект повернення початкової форми елемента, властивої йому перед навантаженням, після його розвантаження. Ефект пов'язують із перетворенням аустеніту у бездвійниковий мартенсит під впливом напружень, спричинених навантаженням зразка на платоподібній ділянці діаграми, і подальшим його перетворенням в аустеніт під час його розвантаження. Перетворення аустеніту в бездвійниковий мартенсит під час псевдопружного навантаження аналогічний до переорієнтації двійникового мартенситу в бездвійниковий під час перетворення. Адже в обох випадках виникають відновлювані псевдопружні деформації. Проте в разі псевдопружного ефекту вихідною фазою є аустеніт, і фазове перетворення фактично відбувається під впливом напружень. Ізотермічне псевдопружне навантаження на діаграмі напруження – температура схематично показане на рис. 5.5. Причому за будь-якого обраного шляху навантаження зразка, який пов'язаний з ефектом псевдопружності, перетворення розпочинається і завершується в аустенітній області, та спричиняє псевдопружний ефект. Перед навантаженням матеріал знаходиться в аустенітному стані (точка 1 на рис. 5.5 і рис. 5.7). Одночасна трансформація і зникнення двійникового мартенситу починаються в точці 2, а повна трансформація двійникового мартенситу в бездвійниковий завершується в точці 3. Подальше навантаження призводить до пружної деформації бездвійникового мартенситу. Під час розвантаження зразка зворотна трансформація розпочинається в точці 4. В кінці плато на діаграмі розвантаження (точка 5) матеріал знову перетворюється в аустеніт, а після повного розвантаження зразка відновлюється вся його пружна деформація (ϵ_{el}) і деформація, спричинена перетворенням (ϵ_t). Не відновлюється лише пластична частина деформації (ϵ_p), якщо вона відбулася.

Типовий експериментальний результат, що засвідчує термопружний ефект NiTi сплаву з ефектом пам'яті форми, представлений на рис. 5.7, за постійної температури 80 °С. До напружень нижчих ніж σ^{Ms} сплав деформувався пружно. Коли напруження в полікристалічному сплаві з пам'яттю форми досягнули критичного значення (σ^{Ms}), в ньому розпочалося перетворення аустеніту в мартенсит ($A \rightarrow M^{dt}$), і це стало початком реалізації ефекту псевдопружності. Під час трансформації на ділянці псевдопружного перетворення виникають значні непружні деформації (верхнє плато на кривій напруження-деформація на рис. 5.7). Перетворення завершилося, коли прикладене напруження досягло критичного значення σ^{Mf} . Матеріал при цьому знаходиться в стані бездвійникового мартенситу. В міру подальшого навантаження (понад σ^{Mf}) матеріал продовжував деформуватися

майже пружно. При розвантаженні, яке спочатку є пружним, зворотне перетворення розпочиналося за критичного рівня напружень σ^{As} і завершувалося за рівня напружень σ^{Af} , тому що зразок навантажували за температури вищої, ніж A^f . Через нахил чотирьох ліній перетворень на фазовій діаграмі σ - T (рис. 5.8) підвищення температури випробувань призводить до зростання кожного критичного рівня напружень, за якого відбувається перетворення.

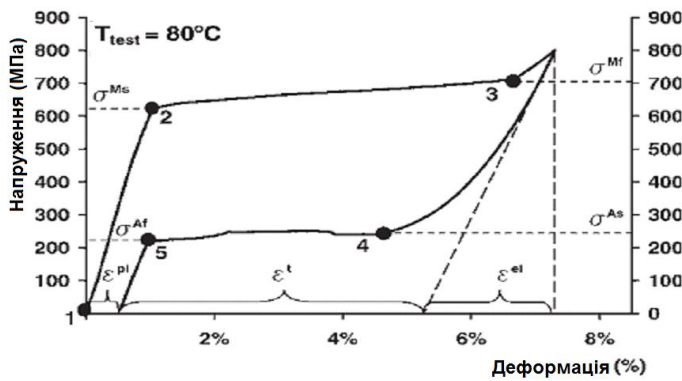


Рис. 5.7. Залежність нормальних напружень від деформацій зразка Ni-Ti сплаву при навантаженні-розвантаженні

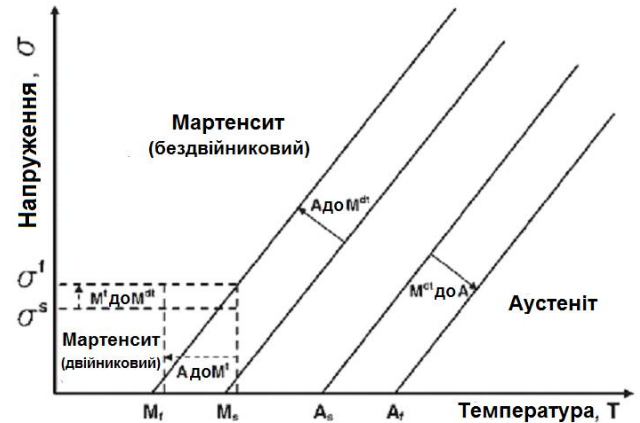


Рис. 5.8. Схематична діаграма в координатах напруження-температура для фазових перетворень сплавів з ефектом пам'яті форми

Під час навантаження і розвантаження зразків із СПФ на їх діаграмі напруження-деформація виникає петля гістерезису. Якщо прикладені напруження перевищують критичне значення σ^{Mf} , то ширина петлі гістерезису, менша за будь-яку накопичену не відновлювану пластичну деформацію, і відповідає максимальній величині відновленої деформації (ϵ^t), яка може бути отримана завдяки фазовому перетворенню аустеніту в мартенсит, спричиненого напруженнями. Ще однією важливою характеристикою СПФ, яку позначено на рис. 5.7, є залишкова пластична деформація (ϵ^{pl}) $\sim 0,6\%$, яка залишається наприкінці циклу навантаження.

Поведінка СПФ під дією циклічного навантаження

Матеріалам з псевдопружністю за незмінної температури випробувань властива петля гістерезису напруження-деформація. Із збільшенням кількості циклів навантаження вона зміщується вниз і в кінці-кінців досягає граничної (стабільної) петлі гістерезису. Форма граничної петлі гістерезису, швидкість її досягнення і слід петлі залежать від рівня напружень і деформацій, швидкості навантаження, температури випроб тощо. Завдяки ЕПФ отримані також аналогічні петлі гістерезису деформація-температура за постійного навантаження. Це явище називають функціональною втомою СПФ.

Функціональну втому СПФ реалізують шляхом механічної втоми в режимі надпружності, як це показано на рис. 5.9. Феноменологічно функціональну втому СПФ можна представити з використанням еволюції декількох змінних: пластичної

деформації ϵ^p , максимальної деформації ϵ^{\max} , і температур перетворень M^s , M^f , A^s , A^f (для спрощення рис. 1.10 на ньому не показані температури початку і закінчення аустенітного перетворення A^s і A^f).

Згадана пластична деформація складається з двох частин. Перша з них пов'язана з перетворенням, спричиненим пластичністю (ПСП - Transformation Induced Plasticity, TRIP), яка враховує незворотну деформацію, що виникає під час перетворень. Зокрема, ПСП є результатом накопичення дислокацій, зерномежевих дефектів і інших дефектів, викликаних перетвореннями. Друга її частина спричинена ковзанням, яке починається за дуже високих рівнів напружень. Але, СПФ використовують в інженерних додатках, призначених для роботи за розумних навантажень. Таким чином, ПСП розглядається як таке, що спричинене первинною пластичною деформацією.

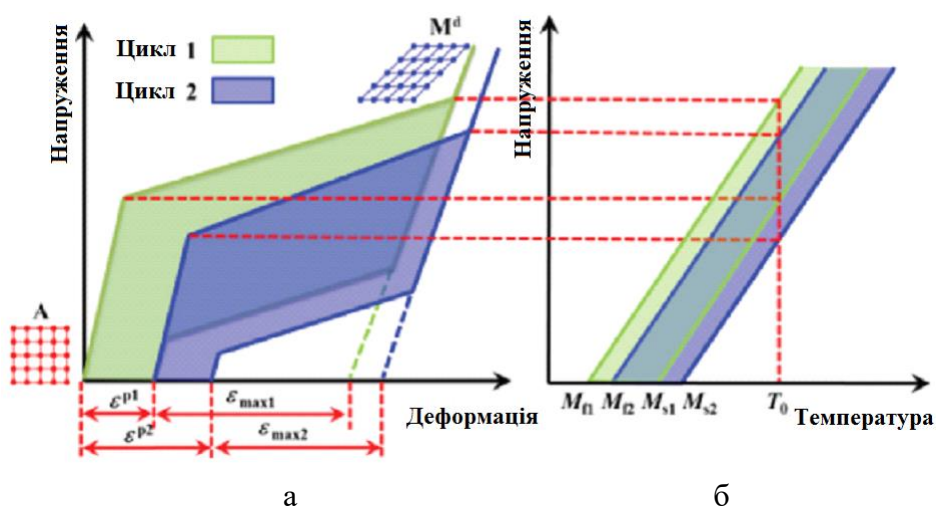


Рис. 5.9. Типова функціональна втома за надпружної поведінки СПФ в координатах напруження-деформація (а) і напруження-температура (б)

Для полікристалічних СПФ точні залежності деформації від температури і напружень від деформації в значній мірі залежать від передісторії навантаження матеріалу. Перетворення, спричинене пластичністю, пов'язане з явищем, за якого пластична деформація генерується в кожному циклі фазових перетворень. Така постійна незворотна деформація часто найінтенсивніше генерується під час перших циклів перетворень в матеріалі, а потім стабілізується. Багато СПФ з часом (після певної кількості циклів фазових перетворень) перестають накопичувати пластичну деформацію і це загалом стабілізує реакцію матеріалу. Таке повторення фазових перетворень для стабілізації матеріалу вважають «тренуванням». Крім забезпечення стабільності матеріалу, достатнє тренування може також стати ефективним засобом запобігання перетворенню $A \rightarrow M^t$, тим самим мінімізуючи до нуля напруження для відновлення форми під час ($A \leftrightarrow M^{dt}$) перетворення. Ця здатність СПФ відновлювати форму при нульових напруженнях відома як ефект двосторонньої

пам'яті форми. Таким чином, фазова діаграма матеріалу, який виявляє таку здатність, не повинна мати зони $A \leftrightarrow M^t$ (рис. 5.5 і рис. 5.8).

Для СПФ, який планують використовувати у відповідальних механізмах, таке «тренування» часто реалізують шляхом прикладання до елемента постійного рівня напружень з подальшим його термоцикуванням поки реакція не стабілізується. Приклад цього можна побачити на рис. 5.10, де петля останнього циклу найтемніша. Для матеріалів, призначених для псевдопружного застосування, для тренування використовують декілька циклів навантаження за підтримання постійною температури (рис. 5.11). Перший з сивих циклів відповідає циклу навантаження, показаному на рис. 5.7, тоді як 18-й цикл виділений темно-сірим кольором. Відповідно до попереднього обговорення можна бачити, що потрібно кілька циклів для того, щоб реакція напружень і деформацій стала повторюватися, і це характерно для всіх сплавів з пам'яттю форми.

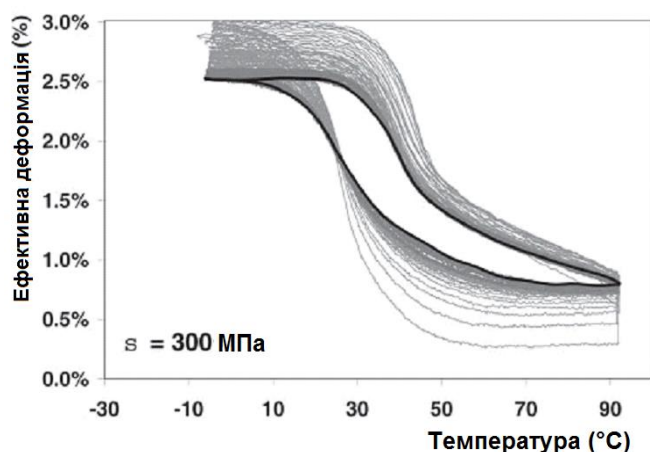


Рис. 5.10. Стабілізація реакції сплаву Ni-60Ti з пам'яттю форми шляхом термоцикування зразка за сталого рівня його навантаження 300 МПа

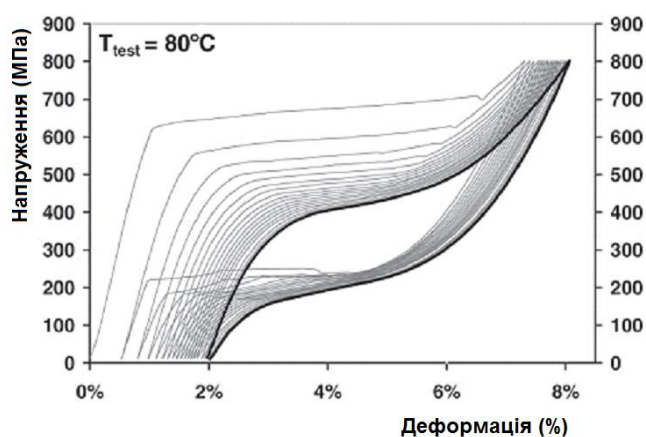


Рис. 5.11. Стабілізація реакції сплаву Ni-Ti з пам'яттю форми шляхом циклічного навантаження зразка за незмінної температури 80°C

Отже, ефект пам'яті форми дає змогу використовувати нітинол у виконавчих механізмах, а також дозволяє їх застосування в активних та напівактивних пристроях контролю у будівельній конструкції. Прикладом активного контролю з використанням СПФ є самовідновлення конструкції.

З'єднання за допомогою NiTi проявляють відмінну пластичність, розсіювання енергії та самоцентруючу здатність.

Демпфуючий пристрій оснований на використанні ефекту псевдопружності СПФ може бути використаний у конструкцій, які експлуатуються під дією циклічних навантажень (сейсмічних).

Тема № 6

РОЗКИД І ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ, РОЗМІРІВ І ГЕОМЕТРІЇ КОНСТРУКЦІЙ І ВИРОБІВ

Найбільш суттєвою особливістю будови будь-якого технічного матеріалу є неоднорідність фізико-механічні властивостей його локальних об'ємів. Це призводить до різноманітних ефектів, у тому числі до неконтрольованого розсіяння (розкиду) характеристик механічних властивостей матеріалу. Оскільки вони є випадковими величинами, то для опис їх розкиду застосовують методи теорії ймовірності і математичної статистики.

Вивчення надійності конструкцій і розкиду даних по руйнуванню було започатковано в роботах Freudenthal і Weibull.

У втомному аналізі зустрічається невизначеність у трьох основних групах даних:

- експлуатаційних навантажень;
- втомних властивостей матеріалу;
- локальної геометрії конструкційного елемента.

Ці дані залежать від методології і можуть бути виражені одним набором кривих (або математичними виразами), які представляють як властивості матеріалу, так і геометрію.

Планування експерименту, вибір методу отримання вибірки, визначення обсягу вибірки

Вибірка є випадковою, якщо всі її складові є статистично незалежними. Найпростіше випадкову вибірку можна скласти з допомогою таблиці випадкових чисел. Задана вибірка повинна бути перевірена на однорідність і випадковість, і з неї повинні бути виключені всі значення, які значно відрізняються.

Оцінювання вибірових параметрів розподілу і числових характеристик випадкової величини

Якщо проведено n випробувань, а отже отримано n значень випадкової величини x (отримано вибірку об'ємом n), то усі результати розміщують у вигляді варіаційного ряду

$$x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq \dots \leq x_i \leq \dots \leq x_n, \quad (6.1)$$

в якому кожне наступне значення більше від попереднього або дорівнює йому.

При невеликих об'ємах вибірки ($n < 50$) кожному отриманому значенні випадкової величини ставлять у відповідність накопичену частоту $w = i/n$ події, яка полягає в тому, що $x \leq x_i$, тобто

$$w(x) = \begin{cases} 0 & \text{для } x < x_1, \\ \frac{i}{n} & \text{для } x_i \leq x \leq x_{i+1}, \quad i = 1, 2, \dots, n-1, \\ 1 & \text{для } x > x_n \end{cases} \quad (6.2)$$

Варіаційний ряд (6.1) і частоти (6.2) утворюють вибіровий або емпіричний розподіл, який може бути представлений у вигляді таблиці або графіка.

Якщо об'єма вибірки $n > 50$ то варіаційний ряд (6.1) розбивають на m рівномірних інтервалів в кожному з яких міститься n_j значень випадкової величини $x_j (j = 1, 2, \dots, m)$; робивку проводять таким чином, щоб отримати $m \geq 7$. Мінімальне значення для групування інтервала можна обчислити за формулою

$$m = \frac{x_n - x_1}{7} = \frac{x_{max} - x_{min}}{7} = \frac{R_x}{7}, \quad (6.3)$$

де x_1, x_n – перший і останній член варіаційного ряду; x_{max}, x_{min} – найбільше і найменше значення випадкової величини; R_x – розмах розподілу.

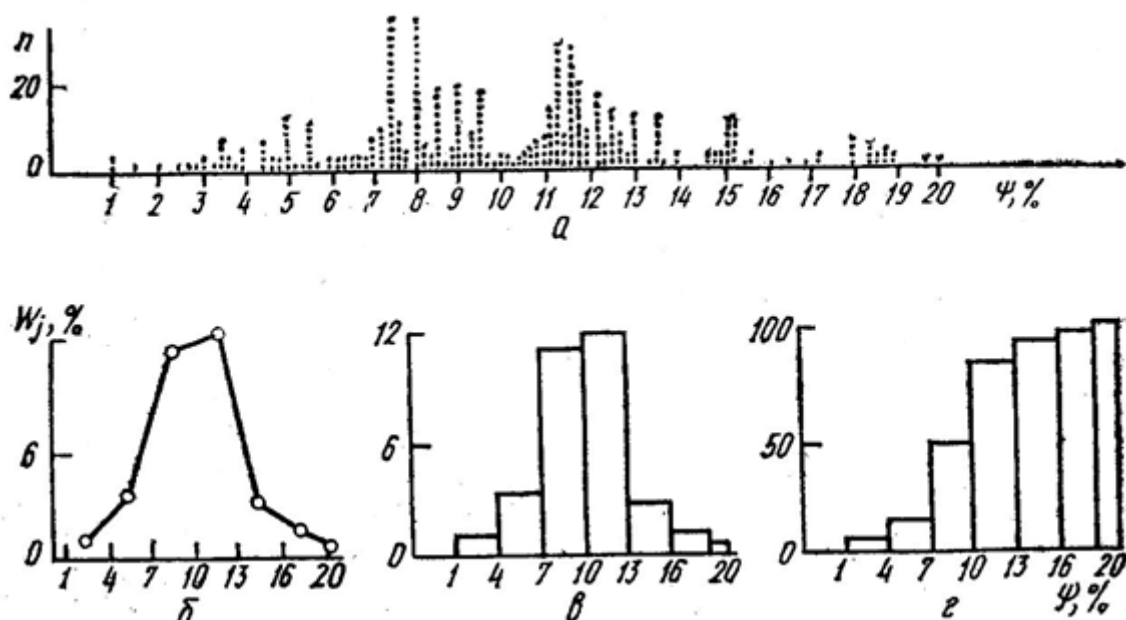


Рис. 6.1. Графічне представлення статистичних результатів випробувань – відносного звуження при розриві сплаву ЖС6К: діаграма індивідуальних значень – а; полігон – б; гістограма – в; графік накопичених частот (кумулята) – г

Формули для оцінювання вибірових параметрів розподілу і числових характеристик випадкової величини приведені в табл. 6.1.

Таблиця 6.1

Формули для оцінювання вибірових параметрів розподілу і числових характеристик випадкової величини

Найменування	Формули	
	$n < 50$	$n > 50$
Середнє значення	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.4)$	$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (6.4a)$
Дисперсія	$D(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2 \quad (6.5)$	$D(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^m n_j (x_j - \bar{x}_j)^2 \quad (6.5a)$
Середнє квадратичне відхилення	$S(x) = k\sqrt{D(x)} \quad (6.6)$	$S(x) = \sqrt{D(x)} \quad (6.6a)$
Коефіцієнт варіації	$v_x = S_x / \bar{x} \quad (5.7)$	
Розмах розподілу	$R_x = x_n - x_1 \quad (6.8)$	$R_x = x_{max} - x_{min} \quad (6.8a)$
Початкові моменти розподілу	$h_1 = \bar{x}, h_2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m x_j^2 n_j, h_3 = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m x_j^3 n_j, h_4 = \frac{1}{h} \sum_{j=1}^m x_j^4 n_j \quad (6.9)$	

Для опису закономірностей розкиду випадкових величин для оцінки міцності і довговічності елементів конструкцій застосовують функції розподілу, основні з яких подані у табл. 6.2.

Таблиця 6.2

Закони розподілу

Тип розподілу	Параметри розподілу	Функція густини розподілу	Формула
Нормальний	$\mu =$ середнє $\sigma =$ стандартне відхилення $-\infty < x < \infty, \sigma > 0$	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	(6.10)
Вейбулла	$x_0 =$ параметр місцезнаходження $\beta =$ параметр масштабу $\eta =$ параметр форми $x_0 \leq x < \infty, \eta > 0, \beta > 0$	$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^\beta\right]$	(6.11)
Експоненціальний	$b =$ параметр масштабу $x_0 =$ параметр місцезнаходження $x_0 \leq x < \infty, b > 0$	$f(x) = \frac{1}{b} \exp\left[-\frac{(x-x_0)}{b}\right]$	(6.12)

Функція нормального розподілу має вигляд:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}} dt, \quad (6.13)$$

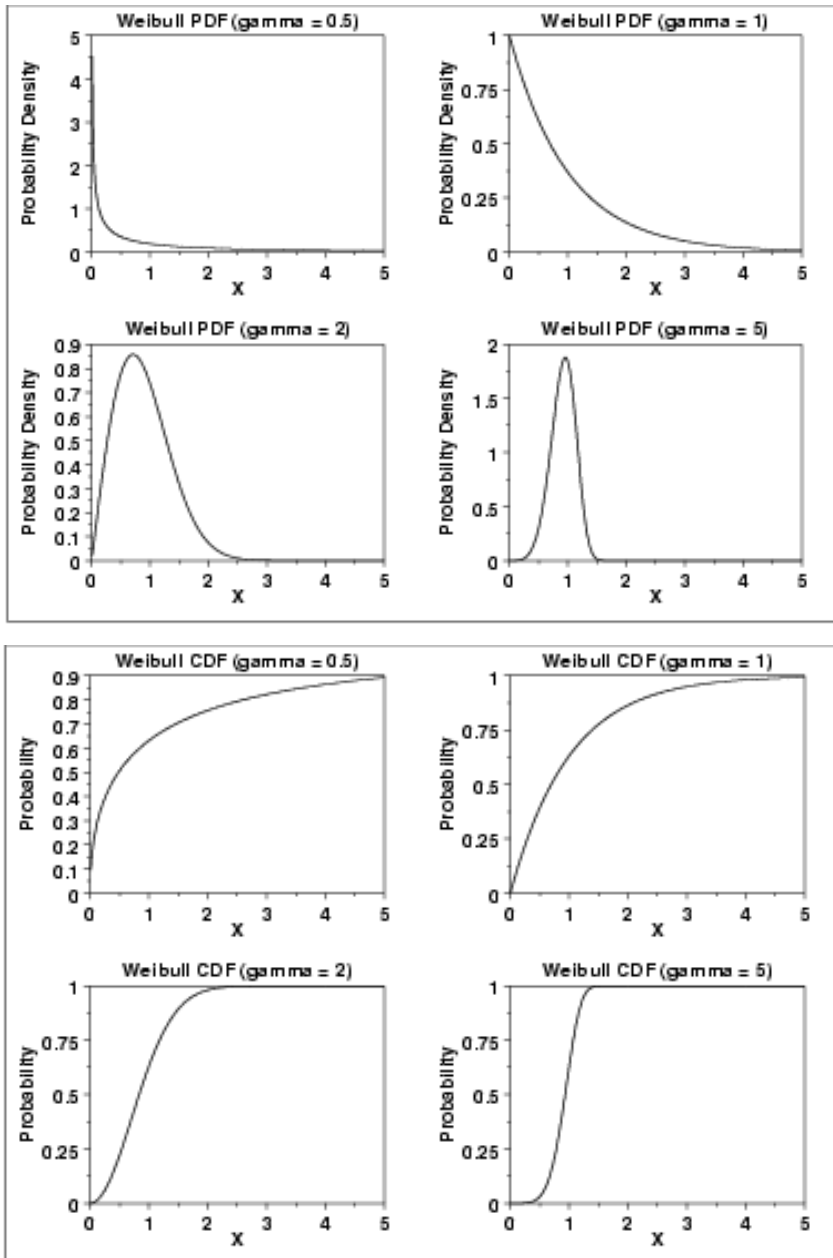


Рис. 6.2. Густина нормального розподілу – а); Кумулята нормального розподілу – б); Густина розподілу Вейбулла (beta=gamma) – в); Кумулята розподілу Вейбулла (beta=gamma) – г)

Експлуатаційне навантаження. У багатьох практичних випадках навантаження є зазвичай процесом із змінною амплітудою, яка залежить від умов експлуатації, природи експлуатаційних завдань та навичок і кваліфікації оператора. Експлуатаційне навантаження є випадковою змінною, а не однією фіксованою величиною, оскільки важко врахувати всі можливі умови експлуатації машини чи структури. Доступні дані, котрі стосуються навантажень, зазвичай обмежені і розкид, котрий може виникнути в умовах експлуатації, слід враховувати при імовірнісних оцінках довговічності.

Експлуатаційне навантаження формально можна визначити лише у певних випадках, котрі рекомендуються спеціальними методичними вказівками чи стандартами. Зазвичай навантаження задається у формі спектру навантажень чи історій навантажень. Стандартне навантаження повинне бути масштабоване для поточного об'єкту із застосуванням параметру масштабування, для прикладу, можна використати максимальний розмах напружень. Такий підхід потребує аналізу навантажень для попередньо заданих типових навантажень

Одним із способів врахування потенційної невизначеності експлуатаційного навантаження є припущення, що параметр масштабування – це випадкова змінна. У випадку історії навантаження, отриманої із експлуатації, середня величина параметра масштабування приймається рівною одиниці. Параметр масштабування зазвичай приймають розподіленним нормально і його розкид, котрий описується коефіцієнтом варіації (КВ), знаходиться у межах 0,05-0,10.

Механічні властивості. Три типи випадковості враховуються для оцінки втомної довговічності:

- у межах зразка;
- від зразка до зразка;
- від серії до серії.

Випадковість у межах зразка можна спостерігати для швидкості РВТ. Більшість втомних властивостей матеріалу показують випадковість тільки останніх двох типів, котра спостерігається у лабораторних випробуваннях за однакових умов навантаження і середовища. Це є результатом недосконалостей і відмінностей, які зустрічаються у межах прийнятних допусків процесу виробництва. Статистичні параметри, які описують втомні властивості отримують із статистичного аналізу результатів експериментів.

Сталу C рівняння Періса описують логарифмічно-нормальним розподілом. Розкид параметру C рівняння Періса малий, якщо отриманий для одного зразка (КВ = 0,1), однак, коли ДВР базується на даних, отриманих на декількох зразках, розкид параметра C може зростати (КВ = 0,2). У цьому випадку параметр C також можна трактувати залежним від експоненти n , яка в свою чергу характеризується нормальним розподілом із КВ 0,05-0,1.

Геометрія компоненти і геометрія тріщини. Геометричні властивості структурних компонентів є результатом як проектування, так і процесу виготовлення. Геометрична форма та розмірності (діаметри, ширина, товщина пластини) так само, як параметри, що описують локальну геометрію (радіус вершини надрізу, кути) описані на різних стадіях процесу виготовлення. Ці параметри отримують із певною точністю. Їх можна трактувати як однозначні величини, так і присвоювати їм певні допустимі рівні. Насправді, в обох випадках маємо справу із випадковими змінними. Таким чином, розкид загальних та

локальних геометричних параметрів структурних компонент відображає якість процесу виготовлення.

Зміни у геометрії, які призводять до змін поперечного перерізу можуть призвести до змін параметрів експлуатаційного навантаження і внаслідок цього до зміни величини напружень. Це може спричинити зростання розкиду параметрів експлуатаційного навантаження.

Локальна геометрія компоненти значно впливає на процес втоми, особливо на етапі ініціації та початкового РВТ. Як результат, розкид геометрії компоненти буде значно впливати на розкид втомної довговічності.

Для статистичного опису початкового розміру тріщини використовують декілька різних статистичних розподілів: *логарифмічно-нормальна чи експоненціальна функції розподілів* досить добре описують різні експериментальні дані. Середня величина початкової довжини (глибини) тріщини залежить від якості матеріалу та елемента конструкції і змінюється від 0,005 мм для лопаток турбін до 5,0 мм для зварних мостових конструкцій. Розкид початкової довжини тріщини є значним із $KV = 0,2 - 1,0$.

Розробка плану інспекцій є метою аналізу допустимого пошкодження. Враховуючи вимогу, що потенційний дефект повинен бути виявлений до досягнення ним критичного розміру, проміжок часу між двома оглядами повинен бути менше ніж залишкова довговічність.

Інколи інспекційні періоди вибирають меншими половини цього проміжку часу. Ідея полягає у наступному: *необхідно мати шанс виявити тріщину до руйнування, якщо вона була пропущена під час першої інспекції*. Однак очевидно, що часто одна чи дві інспекції не гарантують, що тріщина буде виявлена із 100% ймовірністю. Насправді ймовірність виявлення залежить не лише від апаратури неруйнівного контролю, але також від дійсних розмірів тріщини (рис. 6.3). Зазначимо, що найбільша ймовірність виявлення тріщин в порожнинних осях колісних пар в всіма методами, за виключенням магнітного порошку є менша за 100% навіть для довгих тріщин. Загальним методом, який застосовується для залізничних осей, є ультразвуковий контроль. Для апаратури, яка застосовується в неруйнівному контролі, поріг виявлення становить 2 мм. Проте зауважимо, що це не може бути загальним правилом, оскільки поріг виявлення має статистичну природу та залежить від реалізації неруйнівного контролю, яка дуже відрізняється у різних операторів. Малі втомні тріщини в більшості випадків мають форму півеліпса.

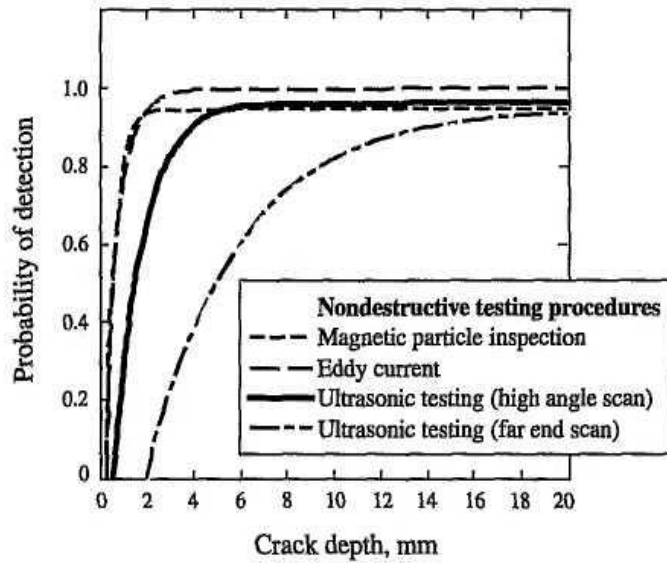


Рис. 6.3. Імовірність виявлення тріщини в осях як функція розміру тріщини та різних методів неруйнівного контролю (Benyon J.A., Watson A.S.)

Підсумовуючи вище сказане, зазначимо, що класична концепція допустимого пошкодження може бути застосована, якщо критичний розмір тріщини є достатньо великим для надійного виявлення неруйнівним контролем і якщо проміжок часу між ними є достатній для виявлення, а ймовірне руйнування є достатньо значним для впровадження міжремонтних інспекцій. Якщо ці умови не дають альтернативних шляхів допустимому пошкодженню, можуть бути реалізовані випробування перевантаженням або періодичні усунення тріщин.

Тема № 7

ОСНОВИ РОЗРАХУНКУ ЙМОВІРНОСТІ РУЙНУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ ЗА СТАТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Діаграма оцінювання руйнування.

Для оцінки граничного стану елементів конструкцій з тріщинами використовували діаграму оцінювання руйнування (ДОР).

Діаграма оцінювання руйнування (рис. 7.1) будується в координатах $K_r - L_r$, де K_r – відношення коефіцієнту інтенсивності напружень (КІН) K_I до в'язкості руйнування матеріалу $K_{mat} = K_{Ic}$; L_r – відношення прикладених напружень до напружень, що спричиняють пластичну текучість матеріалу в конструкції з тріщиною.



Рис. 7.1. Підхід ДОР (схематично)

Огинаюча крива руйнування, інакше лінія оцінювання руйнування (Failure Assessment Line) залежить лише від властивостей матеріалу за статичного розтягу і описується рівнянням (рис. 7.1).

$$f_{FAD} = f(L_r). \tag{7.1}$$

При $L_r=L_r^{max}$ відбувається пластичний колапс елемента конструкції.

Підхід до прогнозування руйнування елемента конструкції, оснований на ДОР проілюстровано на рис. 7.1. Оцінювана точка на діаграмі визначається наступним чином

$$K_r = \frac{K_{Ip}}{K_{mat}} + \frac{K_{Is}}{K_{mat}} + \rho, \quad L_r = \frac{P}{P_L} = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \tag{7.2}$$

де $K_{I\rho}$ та K_{Is} – це КІН для напружень I та II роду, відповідно; ρ – коефіцієнт, що враховує взаємодію між напруженнями першого та другого роду; P – первинні навантаження; P_L (σ_Y) – навантаження (напруження), за яких досягається текучості конструкції з тріщиною.

Напруження I-го роду – це напруження, які за достатньо високого рівня можуть спричинити руйнування внаслідок пластичного колапсу, за відсутності іншого типу руйнування. Напруження II-го роду нездатні викликати таке руйнування. Таким чином, до напружень I-го роду відносять всі види механічних навантажень, до II-го роду – залишкові напруження внаслідок зварювання і термічні напруження.

Лінія оцінювання руйнування $f_{FAD} = f(L_r)$ відділяє область безпечного стану від області руйнування елемента конструкції (рис. 7.1) і визначається, базуючись на експериментальних даних за руйнування розтягом. Наприклад, якщо відома повна крива напруження – деформація, застосовують наступне рівняння

$$f(L_r) = \left(\frac{E\varepsilon}{\sigma} + \frac{1}{2} \frac{\sigma}{E\varepsilon} L_r^2 \right)^{-\frac{1}{2}}, L_r < L_r^{\max}, \quad (7.3)$$

$$L_r^{\max} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_Y + \sigma_U}{\sigma_Y}.$$

тут ε – деформація, що відповідає напруженню $\sigma = L_r \sigma_Y$; σ_U – межа міцності. Якщо при визначенні граничних навантажень деформаційне зміцнення матеріалу конструкції не враховується, то визначається функція, котра описує лінію оцінки руйнування, так само як параметр урізання L_r^{\max} .

Для використання ДОР підходу, будують точки, координати яких визначаються умовами навантажування (заданим зусиллям, розміром тріщини, властивостями матеріалу), що порівнюються з оціночним руйнуванням.

Оціночна лінія визначає досягнення граничних умов для навантажуваного елемента конструкції з тріщиною, і, якщо оціночні точки лежать на, чи всередині цієї огинаючої лінії, то конструкція оцінюється як допустима для цих граничних умов. Точки, які лежать зовні, показують, що конструкція розглядається як зруйнована для даних граничних умов.

Метод Монте-Карло стосовно задач механіки руйнування

Метод Монте-Карло є одним із загальних способів чисельного інтегрування. Нехай нам потрібно оцінити багатомірний визначений інтеграл:

$$\psi = \int_0^1 \int_0^1 \dots \int_0^1 f(u_1, u_2, \dots, u_n) du_1 du_2 \dots du_p = \int_{(0,1)^n} f(u) du. \quad (7.4)$$

Більшість інтегралів може бути зведена до цього вигляду відповідною заміною змінних. Інтеграл представляє не випадкову проблему, але метод Монте-Карло дозволяє апроксимувати розв'язок введенням випадкового вектора U , який є рівномірно розподіленим на ділянці інтегрування. Застосовуючи функцію f до U , ми отримуємо випадкову змінну $f(U)$ із математичним сподіванням

$$E[f(U)] = \int_{(0,1)^p} f(u)\phi(u)du. \quad (7.5)$$

де ϕ – функція густини розподілу u . Оскільки $\phi=1$ на всій області інтегрування, з (6.5) отримуємо

$$E[f(U)] = \int_{(0,1)^p} f(u)du. \quad (7.6)$$

Порівнявши (7.4) та (7.6), отримаємо імовірнісну оцінку для інтеграла ψ :

$$\psi = E[f(U)]. \quad (7.7)$$

Тому випадкова змінна $f(U)$ має математичне сподівання ψ і деяке середнє квадратичне відхилення σ . Позначимо через

$$H = f(U^{(1)}) \quad (7.8)$$

незміщену оцінку для ψ із середнім квадратичним відхиленням σ . Такий підхід є не зовсім прийнятним, оскільки (6.8) є оцінкою, яка залежить від вибірки $\{U^{(1)}\}$ розміру один, але між тим є дійсною оцінкою.

Розглянемо вибірку $\{U^{(1)}, U^{(2)}, \dots, U^{(m)}\}$ розмірності m . Застосовуючи функцію f до кожного елементу вибірки отримаємо m незалежних і однаково розподілених випадкових змінних, кожену з математичним сподіванням ψ і середнім квадратичним відхиленням σ .

Тому

$$H = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m f(U^{(i)}). \quad (7.9)$$

є незміщеною оцінкою для ψ із стандартною помилкою σ/\sqrt{m} .

Проблеми надійності традиційно розглядають через введення так званої функції межового стану $g(x)$, яка визначена на p - вимірному просторі випадкових змінних, де $g(x) \leq 0$ – область руйнування F і $g(x) > 0$ – безпечна область. Випадковому вектору x відповідає функція густини розподілу $f_x(x)$. Тоді ймовірність руйнування є багатовимірним визначенням інтегралом

$$P_f = \int_{g(x) \leq 0} f_x(x) dx \quad (7.10)$$

Розглянемо об'єкт з тріщинами із невідомими механічними характеристиками та геометричними розмірами під дією випадкового навантаження. Позначимо через x p – вимірний випадковий вектор із компонентами x_1, x_2, \dots, x_p , який характеризує всі невизначеності системи і параметрів навантажування. Для оцінки ймовірності руйнування можна використати дві різні граничні функції $g(x)$

$$g_{FAD}(\mathbf{x}) = g_{FAD}(K_{Ic}, \sigma_{0,2}, a) = f_{FAD} - K_r. \quad (7.11)$$

$$g_{L_r}^{\max}(\mathbf{x}) = g_{L_r}^{\max}(\sigma_{0,2}, \sigma_U, a) = L_r^{\max} - L_r. \quad (7.12)$$

де L_r^{\max} – найбільше значення параметра L_r .

Ці дві граничні функції базуються на аналізі першого рівня у процедурі SINTAP.

Для оцінки ймовірності руйнування потрібно обчислити інтеграл (6.10). Аналітичний розв'язок отримати досить складно, особливо, коли є багато випадкових параметрів. Тому припускають, що параметри не корелюють один з одним і можуть бути розподілені за різними законами (нормальним, логарифмічно-нормальним, розподілом Вейбулла, експоненціальним).

Для визначення ймовірності руйнування використовують простий метод симуляції Монте-Карло; Монте-Карло з вибіркою по значущості; метод надійності першого порядку (FORM); метод надійності другого порядку (SORM).

Основою методу Монте-Карло є генерування псевдовипадкових чисел рівномірно розподіленим генератором. Прості алгоритми починають повторювати генеровані значення приблизно від $2 \cdot 10^3$ до $2 \cdot 10^9$ проб і не є підходящими для підрахунку середніх та низьких ймовірностей руйнування. Для цих випадків рекомендують використовувати алгоритм, реалізований у процедурі `ran2`, який повторює себе після $2 \cdot 10^{18}$ проб. Цей алгоритм рекомендують, коли потрібно більше, ніж 10^8 симуляції.

Кожна проба складається з наступної послідовності кроків:

- Генерування випадкових чисел $0 < u_i < 1$, ($i=1, 2, \dots, p$).

- Обчислення значень фізичних параметрів за допомогою функцій, обернених до функцій розподілу. Якщо випадкова змінна x_i має функцію розподілу $F_i(x_i)$, тоді значенням випадкової величини є $x_i' = F_i^{-1}(u_i)$ ($i=1,2,\dots,p$). Отримуємо деяку точку $\mathbf{x}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_p)$.
- Перевірка настання руйнування. Для цього обчислюють значення функцій граничного стану в точці \mathbf{x}' . Якщо $g(\mathbf{x}') \leq 0$, тоді приймаємо, що руйнування відбулося.

Імовірність руйнування P_f визначають за формулою

$$P_f = n_f / n_s, \quad (7.13)$$

де n_f – кількість випадків руйнування, n_s – кількість проб.

Перевагою методу Монте-Карло є його надійність, легкість програмної реалізації та той факт, що для $n_s \rightarrow \infty$ оцінювана ймовірність збігається до точного результату. Серед переваг даного методу можна також назвати те, що цей метод працює з будь-якими функціями розподілу випадкових змінних і не накладає обмежень на граничні функції.

Імовірнісне оцінювання міцності труби з тріщиною за статичного навантажування

Розглянемо трубу зовнішнім діаметром $D=1420$ мм, товщиною стінки $t_s=15,5$ мм виготовленої із сталі StE480.7TM (API X70) (позначення згідно німецького стандарту DIN 17172) із спіральним зварним швом, характеристики механічних властивостей якої подані в табл.6.1. Дефекти у зварних швах виникають тоді, коли зварені труби після кінцевої обробки і випробування тиском нагрівають на опорних роликах для нанесення зовнішньої ізоляції. Внаслідок несправної роботи підтримуючих роликів, зона зварного шва була локально zdeформована, що спричинило зменшення статичної тріщиностійкості шва.

Дефекти між металом зварного шва і пошкодженою зоною термічного впливу простягаються приблизно на 200 мм паралельно до осі шва, яка утворює кут 22° із коловим напрямком. За допомогою вимірювання твердості знайдено, що холодно zdeформована ділянка сягала до 2мм по товщині стінки труби. Холодно zdeформовану зону моделювали довгою поверхневою тріщиною глибиною $a=2,0$ мм. Трубу навантажували сталим внутрішнім тиском $p=7,6$ МПа, що викликало напруження у верхніх шарах труби $\sigma_p=192$ МПа. Залишкові зварні напруження елемента (вторинні напруження) становили $\sigma_s=0,6\sigma_{0,2}$. Це припущення є консервативне, оскільки залишкові напруження правдоподібно зникають у холодно zdeформованій зоні.

Узагальнена геометрія труби і тріщини представлена на рис. 6.2, геометричні розміри труби, параметри навантаження – в табл. 6.2. Статичну тріщиностійкість

оцінювали за розкритом вершини тріщини і брали до уваги найменше з 10 індивідуальних значень критичного розкритву ($\delta_c=0,05$ мм).

Таблиця 7.1

Характеристики геометрії, матеріалу та навантажень

Геометрія			Характеристики сталі St E480.7TM (API X70)			Внутрішній тиск	Напруження	
D	t_s	a	$\sigma_{0,2}$	σ_B	K_{mat}	p	σ_p	σ_s
мм			МПа		МПа $\sqrt{м}$	МПа		
1420	15,60	2,0; 3,0	480	600	91,0	7,60	192	288

Для імовірнісного аналізу використовували функції, представлені у табл. 6.2. Припускали, що статична тріщиностійкість описується трипараметричним законом розподілу Вейбулла згідно з так званою концепцією «майстер кривих», де значення в'язкості руйнування $K_{mat}=91,0$ МПа $\sqrt{м}$ відповідає ймовірності руйнування 5%. Для дослідження значущості глибини тріщини проаналізували два її середніх значення $\mu_a = 2,0$ і $3,0$ мм.

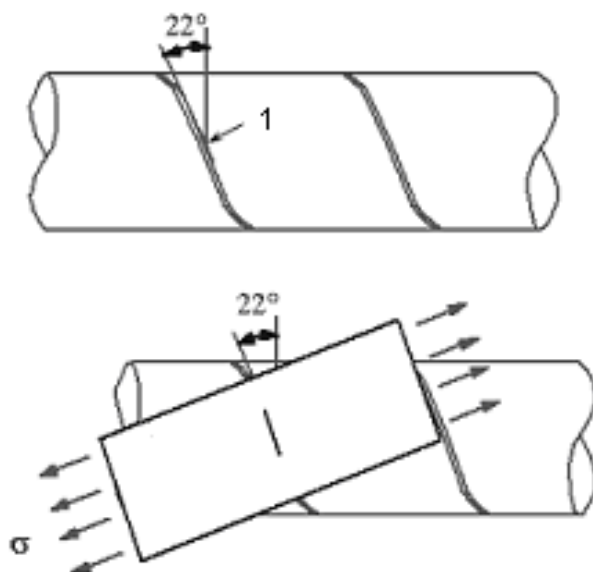


Рис. 7.2. Геометрія спіральньо звареної труби з дефектом 1

Розмірність випадкового вектора $x = 5$.

Для імовірнісних обчислень використовували метод Монте-Карло із загальним числом проб від $n = 10^3$ до 10^6 . Ймовірність руйнування підраховували за формулою (3), з урахуванням (6.11), (6.12).

Дані імовірнісної оцінки труби із спіральним зварним швом

Вхідні дані	Середнє значення	Тип розподілу	Параметри розподілу
a , мм	2,0	нормальний	$\mu = 2, \sigma = 0,2$
	3,0		$\mu = 3, \sigma = 0,3$
σ_p , МПа	192	нормальний	$\mu = 192, \sigma = 4$
σ_s , МПа	288	логарифмічно-нормальний	$x_0 = 282, m = 6, \sigma = 0,6$
$\sigma_{0,2}$, МПа	480	логарифмічно-нормальний	$x_0 = 474, m = 6, \sigma = 0,4$
σ_B , МПа	600	нормальний	$\mu = 600, \sigma = 10$
K_{mat} , МПа $\sqrt{м}$	91,0	Вейбулла	$x_0 = 20, \beta = 4, \eta = 149$

На рис. 7.3 зображена крива оцінювання руйнування, котра відповідає середнім значенням міцності матеріалу і статичної тріщиностійкості. Для кожної окремої проби розраховували криву оцінювання і оціночну точку із випадково вибраними даними (табл. 7.2).

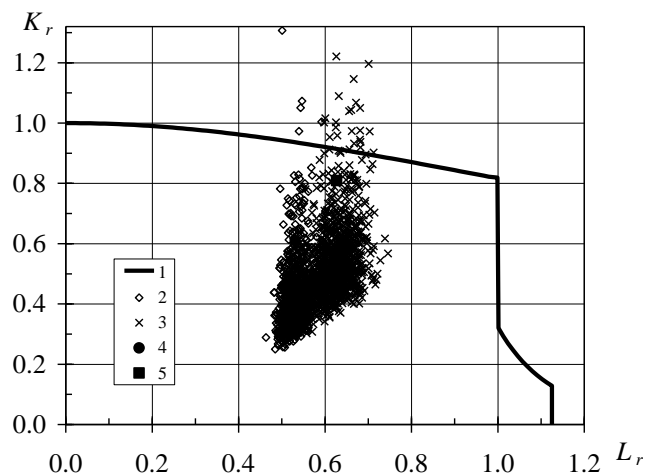


Рис. 7.3. Імовірнісна ДОР труби із спіральним швом: 1 – крива діаграми оцінки руйнування; 2 – імовірнісна оцінка руйнування для $\mu_a = 2$ мм, 3 – для $\mu_a = 3$ мм; 4 – детерміністична оцінка руйнування для $a = 2$ мм, 5 – $a = 3$ мм

Одержано, що ймовірність руйнування труби із спіральним швом $P_f = 4 \cdot 10^{-3}$ для середньої глибини тріщини $\mu_a = 2,0$ мм і $P_f = 2,6 \cdot 10^{-2}$ для $\mu_a = 3,0$ мм. Із збільшенням кількості проб результати збігаються до $P_f = 4,08 \cdot 10^{-3}$ для $\mu_a = 2,0$ мм і $P_f = 3,05 \cdot 10^{-2}$ для $\mu_a = 3,0$ мм (рис. 6.4).

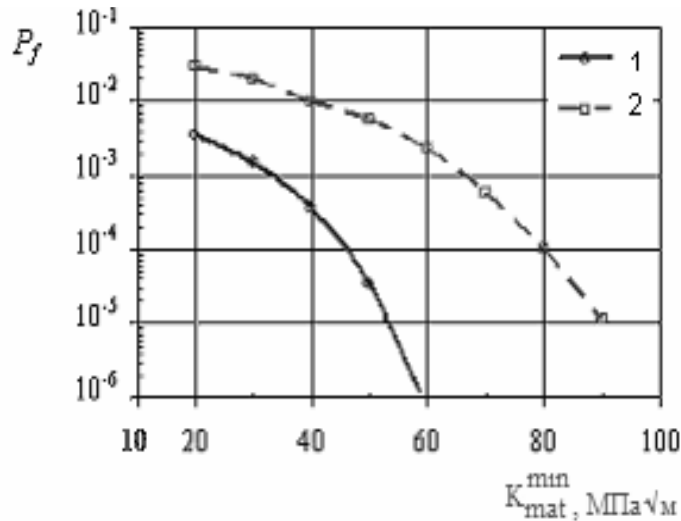


Рис. 7.3. Залежність ймовірності руйнування від K_{mat}^{min} для 1 – $\mu_a=2$ мм; 2 – $\mu_a=3$ мм

Причиною руйнування є, в основному, малі значення в'язкості руйнування, що отримані із припущення функції розподілу Вейбулла із нижньою межею $K_{mat}^{min}=20,0$ МПа $\sqrt{м}$. Це припущення на загал є дуже консервативним, тому в подальшому визначають мінімальне значення статичної тріщиностійкості, для забезпечення необхідного рівня надійності експлуатації трубопроводу. Оскільки трубопровід можна віднести до категорії елементів конструкцій без резервування, руйнування яких може призвести до важких наслідків, то вибрано допустиму ймовірність руйнування $P_f = 7 \cdot 10^{-5}$. Ймовірності руйнування, обчислені методом надійності другого порядку (рис. 7.3), визначали як функції нижньої межі статичної тріщиностійкості. Припускається, що значення $K_{mat}^{min} = 47,0$ і $82,0$ МПа $\sqrt{м}$ забезпечать задану надійність ($P_f = 7 \cdot 10^{-5}$) для труб із середньою глибиною тріщини 2,0 і 3,0мм, відповідно. Отже, комплексні визначення статичної тріщиностійкості разом із надійним неруйнівним контролем є вирішальними заходами для безпечної експлуатації трубопроводу.

Тема № 8

РОЗКИД І ОСНОВНІ ФУНКЦІЇ РОЗПОДІЛУ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИКЛІЧНОЇ ТРІЩИНІСТОЇКІ МАТЕРІАЛІВ

Три типи випадковості (розкиду) механічних властивостей матеріалу враховуються для оцінювання втомної довговічності:

- у межах зразка;
- від зразка до зразка;
- від серії до серії.

Випадковість у межах зразка можна спостерігати для швидкості РВТ.

В загальному випадку в межах лінійної механіки руйнування швидкість росту втомних тріщин (РВТ) в координатах $\lg V - \lg \Delta K$ (K_{\max}) є S-подібною кривою, що обмежена зліва максимальним пороговим КІН K_{th} (пороговим КІН ΔK_{th}), а справа – критичним КІН K_{fc} (ΔK_{fc}) або циклічною в'язкістю руйнування (рис. 8.1).

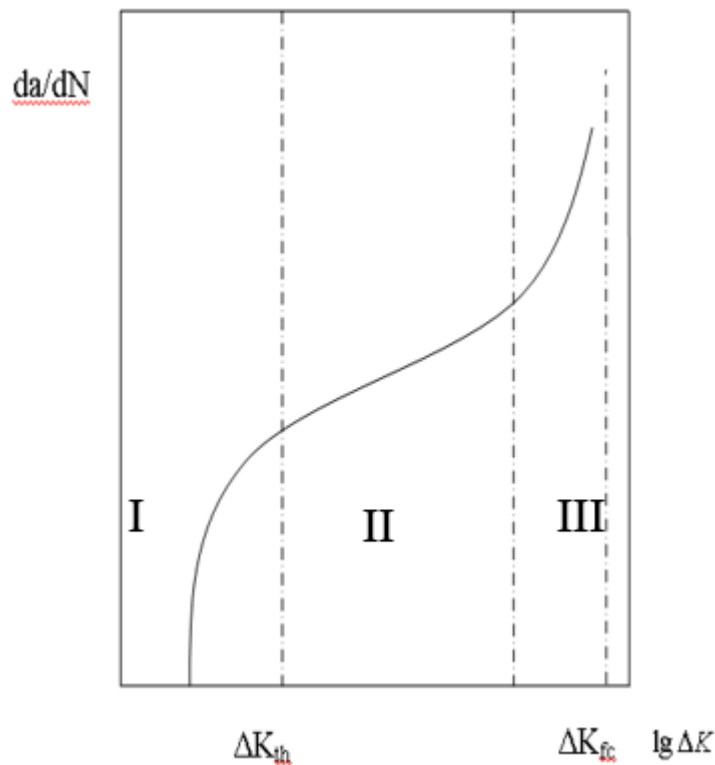


Рис. 8.1. Діаграма втомного руйнування. Ділянки: I – низькоамплітудна; II – середньоамплітудна; III – високоамплітудна

Діаграма складається з трьох ділянок: ділянка I приблизно відповідає швидкості $V \approx 10^{-10} \dots 10^{-8}$ м/цикл, на якій швидкість РВТ істотно збільшується за незначної зміни ΔK (K_{\max}); ділянка II має вигляд прямої лінії і знаходиться в межах $10^{-8} \dots 10^{-6}$ м/цикл; ділянка III характеризується прискореним ростом тріщини і

відповідає значенням $V > 10^{-6}$ м/цикл. В літературі ділянки I, II, III отримали назви відповідно: низькоамплітудна, середньоамплітудна і високоамплітудна.

Періс вперше застосував розмах коефіцієнту інтенсивності напружень ΔK , як характеристику умов навантажування для опису швидкості РВТ на ділянці II діаграми втомного руйнування (ДВР)

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n, \quad (8.1)$$

де $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$; K_{\min} , K_{\max} – мінімальний та максимальний КІН; C , n – експериментальні матеріалу або їх ще називають характеристиками циклічної тріщиностійкості.

Характеристику циклічної тріщиностійкості C (рівняння Періса) описують логарифмічно-нормальним розподілом. Розкид параметру C рівняння Періса малий, якщо отриманий для одного зразка коефіцієнт варіації $KV=0,1$, однак, коли ДВР базується на даних, отриманих на декількох зразках, розкид параметра C може зростати до $KV=0,2$. У цьому випадку параметр C також можна трактувати залежним від експоненти n , яка характеризується нормальним розподілом із $KV=0,05 \dots 0,1$.

Для статистичного опису параметра C рівняння Періса використовують дані із експериментів на циклічну тріщиностійкість.

Методом найменших квадратів одержують рівняння прямої в логарифмічних координатах для середньоамплітудної ділянки ДВР і знаходять середнє значення n . Для сталі з 0,3%С значення характеристик циклічної тріщиностійкості представлено в табл. 8.1.

Таблиця 8.1

Характеристики циклічної тріщиностійкості сталі (0,3% С) при 20°C

R	$C, \frac{m/цикл}{(MPa\sqrt{m})^n}$	n	$\Delta K_{th}, MPa\sqrt{m}$	$K_{fc}, MPa\sqrt{m}$
0,1	$4,66 \cdot 10^{-12}$	3,01	6,62	89
-1	$8,96 \cdot 10^{-13}$	2,84	11,3	127

Випадково вибирають принаймні 5 точок ДВР і проводять пряму із зафіксованим значенням n , у результаті чого отримують вибірку значень C . З міркувань зручності відображення елементи даної вибірки прологарифмували за десятковою основою. Після цього визначають статистичний розподіл, що відповідає параметру $\lg C$.

Статистичні розподіли параметра $\lg C$ рівняння Періса для сталі з 0,45% С при середньому значенні $n=5,55$ при $R=0$ зображено на рис. 8.3.

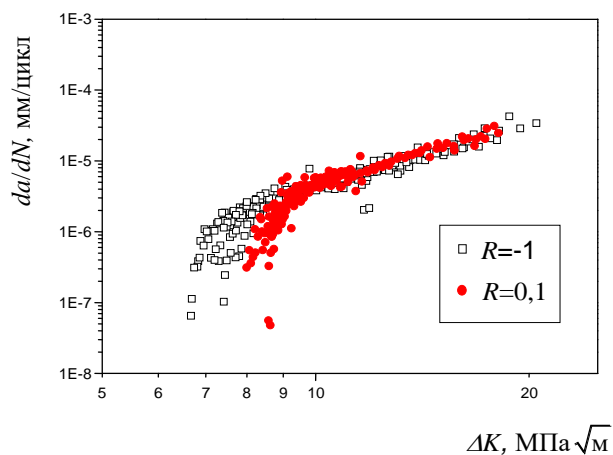


Рис. 8.2. Залежність швидкості РВТ у сталі (0,3% С) від розмаху ΔK при $R = -1$ і $R = 0,1$

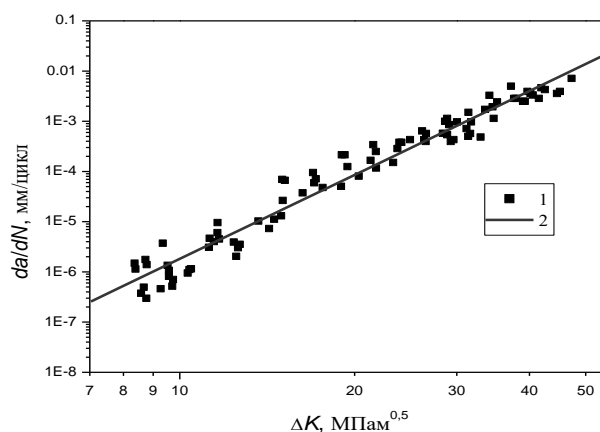


Рис. 8.3. Середньоамплітудна ділянка ДВР сталі (0,45%С) при $R=0$. Експериментальні дані – (1); регресійна залежність – (2)

Статистичні розподіли параметра $\lg C$ рівняння Періса для сталі 0,3% С при середньому значенні $n=3,2$ при коефіцієнті асиметрії циклу навантаження $R = K_{\min} / K_{\max} = -1$ зображено на рис. 8.4.

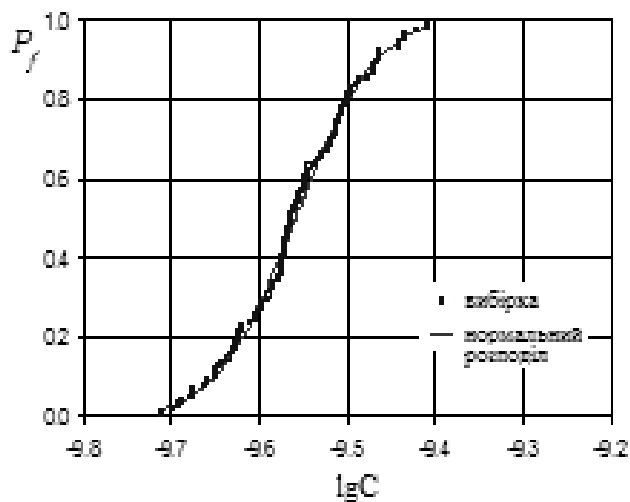
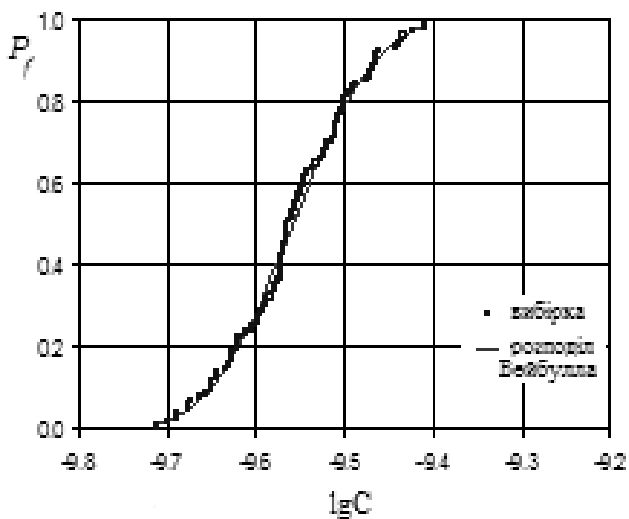


Рис. 8.4. Статистичні розподіли параметра $\lg C$ рівняння Періса для сталі 0,3% С при середньому значенні $n=3,2$ при $R=-1$

Значення характеристик циклічної тріщиностійкості сталі (0,45 %С) при 20°C

R	$C, \frac{м/цикл}{(МПа\sqrt{м})^n}$	n	$\Delta K_{th}, МПа\sqrt{м}$	$K_{fc}, МПа\sqrt{м}$
0	$5,10 \cdot 10^{-15}$	5,55	7,54	38,3-50,3
-1	$6,07 \cdot 10^{-14}$	5,02	5,85	32,8-36,0

Статистичні розподіли параметра $\lg C$ рівняння Періса для сталі 0,45% С при середньому значенні $n=5,06$ при $R=-1$ зображено на рис. 8.6.

На рис. 8.7а зображено низькоамплітудну ділянку ДВР сталі (0,3%С) та регресійні залежності.

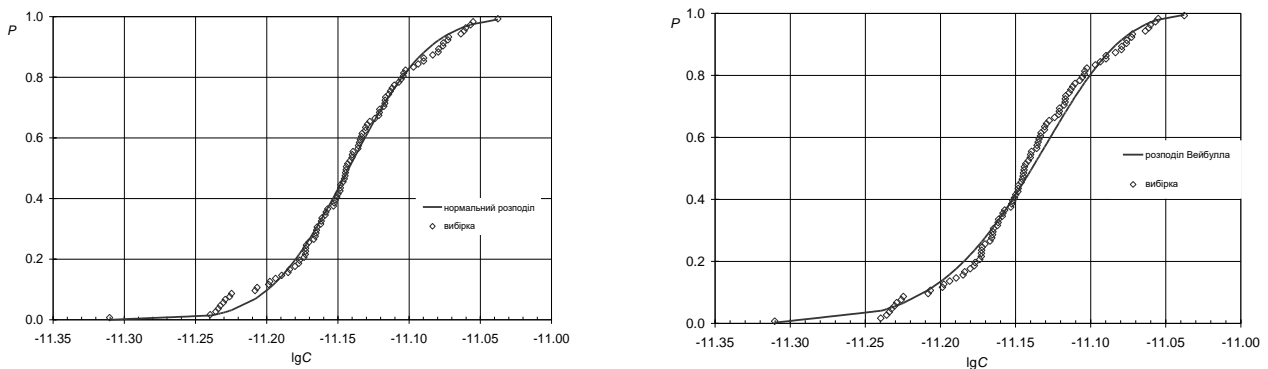


Рис. 8.5. Статистичні розподіли параметра $\lg C$ рівняння Періса для сталі 0,45% С при середньому значенні $n=5,55$ при $R=0$

Пороговий КІН ΔK_{th} визначається за допомогою статистичного аналізу. Із точок, які лежать у діапазоні 10^{-7} - 10^{-6} мм/цикл вибирали випадково 5 точок, і методом лінійної регресії у подвійних логарифмічних координатах отримуємо рівняння прямої.

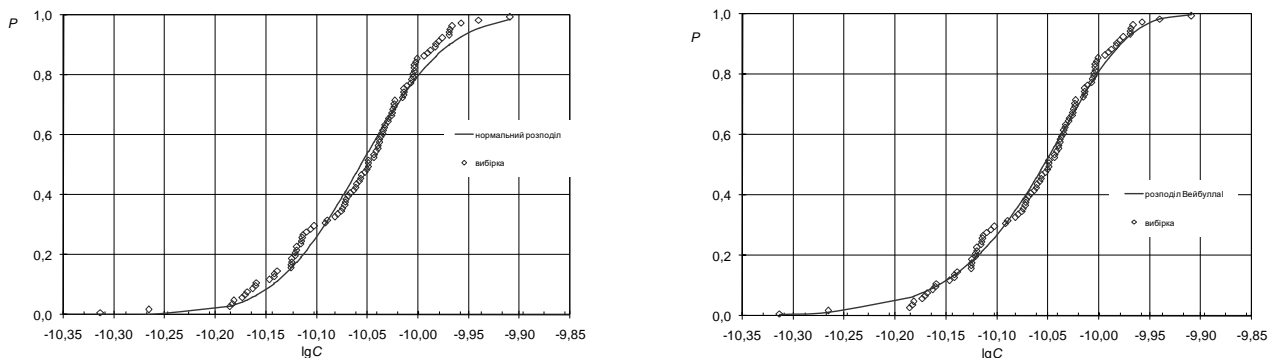
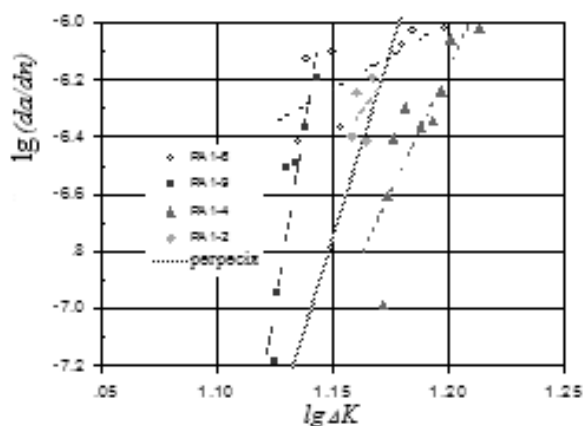
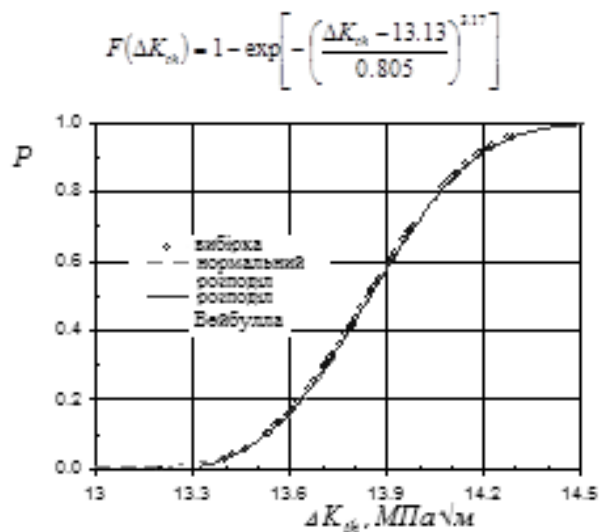


Рис. 8.6. Статистичні розподіли параметра $\lg C$ рівняння Періса для сталі 0,45% С при середньому значенні $n=5,06$ при $R=-1$

Після того потрібно визначити точку, яка відповідала швидкості тріщини 10^{-7} мм/цикл. Провівши проби 100 разів, отримали розкид порогового значення. Даний розкид описували статичними розподілами (рис. 7.7б).



а



б

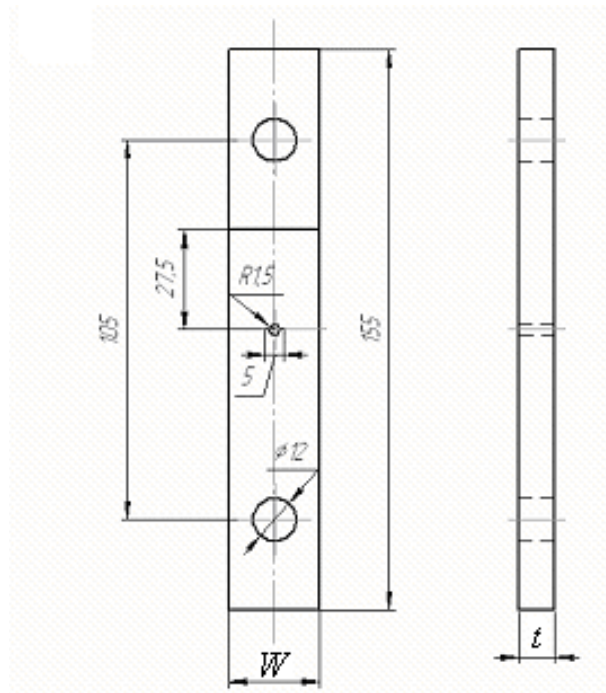
Рис. 8.7. Низькоамплітудна ділянка ДВР сталі (0,3% С) – а і статистичний розподіл порогового значення КІН – б

Змодельовано втомне руйнування пластини товщиною 5 мм із центральною тріщиною (рис. 8.8). Початкова довжина тріщини: $a_0 = 5,1$ мм. Кількість циклів навантаження 10^6 . Для моделювання використовували рівняння Періса, яким апроксимували I і II ділянку діаграми втомного руйнування сталі з 0,45%С.

Коефіцієнт інтенсивності напружень для М(Т) зразка (рис. 7.8) розраховували за формулою

$$K_{\max} = \frac{P_{\max}}{t} \sqrt{\frac{\pi a}{2W}} \sec\left(\frac{\pi a}{W}\right) \quad (8.2)$$

Ця формула справедлива для $2a/W < 0,95$.



$$W=25 \text{ мм}$$

$$t=5 \text{ мм}$$

Рис. 8.8. Зразок з центральною тріщиною для випробування на циклічну тріщиностійкість матеріалу

Розподіл $\lg C$ описували функцією розподілу Вейбулла (8.3) з параметрами $x_0 = -10,81$, $\beta = 12,7$, $\eta = 0,781$.

Таблиця 8.3

Функція розподілу Вейбулла

x_0 = параметр місцезнаходження; β = параметр масштабу; η = параметр форми $x_0 \leq x < \infty, \eta > 0, \beta > 0$	$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{x - x_0}{\eta} \right)^\beta \right]$	(8.3)
---	---	-------

Отримані чисельним методом залежності довжини тріщини від кількості циклів навантаження для окремих імітацій представлені на рис. 8.9. Тут також наведено експериментальну залежність $a - N$, яка знаходиться в межах статистичного розкиду розрахункових даних.

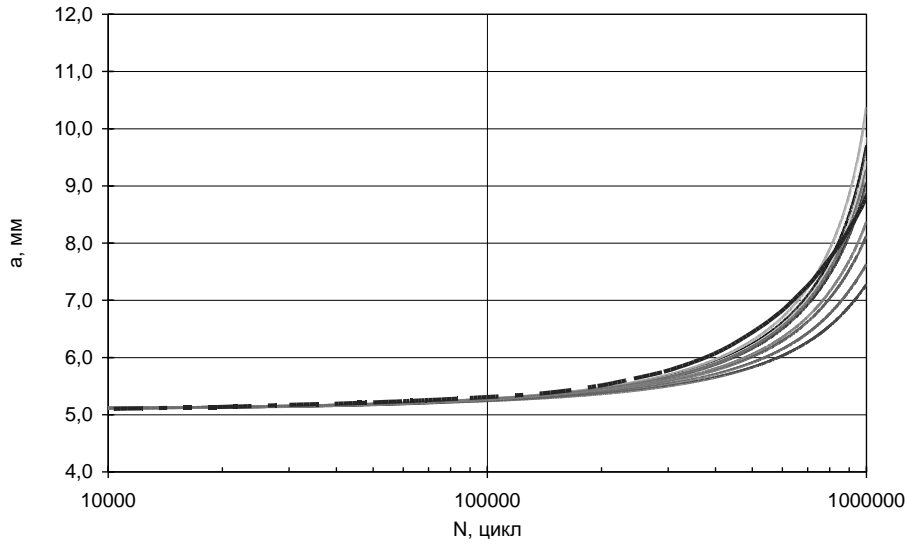


Рис. 8.9. Залежність довжини тріщини від N . Рівняння Періса, $a_0=5,1$ мм: моделювання – суцільні лінії; експеримент – штрих-пунктирна лінія

Густини і функції розподілів кінцевих довжин тріщин представлено на рис. 8.10 та 8.11.

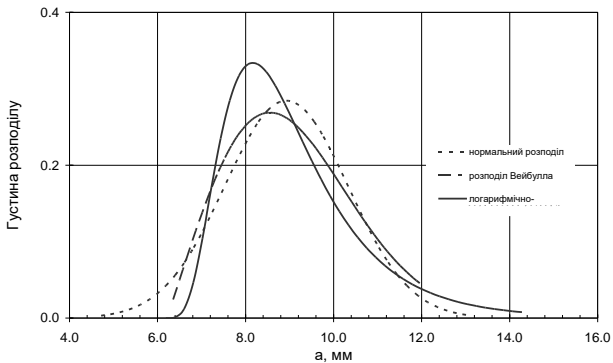


Рис. 8.10. Густина розподілів кінцевих довжин тріщин, моделювання за Перісом. Кількість циклів навантаження дорівнює 10^6

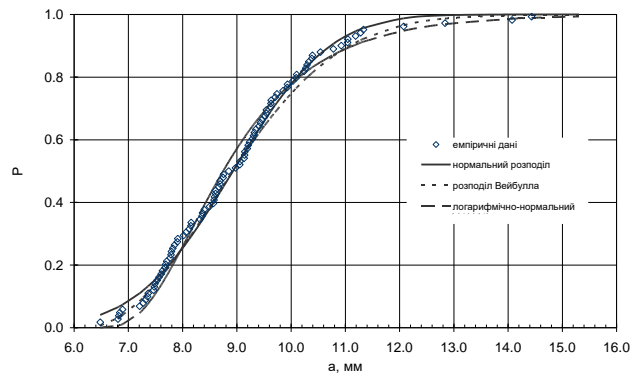


Рис. 8.11. Функції розподілу кінцевих довжин тріщин, моделювання за Перісом. Кількість циклів навантаження дорівнює 10^6

Густини і функції розподілів кінцевих довжин тріщин представлені для розподілів: нормального, логарифмічно-нормального та Вейбула.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ясній П.В. Механіка руйнування зварних конструкцій. Курс лекцій. Тернопіль: ТДТУ, 2006. – 100 с.
2. Ясній П.В., Ковальчук Я.О., Обухівський В.І. Методичний посібник для виконання лабораторних робіт з курсу механіка руйнування. – Тернопіль: ТДТУ, 2001. – 68 с.
3. Тугай О.А., Гарнець В.М., Баглай В.А. та інші. Технічний нагляд за будівництвом і безпечною експлуатацією будівель та інженерних споруд: Навчальний посібник / за ред. проф. Тугая О.А., та Гарнеця В.М. – К.: «Хай-Тек Прес», 2011. – 448 с.
4. Лучко Й.Й., Чубріков В.М., Лазар В.Ф. Міцність, тріщиностійкість бетонних та залізобетонних конструкцій. Львів: Каменяр, 1999.
5. РД-50-345-82. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 95 с.
6. ДСТУ Б В.2.7-227:2009 Бетони. Методи визначення характеристики тріщиностійкості (в'язкості руйнування) при статичному навантаженні.
7. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 43 с.
8. ДСТУ EN 336:2003. Піломатеріали конструкційні із хвойних порід та тополі. Розміри. Допустимі відхилення (EN 336:1995, IDT).
9. ДСТУ EN 384-2001. Лісоматеріали конструкційні. Визначення характеристичних значень механічних властивостей.
10. ГОСТ 21554.3-82. Піломатериалы и заготовки. Метод контроля прочности при изгибе, растяжении и сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 48 с.
11. ГОСТ 21554.4-78. Піломатериалы и заготовки. Метод определения предела прочности при продольном сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 48 с.
12. ГОСТ 21554.5-78. Піломатериалы и заготовки. Метод определения предела прочности при продольном растяжении. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 48 с.
13. ГОСТ 21554.6-78. Піломатериалы и заготовки. Метод определения предела прочности при скалывании вдоль волокон. - М.: Изд-во стандартов, 1979. - 48 с.
14. ГОСТ 24332-88. Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 48 с.
15. ДСТУ 2444-94. Опір втомі. Розрахунки та випробування на міцність. К.: Видавництво державного стандарту України, 1994. – 71 с.
16. В.Т. Трощенко и др. Соппротивление материалов деформированию и разрушению. Т. 1. Киев: «Наукова думка», 1994. – 288 с.

17. В.Т. Трощенко и др. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Т. 2. Киев: «Наукова думка», 1994. – 276 с.
18. П.В. Ясній. Пластично деформовані матеріали: втома і тріщинотривкість. – Львів: Світ, 1998. – 224 с.
19. Ясній О.П. Імовірнісний аналіз поширення втомних тріщині граничного стану елементів конструкцій. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04. Механіка деформівного твердого тіла. Луцьк: ЛНТУ, 2009. – 137 с.
20. Ясній П.В., Марущак П.О. Ролики МБЛЗ: деградація і тріщиностійкість матеріалів / – Тернопіль : ДЖУРА, 2009. – 232 с.
21. ASTM D256 – 10e1. Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics.
22. ISO 13586:2000/Amd 1:2003. Guidelines for the testing of injection-moulded plastics containing discontinuous reinforcing fibres.
23. Hartl D.J., Lagoudas D.C. Aerospace applications of shape memory alloys // Proc. Inst. Mech. Eng. Part G J. Aerosp. Eng. 2007. Vol. 221, № 4. P. 535 – 552.
24. Miller D.A., Lagoudas D.C. Thermomechanical characterization of NiTiCu and NiTi SMA actuators: influence of plastic strains // Smart Mater. Struct. 2000. Vol. 9, № 5. P. 640.

Навчально-методична література

*Ясній Петро Володимирович,
Ясній Володимир Петрович.*

Конспект лекцій

з дисципліни

Механіка руйнування будівельних конструкцій

для студентів денної форми навчання за напрямом
192 «Будівництво та цивільна інженерія»

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

Формат 60x90/16. Обл. вид. арк. 2,82. Тираж 10 прим. Зам. № 3119.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

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