

УДК 539.4, 539.375

**Б.К. Гануліч**

Луцький національний технічний університет

**РЕНТГЕНОГРАФІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЗОНИ ПЛАСТИЧНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ КВАЗІКРИХКОМУ РУЙНУВАННІ МЕТАЛУ**

*У даній роботі рентгенографічними дослідженнями встановлено товщину пластично деформованого шару при квазікрихкому зламі шляхом поширення попередньо створеної втомної тріщини. Зроблено оцінку залишкових напружень другого роду, на основі чого оцінено питому енергію руйнування. Встановлено, що у даних дослідженнях товщина пластично деформованого шару співпадає з висотою нерівностей поверхні злому.*

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

**Б.К. Гануліч****РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗОНЫ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ КВАЗИХРУПКОМ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛА**

*В предлагаемой работе рентгенографическими исследованиями определено толщину пластически деформированного слоя при квазихрупком изломе путем распространения предварительно созданной усталостной трещины. Произведена оценка остаточных напряжений второго рода, на основе чего оценено удельную энергию разрушения. Установлено, что в рассмотренных исследованиях толщина пластически деформированного слоя равна высоте шероховатостей поверхности излома.*

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

**B.K. Ganulich****XENGRAPHIC DETERMINATION OF PLASTIC DEFORMATION ZONE WITH A QUASIC DRINKING METAL**

*In this work X-ray studies have established the thickness of a plastic-deformed layer at a quasi-crisal fracture through the propagation of a pre-created fatigue crack. An estimation of residual stresses of the second kind is made on the basis of which the specific energy of destruction is estimated. It is established that in these studies the thickness of the plastic-deformed layer coincides with the height of the roughness of the cracking surface.*

*Key words:* quasiclean destruction, X-ray examination, plastic zone, energy of destruction.

Робота виконана у рамках науково-дослідної теми «Створення фізичної моделі тріщиностійкості металів», державна реєстрація №0116U001958.

**Постановка проблеми.** Ідеально крихке чи просто крихке руйнування відбувається без пластичної деформації. Після крихкого руйнування можна заново скласти тіло попередніх розмірів із уламків руйнування без порожнин між ними. Як приклад крихко руйнується скло при кімнатних і нижчих температурах. Квазікрихке руйнування передбачає наявність пластичної зони перед краєм тріщини, поширення якої ї є, власне, руйнування. Квазікрихко руйнуються усі метали і сплави.

При розтязі пластинки з еліптичним вирізом (рис.1) найбільші розтягуючі напруження  $\sigma_{y \max}$  отримуються біля вершин еліпса  $A_1A_2$

$$\sigma_{y \max} = \sigma_0 \left(1 + 2 \frac{a}{b}\right), \quad (1)$$

$a, b$  – півосі еліпса .

Згідно формули (1) напруження біля вершин сплюсненого еліпса ( $\frac{a}{b} \rightarrow \infty$ ) можуть стати як завгодно великими. Відношення  $\sigma_{y \max} / \sigma_0$  називається коефіцієнтом концентрації напружень чи, просто, концентрацією напружень. Якщо ввести у формулу (1) величину  $\rho$ , що називається радіусом кривизни у вершині вирізу, то отримується

$$\sigma_{y \max} = \sigma_0 \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}}\right). \quad (2)$$

Виявляється, що у такому вигляді концентрація напружень має місце не тільки для еліптичних вирізів, але й для отворів будь-якої форми, на контурі яких є точки з малим радіусом кривизни.

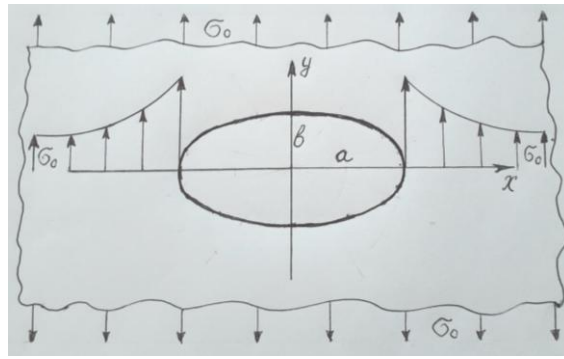


Рис.1. Схема розтягу зразка з еліптичним вирізом

Згідно формули (2) велика концентрація напружень спостерігається там, де різко змінюється геометрія конструкції, деталі і т.д., а також біля вершини подряпини на віконному склі. Звичайно ж, у реальному матеріалі напруження можуть зростати лише до певної величини. У зоні концентрації напружень відбуваються незворотні процеси, які знижують концентрацію напружень (наприклад, у металах такими незворотніми процесами є пластичні деформації).

Якщо відомі сили зчеплення, що зв'язують атоми у твердому кристалічному тілі, можна визначити міцність матеріалу точним розрахунком, тобто визначити так звану теоретичну міцність. Якщо виготовити відповідний зразок із того ж матеріалу, то можна визначити значення міцності експериментально, тобто значення технічної міцності. Виявляється, що технічна (реальна) міцність у десятки і сотні разів менша від теоретичної. Багаточисельними експериментами (А.Ф. Йоффе, А.П. Александров, С.Н. Журков, А.В. Степанов, Ф.Ф. Вітман) показано, що така різюча невідповідність між теоретичною і реальною міцністю матеріалів пояснюється наявністю у реальних матеріалах різноманітних дефектів – концентраторів напружень, найнебезпечніші з яких – тріщини.

Напруження біля вершини тріщини (рис.2) визначаються відомими [1,2] формулами:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma \sqrt{\frac{l}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_y &= \sigma \sqrt{\frac{l}{2r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \tau_{xy} &= \sigma \sqrt{\frac{l}{2r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\quad (3)$$

$\sigma_z = 0$  – плоско напружений стан,

$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y)$  – плоско деформований стан.

Рівняння (3) можна переписати у вигляді

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta), \text{ де } K_I = \sigma \sqrt{\pi l} \quad (4)$$

Коефіцієнт  $K_I$  називається коефіцієнтом інтенсивності напружень (КІН), де індекс I означає I тип руйнування: поширення тріщини нормального відриву. Якщо відомий КІН, то поле напружень біля вершини тріщини є повністю визначеним. Коли напруження (відповідно деформації) біля вершини тріщини досягають критичних значень, відбувається 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.

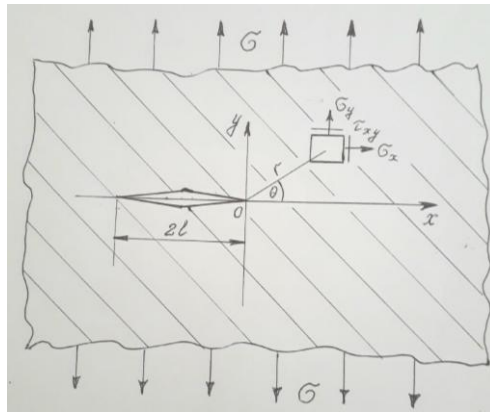


Рис.2. Тріщина у нескінченній пластині

Із (4) слідує, що напруження біля вершини тріщини сингулярні (нескінченно великі). На практиці матеріали, зокрема метали, мають межу текучості, при напруженнях, більших від цієї межі, матеріали пластично деформуються. Таким чином, у металах в околі вершини тріщини завжди є область (зона), де виникають пластичні деформації. Пластичні деформації є визначальним фактором зменшення концентрації напружень. Процеси, що відбуваються у пластичних зонах, поряд з теоретичною, максимально можливою міцністю матеріалу, зумовлюють його тріщиностійкість. Отже, дослідження зон пластичних деформацій і поверхонь зломів є актуальним.

**Результати досліджень.** Рентгенографічний аналіз поверхні руйнування зразків здійснювали на приладі УРС-50 ИМ у  $\text{Cr } K_{\alpha}$  – випромінюванні. Величину напружень II-го роду визначали по розширенню лінії  $[211] \alpha - \text{Fe}$  згідно методики, що описана у роботі [3].

Для досліджень були взяті поверхні зломів зразків, початкові розміри яких  $3 \times 3 \times 20$  см, з V-подібним концентратором напружень та попередньо створеною втомною тріщиною довжини  $2,5 \dots 3$  мм (глибина концентратора 2мм, довжина тріщини  $0,5 \dots 1$ мм). Зразки сталі зруйновані за схемою трьох точкового згину. Механічні характеристики і визначене значення тріщиностійкості на Табл.1

Таблиця 1

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

Результати рентгенографічних досліджень представлені на рис.3.

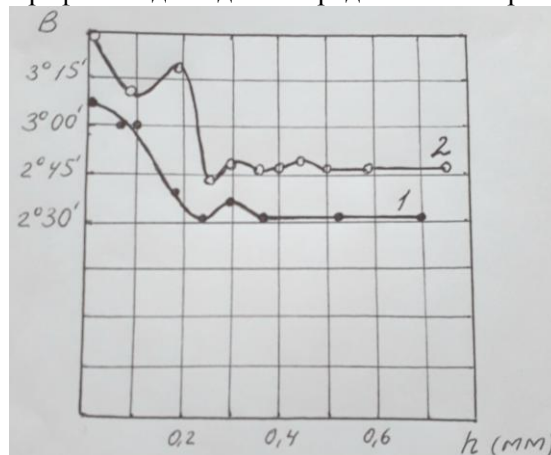


Рис.3. Результати рентгенографічного дослідження поверхні квазікрихкого злому сталей (див.табл.1).

$B$  – ширина (на половині висоти) дифракційної лінії [211]  $\alpha - Fe$  у  $Cr - K_{\alpha}$  – випромінюванні,  $h$  – глибина електрохімічного стравлювання,  $\Delta d / d = \Delta \theta / \operatorname{tg} \theta$ ,  $d$  – міжплощинна віддаль,  $\operatorname{tg} \theta = \operatorname{tg} 78^{\circ} 06' = 4.74$ ,  $\Delta \theta = B - b$ , для сталі 40X  $b = 2^{\circ} 32'$ , для сталі 45ХН2МФА  $b = 2^{\circ} 47'$ . Глибина шару, з якого отримується дифракційна лінія при заданих умовах дослідження, складає 0,08мм [3].

За результатами рентгенографічних досліджень можна отримати наступні висновки:

1. В обох досліджених квазікрихких зломах область пластичних деформацій поширюється у шарі, товщина якого рівна висоті характерних виступів поверхні злому (див. рис.4) і рівна  $\approx 0,35\text{мм}$ .

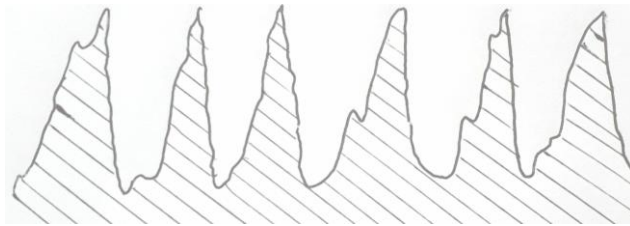


Рис. 4. Профілограми поверхні злому сталей (табл.1)

2. Найбільші спостережувані значення залишкових напружень, що обчислювали за формулою  $\pm \sigma = E * \Delta d / d$ , ( $E = 2,1 * 10^5 \text{ МПа}$ ) складають 558МПа і 493 МПа.

3. Приблизне значення [4] прихованої енергії деформації, обчислене за формулою

$$W = \frac{3E}{2(1 + 2\mu^2)} \left( \frac{\Delta d}{d} \right)^2 \quad (6)$$

$$W_{1\max} = 1294078 \text{ Дж} / \text{м}^3, \quad W_{2\max} = 1342020 \text{ Дж} / \text{м}^3 \quad (\mu = 0,28)$$

4. Поверхнева енергія руйнування  $\gamma_1 = W_1 h_1 = 1294078 \text{ Дж} / \text{м}^3 * 3 * 10^{-4} \text{ м} = 388 \text{ Дж} / \text{м}^2$ ,  
 $\gamma_2 = W_2 h_2 = 1342020 \text{ Дж} / \text{м}^3 * 4 * 10^{-4} \text{ м} = 537 \text{ Дж} / \text{м}^2$ .

5. Згідно формули [5]

$$K_1 = \sqrt{\frac{E\gamma}{1 - \mu^2}} \quad (7)$$

обчислено значення тріщиностійкості  $K_1 = 9,4 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  для зразка 1 та  $K_1 = 11,1 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$  для зразка 2, що у 4,9 і 5,9 рази менше відповідно від отриманих (див.табл.1).

#### Література.

1. Разрушение (ред. Г.Либовиц), т.1-7. - М: Мир, 1973-1977.
2. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие в четырех томах (под. ред. В.В. Панасюка), т.1-4. - Киев: Наукова думка, 1988.
3. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов. - М.: Гос.изд-во физ.-мат. литературы, 1961. - 863с.
4. Уманский Я.С. Ренгенография металлов. - М.: Металлургиздат, 1960. - 448с.
5. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. - М.: Наука, 1985. - 502с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2018