Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Wydziałowy Zakład Wytrzymałości Materiałów W10/Z1

Raport Wydziałowego Zakładu Wytrzymałości Materiałów, PWr 2006
Seria U nr 1/2006

Na prawach rękopisu

LABORATORIUM WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW

Wyznaczanie odporności materiałów na pękanie

Materiały pomocnicze dla studentów do ćwiczeń 14 i 15

Opracował: Grzegorz CHRUŚCIELSKI

Wrocław, 2006

Spis treści

I Wyznaczanie odporności materiałów na pękanie - próba K_{Ic} 3

1. Przedmiot ćwiczenia 3
2. Cel i zakres ćwiczenia 3
3. Znaczenie i sposoby określania odporności materiału na pękanie.....3
4. Wyznaczanie odporności na pękanie na podstawie liniowo-sprężystej mechaniki pękania 4
5. Warunki przeprowadzenia próby przy określaniu krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} 7
6. Ogólne wytyczne do wyznaczania K_{IC} na podstawie badań laboratoryjnych 9

II Wyznaczanie odporności materiałów na pękanie - próba COD 12

1. Przedmiot ćwiczenia 12
2. Cel i zakres ćwiczenia 12
3. Zastosowanie nieliniowo-sprężystej mechaniki pękania.....12
4. Próba badania odporności na pękanie oparta na nieliniowo-sprężystej mechanice pękania (próba *COD*) 14

Literatura 17

I Wyznaczanie odporności materiałów na pękanie – próba K_{Ic}

1. Przedmiot ćwiczenia

Przedmiotem ćwiczenia są metody doświadczalne stosowane w liniowej mechanice pękania, to jest operujące miarą ciągliwości materiału w postaci K_{IC}. Ćwiczenie dotyczy materiałów, które są kruche, a próbki spełniają normy E399.

2. Cel i zakres ćwiczenia

Ćwiczenie obejmuje badanie próbek z karbem, w dnie którego wytworzone zostało wstępne, ostro zakończone pękniecie zmęczeniowe.

3. Znaczenie i sposoby określania odporności materiału na pękanie

Odporność na pękanie jest niezwykle istotnym parametrem określającym własności danego materiału, a zwłaszcza materiału konstrukcyjnego. Do oceny przydatności danego materiału nie wystarczają bowiem stałe materiałowe wyznaczane w ścisłej próbie rozciągania czy ściskania, zdarza się bowiem niejednokrotnie, że materiały o wysokich własnościach mechanicznych (o dużej wytrzymałości i ulepszonej cieplnie plastyczności) mają niewielką odporność na pękanie. W takim przypadku materiały takie mają ograniczoną przydatność jako tworzywo konstrukcyjne, szczególnie w przypadkach występowania w danej konstrukcji obciążeń zmęczeniowych.

Odporność na pękanie może być określana na trzy różne sposoby:

- poprzez przeprowadzanie typowych prób technologicznych (próba udarności, próba kafarowa, wyznaczanie krzywej energii łamania itp.) – są to jedynie badania jakościowe, pozwalające przede wszystkim na określenie, czy materiał nie znajduje się w stanie kruchym (przy występowaniu tzw. progu kruchości w obniżonych temperaturach), a nie dające możliwości ustalenia związku między wynikami badań a poziomem naprężeń inicjujących pękanie;
- poprzez badania próbek będących modelami określonych węzłów konstrukcyjnych i istniejących tam warunków obciążenia – próby te wymagają wykonywania próbek o dużych gabarytach i stosowania specjalnych dużych maszyn wytrzymałościowych, co znacznie podnosi koszty badań;
- poprzez wykonywanie badań opartych na zasadach mechaniki pękania – poprzez badanie stosunkowo małych, znormalizowanych próbek pozwalają one na określanie warunków inicjacji pęknięć przy danej wielkości wady i przy danym poziomie naprężeń.

Mechanika pękania zajmuje się więc rozpatrywaniem zachowania się pęknięcia (wady) w materiale pod wpływem określonych obciążeń. Za pomocą mechaniki pękania określa się takie charakterystyczne parametry odporności na pękanie jak G_C, G_{IC}, K_C, K_{IC}, COD oraz całkę J. W zależności od udziału odkształceń plastycznych w pochłanianiu włożonej energii mechanikę pękania podzielić można na dwie zasadnicze grupy:

- mechanikę pękania liniowo sprężystą – rozpatrującą przypadki, w których propagacja pęknięcia odbywa się przy bardzo małym odkształceniu plastycznym w obszarze wierzchołka szczeliny,
- mechanikę pękania nieliniowo sprężystą – dotyczącą przypadków, w których odkształcenia plastyczne poprzedzające rozwój pęknięcia przekraczają wielkość określoną warunkami linowo-sprężystej mechaniki pękania.

4. Wyznaczanie odporności na pękanie na podstawie liniowo-sprężystej mechaniki pękania

Mechanika pękania jest dziedziną zajmującą się opisem zjawisk występujących w materiale w otoczeniu ostrego karbu, czyli przy wierzchołku szczeliny. Zjawiska te można sprowadzić do trzech głównych zagadnień [1]:

- koncentracji naprężeń,
- intensywności naprężeń
- odporności materiału na inicjację pęknięcia w wierzchołku szczeliny.

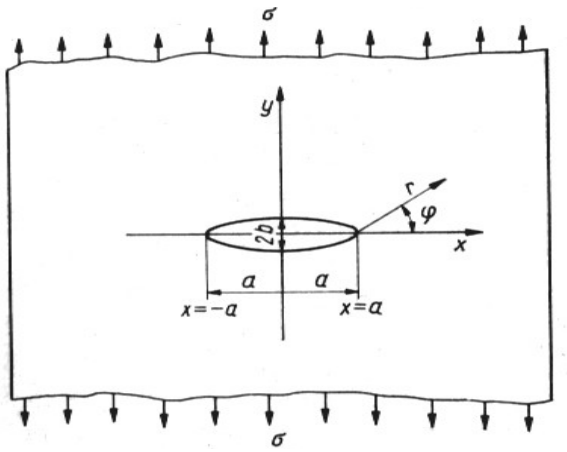
Współczynnik koncentracji naprężeń zdefiniowany jest jako stosunek naprężenia wywołanego w dnie karbu σ_{max} do naprężenia nominalnego:

$$C = \frac{\sigma_{max}}{\sigma} \tag{1}$$

Jeżeli rozpatruje się szczelinę w postaci otworu eliptycznego o dużej osi 2a i małej osi 2b (rys. 1), to współczynnik koncentracji naprężeń wynosi:

$$C = 1 + 2\frac{a}{b} \qquad \text{lub} \qquad C = 1 + \frac{a}{\rho} \tag{2}$$

gdzie ρ – promień krzywizny na końcach elipsy



Rys. 1. Rozwój szczeliny w materiale płyty z wewnętrznym karbem w kształcie elipsy – stan przed rozpoczęciem rozwoju pęknięcia [1].

Jeżeli przyjąć dla wymiarów osi elipsy skrajne wartości, to otrzymamy:

- dla otworu kołowego (a = b): C = 3,
- dla nieskończenie małych promieni krzywizny: $C \rightarrow \infty$.

W tym drugim przypadku, gdy współczynnik C dąży do nieskończoności, wyznaczanie go traci swój sens. Dlatego też wprowadzono tzw. współczynnik intensywności naprężeń, który zachowuje wartość skończoną, nawet gdy $C \rightarrow \infty$. Współczynnik ten oznaczany jest przez K i opisuje go wzór:

$$K = \lim_{\sigma \to 0} \frac{C}{2} \sigma_y \sqrt{\pi \rho} \ , \tag{3}$$

a dla tarczy poddanej jednoosiowemu rozciąganiu wzdłuż osi prostopadłej do powierzchni szczeliny (jak na rys. 1a) określany jest jako granica, do której dąży iloczyn naprężenia normalnego do powierzchni pęknięcia i pierwiastka kwadratowego z odległości mierzonej od czoła szczeliny pomnożonej przez czynnik 2π:

$$K = \lim_{x \to a} \sigma_y \sqrt{2\pi (x - a)} \tag{4}$$

Ponieważ naprężenie normalne σ_y dla warunków jak na rys. 1a może być przedstawione za pomocą wzoru:

$$\sigma_y = \frac{\sigma x}{\sqrt{x^2 - a^2}} \qquad \text{dla} \quad y = 0 \ \text{i} \ |x| \geq a \tag{5}$$

wzór na współczynnik intensywności naprężeń otrzymać można w postaci:

$$K = \lim_{x \to a} \frac{\sigma x \sqrt{2\pi (x - a)}}{\sqrt{x^2 - a^2}} = \sigma \sqrt{\pi a} \tag{6}$$

Współczynnik intensywności naprężeń zależy więc od rozmiarów szczeliny i od przyłożonego obciążenia, a inaczej mówiąc - od konfiguracji szczelina-obciążenie zewnętrzne i opisuje pole naprężeń (a także pole przemieszczeń) w bezpośrednim sąsiedztwie frontu szczeliny.

W warunkach gdy naprężenie nominalne σ przy danej długości szczeliny a osiągnie wartość, przy której następuje inicjacja rozwoju długości szczeliny (inicjacja pękania), współczynnik intensywności naprężeń osiąga wartość krytyczną i jest określany symbolem K_C. Ma on szczególne znaczenie dla badania materiałów, gdyż jest on właśnie miarą odporności materiału na pękanie [1].

Krytyczna długość pęknięcia dla danego naprężenia wyznaczona być może za pomocą liniowo-sprężystej mechaniki pękania na podstawie opracowanej przez A.A. Griffitha (1921) teorii, że pęknięcie w kruchym materiale na dnie ostrego karbu zaczyna się rozwijać wówczas, i energia potrzebna na tworzenie się nowych powierzchni pęknięcia U_o jest mniejsza od wyzwolonej energii sprężystej U_e. Ponieważ dla płaskiego stanu odkształceń energie te wyrazić można wzorami (rys. 1):

$$\Delta U_e = (1 - \nu^2) \frac{\pi \sigma^2 a^2}{E}, \tag{7}$$

$$U_o = 4a\gamma, \tag{8}$$

to krytyczna długość pęknięcia a_c dla danego naprężenia będzie miała wartość

$$2\,a_c = (1 - \nu^2) \frac{4\,E\,\gamma}{\pi \sigma^2} \tag{9}$$

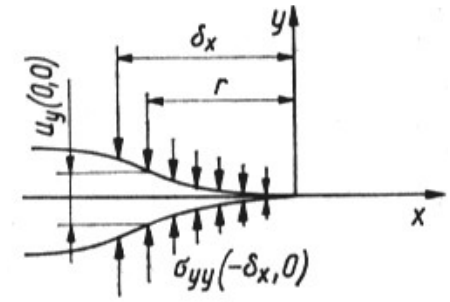
gdzie ν – liczba Poissona, γ – energia powierzchniowa właściwa.

Aby zastosować teorię Griffitha do materiałów konstrukcyjnych, należy uwzględnić, że przed pojawieniem się pęknięcia na dnie karbu występuje w obszarze tego karbu odkształcenie plastyczne. Co więcej, okazuje się, że wielkość energii rozpraszanej w wyniku odkształcenia plastycznego (δP) jest dużo większa od przyrostu energii powierzchniowej, której wpływ można w rozważaniach pominąć. W takim razie, aby doszło inicjacji pęknięcia, spełniony być musi warunek energetyczny w postaci:

$$\delta U_e \geq \delta P \tag{10}$$

Wyrażona w tym równaniu energia włożona na rozwój pęknięcia odniesiona do jednostki długości przyrostu pęknięcia określona jest ogólnie jako prędkość uwalniania energii lub też siła rozwijająca pęknięcie na określoną długość i oznaczana jest symbolem G.

Aby opisać wszystkie typy pękania w badanych materiałach wygodniej jest zamiast energii włożonej na rozwój pęknięcia zastosować pole naprężeń występujące wokół wierzchołka inicjowanego pęknięcia, jak to zaproponował Irwin [2]. Pole to można wyobrazić sobie jako odwrócenie zjawiska pękania, tzn. przyłożenie na odcinku powstałego pęknięcia określonego naprężenia s_{yy}, potrzebnego do zamknięcia tej szczeliny (rys. 2).



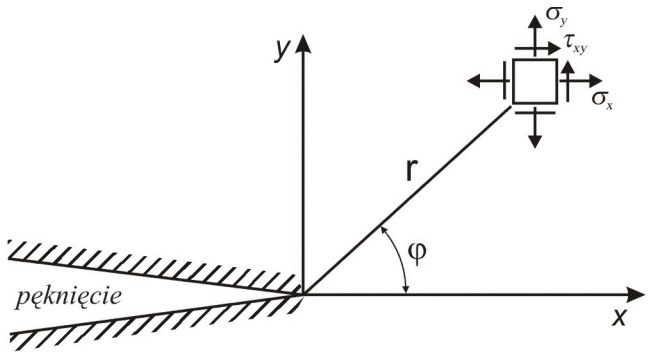
Rys. 2. Schemat zamknięcia zainicjowanej szczeliny na długość δ_x przy pomocy naprężeń ściskających [1].

Jeżeli przyjmiemy długość szczeliny jako δ_x, to przyrost energii wyrazi wzór:

$$\delta U_e = G\delta_x = \int_0^{\delta x} u_y(0,0)\,\sigma_{yy}(-\delta_x,0)\,\delta x \tag{11}$$

gdzie u_y (0,0) – przemieszczenie potrzebne do zamknięcia pęknięcia na długości δ_x.

Aby wyliczyć wartość *G* należy więc znać przemieszczenie u_y oraz naprężenie σ_{yy}. W tym celu należy poddać analizie pole naprężeń w najbliższym otoczeniu końca pęknięcia (rys. 3).



Rys. 3 Rozkład naprężeń w pobliżu dna karbu (w odległości *r* od wierzchołka pęknięcia) [1].

Pole naprężeń w pobliżu dna pęknięcia może być opisane w układzie biegunowym następującymi równaniami:

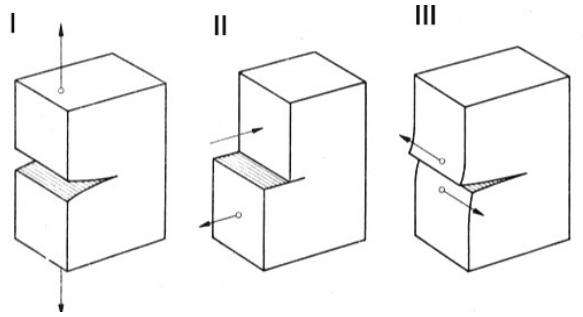
$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\pi}}\cos\frac{\varphi}{2}\left(1-\sin\frac{\varphi}{2}\sin\frac{3\varphi}{2}\right)\\
\sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\pi}}\cos\frac{\varphi}{2}\left(1+\sin\frac{\varphi}{2}\sin\frac{3\varphi}{2}\right)\\
\tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi\pi}}\sin\frac{\varphi}{2}\cos\frac{\varphi}{2}\cos\frac{3\varphi}{2}
\end{aligned} \tag{12}$$

Natomiast przemieszczenie dla płaskiego stanu odkształceń wyrażają równania:

$$\begin{aligned}
u_x &= \frac{K_I}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\cos\frac{\varphi}{2}\left(1-2\nu+\sin^2\frac{\varphi}{2}\right)\\
u_y &= \frac{K_I}{G}\sqrt{\frac{r}{2\pi}}\sin\frac{\varphi}{2}\left(2-2\nu-\cos^2\frac{\varphi}{2}\right)
\end{aligned} \tag{13}$$

gdzie G – moduł Kirchoffa, K_I – współczynnik intensywności naprężeń.

W wyrażeniach tych występuje współczynnik intensywności naprężeń K_I. Indeks I oznacza tu pierwszy schemat odkształcania wg Irwina (rys. 4).



Rys.4. Schematy pękania materiału w zależności od kierunku działania obciążenia (wg Irwina) [1].

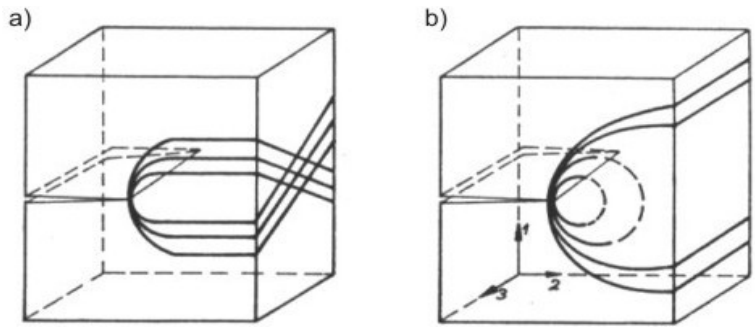
Między współczynnikiem intensywności naprężeń *K* a prędkością uwalniania energii *G* istnieje w płaskim stanie odkształceń następująca zależność:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E(1-\nu^2)} \tag{14}$$

Ponieważ zarówno prędkość uwalniania energii *G*, jak i współczynnik intensywności naprężeń *K* charakteryzują własności materiału, to ich wartości krytyczne (które odpowiadają momentowi inicjacji pękania) można traktować jako stałe materiałowe, określające odporność materiału na pękanie. Jednostką prędkości uwalniania energii *G* jest przy tym jednostka energii [J], a jednostką współczynnika intensywności naprężeń *K* – [MPa · mm^2].

5. Warunki przeprowadzenia próby przy określaniu krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{IC}.

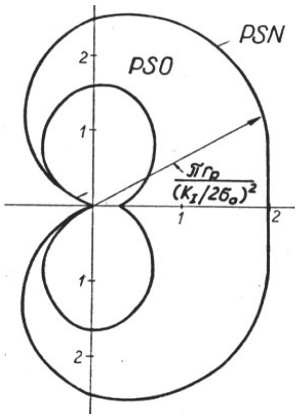
Aby założenia liniowo-sprężystej mechaniki pękania zostały spełnione, odkształcenia plastyczne występujące na dnie karbu przed inicjacją pękania powinny być wystarczająca małe (w przeciwnym przypadku znaczna część włożonej energii pochłaniana jest przez odkształcenie plastyczne, a nie tylko na pokonywanie energii sprężystej materiału). Jak się okazuje, wielkość tej strefy jest różna dla płaskiego stanu naprężeń (PSN), gdzie obszar plastyczny przyjmuje kształt pasma o grubości w przybliżeniu równej grubości elementu (rys.5a), i dla płaskiego stanu odkształceń (PSO), gdzie pojawia się trzecia składowa naprężenia i płaszczyzna poślizgu jest nachylona pod kątem 45º do osi 1 i 2 (rys.5b).



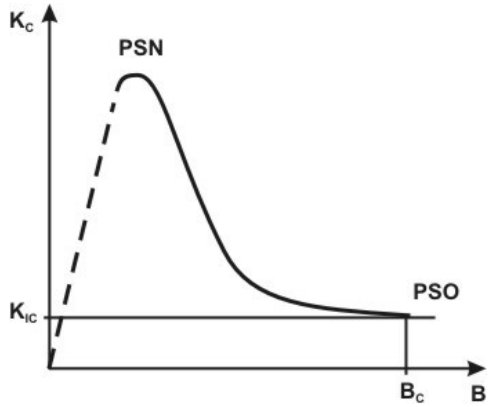
Rys. 5. Układ linii płynięcia w pobliżu wierzchołka szczeliny: a) dla warunków PSN, b) dla warunków PSO [2].

W konsekwencji odmiennego rozkładu linii płynięcia strefa odkształceń plastycznych w przypadku warunków PSN jest około trzy razy większa niż dla warunków PSO (rys. 6), a promień tej strefy można wg Mc Clintocka i Irwina obliczyć ze wzorów:

$$r_o = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \text{ - w PSN,} \qquad r_o = \frac{1}{6\pi}\left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \text{ - w PSO} \tag{15}$$



Rys. 6. Obszary odkształceń plastycznych w warunkach PSN i PSO [2].



Rys. 7. Zmiana odporności na pękanie (K_C) wraz z grubością próbki (B) [2].

Pojawienie się w wierzchołkach szczeliny lokalnych odkształceń plastycznych powoduje ponadto zmianę sztywności elementu i staje się on bardziej podatny niż to wynika z rozwiązania opartego na modelu ciała idealnie sprężystego[1]. Dlatego też rozwiązania mechaniki liniowo-sprężystej stosuje się tylko dla stanów PSO, w którym dopiero wyznaczyć można wartość krytyczną współczynnika intensywności naprężeń K_C. A ponieważ uzyskanie takiego stanu zależy od grubości danego elementu (rys.7) i długości istniejącego w nim pęknięcia, warunkiem prawidłowego przeprowadzenia próby badania odporności na pękanie jest zachowanie następujących warunków:

$$B \geq 2{,}5\left(\frac{K_{IC}}{R_e}\right)^2 \tag{16}$$

$$a \geq 2{,}5\left(\frac{K_{IC}}{R_e}\right)^2 \tag{17}$$

gdzie: B – grubość próbki, a – długość pęknięcia, R_e – granica plastyczności.

Współczynnik intensywności naprężeń jest również zależny od kształtu i wymiarów próbki. Dlatego też w badaniach K_{IC} stosuje się współczynnik poprawkowy f (a/W):

$$K_{IC} = \sigma\sqrt{\pi a}\cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \tag{18}$$

Zachowanie powyższych warunków pozwala na wyznaczenie dla dowolnego materiału maksymalnej, ważnej z punktu widzenia liniowo-sprężystej mechaniki pękania, wartości K_{IC}, będącej miarą odporności tego materiału na pękanie.

Znając wartość K_{IC} określić z kolei można dla danego materiału i przyjętego naprężenia dopuszczalną (krytyczną) wielkość istniejących w nim pęknięć (wad), lub też, znając wielkości obecnych w materiale pęknięć (które w praktyce występują w każdej konstrukcji), określa się maksymalną wartość naprężeń, które dana konstrukcja może bezpiecznie przenieść. Oczywiście warunek braku odkształceń plastycznych przy przeprowadzanej próbie

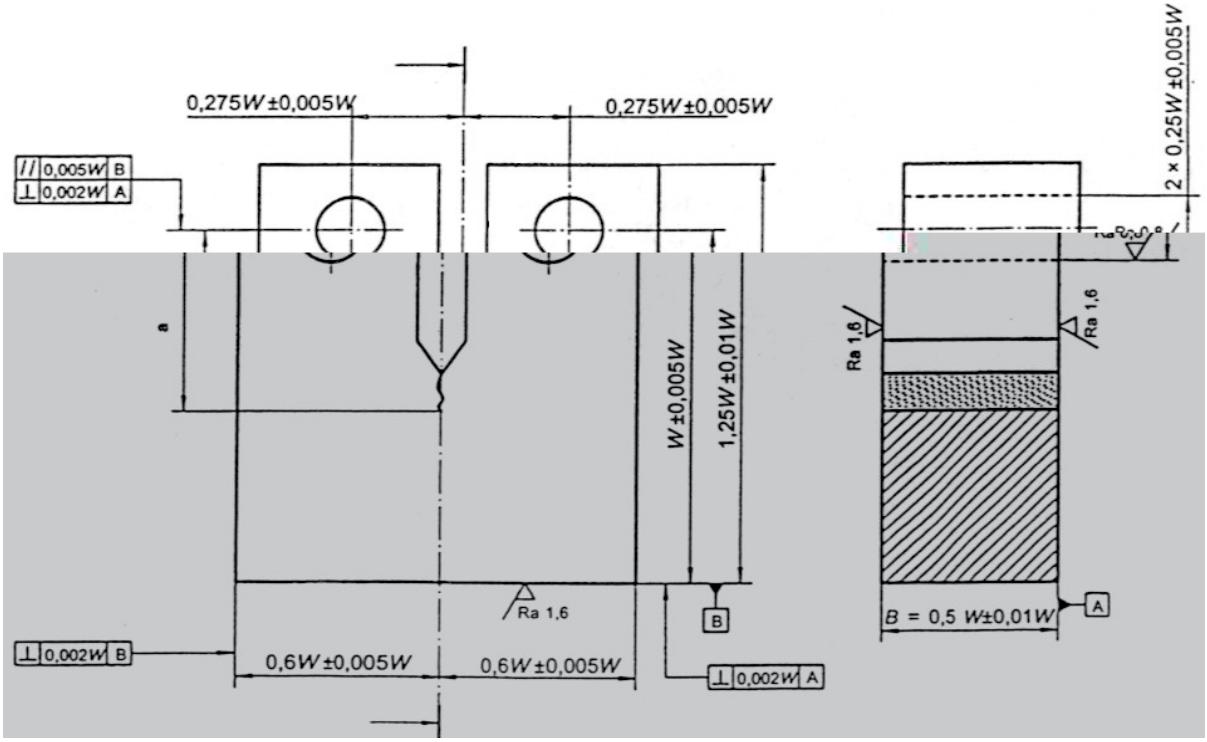
[1] dla małych odkształceń plastycznych istnieje jeszcze możliwość ich uwzględnienia poprzez wprowadzenie w miejsce szczeliny rzeczywistej szczelinę zastępczą o większej długości, tak dobranej, aby podatność elementu z materiału sprężystego ze szczeliną zastępczą była równa podatności materiału rzeczywistego zawierającego szczeliną o długości *a* [2].

ogranicza stosowalność próby K_{IC} do materiałów o niskich własnościach plastycznych (zwanych potocznie materiałami kruchymi),

6. Ogólne wytyczne do wyznaczania K_{IC} na podstawie badań laboratoryjnych

Pomiar wartości K_{IC} w warunkach laboratoryjnych przeprowadza się na podstawie normy PN-EN ISO 12737.

Norma ta przewiduje pomiar odporności na pękanie za pomocą próbek zginanych trójpunktowo lub próbek zwartych (typu *compact*). Na ćwiczeniu stosowane będą próbki zwarte, w postaci płyty z jednostronnym karbem i inicjującą szczeliną zmęczeniową, o wymiarach dobranych według rys. 8.

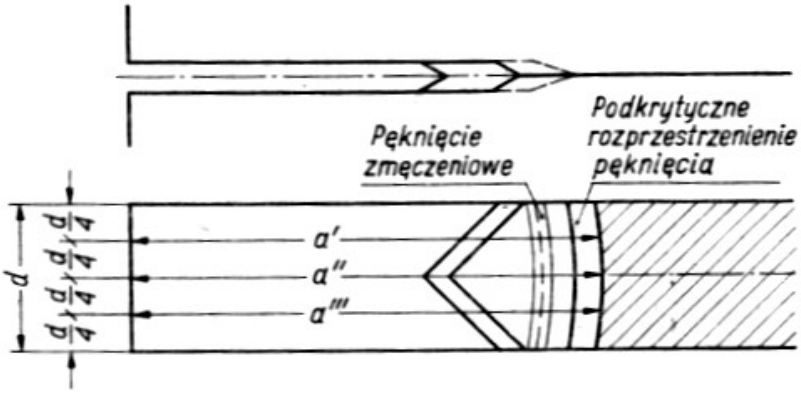


Rys. 8. Schemat próbki typu *compact* [6].

Wymiary próbki można dobierać dowolnie, z zachowaniem podanych na rysunku zależności wymiarowych. Najbardziej istotnym wymiarem jest tzw. czynna szerokość próbki *W*, która nominalnie powinna być równa podwójnej grubości *B*. Długość szczeliny *a* spełniać powinna z kolei zależność:

$$a = 0{,}45 \div 0{,}55\ \mathrm{W} \tag{19}$$

Długość *a* może jednak być precyzyjnie zmierzona dopiero po złamaniu próbki. Pomiaru dokonuje się wówczas z dokładnością 0,5% w trzech pozycjach: pośrodku czoła pęknięcia i z dwóch stron po bokach frontu pęknięcia, w równych wzajemnych odległościach (rys.9).



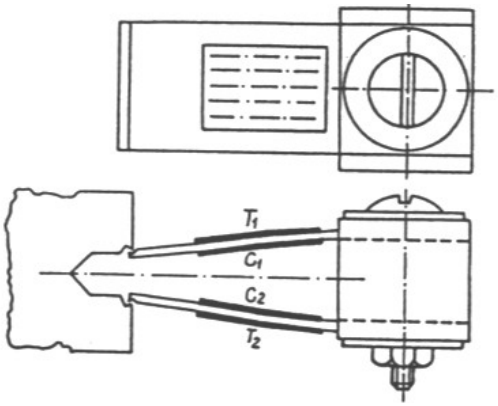
Rys.9. Miejsca pomiaru wielkości karbu (z uwzględnieniem karbu zmęczeniowego) po złamaniu próbki [1].

Aby wyniki badań były zgodne z teorią liniowo-sprężystej mechaniki pękania, spełnione powinny być ponadto warunki (16) i (17). Ponieważ jednak przed wykonaniem próby nie jest znana wartość K_{IC}, dlatego też przy doborze grubości próbki korzysta się z tabeli określającej przybliżoną wartość *B* w zależności od własności mechanicznych badanego materiału (tab.1).

Tab. 1 Orientacyjna grubość próbki w zależności od stosunku R_e/E [2].

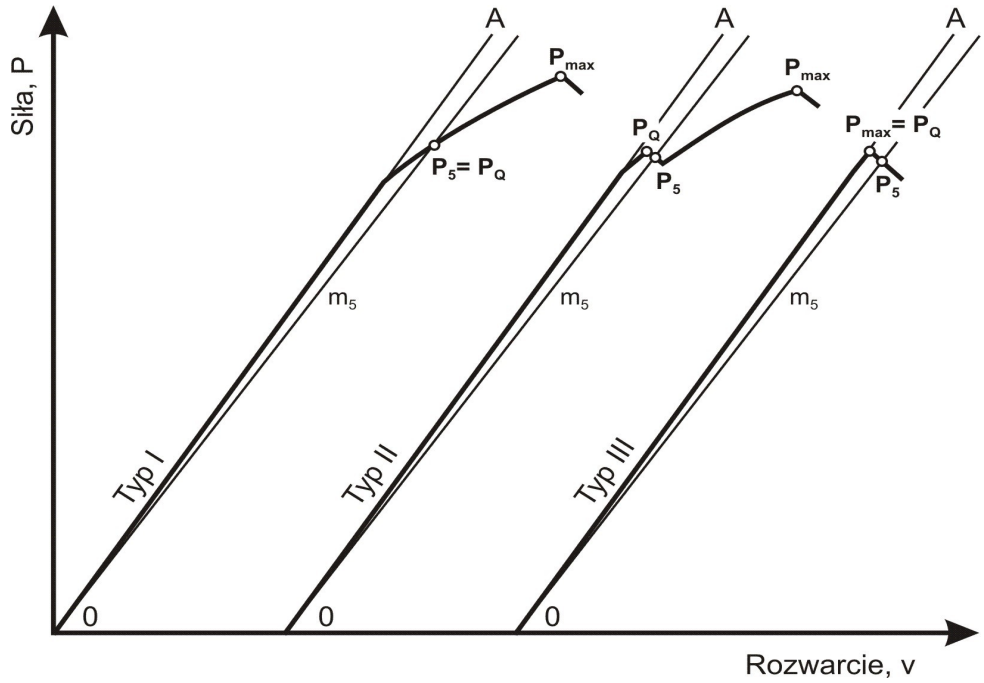
$R_e/E \times 10^3$	B [mm]	$R_e/E \times 10^3$	B [mm]
5,0 – 5,7	75	7,1 – 7,5	32
5,7 – 6,2	63	7,5 – 8,0	25
6,2 – 6,5	50	8,0 – 8,5	20
6,5 – 6,8	44	8,5 – 10,0	12
6,8 – 7,1	38	pow. 10	7

Podczas przeprowadzania samej próby wykonuje się rozrywanie próbki na maszynie wytrzymałościowej za pomocą uchwytów ze sworzniami umieszczonymi w otworach próbki. Dokonuje się przy tym rejestracji siły obciążającej *P* w funkcji rozwarcia szczeliny *v*. W tym celu w krawędzie szczeliny wpina się tensometryczny czujnik przemieszczeń, składający się z oddzielonych kostką dystansową dwóch sprężystych beleczek z naklejonymi czujnikami tensometrycznymi (rys.10). Czujnik powinien mieć liniową charakterystykę dla 5-6 mm.



Rys. 10. Czujnik tensometryczny do pomiaru rozwarcia krawędzi próbki [1].

Uzyskany wykres siły w funkcji rozwarcia szczeliny może odpowiadać jednemu z trzech typów wykresów, przedstawionych na rys. 11.



Rys. 11. Typowe wykresy siła-rozwarcie przy próbie K_{IC} [6].

Na podstawie otrzymanego wykresu P = f(v) określa się wartość siły P_Q stosując prostą pomocniczą m_5, nachyloną w stosunku do osi 0-v pod kątem, którego tangens jest o 5% mniejszy od tangensa kąta nachylenia liniowej początkowej części wykresu (prostej OA). Punkt przecięcia się prostej m_5 z wykresem wyznacza siłę P_5. Wartością siły P_Q jest wówczas:

- dla typu I: $P_Q = P_5$,
- dla typu II i III: P_Q stanowi wartość siły maksymalnej, poprzedzającej siłę P_5.

Następnie oblicza się wartość stosunku P_{max}/P_Q, gdzie P_{max} jest maksimum uzyskanej siły. Jeżeli przy przeprowadzeniu próby spełnione będą warunki:

$$\frac{P_{max}}{P_Q} \leq 1{,}1, \tag{20}$$

$$(W - a) \geq 2{,}5\left(\frac{K_{IC}}{R_e}\right)^2 \tag{21}$$

oraz warunki (16), (17), to można przyjąć, że współczynnik intensywności naprężeń w badanej próbce (K_Q) może być uznany za wartość krytyczną (K_{IC}) i oblicza się go zgodnie ze wzorem (18), dobierając wartość współczynnika f (*a*/W) według tabeli 2 (przy wprowadzeniu we wzorze (18) siły *P* w [kN], a wymiarów *B* i *W* w [cm], jednostką *K* będzie [MPa · $m^{1/2}$]).

Tab. 2. Wartość współczynnika f (*a*/W) w funkcji (*a*/W) [2].

***a*/W**	**f (*a*/W)**	***a*/W**	**f (*a*/W)**	***a*/W**	**f (*a*/W)**	***a*/W**	**f (*a*/W)**
0,450	8,34	0,480	9,09	0,510	9,96	0,540	10,98
0,455	8,46	0,485	9,23	0,515	10,12	0,545	11,17
0,460	8,58	0,490	9,37	0,520	10,29	0,550	11,36
0,465	8,70	0,495	9,51	0,525	10,45		
0,470	8,83	0,500	9,66	0,530	10,65		
0,475	8,96	0,505	9,81	0,535	10,80		

Jeżeli jednak któryś z wymienionych warunków nie jest spełniony, uzyskana wartość K_Q nie może być uznana za prawidłową wartość K_{IC}.

II Wyznaczanie odporności materiałów na pękanie – próba COD

1. Przedmiot ćwiczenia

Przedmiotem ćwiczenia są metody doświadczalne stosowane w nieliniowej mechanice pękania, to jest operujące miarą odporności na pękanie w postaci COD. Ćwiczenie dotyczy materiałów zbyt plastycznych, nie spełniających kryteriów liniowej mechaniki pękania.

2. Cel i zakres ćwiczenia

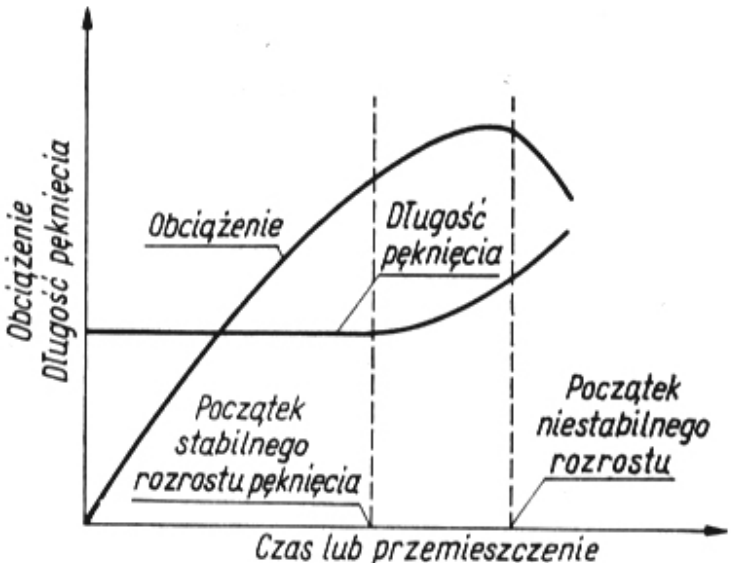
Celem ćwiczenia jest opanowanie procedury pomiaru rozwarcia wierzchołka pęknięcia dla trójpunktowo zginanej próbki z karbem, w dnie którego wytworzone zostało wstępne, ostro zakończone pęknięcie zmęczeniowe.

3. Zastosowanie nieliniowo-sprężystej mechaniki pękania

Mechanika nieliniowo-sprężysta pozwala na wyznaczanie odporności na pękanie materiałów plastycznych, a więc o właściwościach nie pozwalających na stosowanie liniowej mechaniki pękania. Materiały takie stanowią dużą grupę materiałów konstrukcyjnych – są to wszystkie materiały o normalnej i średniej wytrzymałości, stosowane na zbiorniki ciśnieniowe, mosty, statki, rurociągi itp. o stosunkowo dużych grubościach.

Zjawisko pękania materiału w warunkach nieliniowo-sprężystych jest o wiele bardziej złożone niż w warunkach liniowo-sprężystych. Można przyjąć, że pękanie takie zachodzi w trzech etapach (rys. 1) [1]:

- inicjacja pęknięcia o charakterze stabilnym,
- stabilny rozwój pęknięcia,
- przejście pęknięcia w stan niestabilny.



Rys. 1. Etapy rozwoju pęknięcia w funkcji obciążenia próbki [1].

Zasadnicza trudność przy nieliniowo-sprężystej mechanice pękania polega na niemożności rozdzielenia energii rozproszonej w czasie inicjacji i rozwoju stabilnego pęknięcia na dwie zasadnicze składowe: energię pochłoniętą na rozwój pęknięcia i energię zużytą na rozwój odkształcenia plastycznego. Rozdzielenie takie jest jednak konieczne, gdyż tylko energia rozwoju pęknięcia jest stałą materiałową. Energia odkształcenia plastycznego jest natomiast zależna od geometrii próbki i warunków obciążenia.

Wśród metod badania odporności na pękanie, wypracowanych w ramach nieliniowej mechaniki pękania, wymienić można:

- kryterium rozwarcia karbu (próba COD),
- kryterium krzywej *R*,
- całkę Ricea'a (całkę *J*).

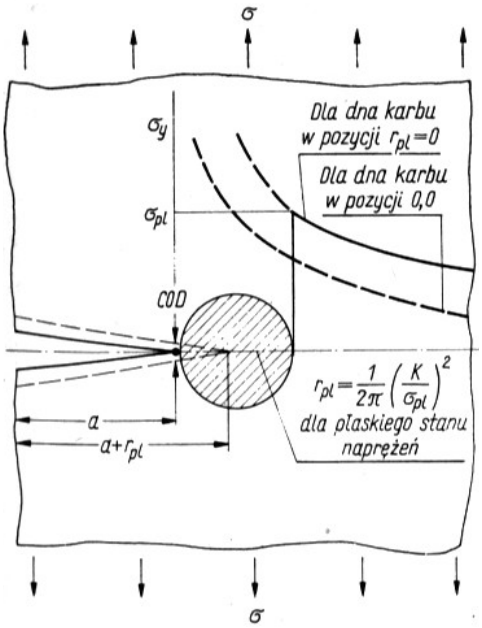
Przeprowadzane na zajęciach ćwiczenie dotyczy realizacji próby COD (ang. *crack opening displacement*). Próba ta stanowi właściwie rozszerzenie liniowo-sprężystej mechaniki pękania i opiera się na założeniu, że w przypadku małych odkształceń na dnie karbu mechanikę liniową stosować można również po włączeniu obszaru tych odkształceń do długości pęknięcia *a*. Założenie takie oparte zostało na podstawie wyników badań doświadczalnych, przeprowadzonych przez Irwina.

Wielkość strefy odkształconej plastycznie w płaskim stanie naprężeń określić można jako:

$$r_{pl} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2 \tag{1}$$

gdzie: r_{pl} – promień strefy odkształconej plastycznie, R_e – granica plastyczności, K_I – współczynnik intensywności naprężeń.

Na skutek wydłużenia długości pęknięcia *a* o długość promienia strefy odkształconej plastycznie r_{pl} zmienia się w zasadzie tylko położenie samego pęknięcia (rys. 2 – linia kreskowa). Nowe położenie zarysu pęknięcia powoduje przesunięcie się linii rozkładu naprężeń, które jednak w dalszym ciągu są zgodne z $r^{-1/2}$.



Rys. 2. Obszar odkształcony plastycznie na dnie karbu i zmiana położenia krzywej rozkładu naprężeń [1].

W tym wypadku współczynnik intensywności naprężeń wyrażony będzie wzorem:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi\,(a + r_{pl})} \tag{2}$$

Przemieszczenie powierzchni pęknięcia V dla danego modelu wynosi:

$$V = \frac{2K}{E}\sqrt{2\pi\, r}\,, \tag{3}$$

skąd *całkowite przemieszczenie obu powierzchni na dnie karbu* (tzw. *wielkość rozwarcia dna karbu* – czyli parametr *COD*) przedstawione będzie równaniem:

$$\delta = COD = 2V = \frac{4K_I}{E}\sqrt{\frac{2\,r_{pl}}{\pi}}\,. \tag{4}$$

Podstawiając teraz: $G = \frac{K_I^2}{E}$ oraz $r_{pl} = \frac{1}{2\pi}\left(\frac{K_I}{R_e}\right)^2$

otrzymamy

$$\delta = \frac{4G}{\pi R_e} \tag{5}$$

gdzie: E – moduł Younga, R_e – granica plastyczności, G – prędkość uwalniania energii sprężystej.

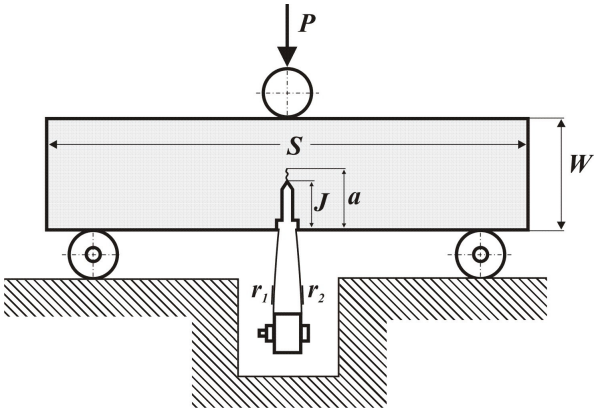
Przedstawiony tu model przemieszczenia dna karbu, uwzględniający odkształcenia plastyczne na dnie pęknięcia, na skutek swego założenia ważny jest tylko dla małych wartości r_{pl} / a, czyli dla niewielkich odkształceń plastycznych. Jednak kolejne prace nad nieliniową mechaniką pękania (prowadzone m.in. przez Dugdale'a) potwierdziły słuszność otrzymanego wzoru na rozwarcie dna karbu – warunkiem jego prawidłowości jest jedynie to, aby strefa uplastycznienia ($2r_p$) była znacznie mniejsza od długości szczeliny. Wówczas za pomocą wzoru (5) można określać prędkość uwalniania energii sprężystej G.

Krytyczne rozwarcie szczeliny δ_c, przy którym następuje inicjacja pęknięcia, może być w takim razie uważane za odporność materiału na pękanie, ponieważ za jego pomocą możemy obliczyć G_c.

Przy wielkości strefy odkształceń plastycznych na dnie karbu zbliżonych do długości szczeliny powyższa koncepcja traci swą słuszność.

4. Próba badania odporności na pękanie oparta na nieliniowo-sprężystej mechanice pękania (próba *COD*)

Przeprowadzanie pomiaru krytycznego rozwarcia szczeliny δ_c (*COD*) odbywa się według norm brytyjskich [7] lub amerykańskich [8]. Badania te przeprowadzać można na tej samej aparaturze i dla takich samych próbek, jakie są stosowane do określania K_{IC} – w przeprowadzanym na laboratorium ćwiczeniu będzie to próbka zginana trójpunktowo (rys. 1).



Rys. 1 Schemat stanowiska do trójpunktowego zginania. S – długość próbki, W – wysokość próbki, *a* – sumaryczna długość karbu, J – długość karbu naciętego mechanicznie, P – siła zginająca, r_1, r_2 – tensometry drucikowe naklejone na sprężyny miernika rozwarcia powierzchni karbu.

Badana próbka powinna mieć pęknięcie zmęczeniowe o długości nie mniejszej niż 1,25 mm. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego powinien przebiegać w ten sposób, aby zmęczeniowy współczynnik intensywności naprężeń K_f dla rozwijającego się pęknięcia nie przekraczał wartości dopuszczalnej:

$$K_f < 0{,}63\,\mathrm{R_e}\sqrt{\mathrm{B}} \tag{6}$$

W celu upewnienia się, że K_f nie przekracza tej dopuszczalnej wartości w czasie rozwoju pęknięcia, zachodzi konieczność obniżenia obciążenia zmiennego iu się pęknięcia zmęczeniowego. Wielkość obciążenia zmęczeniowego P_f można określić na podstawie wyrażenia:

$$K_f = \frac{\mathrm{YP_f}}{\mathrm{B}\sqrt{\mathrm{W}}} \tag{7}$$

gdzie Y – współczynnik intensywności naprężeń dla odpowiedniej długości pęknięcia.

Współczynnik Y można odczytać z tabl. 1.

Tab. 1 Wartości współczynnika Y dla próbek trójpunktowo zginanych o stosunku S/W = 4

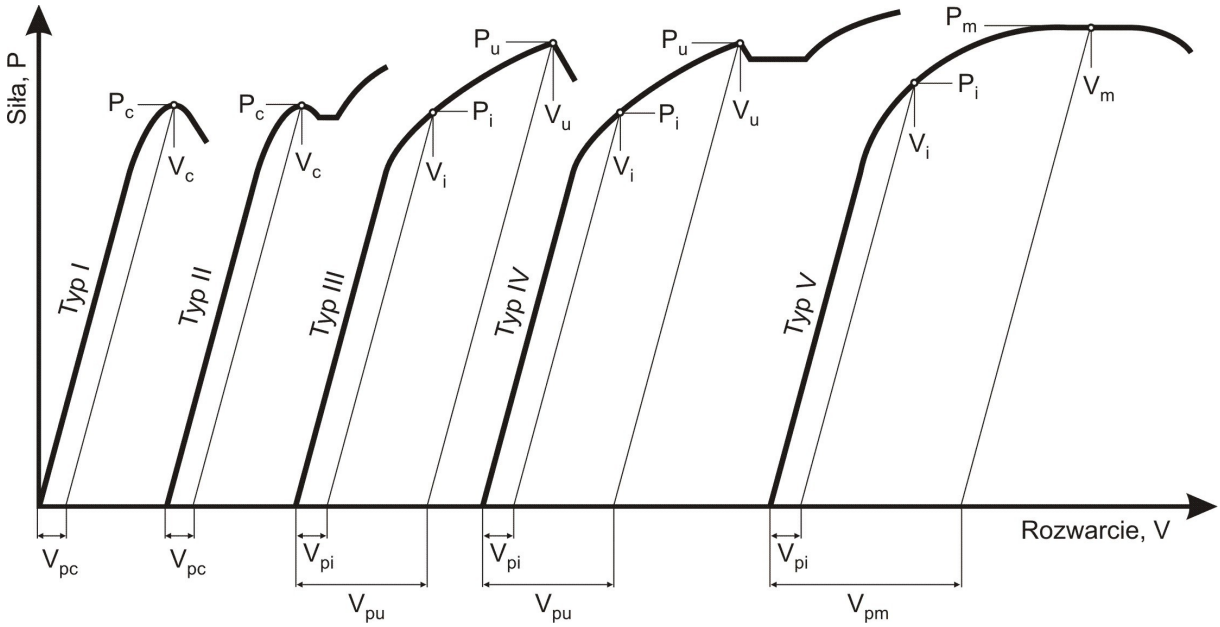
a/W	0,000	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009
0,45	9,142	9,169	9,196	9,223	9,250	9,278	9,305	9,333	9,361	9,389
0,46	9,417	9,445	9,473	9,502	9,530	9,559	9,588	9,617	9,646	9,675
0,47	9,707	9,734	9,763	9,793	9,823	9,853	9,883	9,913	9,944	9,974
0,48	10,01	10,04	10,07	10,10	10,13	10,16	10,19	10,22	10,26	10,29
0,49	10,32	10,35	10,38	10,42	10,45	10,48	10,52	10,55	10,58	10,62
0,50	10,65	10,66	10,72	10,75	10,79	10,82	10,86	10,89	10,93	10,96
0,51	11,00	11,03	11,07	11,10	11,14	11,18	11,21	11,25	11,29	11,32
0,52	11,36	11,40	11,43	11,47	11,51	11,55	11,59	11,63	11,66	11,70
0,53	11,74	11,79	11,82	11,86	11,90	11,94	11,98	12,02	12,06	12,10
0,54	12,15	12,19	12,23	12,27	12,31	12,35	12,40	12,44	12,48	12,53
0,55	12,57									

Grubość i szerokość próbki powinna być mierzona przed złamaniem w pobliżu dna karbu z dokładnością do 0,025 mm. Po złamaniu próbki długość karbu zmęczeniowego powinna być mierzona w trzech symetrycznych miejscach: w ¼, ½ i ¾ grubości próbki. Maksymalna i minimalna wartość pomiaru głębokości nie powinna przy tym przekraczać 5%. Długość pęknięcia powinna wynosić min. 1,25 mm.

Do obliczeń δ_c należy stosować maksymalną wartość pęknięcia uzyskaną podczas pomiarów. Przy próbie COD, przy obciążeniu statycznym, złamanie ma być zakończone w czasie od 30 s do 5 min.

Podczas przeprowadzania próby COD siła działająca na próbkę płaską powoduje jej odkształcanie (gięcie), a zewnętrzne powierzchnie karbu zaczynają oddalać się od siebie (karb ulega rozwarciu). Pomiar rozwarcia karbu dokonywany jest za pomocą uprzednio wyskalowanego tensometrycznego miernika przemieszczeń w postaci dwóch sprężyn płaskich z naklejonymi oporowymi tensometrami drucikowymi (rys. 1). Przebieg zginania rejestrowany jest na rejestratorze *x-y* w postaci wykresu zmiany siły obciążającej w funkcji rozwarcia karbu.

Rejestrując przebieg łamania próbki można, wg normy brytyjskiej [7], uzyskać jeden z pięciu typów wykresów (rys.2).



Rys. 2 Rodzaje krzywych rozwarcie-obciążenie przy badaniu metodą COD.

Według normy uwzględnić należy istnienie kilku różnych obciążeń krytycznych, występujących w zależności od sposobu pękania próbki (typu wykresu). I tak, wyróżnia się:

- δ_c – rozwarcie odpowiadające nagłemu pęknięciu próbki, prowadzącemu do złomu (typ I) lub też zatrzymanemu (typ II), jeśli pęknięcie to nie było poprzedzone okresem powolnego pękania,
- δ_i – rozwarcie w chwili inicjacji powolnego podkrytycznego wzrostu pęknięcia (typy III, IV i V),
- δ_u – rozwarcie w chwili nagłego pęknięcia prowadzącego do złomu próbki (typ III) lub nagłego pęknięcia, które następnie zostało zatrzymane (typ IV), jeśli pęknięcie to było poprzedzone okresem powolnego pękania,
- δ_m – rozwarcie wierzchołka szczeliny odpowiadające maksymalnemu obciążeniu próbki (typ V).

Rozwarcie wierzchołka szczeliny jest w próbie COD zawsze sumą rozwarcia sprężystego (V_s) i rozwarcia plastycznego(V_p). Aby rozdzielić te dwie części rozwarcia na wykresie siły wyznacza się prostą wychodzącą z punktu odpowiadającego sile krytycznej (P_c), równoległą do początkowej liniowej części wykresu. Odcinek mierzony od początku wykresu do miejsca przecięcia się tej prostej z osią *OX* wyznacza część plastyczną rozwarcia V_p.

Rozwarcie występujące w zakresie sprężystym jest niczym innym jak współczynnikiem intensywności naprężeń i można je obliczać zgodnie z zasadami liniowej mechaniki pękania:

$$V_s = K_I = \sqrt{2\,\delta\,\mathrm{E}\,\mathrm{R_e}} \tag{8}$$

Rozwarcie plastyczne natomiast oblicza się przy założeniu, że obrót połówek próbki następuje dookoła środka usytuowanego w odległości 0,4 (W-a) od wierzchołka szczeliny. Stąd rozwarcie wierzchołka szczeliny określa wzór:

$$\delta = \frac{\mathrm{K}^2(1-\nu^2)}{2\mathrm{R_e}\mathrm{E}} + \frac{0{,}4(\mathrm{W}-a)\,\mathrm{V_p}}{0{,}4\,\mathrm{W}+0{,}6\,a+\mathrm{z}}\ , \tag{9}$$

gdzie K wylicza się ze wzoru (7). We wzorach tych za siłę P i rozwarcie V odpowiadają wartościom V_i, V_c, V_u i V_m, wyznaczonym z wykresu siły.

Literatura:

1. Butnicki S., Spawalność i kruchość stali. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.
2. Gołaski L., Elementy doświadczalnej mechaniki pękania. Podręcznik akademicki. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992.
3. Neimitz A., Mechanika pękania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998.
4. Bochenek A., Elementy mechaniki pękania :podręcznik dla materiałoznawców. Cz. 1. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998.
5. Wnuk M.P., Podstawy mechaniki pękania. Wydawnictwo AGH, Kraków 1981.
6. PN-EN ISO 12737: Metale. Określanie odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia.
7. BS 5762:1979: British Standard Methods for Crack opening displacement (COD) testing.
8. ASTM E 1290-93: Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement.