

УДК 539.4, 539.375

## ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАТРАТ ЗА КВАЗІКРИХКОГО РУЙНУВАННЯ НА ОСНОВІ РЕНТГЕНОГРАФІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НОВОУТВОРЕНОЇ ПОВЕРХНІ

Б. К. ГАНУЛІЧ<sup>1</sup>, В. М. ТИМОЩУК<sup>1</sup>, О. М. ГОЛІЯН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Луцький національний технічний університет;

<sup>2</sup> Національний лісотехнічний університет України, Львів

Рентгенографічними дослідженнями встановлено товщину пластично деформованого шару за квазікрихкого руйнування шляхом поширення попередньо створеної втомної тріщини. Зроблено оцінку залишкових напружень другого роду, на основі чого обчислено питому енергію руйнування. Встановлено, що товщина пластично деформованого шару збігається з висотою нерівностей поверхні руйнування.

**Ключові слова:** квазікрихке руйнування, рентгенографічні дослідження, пластична зона, енергія руйнування.

**Формулювання задачі.** Ідеально крихке чи просто крихке руйнування відбувається без пластичної деформації. Після крихкого руйнування тіло можна заново скласти із уламків без порожнин між ними, наприклад, крихко руйнується скло за кімнатних і нижчих температур. Квазікрихке руйнування передбачає пластичну зону перед краєм тріщини, поширення якої і є руйнуванням. Квазікрихко руйнуються усі метали і сплави. Згідно з енергетичним критерієм, запропонованим у 1920 р. А. А. Гріфітсом, тріщина поширюється за умови

$$\Delta\Gamma = 2\gamma\Delta S, \quad (1)$$

де  $\Delta\Gamma$  – робота руйнування, необхідна для утворення нової поверхні розриву, площа якої  $\Delta S$ ;  $\gamma$  – інтенсивність поверхневої енергії, яка витрачається на руйнування.

Потік енергії  $\Delta\Gamma$  у вершину тріщини забезпечується вивільненням (зменшенням) пружної деформації  $\Delta W$  тіла, яке руйнується внаслідок збільшення тріщини. Руйнування відбувається, якщо

$$\Delta W \geq \Delta\Gamma. \quad (2)$$

Інтенсивність поверхневої енергії  $\gamma$  складається із двох доданків

$$\gamma = \gamma_0 + \gamma_p, \quad (3)$$

де  $\gamma_0$  – поверхнева енергія твердого тіла, що має таку ж фізичну природу, що й для рідини (за А. А. Гріфітсом); для заліза  $\gamma_0 = 1 \dots 2 \text{ J/m}^2$  [1];  $\gamma_p$  – енергія, яка витрачається на пластичну деформацію.

Для металів, які руйнуються внаслідок поширення тріщини,  $\gamma_0 \ll \gamma_p$ , що й визначає квазікрихке руйнування більшою чи меншою мірою: якщо  $\gamma_p = 0$ , то руйнування абсолютно крихке.

З іншого боку, напруження, визначені методами лінійної теорії пружності, біля вершини тріщини визначають [2] відомими формулами:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta). \quad (4)$$

Коли напруження (відповідно деформації) біля вершини тріщини ( $r$  – віддаль від вершини) досягають критичних значень, то починається ріст тріщини, тобто руйнування. Силовий критерій Дж. Р. Ірвіна початку росту тріщини має вигляд

$$K_I = K_{IC} . \quad (5)$$

У лінійній механіці руйнування величину  $K_{IC}$  вважають константою і називають тріщиностійкістю матеріалу.

Із формули (4) випливає, що напруження біля вершини тріщини нескінченно великі (сингулярні). На практиці матеріали, зокрема метали, мають границю плинності і за більших за неї напружень, вони пластично деформуються. Таким чином, у металах в околі вершини тріщини завжди є область (зона), де виникають пластичні деформації, які є визначальним чинником зменшення концентрації напружень. Процеси, які відбуваються у пластичних зонах, поряд з теоретичною максимально можливою міцністю матеріалу, зумовлюють його тріщиностійкість. Отже, дослідження зон пластичних деформацій і новоутворених поверхонь руйнування є актуальними [3, 4].

**Результати досліджень.** Рентгенографічні дослідження поверхні руйнування зразків здійснювали на приладі УРС-50 ИМ у  $\text{CrK}_\alpha$ -випромінюванні. Напруження другого роду визначали за розширенням лінії [211]  $\alpha\text{-Fe}$ , згідно з методикою [5].

Інтерференційні максимуми рентгенівського випромінювання отримують згідно з відомим рівнянням Вульфа–Брегга

$$2d \sin \theta = n\lambda , \quad (6)$$

де  $d$  – міжплощинна віддаль у кристалі;  $\theta$  – кут падіння рентгенівського променя;  $n$  – порядковий номер максимуму;  $\lambda$  – довжина хвилі рентгенівського випромінювання.

Оскільки для цього максимуму  $n\lambda = \text{const}$ , то повний диференціал лівої частини (6)  $\Delta(2d \sin \theta) = 0$  або  $\sin \theta \Delta d + d \cos \theta \Delta \theta = 0$ . Звідси

$$\Delta d / d = \text{ctg} \theta \cdot \Delta \theta , \quad (7)$$

де  $\pm \Delta d / d$  – залишкові пластичні деформації, які зумовлюють розширення  $\pm \Delta \theta$  інтерференційної лінії.

Механічні характеристики та визначені [6] значення тріщиностійкості подані у табл. 1. Результати рентгенографічних досліджень новоутвореної поверхні зразків досліджували раніше [6], а поверхонь зламу наведені на рис. 1 і в табл. 2.

**Таблиця 1**

Сталь	$\sigma_B$	$\sigma_{0,2}$	$\delta$	$\psi$	$K_{IC}$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$
	МПа		%		
40Х, гарт. 1133 К, відпуск 673 К	1550	1380	10	51	45,9
45ХН2МФА, гарт. 1133 К	1680	1490	12	42	65,1

Глибина шару, з якого отримуємо дифракційну лінію за заданих умов дослідження, становить 0,08 мм [5]. Наближене значення прихованої енергії деформації обчислювали за формулою [7]

$$W = \frac{3E}{2(1 + 2\mu^2)} \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 , \quad (8)$$

де  $E = 2,1 \cdot 10^5$  МПа – модуль пружності Юнга;  $\mu = 0,28$  – коефіцієнт Пуассона.

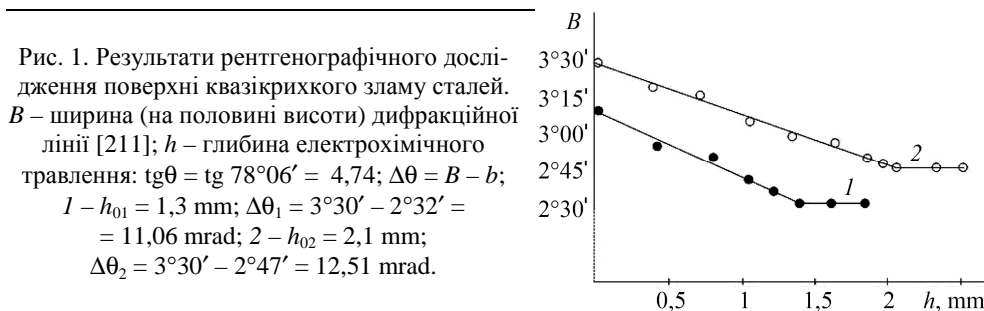


Fig. 1. Results of X-ray examination of the surface of quasicircular fracture of steels.  $B$  is the width (at half the height) of the diffraction line [211];  $h$  is the depth of electrochemical etching:  $\operatorname{tg}\theta = \operatorname{tg} 78^{\circ}06' = 4.74$ ;  $\Delta\theta = B - b$ ;  $1 - h_{01} = 1.3 \text{ mm}$ ;  $\Delta\theta_1 = 3^{\circ}30' - 2^{\circ}32' = 11.06 \text{ mrad}$ ;  $2 - h_{02} = 2.1 \text{ mm}$ ;  $\Delta\theta_2 = 3^{\circ}30' - 2^{\circ}47' = 12.51 \text{ mrad}$ .

Таблиця 2

Сталь	$\left(\frac{\Delta d}{d}\right)_{\max}$	$h_0$ , mm	$W$ , $\text{J/m}^3$	$\gamma$ , $\text{J/m}^2$	$K_{IC}$ , $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
40X, гарт. 1133 К, відпуск 673 К	0,00233	1,3	$1,48 \cdot 10^6$	$1,92 \cdot 10^3$	27,2
45XН2МФА, гарт. 1133 К	0,00264	2,1	$1,90 \cdot 10^6$	$3,98 \cdot 10^3$	42,7

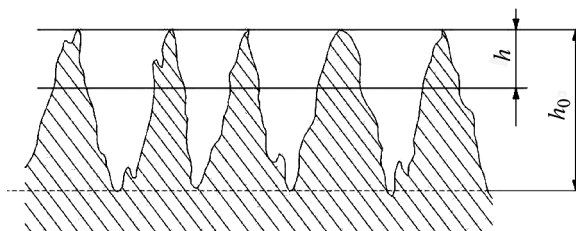
Поверхневу енергію руйнування, яка зумовлює залишкові пластичні деформації, визначали за формулою

$$\gamma = Wh_0, \quad (9)$$

де  $h_0$  – висота шару, у якому спостерігали залишкові напруження другого роду (рис. 2).

Рис. 2. Профілограми поверхні зламу сталей (табл. 1).

Fig. 2. Profilograms of the surface fracture of steels (Table 1).



Тріщиностійкість обчислювали за формулою [8]

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{1-\mu^2}}. \quad (10)$$

Підставивши у (10) формули (8), (9) і  $\mu = 0,28$ , отримаємо:

$$K_{IC} = 0,97E\sqrt{3h_0}\left(\frac{\Delta d}{d}\right), \quad (11)$$

де  $h_0$  – товщина шару, у якому спостерігаємо залишкові напруження другого роду.

Результати досліджень та обчислень подані у табл. 2. Згідно з ними, в обох досліджених зразках область пластичних деформацій поширюється у шарі, товщина якого рівна висоті характерних виступів поверхні зламу (рис. 2), слідів залишкових напружень другого роду у глибших шарах не виявили. Найбільші залишкові напруження, які обчислювали за формулою  $\pm\sigma = E\frac{\Delta d}{d}$ , ( $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ )

становлять 489 і 554 МПа, відповідно. Тріщиностійкість становить ~60% від значень, визначених за механічних випробувань; це, можливо, пояснюється частковою релаксацією напружень на гострих вершинах нерівностей зламу. Тут необхідно зауважити: порівняно з розмиттям інтерференційних ліній, які зумовлені мікронапруженнями, ефект від подрібнення мозаїчних блоків настільки несуттєвий, що ним можна знехтувати [7]. Отримані результати рентгенографічних досліджень дають змогу оцінювати тріщиностійкість сталей за формулою  $K_{IC} \approx 0,5\sigma_B\sqrt{3h_0}$ .

**РЕЗЮМЕ.** Рентгенографическими исследованиями определено толщину пластически деформированного слоя при квазихрупком разрушении путем распространения предварительно созданной усталостной трещины. Произведена оценка остаточных напряжений второго рода, на основе чего рассчитано удельную энергию разрушения. Установлено, что толщина пластически деформированного слоя равна высоте шероховатостей поверхности разрушения.

**Ключові слова:** квазихрупкое разрушение, рентгенографические исследования, пластическая зона, энергия разрушения.

**SUMMARY.** The thickness of a plastic-deformed layer under a quasi-brittle fracture by propagation of a pre-created fatigue crack is established by X-ray studies. An estimation of residual stresses of the second kind is made on the basis of which the specific energy of fracture is estimated. It is established that the thickness of the plastic-deformed layer is equal to the height of the cracking surface roughness.

**Keywords:** quasi-brittle fracture, X-ray studies, plastic region, fracture energy.

**Робота виконана у межах науково-дослідної теми “Створення фізичної моделі тріщиностійкості металів”, державна реєстрація № 0116U001958.**

1. Степаненко В. А., Ярема С. Я., Остап О. П. Оценка площади и геометрических параметров микрорельефа усталостных изломов методом стереофрактографии // Физ.-хим. механика материалов. – 1987. – **23**, № 6. – С. 67–71.  
(Stepanenko V. A., Yarema S. Ya., and Ostap O. P. Evaluation of the area and geometrical parameters of the microrelief of fatigue fractures by the stereofractographic method // Soviet Materials Science. – 1987. – **23**, № 6. – P. 596–599.)
2. Механика разрушения и прочность материалов. Справ. пос. в 4-х т. / Под. ред. В. В. Панасюка). – К.: Наук. думка, 1988.
3. Богданова О. С., Каминский А. А., Курчаков Е. Е. О зоне предразрушения возле фронта произвольной трещины в твердом теле // Доп. НАН України. – 2017. – **55**, № 5. – С. 25–33.
4. Каминский А. А., Курчаков Е. Е. О зоне предразрушения у вершины трещины нормального отрыва в нелинейно-упругом ортотропном материале // Прикладная механика. – 2019. – **57**, № 1. – С. 26–43.
5. Миркин Л. И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1961. – 864 с.
6. Зазуляк В. А. Определение вязкости разрушения при испытании цилиндрического образца с кольцевой трещиной // Физ.-хим. механика материалов. – 1980. – **16**, № 5. – С. 97–98.  
(Zazulyak V. A. Determining the cyclic fracture toughness when testing a cylindrical sample with a circular crack // Soviet Materials Science. – 1980. – **16**, № 5. – P. 475–477.)
7. Уманский Я. С. Рентгенография металлов. – М.: Металлургиздат, 1960. – 448 с.
8. Партон В. З., Морозов Е. М. Механика упругопластического разрушения. – М.: Наука, 1985. – 502 с.

Одержано 26.02.2019