

УДК 539.375: 620.178.7: 620.172.2: 624.07

В.Бойко; Я. Іваницький; С.Штаюра

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка

Національної академії наук України, Львів

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ МЕТАЛІВ ПРИ ДИНАМІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ(НОРМАЛЬНИЙ ВІДРИВ)

Держстандартом України введено в дію ДСТУ 2576-94 „Методи механічних випробовувань металів на тріщиностійкість під дією імпульсного навантаження” за редакцією Г. В. Степанова із ППМ НАН України. Для визначення характеристик динамічної тріщиностійкості використовують кільцеві зразки з двома радіальними втомними тріщинами на внутрішній поверхні зразка. Але через низку причин ця методика не отримала конкретного впровадження в практику заводських та наукових лабораторій.

Нами викладено дві основні методики визначення динамічної тріщиностійкості матеріалів на балкових та циліндричних зразках із вихідною тріщиною. З цією метою застосовується змішаний числово-експериментальний підхід, який ґрунтується на поєднанні напіваналітичного методу скінченних елементів(МСЕ) та результатів експериментальних досліджень. Динамічні коефіцієнти інтенсивності напружень(ДКІН) визначаються за допомогою простих залежностей, які містять параметри, що визначаються чисельно та експериментально. Для найуживаніших розмірів зразків числові значення цих параметрів подані у вигляді простих аналітичних виразів.

Розроблена інформаційно-вимірювальна система дозволяє вводити цифрові сигнали в пам'ять комп'ютера, розраховувати на основі отриманих даних динамічну тріщиностійкість, унаочнювати вихідні сигнали у табличній та графічній формах на екрані дисплея.

Запропоновані підходи відкривають широкую перспективу застосування циліндричних та балкових зразків для визначення ДКІН, методів обробки та аналізу результатів експерименту.

Вступ

Залежність динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень(ДКІН) від часу визначають експериментально двома способами. Перший спосіб – це наклеювання біля вершини тріщини малогабаритного датчика. Недоліком цього способу є необхідність наклеювання датчиків на кожний зразок з їх подальшим таруванням. Другий спосіб – це використання методів фотопружності або каустик. Цей метод потребує високошвидкісного фотографування, а отже, складної реєструючої апаратури і характеризується трудомісткою процедурою дешифрування одержаних кінокадрів. Очевидно, що використання цього методу є доцільним при проведенні еталонних експериментів.

Існує ще третій спосіб – числово-експериментальний. При застосуванні цього способу використовують дані, які одержані як на основі експериментальних випробувань, так і з результатів числових розрахунків. На нашу думку такий спосіб є найбільш придатним для визначення характеристик тріщиностійкості матеріалів. Він складає основу запропонованої методики.

В даній методиці запропоновано методи механічних випробувань для визначення характеристик тріщиностійкості металів при динамічному навантаженні на циліндричних та балкових зразках у діапазоні температур від -263 до $+400^{\circ}$ С. Ці методи сформульовано з врахуванням положень, що викладені в роботах [1-3].

Для визначення характеристик тріщиностійкості застосовують метод випробувань зразків з попередньо вирощеною втомною тріщиною із записом діаграм “навантаження - час” ($F - t$).

Запропонована методика регламентує проведення випробувань в діапазоні зміни швидкостей зростання коефіцієнта інтенсивності напружень (КІН) $\dot{K}_I = dK/dt$ від 10 до 10^6 МПа $\sqrt{\text{мс}}^{-1}$.

За результатами випробувань визначають наступні основні характеристики тріщиностійкості: КІН напружень від історії його навантаження $K_I(t)$, критичні динамічні коефіцієнти інтенсивності напружень (ДКІН) K_C° , K_{IC}° .

Зразки та їх виготовлення

Для визначення характеристик тріщиностійкості застосовують наступні зразки [1]: тип 2 - циліндричний зразок діаметра D з зовнішньою кільцевою тріщиною діаметра d для випробувань осьовим розтягом (рис. 1); тип 4 - плоский прямокутний зразок з крайовою тріщиною (балковий) для випробувань триточковим згином (рис. 2).

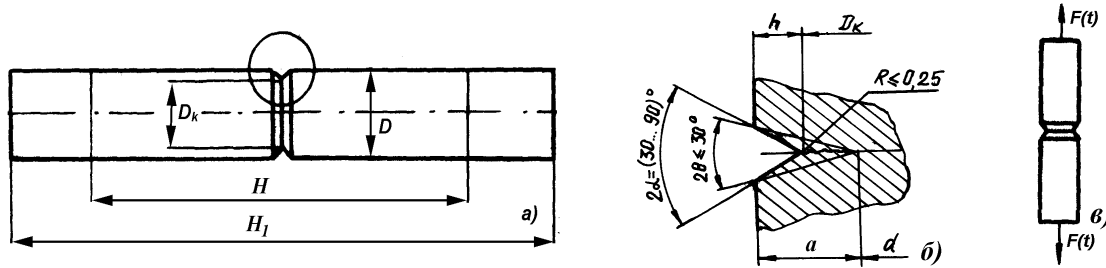


Рис. 1. Циліндричний зразок (а, б) для випробувань ударним розтягом та силова схема навантаження (в). H - відстань між частинами зразка, котрі служать для кріплення в зачепах; H_1 - загальна довжина зразка; h - глибина концентратора; R - радіус концентратора; 2α - кут при вершині концентратора.

Для цих параметрів зразка рекомендуються такі оптимальні розміри

$$H = 7D; d = (0.6 \div 0.7)D; H_1 \geq 10D, a = 0.5(D - d) \geq h + 1.5\text{мм}, \quad (1)$$

$$D_k = D - 2h \approx (0.65 \div 0.85)D.$$

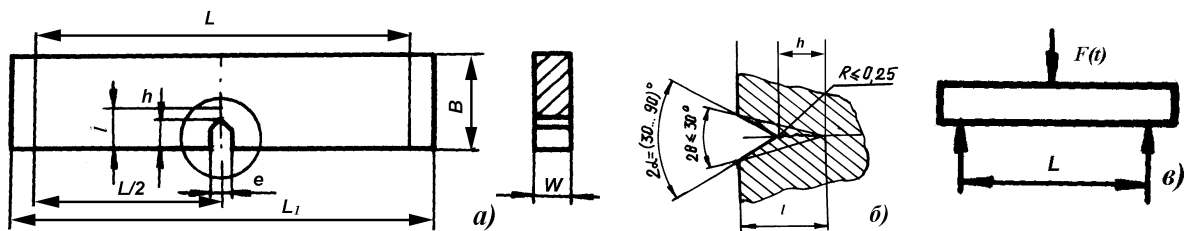


Рис. 2. Балковий зразок (а, б) для випробувань ударним згином і силова схема навантаження (в). L_1 - довжина зразка; L - відстань між опорами; B - висота зразка; W - ширина зразка; l - довжини тріщини; e - глибина концентратора; h - довжини вищої тріщини; L - відстань між опорами.

Для цих параметрів зразка рекомендуються такі оптимальні розміри

$$B = 2W; l = (0.45 \div 0.55)B; L = 4B; L_1 = 4B + 0.5B; h \approx (0.35 \div 0.45)B \quad (2)$$

Коректність вимірювання величини K_{IC}° при випробуваннях зразків, приведених на рис. 1, 2, визначається вимогами до діаметра або товщини зразка. Орієнтовна товщина зразка W чи діаметр D зразків для визначення K_{IC}° в діапазоні зміни встановлюється згідно з таблицею 1 з використанням модуля пружності E і границі текучості матеріалу при статичному $\sigma_{0,2}$ та динамічному $\sigma_{0,2}^{\circ}$ навантаженнях ($\sigma_{0,2}$ умовна межа плинності матеріалу).

Таблиця 1

Розміри зразків для визначення K_{IC}°

$\sigma_{0,2}/E$	$\sigma_{0,2}^{\circ}/E$	W чи D (мм)
0,005	0,006	60
0,005-0,0057	0,006-0,0065	50
0,0057-0,0065	0,0065-0,0075	40
0,0065-0,0075	0,0075-0,008	25
0,0075-0,0095	0,008-0,095	15
0,095	0,095	10

Регламентуються наступні параметри зразків:

тип 2 - діаметр $D \geq 12$ мм;

тип 4 - товщина $t \geq 10$ мм.

Втомні тріщини в циліндричному зразку (тип 2) створюють при круговому згинанні ($R=-1$), а на зразку типу 4 при розтягуванні з коефіцієнтом асиметрії циклу $R = 0.1 \div 0.2$. Номінальні напруження σ_0 при максимальному зусиллі циклу повинні бути не більше $0.5\sigma_{0,2}$, а регламентована кількість циклів навантаження при наведенні втомної тріщини $N \geq 5 \times 10^4$.

Випробувальне обладнання

Для визначення характеристики тріщиностійкості при динамічному навантаженні використовують випробувальні машини з механічним, гідравлічним і електрогідравлічним приводами, маятникові і ротаційні копри, а також вертикальні копри з падаючим вантажем, які забезпечують вимірювання і реєстрацію зусиль, переміщень (розкриття) і часу дії навантаження.

Максимальне навантаження, необхідне для руйнування зразка, визначається за формулами:

для циліндричних зразків(тип 2) при осьовому розтязі

$$P_{\max} \geq \frac{\pi d^2}{4} \left(\frac{\sigma_{0,2} + \sigma_b}{2} \right); \quad (3)$$

для плоских зразків (тип 4) при триточковому згині:

$$P_{\max} \geq 0.1 \frac{W(B-l)}{B} (\sigma_{0,2} + \sigma_b), \quad (4)$$

де σ_b - межа плинності матеріалу

При випробуваннях на маятниковому і вертикальних копрах вимірюють зусилля з допомогою динамометрів, пружним елементом яких служить ударна частина маятника копра, падаючого вантажу і опори копра. Для еталонних досліджень контрольні датчики наклеюють у відповідності зі схемами, поданими на рис. 3б, безпосередньо на зразках.

В аналоговій формі для запису діаграм руйнування “навантаження - час” на опорах та молоті копра використовують електронні осцилографи з пам’яттю (рис. 3а).

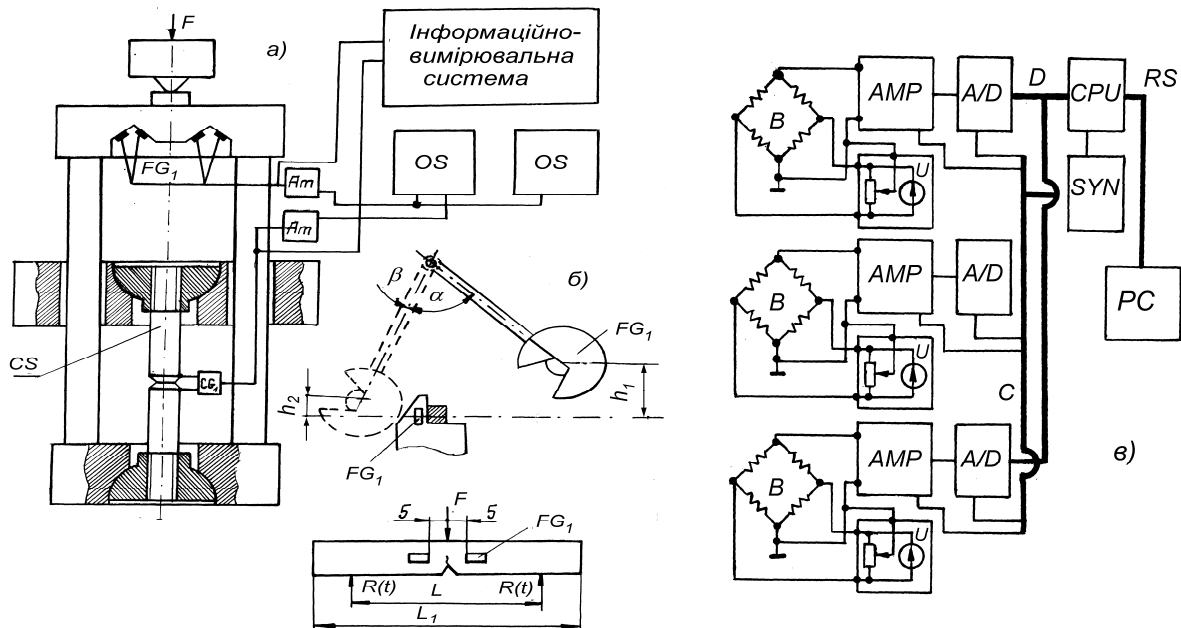


Рис. 3. Схема ударного навантаження при розтязі (а) циліндричного зразка; при згині балкового зразка (б) та блок-схема інформаційно-вимірювальної системи (в). Am – підсилювачі вхідного сигналу; OS – осцилографи із запам'ятовуючими пристроями; FG_1 – датчики навантаження; CG_1 – датчики розкриття берегів надрізу, CS – циліндричний зразок.

Процедура визначення динамічної тріщиностійкості (ДКІН) матеріалу передбачає реєстрацію всієї залежності $K(t)$ - історії його зміни за час навантаження. Для цього використовують інформаційно - вимірювальну систему (ІВС), блок схема установки якої подана на рис. 3в. Ця ІВС виконує такі функції:

- відбір інформації і підсилення сигналів з тензодатчиків (вузол B), розташованих на опорах і молоті копра;
- аналого - цифрове перетворення сигналів;
- ввід цифрових сигналів у пам'ять персонального комп'ютера (ПК);
- розрахунок на основі отриманих даних ДКІН під час одноточкового (безопорного) та триточкового згину балкового зразка та розтягу циліндричного зразка;
- візуалізація вихідних сигналів у табличній та графічній формах на екрані ПК та папері за допомогою принтера;

Блок має наступні модулі (рис. 2в):

- підсилювач широкосмуговий АМР (3 шт.);
- давачі силовимірювання B ;
- аналого - цифровий перетворювач А/Д (3 шт.);
- синхрогенератор SYN (1 шт.);
- процесор CPU (1 шт.);
- модуль живлення (1 шт.).

Комплекс розроблених програм виконує наступні задачі:

- тарування ІВС;
- зчитування даних з ІВС і зберігання даних на довгострокових носіях;
- забезпечення візуалізації результатів експерименту у вигляді кусково - лінійних діаграм та таблиць на екрані дисплея і друкувальному пристрої, обчислення часових залежностей ДКІН.

Розрахунок залежностей $K_I(t)$ і визначення критичних значень коефіцієнтів інтенсивності напружень K_{IC}^0 і K_C^0

Швидкість процесу динамічного навантаження зразків з тріщиною характеризується швидкістю зміни ДКІН - $\dot{K}_I = dK/dt$, або співвідношення t_c/τ_1 , де t_c - час до старту тріщини; τ_1 - період першої моди власних безопорних коливань зразка. Критичні значення $K_{IC}^{\partial}, K_C^{\partial}$ визначаються за максимальним значенням залежності $K_I(t)$ для циліндричних зразків (тип 2) і для балкових зразків (тип 4) у відповідності з формулами і діапазонами швидкостей навантаження, приведеними нижче.

Для циліндричного зразка навантаження, отримане на навантажуючому елементі копра, апроксимуємо кусково - ламаною лінією у відповідності з формулою

$$F(t) \approx \sum_{i=1}^N (k_i - k_{i-1})(t - t_{i-1})H(t - t_{i-1}). \quad (5)$$

Тоді динамічний коефіцієнт інтенсивності $K_I(t)$ буде визначитися за формулою [5]

$$K_I(t) = K_{IS}F(t) - K_{IS} \sum_{i=1}^N (k_i - k_{i-1})H(t - t_{i-1}) \sum_{j=1}^n (\eta_j / \omega_j) \sin(\omega_j(t - t_{i-1})). \quad (6)$$

K_{IS} - статичний коефіцієнт інтенсивності напружень при дії одиничної сили визначається згідно з формулою [5]

$$K_{IS}^{(1)} = 2\sqrt{2} Y(\lambda) (3,403 - 29,637\lambda + 104,613\lambda^2 - 156,12\lambda^3 + 89,14\lambda^4) / D\sqrt{D}. \quad (7)$$

Кругові частоти ω_i і вагові коефіцієнти η_i для різних відносних глибин тріщини $\lambda = 2a/D$ і різних відносних довжин циліндра $\gamma = 2H/D$ та різних значень коефіцієнта Пуассона ($13 \leq \gamma \leq 20$; $0,3 \leq \lambda \leq 0,7$; $0,2 \leq \nu \leq 0,4$, $N=4$) можна записати відповідно до формул [6].

$$\begin{aligned} \omega_1^* &= 0,142 - 0,581\lambda + 0,629\lambda^2 + (14,83\lambda - 22,32\lambda^2 + 6,417\lambda^3) / \gamma, \\ \omega_2^* &= 0,393 - 1,511\lambda + 1,525\lambda^2 + (44,48\lambda - 71,41\lambda^2 + 29,35\lambda^3) / \gamma, \\ \omega_3^* &= 0,1782\lambda - 0,1952\lambda^2 + (66,056\sqrt{\lambda} - 80,88\lambda + 28,98\lambda^2) / \gamma + \\ &\quad \nu [-0,1538 + 1,2855\lambda - 1,277\lambda^2 + (-15,621\lambda + 17,336\lambda^2) / \gamma], \\ \omega_4^* &= 0,2639 - 0,7707\lambda + 0,6286\lambda^2 + (85,433\sqrt{\lambda} - 103,71\lambda + 51,75\lambda^2 - 14,944\lambda^3) / \gamma + \\ &\quad \nu [-0,2849 + 2,8885\lambda - 2,7847\lambda^2 + (-54,217\lambda + 85,716\lambda^2 - 39,119\lambda^3) / \gamma], \end{aligned} \quad (8)$$

де $\omega_i^* = \omega_i r / \sqrt{E/\rho}$ (E - модуль Юнга; ρ - густина матеріалу, $i=1,2,3,4$)

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 1,228 + 0,358\lambda - 0,705\lambda^2 + (-0,0047\lambda + 0,0159\lambda^2) \gamma, \\ \eta_2 &= -0,372 - 0,484\lambda + 1,133\lambda^2 + (0,0057\lambda - 0,0238\lambda^2) \gamma, \\ \eta_3 &= 0,7543 - 1,8615\lambda + 1,1276\lambda^2 + (-0,1579\sqrt{\lambda} + 0,378\lambda - 0,3672\lambda^2 + 0,1536\lambda^3) \gamma + \\ &\quad \nu [-1,0961 + 4,2891\lambda - 3,6264\lambda^2 + (0,294\sqrt{\lambda} - 0,6923\lambda + 0,6603\lambda^2 - 0,2555\lambda^3) \gamma], \\ \eta_4 &= 1,822 - 10,78\sqrt{\lambda} + 14,493\lambda - 6,01\lambda^2 + (0,0708\sqrt{\lambda} - 0,11\lambda - 0,052\lambda^2 + 0,118\lambda^3) \gamma + \\ &\quad \nu [-1,312 + 13,16\sqrt{\lambda} - 21,87\lambda + 11,19\lambda^2 + (-0,304\sqrt{\lambda} + 0,582\lambda - 0,234\lambda^2 - 0,1\lambda^3) \gamma]. \end{aligned} \quad (9)$$

Як приклад розглянемо сталевий циліндричний зразок із сталі 40Х (гартування + відпуск 400°С) довжиною $H=160$ мм і діаметром $D=16$ мм ($E=2 \times 10^{11}$ Па, $\nu=0,28$). Глибина тріщини $a=6,8$ мм. Діаграма навантаження "сила-час", одержана на випробувальному обладнанні (рис. 3а, в), показана на рис. 4, а залежність ДКІН від часу, обчислена згідно з формулами (5-9), на рис 5.

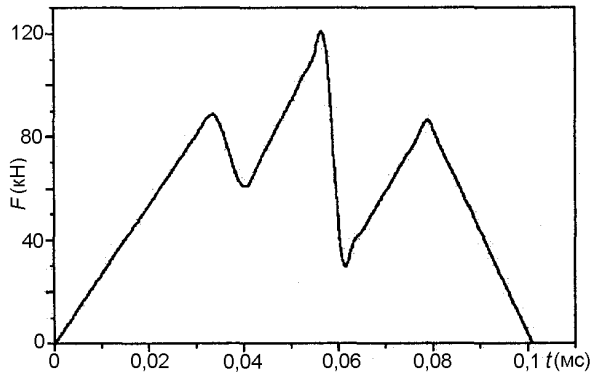


Рис. 4. Діаграма "сила-час" при ударному навантаженні циліндричного зразка

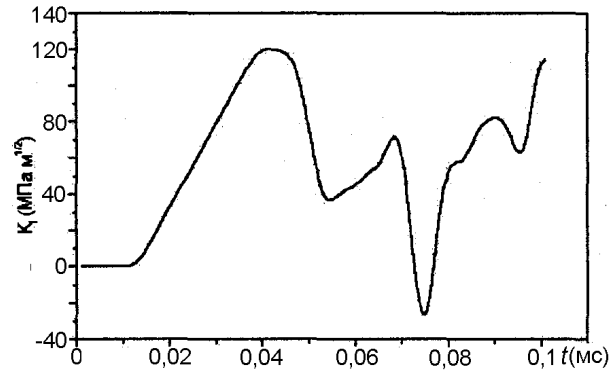


Рис. 5. Залежність динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень від часу

На початковому етапі навантаження взаємодія зразка з опорами не впливає на величину ДКІН. Тому у випадку крихких матеріалів при високих швидкостях навантаження ріст тріщини починається ще до того, як почнеться взаємодія зразка з опорами. Тому в даному випадку наявність опор не впливає на докритичне навантаження зразка. Такі умови досліджень дістали назву одноточкового або безопорного згину. В цьому випадку, після апроксимації діаграми "навантаження-час" ламаною лінією, згідно з формулою (5), (діаграма "навантаження – час" може бути отримана за допомогою обладнання, яке показано на рис. 2б, в) $K_I(t)$ для одноточкового згину обчислюємо за допомогою формули (6) при $N=3$ [7, 9, 11]. При цьому вирази для власних частот половини балкового зразка для $4 \leq \gamma \leq 6$; $0,3 \leq \lambda \leq 0,7$; $0,2 \leq \nu \leq 0,4$ ($\lambda = l/B, \gamma = L_1/B$) можна записати у вигляді [12].

$$\begin{aligned} \omega_1^* &= -0,2346 + 0,38\lambda - 0,16\lambda^3 + \gamma^{-1}(2,5 - 3,12\lambda + 0,59\lambda^3), \\ \omega_2^* &= 0,063 - 0,14\lambda + \gamma^{-1}(3,15 - 1,2\lambda), \\ \omega_3^* &= (-0,36 + 6,01\gamma^{-1})(1,03 - 0,1\nu), \end{aligned} \quad (10)$$

де $\omega_i^* = \omega_i l / \sqrt{E/\rho}$, а безрозмірні коефіцієнти η_i в такому вигляді

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 1,08 - 0,119\lambda^{-1} + \gamma^{-1}(-0,073 + 0,304\lambda^{-1}), \\ \eta_2 &= -0,4723 + 0,1193\lambda^{-1} + 0,5\lambda^3 + \sqrt{\gamma}(0,2874 - 0,06473\lambda^{-1} - 0,2721\lambda^2) + \\ &\quad + (\nu - 0,3)[0,0185 - 0,0163\lambda^{-1} + \gamma^{-1}(1,345 - 1,45\sqrt{\lambda})], \\ \eta_3 &= 0,3963 - 0,6216\sqrt{\lambda} + 0,26\lambda^2 - 0,00225\lambda\gamma + (\nu - 0,3)(0,0198 - 0,0142\lambda^{-1}). \end{aligned} \quad (11)$$

Статичний коефіцієнт інтенсивності напружень при навантаженні зразка одиничною силою визначається за формулою [9-11]

$$K_{IS}^{(1)} = \frac{\gamma\sqrt{\lambda}}{B\sqrt{W}}(-0,3442 + 13,17\lambda - 32,79\lambda^2 + 31,44\lambda^3 - 0,923\gamma^{-1}). \quad (12)$$

У випадку триточкового згину діюче навантаження апроксимуємо формулою (5), а навантаження на опорах $R(t)$ апроксимуємо за формулою:

$$R(t) \approx \sum_{i=1}^m (c_i - c_{i-1})(t - t_{i-1})H(t - t_{i-1}). \quad (13)$$

Тоді, згідно з роботами [7, 10, 11] $K_I(t)$ можна знайти із такого співвідношення

$$K_I(t) = K_{IS}^{(1)}F(t) + K_{IS}^{(2)}R(t) - K_{IS}^{(1)} \sum_{i=1}^n (k_i - k_{i-1})H(t - t_{i-1}) \sum_{j=1}^3 \eta_j \sin[\omega_j(t - t_{i-1})] / \omega_j - K_{IS}^{(2)} \sum_{i=1}^m (c_i - c_{i-1})H(t - t'_{i-1}) \sum_{j=1}^3 \vartheta_j \sin[\omega_j(t - t'_{i-1})] / \omega_j, \quad (14)$$

$$K_{IS}^{(2)} = 2[K_{IS}^{(3)} - K_{IS}^{(1)}], \quad (15)$$

де $K_{IS}^{(3)} = \frac{3L_1\sqrt{l}}{B^2W} \left[\frac{1,99 - \lambda(1 - \lambda)(2,15 - 3,93\lambda + 2,7\lambda^2)}{2(1 + 2\lambda)(1 - \lambda)^{3/2}} \right]$, $\lambda = l/B$, $\gamma = L_1/B$,

а безрозмірні коефіцієнти ϑ_i для $4 \leq \gamma \leq 6$; $0,3 \leq \lambda \leq 0,7$; $0,2 \leq \nu \leq 0,4$ такі [12]

$$\begin{aligned} \vartheta_1 &= 1,323 - 0,34\lambda + \gamma^3(-0,0034 + 0,00368\sqrt{\gamma}), \\ \vartheta_2 &= -0,0556 - 0,00113\lambda^{-1} + \gamma^2(0,09238 - 0,3052\sqrt{\lambda} + 0,2246\lambda) + \\ &+ \gamma^3(0,006752 - 0,001291\lambda - 0,007475\lambda^2) + (\nu - 0,3) \times \\ &\times [-0,0337 + 0,0427\lambda + \gamma^3(0,000926 - 0,00109\sqrt{\lambda})], \\ \vartheta_3 &= \gamma[0,05787 - 0,03105\lambda^{-1} - 0,01427\lambda + \gamma^2(-0,002427 + 0,001253\lambda^{-1} + 0,000705\lambda)] + \\ &+ (\nu - 0,3)[0,275 - 0,418\lambda + \gamma(-0,0628 + 0,095\lambda)] \end{aligned} \quad (16)$$

Для визначення ДКІН можна застосувати інший підхід[13], апробований для одно- та триточкового згину балкового зразка [7, 8]. Для цього подамо навантаження $F(t)$ в інтервалі часу $[0, T]$ у вигляді ряду Фур'є:

$$F(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m [a_k \cos kpt + b_k \sin kpt], \quad p = 2\pi/T. \quad (17)$$

Тоді $K_I(t)$ для одноточкового згину ($N=3$) та розтягу циліндричного зразка ($N=4$) визначається за формулою. [7]

$$K_I(t) = K_{IS}^{(1)} \sum_{i=1}^N \eta_i \left\{ A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t) + \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 - (kp/\omega_i)^2} [a_k \cos kpt + b_k \sin kpt] \right\} \quad (18)$$

де $A_i = -\frac{\rho}{\omega_i} \sum_{k=1}^m \frac{kb_k}{1 - (kp/\omega_i)^2}$, $B_i = -\frac{a_0}{2} - \frac{\rho}{\omega_i} \sum_{k=1}^m \frac{a_k}{1 - (kp/\omega_i)^2}$.

У співвідношенні (18) кругові частоти власних коливань зразка ω_i і вагові коефіцієнти η_i для зразка типу 2 визначаюся за формулами (8, 9), а для зразка типу 4 за формулами (10, 11).

Для балкового зразка у випадку триточкового згину діюче навантаження апроксимуємо формулою (5). Навантаження на опорах $R(t)$ апроксимуємо за формулою:

$$R(t) = \frac{q_0}{2} + \sum_{k=1}^{m_1} [q_k \cos kpt + g_k \sin kpt]. \quad (19)$$

Залежність $K_I(t)$ визначаємо за формулою [7]

$$K_1(t) = K_{IS}^{(1)} \sum_{i=1}^3 \eta_i \left\{ A_i \sin(\omega_i t) + B_i \cos(\omega_i t) + \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^m \frac{1}{1 - (kp/\omega_i)^2} [a_k \cos kpt + b_k \sin kpt] \right\} + \quad (20)$$

$$+ K_{IS}^{(2)} \sum_{i=1}^3 \vartheta_i \left\{ Q_i \sin(\omega_i t) + G_i \cos(\omega_i t) + \frac{q_0}{2} + \sum_{k=1}^{m_i} \frac{1}{1 - (kp/\omega_i)^2} [q_k \cos kpt + g_k \sin kpt] \right\},$$

$$\text{де } Q_i = -\frac{\rho}{\omega_i} \sum_{k=1}^{m_i} \frac{kd_k}{1 - (kp/\omega_i)^2}, \quad G_i = -\frac{a_0}{2} - \frac{\rho}{\omega_i} \sum_{k=1}^{m_i} \frac{g_k}{1 - (kp/\omega_i)^2}.$$

На основі на основі наших числових експериментів та результатів роботи [13] можна стверджувати, що для досягнення задовільної точності в формулах (18, 20) m_1 і m_2 потрібно вибирати в інтервалі 10...15.

У співвідношенні (20) ω_i , η_i та ϑ_i визначаються за формулами (10, 11, 16).

З допомогою апаратури, поданої на рис.3б,в, одержано такі діаграми навантаження "сила-час" (рис. 6) для зразка із сталі 45(гартування + відпуск 400° С). Розміри зразка $B=10$ мм; $W=20$ мм; $L_1=110$ мм, глибина тріщини $l=9,9$ мм, $E=2 \times 10^{11}$ Па, $\nu=0,28$.

Після цього запис діаграми "навантаження-час" (рис.6) був розкладений в ряд Фур'є, згідно з формулами (13) та (17). Після цього за допомогою співвідношень (10, 11, 16, 20) одержали залежність ДКІН від часу.

За нашими даними, перші швидкісні ефекти починають спостерігатися, коли $t_c \leq \tau_1/2$. Порівнюючи параметри дослідних залежностей $K_1(t)$ з періодами першої моди вільних коливань зразків, можна стверджувати, що за безопорного згину тривалість росту ДКІН не перевищує $\tau_1/2$, тобто динамічні ефекти починають проявлятися лише в зоні швидкостей навантаження, при яких реалізується одноточковий згин. При співвідношеннях $t_c \leq \tau_1/10$ ми спостерігали зростання K_{IS}^0 ,

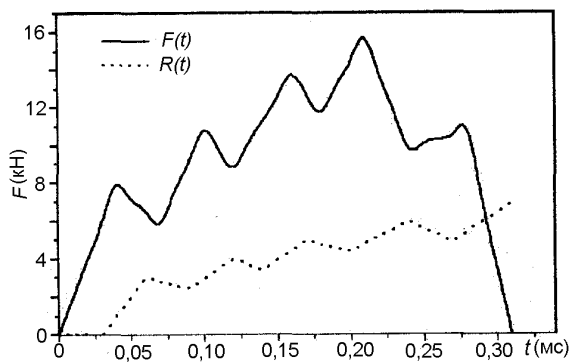


Рис. 6. Діаграми навантаження "сила-час" на ударнику і опорах

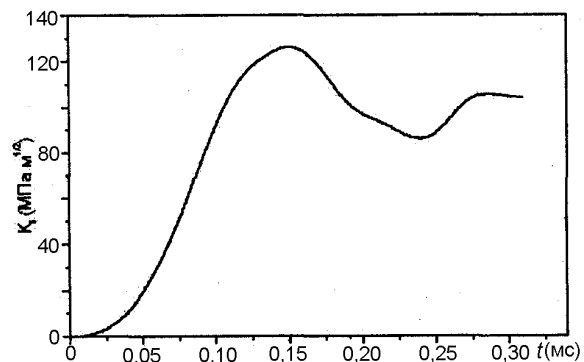


Рис. 7. Залежність динамічного коефіцієнта інтенсивності напружень від часу

На основі проведеного комплексу досліджень можна зробити наступні висновки [8]. Для випадків динамічного руйнування зразків і елементів конструкцій, коли $t_c \leq \tau_1/2$, доцільно застосовувати формули триточкового згину (14, 20). У випадку звичайних низькошвидкісних випробувань вони переходять у квазістатичну формулу. Оптимальний діапазон застосування формул (5) при дії динамічних навантажень, коли $\tau_1/2 \leq t_c \leq 3\tau_1$. Для випадків коли $\tau_1/10 \leq t_c \leq \tau_1/2$ доцільно застосовувати формулу для одноточкового безопорного згину (6, 18).

Висновки

Запропоновано змішану експериментально – числову методику визначення динамічної тріщиностійкості матеріалів. При цьому використовуються два типи зразків- балкові (тип 4) та циліндричні (тип 2). Для цих зразків запропоновано

обладнання, яке дозволяє досить просто визначати діаграму "навантаження – час", на основі якої знаходяться динамічні коефіцієнти інтенсивності напружень. На відміну від інших методик (наприклад Г. В. Степанова), ці ДКІН враховують інерційні процеси, які відбуваються при ударних випробовуваннях.

Для випадків високошвидкісного руйнування, коли $t_c \ll \tau_1/10$, превалюючим є руйнування шляхом розгалуження тріщини. Результати, отримані в цьому випадку за формулою одноточкового згину балкового зразка, вимагають ґрунтовного аналітично-експериментального дослідження на предмет їх достовірності. Комбінований аналіз експериментальних даних і числових розрахунків [13,14] показав, що руйнування у вершині тріщини може відбуватися на спадній ділянці $K_I(t)$, що суперечить традиційним уявленням про руйнування. Власне для цього випадку і був запропонований критерій мінімального часу [13]. Зараз стає очевидним той факт, що дослідженню піддаються ті проблеми, котрі зводяться до плоских. Але щоб проаналізувати реальні умови, при яких починають проявлятися динамічні ефекти, особливо розгалуження тріщини, необхідно розв'язувати менш ідеалізовані задачі, в яких допускається розгалуження в різних точках криволінійного фронту, розгалуження в неавтомоделному режимі та тривимірне розгалуження.

According to the given recommendations the methods of mechanical testing for evaluation of crack growth resistance characteristics under dynamic beam and cylindrical specimens loading at temperatures from -263 to 400°C are established.

In the recommended instructions two main procedures of dynamic crack growth resistance evaluation on the beam and cylindrical specimens with an outgoing crack are proposed. The complex numerical-experimental approach, based on the combination of a semianalytical method of finite elements(FEM) and experimental testing results is used for this purpose. The dynamic stress intensity factors(DSIF) are determined by simple dependences, which have parameters, calculated numerically and experimentally.

For the widely specimen dimensions, numerical values of these parameters are given as simple analytical expressions. The information measuring system allow used to introduce the us digital signal into computer memory, calculate the dynamic crack growth resistance using the obtained data and to present the output signals in the form of tables and plots on the display.

The values of DSIF calculated by FEM and the presented formulas were verified, proving the correctness of the obtained results. Fractographic analysis of the specimen fracture surface allowed to establish the critical criteria of formulas application.

The proposed approaches open wide prospects of the cylindrical and beam specimen application for evaluation of DSIF, methods of processing and analysis of the experimental data.

Література

1. РД 50 - 344 - 82. МВ. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик вязкости разрушения (трещиностойкости) при динамическом нагружении. -М.: Из-во стандартов. -1983. -51с.
2. Draft British Standard Fracture Mechanics Toughness Test. Method for determination of dynamic fracture toughness of metallic materials. ВН Part 3. Draft 3. -1991.
3. Proposed ESIS Instrumented Charpy - V Impact test Method. Draft 10. January 14, 1994. -p.14.
4. "Standard Methods for Notched Bar Impact testing of Metallic Materials" E23 ASM Handbook. -v.8. -1997. -P.259-297.
5. Андрейків О. Є., Бойко В. М., Ковчик С. Є., та інші. Динамічний розтяг циліндричного зразка з кільцевою тріщиною // Фіз.-хім. механіка матеріалів. -2000. -№3. -С.52-60.
6. Andreykiv O. Ye., Bojko V. M., Kovchuk S. Ye., et. al. The estimation of dynamic stress intensity factor for precracked cylindrical tension specimens / Abstract volumes 13th European Conf. of Fracf, 6-9 september 2000, San Sebastian, 2000.
7. Андрейкив О. Є., Ковчик С. Є., Ходань И. В. и др. К вопросу о методах определения динамической трещиностойкости конструкционных материалов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 1997. -№5-6. –С.22-35.
8. Андрейків О. Є., Бойко В. М., Ковчик С. Є., та інші. Методи та засоби визначення динамічної тріщиностійкості матеріалів // Оцінка й обґрунтування продовження ресурсу елементів конструкцій – Київ, ІПМ НАНУ, 2000. –С.201-206.
9. Андрейкив А. Е., Рокач И. В. Упрощенный метод определения зависимости от времени коэффициента интенсивности напряжений при испытании балочных образцов на безопорный ударный изгиб. Физико - химическая механика материалов// -1989, № 5, -С.42-51.

10. *Рокач И. В.* Упрощенный метод определения зависимости от времени коэффициента интенсивности напряжений при испытаниях образцов на трехточечный ударный изгиб // Физ.-хим. механика материалов. -1990. -№3. -С.79-83.
11. *Rokach I. V.* Modal approach for processing one- and three-point bend test data for DSIF-time diagram determination. Part I - Theory // Fatigue and Fract. Eng. Mat. and Struct. - 1998. -21. -P.1007-1014.
12. *Rokach I. V.* Modal approach for processing one- and three-point bend test data for DSIF-time diagram determination. Part II - Calculations and results // Fatigue and Fract. Eng. Mat. and Struct. - 1998. -21. - P.1015-1026.
13. *Wich G.* Ein Beitrag zur Ermittlung von Risszahigkeiten beischlagatiger Belastung: Diss. TH. - Munchen, 1986.
14. *Kalthoff J. F., Winkler S.* Failure mode transition at high rates of shear loading. //Proc. Conf. an Impact Loading and Dynamic Behavior of Materials. (May 18-22,1987, Bremen, West Germany, -1987. -P. 185-196.
15. *Shokey D. A., Erlich D. C., Kalthoff J. F., et all.* Short - pulse fracture mechanics // Eng. Fract. Mech. - 1986. -23. -P.311-319.