

УДК 539.3

ОЦІНЮВАННЯ МІЦНОСТІ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ З ТРІЩИНАМИ ЗА СКЛАДНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Я. Л. ІВАНИЦЬКИЙ

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Розроблено експериментальну методологію та конструкцію зразків для визначення характеристик тріщиностійкості конструкційних матеріалів за різних (I, II, III) макромеханізмів руйнування. Побудовано діаграми гранично-рівноважного стану тіла з тріщиною (його міцності) за складного навантаження, що пропорційно збільшується.

Ключові слова: складний напружено-деформований стан, мішане руйнування, діаграма гранично-рівноважного стану (міцності) матеріалу.

На основі аналізу відомих і власних результатів досліджень розроблено метод оцінки міцності та конструкцію зразків для визначення тріщиностійкості деяких конструкційних матеріалів за мішаних макромеханізмів руйнування.

Відомо [1], що за двовісного розтягування деформівного твердого тіла руйнівне навантаження більше, ніж за одновісного. Наприклад, за тривісного напружено-деформованого стану розмір зони передруйнування матеріалу біля вершини тріщини менший, ніж за одновісного, що впливає і на руйнівне навантаження.

Таким чином, складне навантаження дещо змінює пружно-пластичне деформування матеріалу і механізми його руйнування. Для технічної діагностики та визначення залишкової довговічності елементів конструкцій, що працюють в умовах складного напружено-деформованого стану, необхідно вибрати критерії руйнування матеріалу, враховуючи, що в зоні передруйнування наявні всі компоненти тензора напружень. Крім цього, слід брати до уваги характеристики тріщиностійкості матеріалу за складного навантаження.

Під час навантаження пружно-пластичного тіла, коли напружено-деформований стан біля вершини тріщини повністю визначають коефіцієнти інтенсивності напружень (K_I , K_{II} , K_{III}) і деякі сталі матеріалу C_i (характеристики тріщиностійкості матеріалу, $i = 1, 2, 3$), критеріальне рівняння має вигляд [2]

$$F(K_I^*, K_{II}^*, K_{III}^*, C_i) = 0 \quad (i = 1, 2, 3 \dots), \quad (1)$$

де $K_j^* = K_j(P_*)$, P_* – параметр навантаження, $P = P_*$ – значення параметра P в момент руйнування.

За складного напружено-деформованого стану біля вершини тріщини, використовуючи критерій Ірвіна $K_I^*/K_{Ic} = 1$ та узагальнюючи його в межах феноменологічного підходу, запропонували [2] таку структуру критерію (1):

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^{n_1} + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^{n_2} + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIc}}\right)^{n_3} = 1, \quad (2)$$

де n_1, n_2, n_3 – параметри, пов'язані зі структурою матеріалу, які визначають експериментально або на основі розрахунку за певною моделлю зони передруйнування; $K_{Ic}, K_{IIc}, K_{IIIc}$ – характеристики тріщиностійкості матеріалу.

Використовуючи деформаційний підхід [3], критерій (2) записали так:

$$\left(\frac{\delta_I^*}{\delta_{Ic}}\right)^{m_1} + \left(\frac{\delta_{II}^*}{\delta_{IIc}}\right)^{m_2} + \left(\frac{\delta_{III}^*}{\delta_{IIIc}}\right)^{m_3} = 1, \quad \delta_i^* = \delta_i(P^*), \quad i = I, II, III, \quad (3)$$

де m_1, m_2, m_3 – параметри, що характеризують структурні особливості матеріалу і які визначають експериментально; δ_i – розкриття, поперечний і поздовжній зсуви берегів тріщини біля її вершини за складного навантаження; δ_i^* – їх критичне значення; $\delta_{Ic}, \delta_{IIc}, \delta_{IIIc}$ – критичне нормальне розкриття, поперечний та поздовжній зсуви берегів тріщини в околі її вершини.

Розроблено [4] критерій для встановлення гранично-рівноважного стану за складного навантаження в околі вершини тріщини та експериментально його перевірено. Згідно з цим підходом руйнування відбувається в результаті відгалуження тріщини від головної (початкової) під кутом θ_c :

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_I^c & |\varphi| < \varphi_c, \\ \theta_{II}^c & |\varphi| \geq \varphi_c, \end{cases} \quad (4)$$

де $\theta_I^c, \theta_{II}^c$ – відповідні значення кута напрямку поширення відгалуженої тріщини нормального відриву або поперечного зсуву; $\varphi = \arctg \frac{D_{II}}{D_I}$ (D_I, D_{II} – величини, що відповідають розкриттю та зсуву берегів головної тріщини); φ_c – кут граничного переходу від руйнування за типом I до типу II (рис. 1).

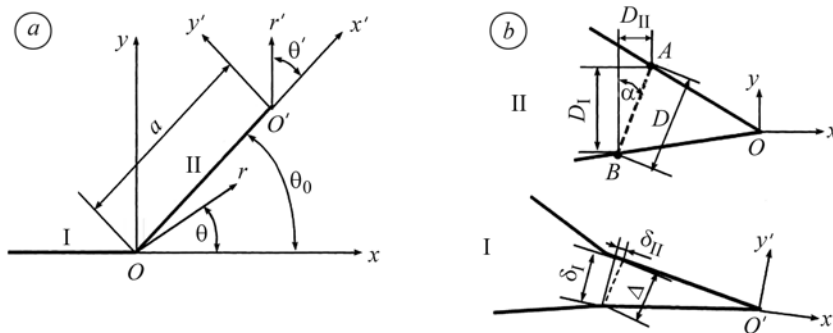


Рис. 1. Геометричне зображення взаємозв'язку між головною (I) і відгалуженою (II) тріщинами: *a* – система координат для цих тріщин; *b* – визначення розкриття і зсуву для головної і відгалуженої тріщин.

Fig. 1. A geometrical representation of the relation between a main crack (I) and a branched (II) crack: *a* – coordinate system for the main and branched cracks; *b* – evaluation of the crack tip opening displacement for the main and branched cracks.

Еквівалентне розкриття у відгалуженій тріщині Δ визначають із співвідношення

$$\Delta = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_{II}^2} = \sqrt{\frac{r_c}{2} \frac{1+\chi}{\mu} \sqrt{k_1^2 + k_2^2}}, \quad (5)$$

де $\delta_I = \sqrt{\frac{r_c}{2\pi} \frac{1+\chi}{\mu} k_1}$; $\delta_{II} = \sqrt{\frac{r_c}{2\pi} \frac{1+\chi}{\mu} k_2}$, $\mu = E/2(1+\nu)$ – модуль зсуву, ν – коефіцієнт Пуассона, $\chi = 3 - 4\nu$ – для плоскої деформації, $\chi = (3 - \nu)/(1 + \nu)$ – для плоского напруженого стану; k_1 і k_2 – КІН біля вершини відгалуженої тріщини, які об-

числюють через КІН K_I і K_{II} для головної тріщини; r_c – відстань від вершини головної тріщини до точок вимірювання на відгалуженій тріщині.

Для малих значень ϕ встановлені експериментальні результати збігаються із відомими, розрахованими за σ_θ -критерієм [2]. Зі збільшенням зсувних деформацій напрям поширення відгалуженої тріщини такий самий, як виявлений раніше [5].

Щоб встановити допустимі навантаження елементів конструкцій з концентраторами напружень (тріщинами) за складного навантаження, необхідно експериментально знайти характеристики тріщиностійкості матеріалу K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} , або δ_{Ic} , δ_{IIc} , δ_{IIIc} , а також параметри n_i , m_i ($i = 1, 2, 3$). Слід мати також розв'язки задач для КІН K_I , K_{II} , K_{III} або δ_I , δ_{II} , δ_{III} залежно від силової схеми навантаження елемента конструкції. З цією метою у Фізико-механічному інституті (ФМІ) впродовж 2000–2010 рр. виконані теоретичні і експериментальні дослідження. Одержані результати вказують на правомірність застосування запропонованих критеріїв для оцінювання роботоздатності елементів конструкцій в екстремальних умовах експлуатації та за складного навантаження.

Визначення параметрів n_i та характеристик тріщиностійкості K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} для критерію (2). Знайти параметри n_i можна експериментально, але це вимагає додаткових затрат. Інший шлях полягає у моделюванні зони передруйнування в деформівному тілі з тріщиною і на цій основі обчислення необхідних величин. Взавши за основу відому δ_c -модель [6] та узагальнивши її для просторового напружено-деформованого стану матеріалу зони передруйнування, у праці [7] прийняли, що коефіцієнти $n_1 = n_2 = n_3 = 4$.

Таким чином, для реалізації критерію (2) необхідно ще встановити характеристики тріщиностійкості матеріалу (K_{Ic} , K_{IIc} і K_{IIIc}). Методи визначення параметрів K_{Ic} відомі [8, 9], а характеристик K_{IIc} і K_{IIIc} одержали розвиток лише за останні 10–15 років. Зокрема, у ФМІ запропоновані оригінальні способи випробування зразків циліндричної форми за силовою схемою закруту [5, 10–12].

Визначення параметрів K_{Ic} і δ_{Ic} . Для цього розтягують циліндричний зразок із зовнішньою кільцевою тріщиною (рис. 2а), процедура виведення якої відома [13]. Встановивши рівень руйнівного навантаження ($P = P^*$), характеристику K_{Ic} підраховували за формулою [8]

$$K_{Ic} = \frac{1,7P^*f(\alpha)\sqrt{1-\varepsilon}}{d\sqrt{d}f(\varepsilon)\sqrt{1-2,7D-2\sigma_{0,2}\sin 2\alpha}}, \quad (6)$$

де $f(\alpha) = 0,0583\sin\alpha(1 - \cos(3\alpha - 30^\circ))(1,0043\sin\alpha + 0,2136\sin 2\alpha + 0,1564\sin 3\alpha)$, P^* – критичне зусилля розтягу; $\sigma_{0,2}$ – границя текучості матеріалу; D – зовнішній діаметр зразка; d – діаметр перешийка тріщини; $\varepsilon = d/D$ – безрозмірний параметр; $f(\alpha)$ – функція, що характеризує розміщення пластичних смуг; α – кут нахилу смуг пластичності до площини тріщини.

Розміри зразка визначили так:

$$d = 0,7D; \quad \rho_1 = 0,01D; \quad \rho_2 = 0,16D; \quad d_k = 0,9D; \quad d_T = 0,7D; \quad L_1 = 5D.$$

Для обчислення величин K_{IIc} , δ_{IIc} використовували пустотілий циліндричний зразок (рис. 2б) із зовнішнім і внутрішнім кільцевими надрізами і створеними двома наскрізними тріщинами [10], який навантажували закрутом. Встановивши момент закруту ($M = M^*$), коли тріщина стартує, тріщиностійкість матеріалу на поперечний зсув визначали за формулами [11]

$$K_{IIc} = \frac{F_B(\lambda)\sqrt{l}\sqrt{2/\pi(\pi R - 2l)}}{\sqrt{F_B^2(\lambda) \cdot Fl + 2/\pi(\pi R - 2l)}} \frac{M^*}{2tR(\pi R - 2l)},$$

$$F_B(\lambda) = 0,144 \sqrt{1,5 + \pi 4 / 16 (1\sqrt{2}) \lambda^4 (R/l)^2 + 0,84}. \quad (7)$$

Тут l – довжина тріщини; R – зовнішній радіус зразка; t – товщина перемички; λ – відносна довжина тріщини ($l/\pi R$).

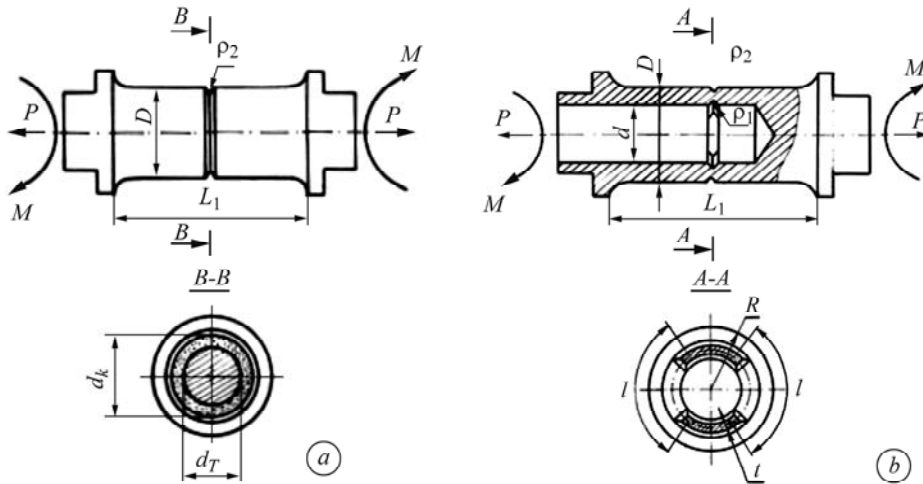


Рис. 2. Зразки для визначення характеристик тріщиностійкості матеріалу за нормального відриву (I), поздовжнього зсуву (III) і мішаного руйнування (I + III) (a), а також за поперечного зсуву (II) і мішаного руйнування (I + II) (b).

Fig. 2. Specimens for determination of crack growth resistance characteristics under mode I, mode III and mixed mode I + III (a), and also at mode II and mixed mode I + II (b) fracture.

Для визначення величини K_{IIIc} використовували суцільний циліндричний зразок із зовнішньою кільцевою тріщиною (рис. 2a), який навантажували моментом закруту довкола осі циліндра. Встановивши момент ($M = M_*$), коли тріщина стартує, значення K_{IIIc} підраховували за формулою [12]

$$K_{IIIc} = \frac{6M_*}{\sqrt{2\pi}\varepsilon^2 \sqrt{\varepsilon D^2 \sqrt{D}}} \left[1 + 0,78\varepsilon^2 + 0,6\varepsilon^4 - 1,024\varepsilon^5 + 0,47\varepsilon^6 - 0,9\varepsilon^7 + 0(\varepsilon^8) \right], \quad (8)$$

де M_* – критичне значення моменту закруту; $\varepsilon = d/D$ – безрозмірний параметр.

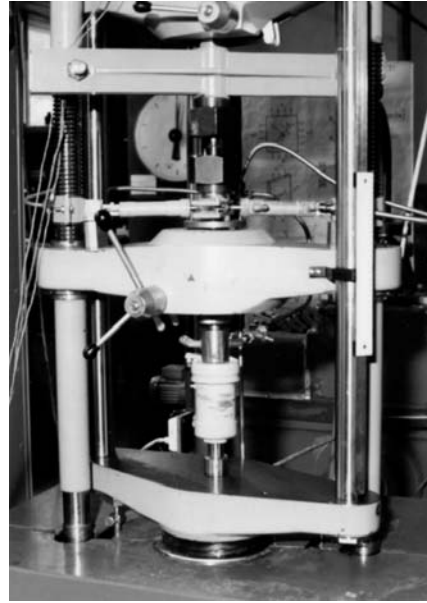
Деякі експериментальні дослідження граничної рівноваги (міцності) тіл з тріщинами за складного навантаження. Випробовували зразки з тріщинами за умов складного навантаження за силовою схемою одночасного пропорційного розтягу і закруту. Зовнішнє навантаження формує в матеріалі біля вершини тріщини напружено-деформований стан, який характеризується такими КІН: $K_I \neq 0$, $K_{II} \neq 0$, $K_{III} = 0$ і $K_I \neq 0$, $K_{II} = 0$, $K_{III} \neq 0$.

Тут складне навантаження зразка, а відтак і руйнування відбуваються за макромеханізмами (I + II) і (I + III). Випробували зразки на модернізованій гідралічній установці EUS-20 з додатковим пристосуванням (рис. 3), яка дає змогу здійснювати складне пропорційне навантаження циліндричного зразка розтягом і закрутом за різних співвідношень зусилля розтягу і моменту закруту.

За складного навантаження зразка з допомогою давачів фіксували зусилля розтягу P та моменту закруту M , розкриття U та зсуву V берегів тріщини і через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) на персональному комп'ютері (ПК) записували дві діаграми: $P = P(U)$ і $M = M(V)$ (рис. 4, криві 1 і 2). Із діаграм (рис. 4a) визначали критичне зусилля P_* і нормальне розкриття U_R , яке вважали критичним розкриттям берегів тріщини δ_1^* ($\delta_1^* \approx U_{P^*}$).

Рис. 3. Установка для синхронного розтягу-закруту циліндричних зразків (реалізація механізмів (I + II), (I + III)).

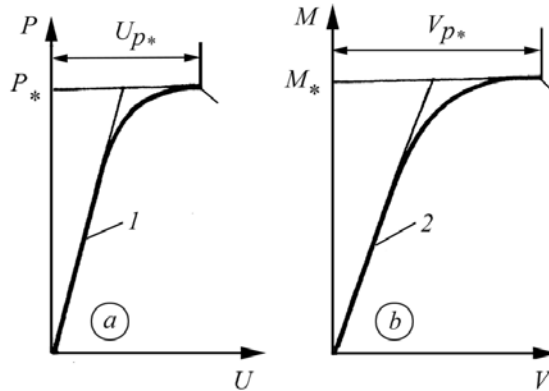
Fig. 3. Test machine for synchronous tension and torsion of cylindrical specimens (modes I + II, I + III).



За зусиллям P_* , використовуючи формулу (6), обчислювали значення K_I^* . За діаграмами (рис. 4b), вживаючи вираз (7), визначали руйнівний момент закруту (M_*) і характеристику K_{II}^* , а також вимірювали поперечний зсув берегів тріщини і знаходили деформаційну характеристику тріщиностійкості ($\delta_{II}^* \approx V_{P_*}$). Досліджували руйнування в діапазоні співвідношень K_I/K_{II} від 0 до 1.

Рис. 4. Діаграми розтягу (a) та закруту (b) циліндричного зразка з кільцевою тріщиною.

Fig. 4. Stress-strain (a) and torsion (b) curves of cylindrical specimens with a circular crack.



Результати експериментів для зразків із сталі 40X з зовнішнім діаметром 25 mm наведені у табл. 1, а також у вигляді діаграм тріщиностійкості $K_I^* = f(K_{II}^*)$, побудованих за рівнянням (2), – на рис. 5.

Таблиця 1. Граничні значення δ_I^* і δ_{II}^* , а також K_I^* і K_{II}^* за складного навантаження (I + II) зразків зі сталі 40X

D	d	2l	$\lambda = l/\pi R$	K_I^* ,	δ_I^* ,	K_I^*/K_{Ic}	K_{II}^* ,	δ_{II}^* ,	K_{II}^*/K_{IIc}
mm				MPa·√m	mm		MPa·√m	mm	
22,54	17,40	38,92	0,55	78	0,10	0,95	79	0,34	0,64
22,68	17,60	39,87	0,56	74	0,09	0,90	95	0,35	0,77
22,27	17,80	41,95	0,60	70	0,08	0,85	101	0,56	0,82
22,48	17,32	40,23	0,57	62	0,07	0,75	113	0,63	0,91
22,42	17,40	27,45	0,39	64	0,07	0,78	112	0,65	0,9
22,56	17,60	41,08	0,58	51	0,06	0,62	119	0,68	0,96
22,40	17,20	40,08	0,57	41	0,05	0,50	120	0,73	0,97
22,60	17,42	39,73	0,56	30	0,04	0,37	121	0,76	0,98

$K_{Ic} = 82 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; $K_{IIc} = 124 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}$; $\delta_{Ic} = 0,11 \text{ mm}$; $\delta_{IIc} = 0,82 \text{ mm}$.

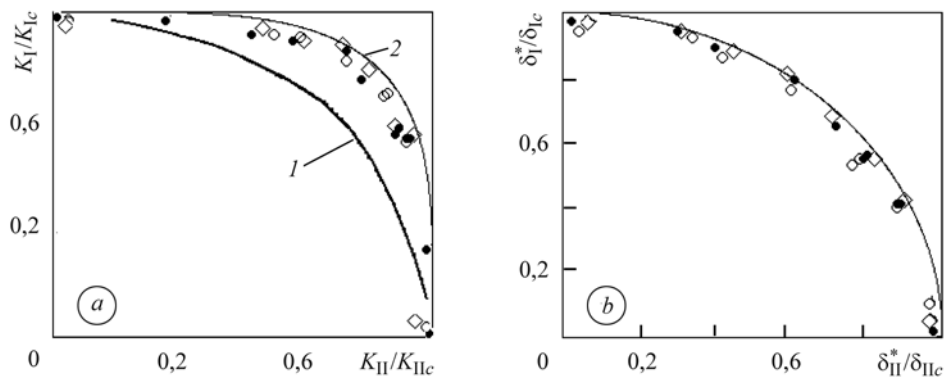


Рис. 5. Діаграми гранично-рівноважного стану матеріалів $K_I = f(K_{II})$ (а) і $\delta_I = f(\delta_{II})$ (б) за складного навантаження і реалізації мішаного руйнування (I + II): \circ – сталь 40XH, гартування в оливі при 1123 К, відпуск при 833 К; \diamond – сталь 30XГСНА, нормалізація; \bullet – сталь 40X, гартування в оливі при 1133 К, відпуск при 773 К; крива 1 відповідає критерію (2), коли $n_1 = n_2 = 4$, крива 2 – емпіричному критерію $(K_I^*/K_{Ic})^2 + (K_{II}^*/K_{IIc})^2 = 1$.

Fig. 5. Diagrams of the limiting-equilibrium state of materials $K_I = f(K_{II})$ (a) and $\delta_I = f(\delta_{II})$ (b) under conditions of complex loading and mixed mode (I + II) fracture:
 \circ – 40XH steel, oil quenching at 1123 K, tempering 833 K; \diamond – 30XГСНА steel, normalization; \bullet – 40X steel, oil quenching at 1133 K, tempering 773 K;
 curve 1 corresponds to criterion (2) at $n_1 = n_2 = 4$, curve 2 corresponds to empirical criterion $(K_I^*/K_{Ic})^2 + (K_{II}^*/K_{IIc})^2 = 1$.

Прогнозовані допустимі значення величин K_I^* і K_{II}^* (рис. 5а, крива 1) дещо занижені порівняно зі встановленими за критерієм (2). Крива 2 краще узгоджується з експериментальними результатами. Паралельно визначали також деформаційні характеристики тріщиностійкості δ_I^* і δ_{II}^* (рис. 6) і виявили задовільну кореляцію експериментальних і теоретичних даних.

Для встановлення впливу деформації зсуву на мішане руйнування та вивчення структурних особливостей мікромеханізму руйнування матеріалу фрактографічно досліджували злами зразків за складного деформування [14]. Вивчали поверхню зламу за різних співвідношень параметрів руйнування δ_I^*/δ_{II}^* або K_I^*/K_{II}^* на електронному мікроскопі і зіставляли фрактограми. Встановлено три характерні особливості поширення тріщини (рис. 6).

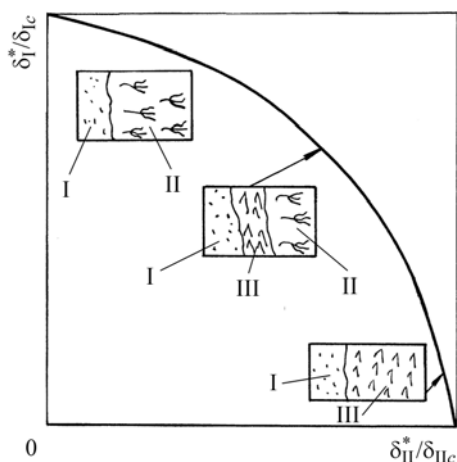


Рис. 6. Фрактограма мішаного руйнування сталі 9ХФ: I – втомна тріщина; II – відкол; III – зона поперечного зсуву.

Fig. 6. Mixed-mode fracture fractography of 9ХФ steel: I – fatigue crack; II – mode II; III – fracture zone.

Тріщина стартує шляхом міжзеренного сколу, коли $0,9 < \delta_I^*/\delta_{Ic} < 1$, що відповідає макроскопічному відриву. Зі збільшенням деформації зсуву змінюється мікромеханізм її старту.

Вздовж фронту початкової тріщини виникають ділянки, притаманні для “зсувного” мікромеханізму. За ними лежать зони з фасетками міжзеренного відколу, що відповідає зрізно-скольному мікромеханізму. Зі збільшенням впливу поперечного зсуву площа ділянок зсуву зростає порівняно з ділянкою відколу. Для силового навантаження, коли $(0,8\delta_{II}^*/\delta_{IIIc} \leq 1)$, руйнування зразка відбувається за механізмом чистого зсуву і якісно змінюється мікробудова всього зламу. Тріщина тут стартує за мікромеханізмом поперечного зсуву.

Наведені результати підтверджують ефективність критеріїв (2) або (3) для оцінювання граничного стану тіла з тріщиною за умов складного навантаження і одночасної реалізації макромеханізмів руйнування за нормальним відривом і поперечним зсувом.

Побудова діаграми мішаного ($K_I + K_{III}$) руйнування. Для дослідження гранично-рівноважного стану тіла за складного навантаження, коли матеріал біля вершини тріщини руйнується за механізмом нормального відриву і поздовжнього зсуву, циліндричний зразок із зовнішньою кільцевою тріщиною навантажували розтягом та закрутом (рис. 7).

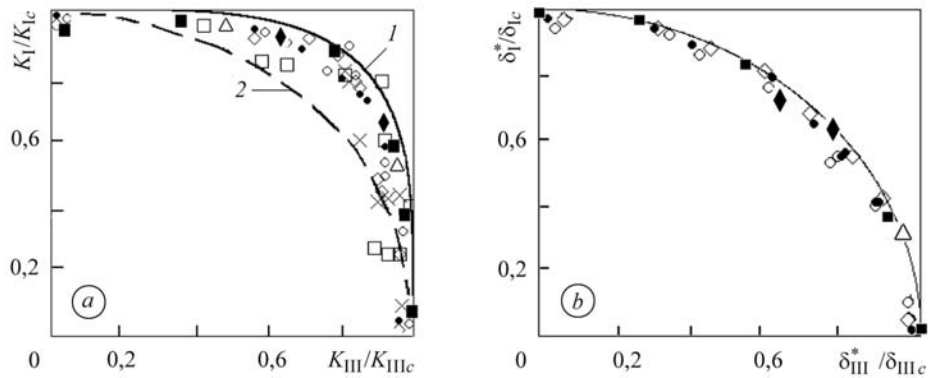


Рис. 7. Діаграми гранично-рівноважного стану (міцності) матеріалів $K_I = f(K_{III})$ (a) і $\delta_I = f(\delta_{III})$ (b) за мішаного (I + III) макромеханізму руйнування: \circ – сталь 40XH, гартування в оливі при 1123 К, відпуск при 833 К; \diamond – сталь 30ХГСНА, нормалізація; \bullet – сталь 40X, гартування в оливі при 1133 К, відпуск при 773 К; \square – сталь 4340 [А. О. Чижик]; \times – алюмінієвий сплав 2219 (Т87) [А. О. Чижик]; сталь 9ХФ: \blacklozenge – гартування в оливі при 1133 К, відпуск при 873 К; \blacksquare – відпуск при 773 К; \triangle – відпуск при 673 К; крива 1 побудована за критерієм (2), коли $n_1 = n_3 = 4$; крива 2 – за емпіричним критерієм $(K_I^*/K_{Ic})^2 + (K_{III}^*/K_{IIIc})^2 = 1$.

Fig. 7. Diagrams of the limiting-equilibrium state (strength) of materials $K_I = f(K_{III})$ and $\delta_I = f(\delta_{III})$ under conditions of mixed mode (I + II) fracture: \circ – 40XH steel, oil quenching at 1123 K, tempering at 833 K; \diamond – 30ХГСНА steel, normalization; \bullet – 40X steel, oil quenching at 1133 K, tempering at 773 K; \square – 4340 steel [A. O. Chyzyk]; \times – 2219 (Т87) aluminium alloy [A. O. Chyzyk]; 9ХФ steel: \blacklozenge – oil quenching at 1133 K, tempering at 873 K; \blacksquare – tempering at 773 K; \triangle – tempering at 673 K; curve 1 is constructed by criterion (2) at $n_1 = n_3 = 4$; curve 2 is built by empirical criterion $(K_I^*/K_{Ic})^2 + (K_{III}^*/K_{IIIc})^2 = 1$.

Утомну тріщину утворювали за силовою схемою триточкового згину [7, 8]. Зразки випробовували на установці EUS-20 з додатковим пристроєм, як під час дослідження порожнинних зразків за складного навантаження (I + II). Одну партію зразків із зовнішньою кільцевою тріщиною розтягували і реєстрували з допомогою АЦП критичне зусилля P_* , а також критичне розкриття тріщини U_P . За результатами експериментів визначали характеристики тріщиностійкості K_{Ic} і δ_{Ic} .

Під час деформування зразка закрутом фіксували пластичну компоненту критичного зсуву берегів тріщини ω^* , критичний момент закруту M^* і визначали параметр K_{IIIc} за формулою (8), а деформаційні характеристики тріщиностійкості матеріалу, зокрема критичне розкриття (δ_{Ic}) і критичний зсув (δ_{IIIc}) – за співвідношеннями [9]

$$\delta_{Ic} \approx U_{p^*}; \quad \delta_{IIIc} = 1,19\omega^* - 0,6t_s / G, \quad (9)$$

де t_s – границя текучості матеріалу під час закруту; G – модуль зсуву; ω – пластична компонента поздовжнього зсуву берегів тріщини, ω^* – її критичне значення.

Мішане руйнування зразків здійснювали, пропорційно збільшуючи зусилля розтягу та момент закруту. З експерименту визначали критичне розкриття берегів тріщини U_p і руйнівну силу P^* , а також пластичну компоненту зсуву берегів тріщини ω^* і руйнівний момент M^* (табл. 2).

Таблиця 2. Граничні значення K_I^* і K_{III}^* , а також δ_I^* і δ_{III}^* за мішаного (I + III) руйнування сталі 40X

d , mm	ε	K_I^* , MPa·√m	δ_I^* , mm	K_I^* / K_{Ic}	K_{III}^* , MPa·√m	ω^*	δ_{III}^*	K_{III}^* / K_{IIIc}
						mm		
13,85	0,55	—	0,10	0,95	100	0,39	0,45	0,61
15,83	0,63	57	0,09	0,85	118	0,70	0,78	0,72
16,42	0,65	54	0,08	0,80	124	0,79	0,89	0,76
16,25	0,65	48	0,08	0,75	150	0,88	0,98	0,90
16,20	0,64	41	0,07	0,64	160	1,02	1,14	0,96
15,90	0,63	32	0,06	0,52	163	1,14	1,27	0,98

$$K_{Ic} = 64 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}; \quad K_{IIIc} = 165 \text{ MPa} \cdot \sqrt{\text{m}}; \quad \delta_{Ic} = 0,11 \text{ mm}, \quad \delta_{IIIc} = 1,49 \text{ mm}.$$

Критерій (2) (рис. 7a) добре узгоджується із експериментальними результатами для деформаційно зміцнювальних матеріалів, коли $\sigma_B / \sigma_{0,2} > 1,4$ (σ_B – границя міцності). Для деформаційно знеміцнювальних матеріалів, у яких $\sigma_B / \sigma_{0,2} < 1,2$, спостерігається відхилення від критерію (2). Результати випробувань попадають у смугу, обмежену критерієм (2) і емпіричним критерієм (крива 2). Критерій (2) (рис. 7b, суцільна крива) добре узгоджується із одержаним результатом [5, 11, 12, 14], а також даними А. О. Чижика [15].

РЕЗЮМЕ. На основани анализ известных и собственных исследований разработана экспериментальная методология и конструкция образцов для определения характеристик трещиностойкости конструкционных материалов при смешанных макромеханизмах разрушения.

SUMMARY. On the basis of the analysis of the known and own researches the experimental method and specimen geometry for evaluation of the crack growth resistance characteristics of structural materials under mixed-mode fracture are developed.

1. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – К.: Наук. думка, 1976. – 415с.
2. Панасюк В. В. Механика квазихрупкого разрушения материалов. – К.: Наук. думка, 1991. – 416 с.

3. *Андрейків О. С., Іваницький Я. Л., Варивода Ю. Ю.* КРТ-критерій для тіл з тріщинами при складному напруженому стані // Доп. АН УРСР. – 1987. – № 2. – С. 37–39.
4. *Development and application of a crack tip opening displacement-based mixed mode fracture criterion / M. A. Sutton, X. Deng, F. Ma et al.* // Int. J. of Solids and Structures. – 2000. – 37. – P. 3591–3618.
5. *Іваницький Я. Л.* Методи оцінки тріщиностійкості конструкційних матеріалів за умов складного навантаження: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. – 2005. – 41 с.
6. *Панасюк В. В.* Предельное равновесие хрупких тел с трещинами. – К.: Наук. думка, 1968. – 246 с.
7. *Панасюк В. В.* Деякі проблеми механіки руйнування та міцності матеріалів // Механіка руйнування матеріалів і міцність конструкцій (вип. 2): в 3-х т./ Під. заг. ред. В. В. Панасюка. – Львів: Каменяр, 1999. – Т. 1. – 352 с.
8. *Панасюк В. В., Андрейків А. Е., Ковчик С. Е.* Методы оценки трещиностойкости металлов. – К.: Наук. думка, 1977. – 277 с.
9. *ГОСТ 25.506-85.* Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 62 с.
10. *Патент України № 71772 А МПК: 7G01N3/00.* Зразок для визначення характеристик циклічної тріщиностійкості при поперечному зсуві / Я. Л. Іваницький, С. Т. Штаюра, Д. В. Рудавський та ін. – Опубл. 15.12.2004; Бюл. № 12.
11. *Іваницький Я. Л., Андрейків А. О., Король В. Р.* Коефіцієнт інтенсивності напружень за розтягу та закруту труби з двома симетричними тріщинами // Фіз.-хім. механіка матеріалів. – 2000. – № 6. – С. 113–115.
(*Ivanyts'kyi Ya. L., Andreikiv A. O., and Korol' V. R.* Stress Intensity Factors for a Pipe with Two Symmetric Cracks Subjected to Tension and Torsion // Materials Science. – 2000. – № 6. – P. 932–934.)
12. *Андрейків А. Е., Панько И. Н., Іваницький Я. Л.* Об условиях правомерности применения критерия Ирвина для трещин продольного сдвига // Там же. – 1983. – № 3. – С. 73–78.
13. *Панасюк В. В., Ковчик С. Е., Козут Н. С.* Об одном способе образования поверхностных осесимметричных трещин в цилиндрических образцах // Там же. – 1972. – № 2. – С. 95–97.
14. *Руйнування при навантаженні тріщин крученням і розтягом / О. Є. Андрейків, Ю. Ю. Варивода, Ю. В. Зима, Я. Л. Іваницький* // Там же. – 1993. – № 5. – С. 101–102.
(*Andreikiv A. E., Varyvoda Yu. Yu., Zyma Yu. V., and Ivanyts'kyi Ya. L.* Fracture of Specimens with Cracks under Torsion and Tension Load // Materials Science. – 1993. – № 5. – P. 545–547.)
15. *Чижев А. А.* О локальных критериях разрушения при наличии трещин в условиях сложного напряженного состояния // Энергомашиностроение. – 1975. – № 10. – С. 31–34.

Одержано 06.04.2011