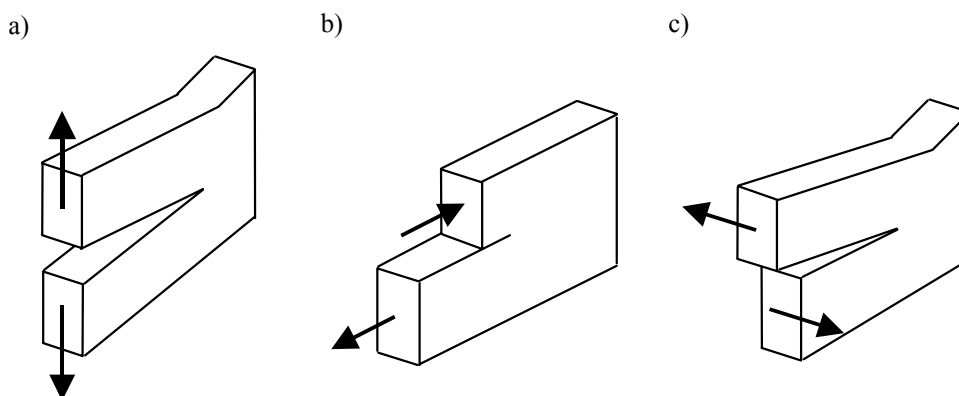


6. BADANIE ODPORNOŚCI NA PĘKANIE W PŁASKIM STANIE ODKSZTAŁCENIA – K_{IC}^*

6.1. ROZWIĄZANIE WILLIAMSZA

W zależności od udziału odkształceń sprężystych i plastycznych towarzyszących rozprzestrzenianiu się pęknięcia można dokonać podziału mechaniki pękania na dwie zasadnicze części: liniowo-sprężystą mechanikę pękania i nieliniową mechanikę pękania. Pierwsza umożliwia opis ilościowy zniszczenia, pod warunkiem, że rozprzestrzenianie się pęknięcia odbywa się w materiale liniowo-sprężystym w zakresie obowiązywania równań teorii sprężystości.

Liniowo-sprężysta mechanika pękania obejmuje przypadki, w których obszar występowania odkształceń plastycznych wokół wierzchołka rozprzestrzeniającej się szczeliny jest mały w porównaniu z innymi charakterystycznymi wymiarami próbki. Obszar plastyczny jest w takim przypadku kontrolowany przez otaczający go obszar sprężysty. Małą strefę plastyczną można uwzględnić w postaci poprawki na długość szczeliny.



Rys. 6.1. Trzy podstawowe sposoby obciążenia elementu konstrukcyjnego zawierającego szczelinę: a) I sposób obciążenia (rozciągania); b) II sposób obciążenia (ściananie); c) III sposób obciążenia (antyplaskie ściananie).

Liniowa mechanika pękania pozwala na opis procesów pękania w materiałach kruchych. Zazwyczaj punktem wyjścia w analizie wytrzymałości konstrukcji jest analiza stanu naprężeń (odkształceń) wywołanego obciążeniami zewnętrznymi. Ze względu na rodzaj obciążenia, w mechanice pękania wyróżnia się trzy podstawowe sposoby obciążenia elementu konstrukcyjnego zawierającego szczelinę (rys. 6.1):

- I sposób obciążenia – rozrywanie; powierzchnie szczeliny rozchodzą się w kierunku prostopadłym do frontu szczeliny.

* Opracował: Marcin Graba, Robert Molasy

- II sposób obciążenia – poprzeczne ścinanie; powierzchnie szczeliny ślizgają się po sobie w kierunku prostopadłym do frontu szczeliny.
- III sposób obciążenia – podłużne ścinanie; powierzchnie szczeliny przesuwają się po sobie w kierunku równoległym do frontu szczeliny.

Obszar przywierzchołkowy przed frontem szczeliny jest tym, w którym następuje koncentracja naprężeń. Klasyczne rozwiązanie Williamsa [1] prowadzi do wyrażeń określających poszczególne składowe tensora naprężeń w postaci asymptotycznego szeregu, z którego jeden, a co najwyżej dwa pierwsze fizycznie istotne człony wyznaczają poziom naprężeń w tym obszarze. Wzory (6.1) przedstawiają ogólną postać pierwszego osobliwego członu rozwinięcia dla naprężeń (przypadek pierwszego sposobu obciążenia):

$$\begin{aligned}\sigma_{11} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right] + \dots O(r^o) \\ \sigma_{22} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right] + \dots O(r^o) \\ \sigma_{12} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta + \dots O(r^o)\end{aligned}\quad (6.1)$$

gdzie:

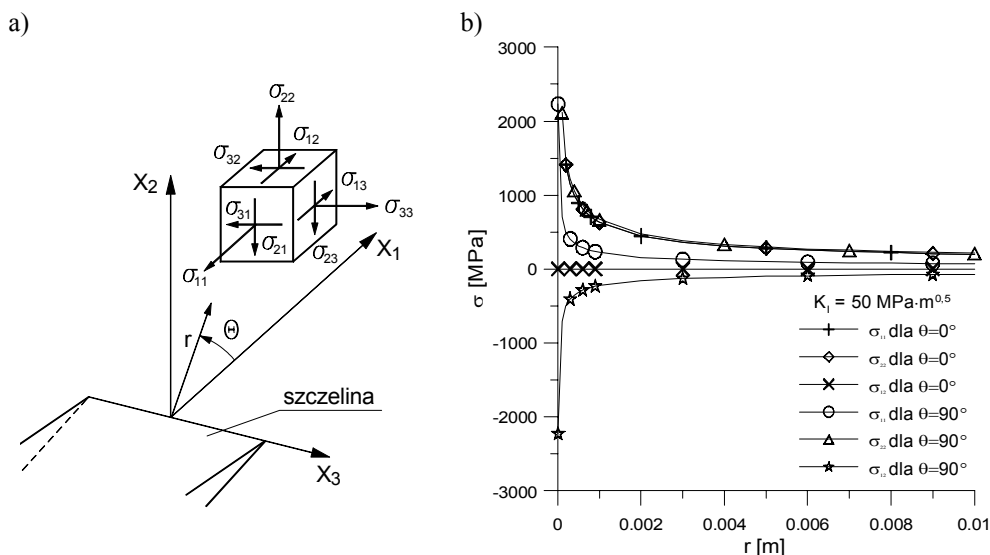
K_I – **współczynnik intensywności naprężenia (WIN)** dla I-sposobu obciążenia,
 r, Θ – współrzędne biegunowego układu współrzędnych zaczepionego w wierzchołku szczeliny w sposób pokazany na rys. 6.2.

Zależności (6.1) mają charakter uniwersalny. Wynika z nich, iż wartości składowych tensora naprężenia są takie same dla dwóch dowolnych próbek i obciążeń pod warunkiem, że współczynniki intensywności naprężeń są sobie równe. Tak więc współczynnik intensywności naprężeń jest tą wielkością, która odróżnia od siebie analizowane konfiguracje. Współczynnik intensywności naprężeń znajduje się rozwiązując zagadnienie brzegowe teorii sprężystości. Jest on funkcją zewnętrżnych obciążeń, długości pęknięcia i parametrów określających geometrię próbki. Obecnie istnieją obszerne katalogi, w których podano wzory na współczynniki intensywności naprężeń dla różnych geometrii próbki i obciążeń [4], [5].

Zależności (6.1), przedstawiając pierwsze człony rozwinięcia asymptotycznego, prowadzą do wystarczająco dokładnych wartości jedynie w obszarach leżących blisko wierzchołka szczeliny. Obliczenia numeryczne wykazują, że dzieje się tak dla:

$$r < 0,01a \quad (6.2)$$

W takim przypadku popełniany błąd jest na ogół mniejszy niż 10%. Ze względu na to, że wszystkie procesy degradacji materiału występują w tym obszarze, rozwinięcie jednoczłonowe jest zazwyczaj wystarczające do analizy wytrzymałości elementów zawierających pęknięcia.



Rys. 6.2. a) Schemat przedstawiający układy współrzędnych $\{x_1, x_2, x_3\}$ oraz $\{r, \Theta\}$ w wierzchołku szczeliny; b) Rozkład naprężeń przed wierzchołkiem pęknięcia wykreślony w oparciu o rozwiązanie Williams'a – wzory (6.1).

Dla olbrzymiej większości materiałów konstrukcyjnych przed wierzchołkiem szczeliny występuje obszar plastyczny. Jeżeli obszar ten jest mniejszy od obszaru zdominowanego przez jednoczłonowe przybliżone asymptotyczne rozwinięcie dla naprężeń (warunek 6.2), to wówczas akceptowane jest stosowanie liniowej mechaniki pęknięcia, gdyż rozwój obszaru plastycznego jest ściśle kontrolowany przez otaczający go obszar sprężysty.

Dla płaskiego stanu odkształcenia zgodnie z modelem Irwina [2] długość strefy plastycznej r_p przed frontem pęknięcia wyraża się wzorem:

$$r_p = \frac{1}{6 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (6.3)$$

Należy zwrócić uwagę na osobliwy charakter pola naprężeń i odkształceń. W miarę zbliżania się do wierzchołka szczeliny wartość naprężeń dąży do nieskończoności (rys. 6.2b).

6.2. KRYTERIUM PĘKANIA. WPLYW GRUBOŚCI NA WARTOŚĆ W_{IN}

Ze względu na występowanie osobliwości naprężeń, nie możemy stosować klasycznych hipotez wytrzymałościowych typu Tresca czy też Hubera-Misesa-Henckyego do oceny wytrzymałości konstrukcji zawierających pęknięcia.

W mechanice pękania, zamiast posługiwać się pojęciem naprężenia, do oceny momentu inicjacji procesu pękania można użyć innych wielkości, które charakteryzują pole naprężeń i mają skończone wartości. Taką wielkością dla ciał liniowo-sprężystych jest współczynnik intensywności naprężeń. Kryterium zniszczenia wyrażone za jego pomocą ma postać [3]:

$$K(a, \sigma_a, Y) = K_C \quad (6.4)$$

gdzie:

σ_a – obciążenie zewnętrzne,

Y – bezwymiarowa funkcja argumentów charakteryzujących geometrię próbki.

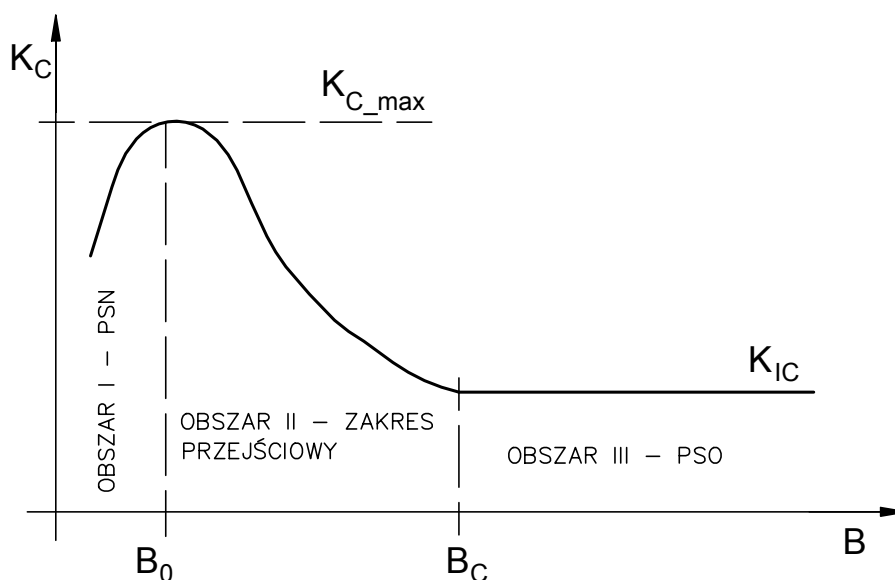
Wartości współczynnika Y podawane są najczęściej w postaci graficznej lub tabelarycznej np. [4], [5].

Należy pamiętać, iż kryterium (6.4) choć słuszne jest zawsze dla materiałów liniowych to tylko dla płaskiego stanu odkształcenia definiuje nam stałą materiałową K_{IC} , powszechnie określaną mianem „**odporności na kruche pękanie**”. Występowanie płaskiego stanu odkształcenia dla I-sposobu obciążenia, gwarantuje grubość próbki B oraz długość pęknięcia, które spełniają warunki:

$$B \geq 2.5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (6.5a)$$

$$a \geq 2.5 \cdot \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (6.5b)$$

Badania doświadczalne dowiodły, że krytyczny współczynnik intensywności naprężeń jest silnie zależny od grubości elementu. W elementach o znacznej grubości w wierzchołku szczeliny dominuje PSO, a strefy plastyczne są znikomo małe w stosunku do grubości ciała. W przypadku PSN długość przywierzchołkowych stref plastycznych jest zbliżona do grubości ciała i jest to charakterystyczne dla elementów o małej grubości. Odkształcenia plastyczne ograniczają możliwość kruchego pękania, któremu towarzyszy gwałtowny wzrost długości pęknięcia prowadzący do zniszczenia elementu. Okazuje się więc, że przyłożone obciążenie zewnętrzne wywołujące wzrost pęknięcia może być większe w porównaniu z obciążeniem dla ciała, w którym odkształcenia plastyczne są niewielkie. Rysunek 6.3 prezentuje wpływ grubości próbki na krytyczną wartość współczynnika intensywności naprężeń.



Rys. 6.3. Wpływ grubości na krytyczną wartość współczynnika naprężeń K_{IC} .

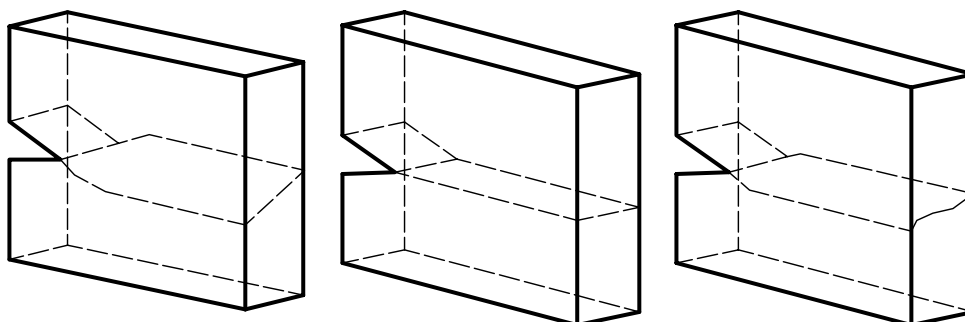
W ciałach o grubościach mniejszych od B_0 dominuje w otoczeniu wierzchołka szczeliny PSN (obszar I) – rysunek 6.2. W przypadku, gdy grubości ciała, zawiera się między B_0 i B_C (obszar II), wewnętrzna część obszaru ciała przylegającego do wierzchołka szczeliny znajduje się w PSO, natomiast pozostałe części przylegające do zewnętrznych powierzchni ciała w PSN, przy czym wymiar obu tych części jest porównywalny. Odporność na pękanie w tym obszarze zmienia się pomiędzy wartością maksymalną K_{C_max} odpowiadającą grubości B_0 , a minimalną, tzn. K_{IC} . Broek [10] określa grubość B_0 mianem „grubości optymalnej”, zaś K_{IC_max} „rzeczywistą odpornością na pękanie w warunkach PSN”.

W ciałach o grubości przekraczającej wartość krytyczną B_C (obszar III) zdecydowanie dominuje PSO (poza niewielkimi obszarami przylegającymi do powierzchni zewnętrznych ciała), dla którego krytyczny współczynnik intensywności osiąga wartość minimalną K_{IC} . Dalszy wzrost grubości ciała powyżej wartości krytycznej B_C nie powoduje zmiany K_{IC} . Jest to zatem wielkość niezależna od grubości i jako taka jest uznana za stałą materiałową określającą odporność materiału na pękanie. Im wartość K_{IC} jest większa, tym większe obciążenie może przenosić element konstrukcyjny zawierający pęknięcie. Sposób wyznaczania tej jednej z podstawowych w mechanice pękania stałej materiałowej jest obecnie znormalizowany i będzie przedstawiony w dalszej części niniejszego rozdziału.

a)

b)

c)



Rys. 6.4. Powierzchnie pęknięcia dla próbek o różnej grubości: a) próbka zdominowana przez PSN – pękanie ukośne; b) próbka zdominowana przez PSO – pękanie płaskie; c) pękanie płaskie z daszkami poślizgu.

Badania doświadczalne wykazały, że w cienkich płytach zdominowanych przez PSN, powierzchnie, w których rozwija się szczelina przebiegają skośnie do płaszczyzny szczeliny, pod kątem 45° do powierzchni płyty. Zjawisko to określa się mianem **zniszczenia ukośnego**. W przypadku gdy grubość płyty przekracza wartość B_0 , kształt powierzchni zniszczenia zmienia się. W części przylegającej do zewnętrznej powierzchni płyty, powierzchnie są ukośne, a pozostała część leżąca w głębi grubości płyty ma kształt płaszczyzny prostopadłej do zewnętrznej powierzchni płyty. Im płyta jest grubsza, tym płaska część powierzchni zniszczenia jest większa. W płytach grubych jest to efekt dominujący, określany mianem **zniszczenia płaskiego**. Należy jednak nadmienić, że „czyste” zniszczenie płaskie w zasadzie nigdy nie występuje, gdyż na częściach grubości płyty (bezpośrednio przylegających do jej ścianek zewnętrznych) panuje PSN i może pojawiać się zniszczenie ukośne, które jest z kolei bardzo ograniczone. Małe ukośne powierzchnie zniszczenia nazywa się **daszkami poślizgu**. Omówione pokrótce trzy możliwe formy powierzchni pęknięcia pokazano na rysunku 6.4.

Podsumowując dotychczasowe rozważania podkreślić należy, że:

- ★ współczynnik intensywności naprężeń K_I , K_{II} lub K_{III} jest miarą intensywności osobliwych naprężeń przed frontem szczeliny,
- ★ krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_{IC} , K_{IIC} lub K_{IIIC} jest cechą materiału określającą odporność materiału na proces pęknięcia i może być uznany za stałą materiałową w przypadku spełnienia wymogów PSO.

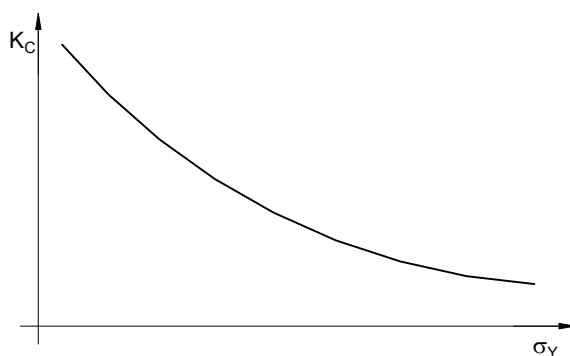
Tabela 6.1

Wartości krytycznych WIN dla różnych materiałów o znanej σ_Y wraz z podaną minimalną grubością zapewniającą warunki PSO wg [10]

MATERIAŁ	σ_Y [MPa]	K_{IC} [MPa·m ^{0.5}]	MIN. GRUBOŚĆ B [mm]
stal martenzytowa 350	2241	38.5	0.7
stal AISI 4340	1815	46.5	1.7
stal martenzytowa 250	1776	73.8	4.3
stal martenzytowa 300	1668	93.1	7.8
stal D 6 AC	1491	65.1	4.8
stal reaktorowa A 533 B	343	195.4	811
stal węglowa	235	217.2	2136
Ti 6Al-2Sn-4Zr-6Mo	1177	26.4	1.3
Ti 13V-11Cr-3Al	1128	27.6	1.5
Ti 6Al-4V	1099	37.8	3.0
Ti 6Al-6V-2Sn	1079	37.2	3.0
Ti 4Al-4Mo-2Sn-0.5Si	942	69.5	13.6
Al 7075-T651	540	29.2	7.3
Al 7079-T651	461	32.6	12.5
Al 2014-T4	451	27.9	9.6
Al 2024-T3	392	34.1	18.9
pleksiglas		1.6	

6.3. WPLYW GRANICY PLASTYCZNOŚCI NA WARTOŚĆ WIN

Parametrem mającym wpływ na odporność materiału na pękanie jest granica plastyczności. Im granica plastyczności materiału jest większa, tym strefa plastyczna jest mniejsza, a przeważająca część materiału w strefie pękania jest zdominowana przez PSO.



Rys. 6.5. Wpływ granicy plastyczności na odporność na pękanie.

Zmniejszanie się strefy plastycznej, osłabiającej efekt kruchego pękania musi jednocześnie oznaczać względny wzrost kruchości, przejawiający się spadkiem wartości K_{IC} . Reasumując, można powiedzieć, że im wyższa jest granica plastyczności materiału, tym mniejszą ma on odporność na pękanie. Materiały o wysokiej granicy plastyczności mają niską zarówno maksymalną odporność na pękanie $K_{IC_{max}}$ (charakterystyczną dla PSN), jak i minimalną K_{IC} (charakterystyczną dla PSO).

6.4. WSPÓŁCZYNNIK UWALNIANIA ENERGII

Inne kryterium odporności na pękanie materiałów w zakresie liniowej mechaniki pękania zostało oparte o wielkość nazwaną współczynnikiem uwalniania energii G . Definiuje on zmiany energii potencjalnej układu przy przyroście długości szczeliny o jednostkową wartość:

$$G = \frac{\partial \Pi}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a}(V - W) \quad (6.6)$$

gdzie:

- Π – energia potencjalna obciążenia zewnętrznego,
- V – praca sił zewnętrznych,
- W – energia odkształcenia.

Jeśli pękanie następuje w warunkach kontrolowanego przemieszczenia punktu przyłożenia siły to praca sił zewnętrznych w momencie pękania jest równa zero i wówczas

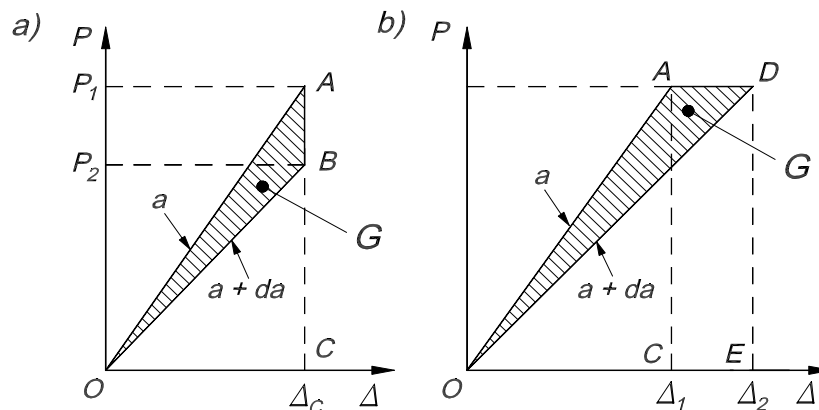
$$G = - \frac{\partial W}{\partial a} \quad (6.7)$$

Można wykazać, że przy pękaniu w warunkach kontrolowanej siły

$$G = \frac{\partial W}{\partial a} \quad (6.8)$$

równe jest więc bezwzględnej wartości wynikającej ze wzoru (6.7).

Występująca różnica w znaku informuje nas o źródle energii dostarczonej dla procesu pękania. W pierwszym przypadku jest to energia odkształcenia sprężystego „zmagazynowana” w próbce (por. rys. 6.6a). Stąd też nazwa współczynnik uwalniania energii. W drugim przypadku jest to zarówno praca sił zewnętrznych jak i energia wewnętrzna (por. rys. 6.6b).



Rys. 6.6. Przypadek pęknięcia a) w warunkach kontrolowanego przemieszczenia $\Delta = \text{const} = \Delta_c$, b) w warunkach kontrolowanej siły $P = \text{const} = P_c$

Aby nastąpił niekontrolowany rozwój pęknięcia, współczynnik uwalniania energii musi osiągnąć pewną krytyczną wartość. Zakłada się, że w momencie krytycznym [6]:

$$G(a, \sigma_w, Y) = G_c \quad (6.9)$$

Dla ciał liniowo-sprężystych Irwin powiązał jednoznacznie współczynnik intensywności naprężeń K ze współczynnikiem uwalniania energii G w następujący sposób:

$$G_I = \frac{K_I^2}{E'} \quad (6.10)$$

gdzie:

$$E' = E \quad (\text{p.s.n.}) \quad E' = \frac{E}{1 - \nu^2} \quad (\text{p.s.o.}) \quad (6.10a)$$

Tak więc kryterium (6.9) utożsamiane jest z kryterium (6.4). Zależność (6.10) jest jedną z fundamentalnych zależności mechaniki pęknięcia. Łączy ona tzw. lokalne podejście reprezentowane przez współczynnik intensywności naprężeń K , charakteryzujący stan naprężeń blisko wierzchołka szczeliny i globalne podejście reprezentowane przez współczynnik uwalniania energii z całego układu.

Szczegółowe, rozszerzone informacje na temat współczynnika uwalniania energii oraz kryteriów pęknięcia materiałów kruchych można znaleźć w [7] w rozdziale 3.3 oraz dodatku D.5.

6.5. METODA BADANIA ODPORNOŚCI NA PĘKANIE W PŁASKIM STANIE ODKSZTAŁCENIA (wg PN-87/H-4335)

Norma PN-87/H-4335 obejmuje wyznaczenie odporności na pękanie K_{IC} w płaskim stanie odkształcenia metali i ich stopów przy wykorzystaniu różnych próbek z nacięciem oraz pęknięciem zmęczeniowym, zainicjowanym w dnie nacięcia, mającym długość około 1.6mm. Obejmuje również wyznaczenie współczynnika wytrzymałości próbki R_{SX} , gdzie x dotyczy szczególnej konfiguracji badanych próbek. Współczynnik ten nie jest pojęciem liniowo-sprężystej mechaniki i nie jest podobny do K_{IC} , ale może być w pełni porównywalną miarą odporności na pękanie materiałów, kiedy próbki są tego samego kształtu i wielkości. Współczynnik R_{SX} określa moment inicjacji wzrostu pęknięcia, który może być stabilny. Natomiast K_{IC} określa moment niestabilnego wzrostu pęknięcia. Zaznaczyć należy, że współczynnik R_{SX} wyznacza się, jeśli którykolwiek wymiar badanego materiału nie może zapewnić spełnienia warunku (6.5).

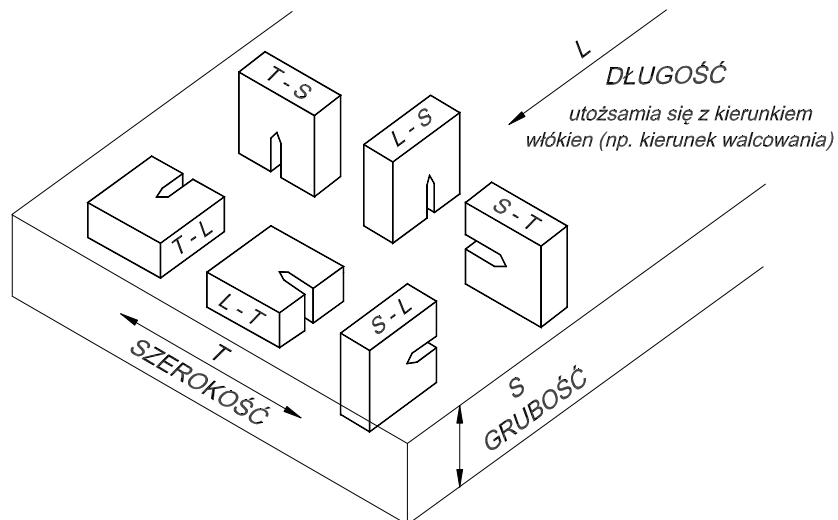
Wartość K_{IC} wyznaczona w badaniu określonym przez tę normę charakteryzuje odporność materiału na pękanie w neutralnym środowisku, przy obecności ostrego pęknięcia, pod takim obciążeniem, że rozkład naprężeń przy wierzchołku pęknięcia jest zbliżony do płaskiego stanu odkształcenia i strefa plastyczna przy wierzchołku pęknięcia jest mała w porównaniu z wielkością pęknięcia i wymiarami próbki.

Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń wiarygodnie opisuje dolną, graniczną wartość odporności na pękanie, która może być użyta do określenia zależności między obciążeniem niszczącym a wielkością pęknięcia.

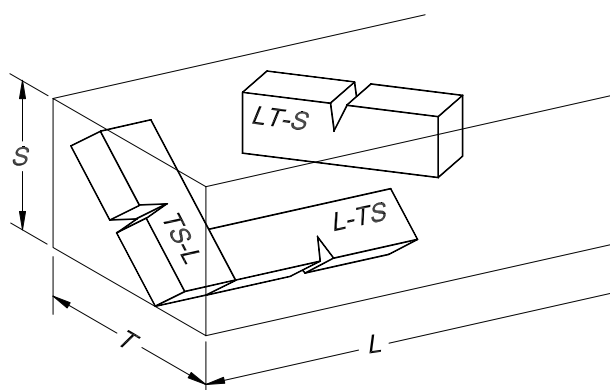
Wartość K_{IC} dla danego materiału jest funkcją szybkości obciążenia i temperatury (podobnie jak większość stałych materiałowych). Obciążenia cykliczne mogą spowodować wzrost pęknięcia przy wartości K_I mniejszej niż K_{IC} . Wzrost szczeliny przy cyklicznych obciążeniach może być przyspieszony przez obecność środowiska agresywnego. Dlatego też K_{IC} w projektowaniu materiałów użytkowych powinno być dokonywane ze świadomości różnic, które mogą zaistnieć między warunkami laboratoryjnymi a rzeczywistymi warunkami pracy.

6.5.1. Oznaczenie orientacji płaszczyzny pęknięcia

Odporność na pękanie materiału zależy od orientacji i kierunku propagacji pęknięcia w relacji do anizotropii materiału, która zależy od podstawowych kierunków obróbki plastycznej. Orientacja płaszczyzny pęknięcia powinna być oznaczona wszędzie, gdzie jest to możliwe zgodnie z podawanymi systemami oznaczenia. Dodatkowo podaje się kształt próbki. Dla przekrojów prostokątnych, zalecane kierunki są oznaczone jak na rysunkach 6.7 i 6.8. Taki sam system może być użyty do blach, elementów wyciskanych, prasowanych i kutych przy niesymetrycznym przebiegu włókien.



Rys. 6.7. Oznaczenie orientacji powierzchni pęknięcia dla części prostokątnych



Rys. 6.8. Oznaczenie orientacji powierzchni pęknięcia dla części prostokątnych, z których próbki wycinane są w dowolnym kierunku

6.5.2. Próbki stosowane do badania

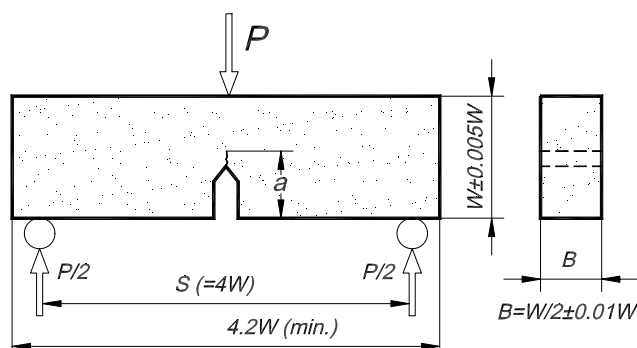
Zgodnie z rozważaniami dotyczącymi ważności wyników próby, wymagane jest, by grubość próbki i długość szczeliny były większe niż $2.5(K_{IC}/\sigma_Y)^2$.

Wstępna selekcja wielkości próbek, z których mogą być uzyskane ważne wartości K_{IC} może być poprzedzona oszacowaniem K_{IC} dla danego materiału. Oszacowanie takie jest zalecane przed badaniem. Po uzyskaniu ważnej wartości K_{IC} przy założeniu początkowej wielkości próbki, można ją zmniejszyć (wartości B i a) podczas następnego badania. Alternatywnie, dla właściwego wyboru wielkości

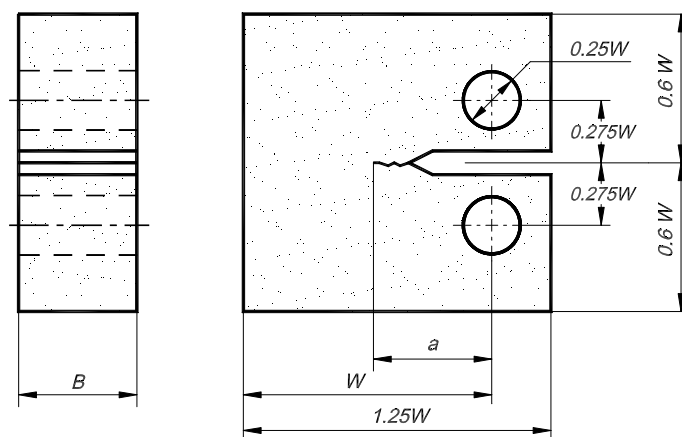
próbki może być użyty stosunek granicy plastyczności do modułu Younga. Odpowiednie wartości przedstawia tabela 6.2. Natomiast na rys. 6.9 i 6.10 przedstawiono odpowiednio próbkę trójpunktowo zginaną oraz próbkę zwartą.

Tabela 6.2

Minimalna grubość próbki w zależności od stosunku σ_y/E									
Stosunek σ_y/E	0.0050 do 0.0057	0.0057 do 0.0062	0.0062 do 0.0065	0.0065 do 0.0068	0.0068 do 0.0071	0.0071 do 0.0075	0.0075 do 0.0080	0.0080 do 0.0085	0.0085 do 0.0100
Grubość próbki	75 mm	63 mm	50 mm	44 mm	38 mm	32 mm	25 mm	20 mm	12.5 mm



Rys. 6.9. Standardowa próbka trójpunktowo zginana SE (B)



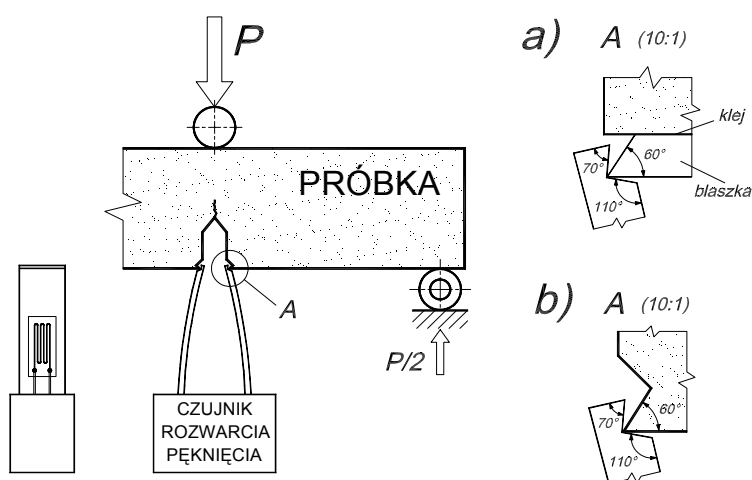
Rys. 6.10. Standardowa próbka zwartą C (T)

Standardowo stosowane są 4 rodzaje próbek o różnych kształtach, tj. próbka trójpunktowo zginana, standardowa zwartą, zwartą okrągłą oraz łukowa.

W próbkach standardowych długość pęknięcia (długość karbu plus pęknięcie zmęczeniowe) jest bliska grubości i zawiera się w przedziale $(0.45 \div 0.55)W$. Stosunek W/B jest równy 2. W pewnych przypadkach wskazane jest użycie próbek, mających W/B różne od 2 (szczegóły można znaleźć w normach).

6.5.3. Aparatura stosowana do badania

Przyrządy do obciążenia próbek i odpowiednie uchwyty mocujące próbki są tak zaprojektowane, aby zminimalizować udział tarcia przy pomiarze siły oraz zniwelować niedokładności ustawienia próbek przed badaniem. Normy [8], [9] podają dokładne rysunki wykonawcze odpowiednich uchwytów.



Rys. 6.11. Czujnik rozwarcia pęknięcia oraz sposoby mocowania: a) przy użyciu blaszki, b) bezpośrednio do próbki

Czujnik rozwarcia pęknięcia (ekstensometr) służy do pomiaru przemieszczenia krawędzi naciętego karbu imitującego pęknięcie na brzegu próbki. Rozwarcie pęknięcia powoduje odginanie sprężystych nóżek czujnika, na których naklejone tensometry ulegają odkształceniu i przetwarzają sygnały mechaniczne na elektryczne. Bardzo ważne jest dokładne i poprawne zamocowanie ekstensometru na próbce. Jednocześnie sposób mocowania musi zapewnić zwolnienie czujnika bez jego uszkodzenia w momencie złamania próbki. Schemat czujnika pokazano na rysunku 6.11. Ramiona czujnika mogą być mocowane w specjalnie wyfrezowanym gnieździe bądź zaczepione o blaszki (przyklejone do powierzchni próbki).

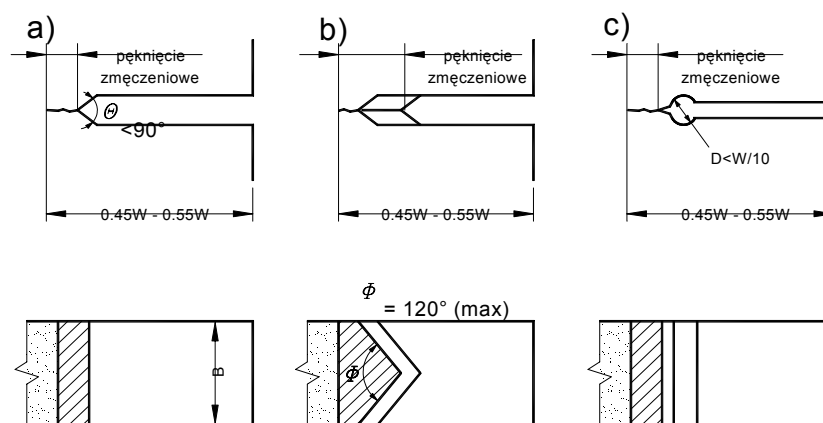
Ekstensometr powinien wykazywać liniową charakterystykę w przewidywanym zakresie pracy. Na podstawie wymaganego zakresu pracy należy również dobrać odpowiednią bazę pomiarową ekstensometru. Przed przystąpieniem do badań czujnik powinien być sprawdzony na liniowość charakterystyki. Odczyty w czasie

skalowania powinny być dokonane dla co najmniej 10 punktów równomiernie rozłożonych na całym zakresie pracy czujnika. Wymagana nieliniowość powinna odpowiadać maksymalnej odchyłce o 0.0025mm pojedynczego odczytu przemieszczenia od prostej wyznaczonej za pomocą metody najmniejszych kwadratów z wszystkich zarejestrowanych punktów pomiarowych.

6.5.4. Wytyczne postępowania w czasie badania

Zaleca się, aby dla danego materiału przeprowadzić co najmniej trzy próby dla tych samych parametrów geometrycznych oraz warunków obciążenia.

Tolerancje wymiarowe i chropowatości zamieszczonych na rysunkach próbek powinny być zgodne z normą [8]. Rodzaje karbów niezbędnych do wykonania pęknięcia zmęczeniowego pokazano na rys. 6.12.



Rys. 6.12. Przykłady karbów: a) prosty, b) daszkowy, c) z otworem

Dla ułatwienia wykonania pęknięcia zmęczeniowego przy niskim poziomie intensywności naprężenia promień dna karbu prostego powinien wynosić 0.08mm lub mniej. Jeśli używa się daszkowego kształtu karbu, promień dna karbu może mieć 0.25mm lub mniej. W przypadku stosowania karbu z otworem konieczne jest zastosowanie dodatkowego ostrza zwiększającego naprężenia przy brzegu otworu.

Zasady wykonania pęknięcia zmęczeniowego zawarte są w cytowanej wcześniej normie. Pęknięcie zmęczeniowe powinno być widoczne po obydwu stronach próbki. Zaś długość pęknięcia z karbem powinna spełniać następujące wymagania:

- ★ całkowita długość pęknięcia powinna wynosić $(0.45 \div 0.55)W$,
- ★ dla karbu prostego długość pęknięcia zmęczeniowego na każdej stronie próbki powinna wynosić co najmniej $0.025W$ lub 1.3mm, a dla pęknięcia z otworem przyrost pęknięcia od naciętego rowka powinien być nie mniejszy niż $0.5D$ lub

1.3mm dla obydwu stron próbki; dla karbu daszkowego pęknięcie powinno być widoczne po obydwu stronach próbki.

Do obliczenia K_{IC} niezbędne są trzy podstawowe wymiary: długość początkowa pęknięcia, grubość oraz szerokość próbki. Grubość należy mierzyć z dokładnością 0.025mm lub 0.1% dla dużych wymiarów, w co najmniej trzech równo oddalonych miejscach leżących na linii planowanego przyrostu pęknięcia, od wierzchołka pęknięcia zmęczeniowego do nienaciętej strony próbki. Średnią z tych pomiarów zapisuje się jako B . Długość pęknięcia a_0 mierzy się po wcześniejszym „zabarwieniu” przełomu poprzez wygrzanie próbki w temp. ok. 300°C w piecu a następnie złamaniu próbki po próbie. Pomiaru dokonuje się z dokładnością 0,5% w następujących trzech punktach: na środku frontu pęknięcia oraz w połowie odległości między środkiem frontu pęknięcia a końcem frontu pęknięcia na każdej stronie próbki. Długość a_0 jest średnią z trzech pomiarów.

Front pęknięcia zmęczeniowego powinien spełniać następujące wymagania:

- ★ różnica pomiędzy dwoma z trzech pomiarów długości pęknięcia nie powinna przekraczać 10% średniej,
- ★ dla karbów daszkowych pęknięcie zmęczeniowe powinno być widoczne na obydwóch stronach próbki, a żadna z długości pęknięcia na powierzchni próbki nie powinna odbiegać od średniej więcej niż 10% i różnica między dwoma pomiarami nie powinna przewyższać 10% średniej długości pęknięcia,
- ★ płaszczyzna pęknięcia powinna być równoległa do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunki szerokości i grubości próbki w zakresie $(-10 \div +10)^\circ$.

Szybkość obciążania dla badania powinna być tak dobrana, aby wielkość przyrostów intensywności naprężeń mieściła się w zakresie $(0,55 \div 2,75) \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}/\text{s}$.

6.6. CEL ĆWICZENIA

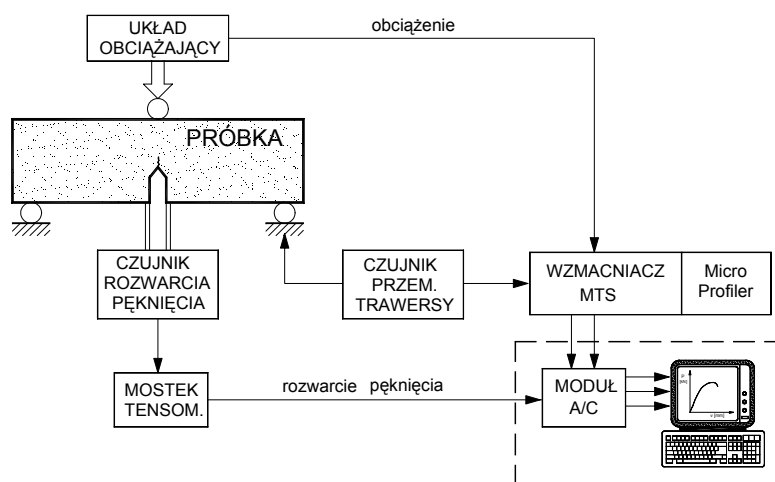
Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z metodyką wyznaczania odporności materiałów na pękanie w płaskim stanie odkształcenia poprzez wyznaczenie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia - K_{IC} .

Wyznaczenie wartości K_{IC} wykorzystuje się w:

- ★ badaniach i rozwoju techniki – ustala się w składnikach ilościowych efekty zmian metalurgicznych (takich jak skład chemiczny, obróbka cieplna) lub operacji produkcyjnych (np. spawanie lub kształtowanie) na odporność na pękanie nowych czy też istniejących materiałów,
- ★ ocenie użytkowej – ustala, czy dany materiał jest odporny na pękanie dla jego specyficznych zastosowań, przy opisanych warunkach obciążenia dla danego materiału i ustalonej z określonym poziomem ufności wielkości wady,
- ★ kontroli jakości - ale tylko wtedy, gdy jest podstawa do wyznaczenia minimalnej wartości K_{IC} i tylko wtedy, gdy wymiary wyrobu są wystarczające do zabezpieczenia wielkości próbek, wymaganych dla spełnienia warunków ważności pomiaru K_{IC} .

6.7. STANOWISKO BADAWCZE

Schemat stanowiska badawczego pokazano na rysunku 6.13. Próbkę zamocowaną w uchwytach, poddawana jest obciążeniu za pomocą maszyny wytrzymałościowej.



Rys. 6.13. Schemat stanowiska do badania odporności na pękanie.

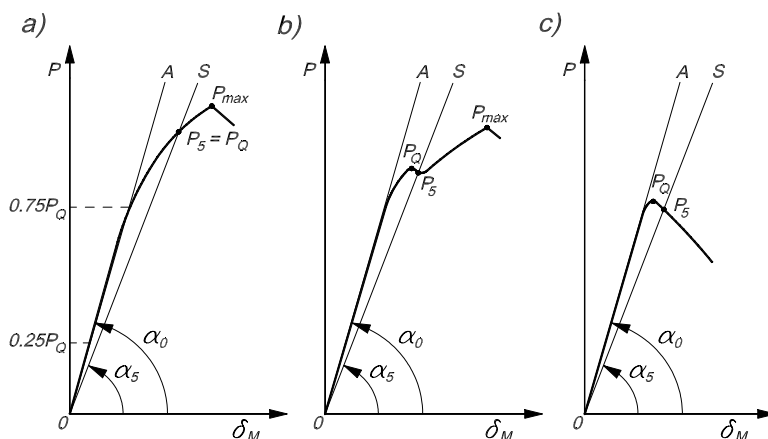
Sterowanie odbywa się programowo za pomocą sterownika (MicroProfiler) w warunkach kontrolowanego przemieszczenia. Ekstensometr blaszkowy mierzy w sposób ciągły rozwarcie szczeliny, a przy złamaniu próbki samoczynnie odpina się od niej. Sygnał elektryczny (napiecie) z ekstensometru wzmacniany jest przez wzmacniacz mostka tensometrycznego, a następnie przekazywany jest na wejście modułu analogowo-cyfrowego. Do modułu tego doprowadzany jest także sygnał napięciowy (z maszyny testującej) odpowiadający sile obciążającej. Sygnały te poprzez przetwornik analogowo-cyfrowy zamieniane są na liczby całkowite z zakresu 0-4095. Następnie liczby te (dzięki kalibracji dokonywanej przed rozpoczęciem doświadczenia) przeliczane są na wartości siły obciążającej i przemieszczenia nóżek ekstensometru.

6.8. WYZNACZENIE KRYTYCZNEJ WARTOŚCI K_{IC}

Wyznaczenie krytycznej wartości K_{IC} wykonuje się po przeprowadzeniu doświadczenia przy wykorzystaniu wykresu siły w funkcji rozwarcia pęknięcia. Na krzywej $P(\delta_M)$ określamy wartość siły P_Q . Gdzie δ_M jest rozwarciem powierzchni nacięcia, mierzonym przy pomocy ekstensometru.

Wartość siły P_Q utożsamiana jest z początkiem procesu pęknięcia. Ze względu

na fakt, że nie jesteśmy w stanie jednoznacznie określić punktu inicjacji wzrostu pęknięcia, aby wyniki były porównywalne przyjęto umowny sposób określania tego punktu.



Rys. 6.14. Podstawowe typy krzywych siła - rozwarcie powierzchni pęknięcia

Procesowi inicjacji wzrostu pęknięcia towarzyszą często odkształcenia plastyczne, które powodują stabilny wzrost pęknięcia na krótkim odcinku i na wykresie $P(\delta_M)$ występuje nieliniowość. Wartość K_{IC} powinna być określona w sposób jedno-znaczny dla wszystkich badanych materiałów. W tym celu rysujemy linię prostą OP_5 (na rysunku linia OS) nachyloną w stosunku do prostoliniowego odcinka krzywej $P(\delta_M)$ pod kątem, którego tangens $(P/\delta_M)_5$ jest równy $0,95(P/\delta_M)_0$ tak jak pokazano na rysunku 6.14. Linię odniesienia OP_5 wykreśla się w oparciu o punkty pomiarowe leżące w zakresie siły P_0 , gdzie $0,25P_Q < P_0 < 0,75P_Q$. Dla wykresu jak na rysunku 6.14a siłę P_Q utożsamia się z punktem przecięcia prostej o nachyleniu $0,95(P/\delta_M)_0$ z krzywą $P(\delta_M)$. Jeśli istnieje jakakolwiek maksymalna siła poprzedzająca punkt P_5 , która ten punkt przewyższa, wtedy ta maksymalna siła utożsamiana jest z siłą P_Q (rys. 6.14b i 6.14c).

Bardzo ważne jest wyznaczenie z dużą dokładnością początkowego nachylenia wykresu. Wskazane jest zminimalizowanie występującej tam nieliniowości przez wstępne obciążenie i odciążenie próbki siłą nieprzekraczającą wartości siły użytej do wykonania pęknięcia zmęczeniowego w jego końcowej fazie.

Następnie sprawdzić należy warunek:

$$\frac{P_{\max}}{P_5(\text{lub } P_Q)} \leq 1,1 \quad (6.11)$$

Jeśli powyższy warunek nie jest spełniony należy powtórzyć próbę, wykorzystując grubszą próbkę (większe B). W przypadku spełnienia warunku (6.11) obliczamy wartość współczynnika intensywności naprężeń K_Q zgodnie z zależnością (6.12) dla próbki trójpunktowo zginanej oraz zależnością (6.13) dla próbki zwartej:

$$K_Q = \frac{P_Q \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6.12)$$

gdzie:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3 \cdot \left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \cdot \left[1.99 - \frac{a}{W} \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right) \cdot \left(2.15 - 3.93 \cdot \frac{a}{W} + 2.7 \cdot \frac{a^2}{W^2}\right)\right]}{2 \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{a}{W}\right) \cdot \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (6.12a)$$

P_Q – siła wyznaczona z wykresu siła-rozwarcie powierzchni pęknięcia w (kN),
 S – rozstaw podpór w (cm), a (cm), B (cm)

– dla próbki zwartej:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B \cdot W^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (6.13)$$

gdzie:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \cdot \left(0.866 + 4.64 \cdot \frac{a}{W} - 13.32 \cdot \frac{a^2}{W^2} + 14.72 \cdot \frac{a^3}{W^3} - 5.6 \cdot \frac{a^4}{W^4}\right)}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (6.13a)$$

Możliwe jest, że K_Q może nie być uznane za wartość K_{IC} . Dzieje się tak, gdy nie jest spełniony warunek (6.5). W tym wypadku należy obliczyć tylko współczynnik wytrzymałości próbki R_{sx} (R_{sb} dla próbki trójpunktowo zginanej a R_{sc} dla próbki zwartej) zgodnie ze wzorami (6.14) i (6.15) [9].

$$R_{sb} = \frac{6 \cdot P_{\max} \cdot W}{B \cdot (W - a)^2 \cdot \sigma_Y} \quad (6.14)$$

$$R_{sc} = \frac{2 \cdot P_{\max} \cdot (2 \cdot W + a)}{B \cdot (W - a)^2 \cdot \sigma_Y} \quad (6.15)$$

gdzie P_{max} jest maksymalną siłą uzyskaną w czasie badania w (kN).

W przypadku niespełnienia warunku (6.5), aby wyznaczyć K_{IC} dla danego materiału należy próbę powtórzyć na próbce o większej grubości, której wymiary mogą być określone na podstawie K_Q , ale ogólnie sugeruje się, że grubość próbki powinna być 1,5 razy większa od próbki, która dała zły wynik badania.

6.9. PRZEBIEG ĆWICZENIA

- 1° Dokonać pomiaru rozmiarów próbki: grubość B (mm) i szerokość W (mm).
- 2° Dokonać kalibracji ekstensometru do pomiaru rozwarcia pęknięcia.
- 3° Zamocować na próbce nakładki nożowe (w przypadku gdy ekstensometr jest mocowany tak, jak na rys. 6.7a).
- 4° Wybrać odpowiednie zakresy pracy maszyny wytrzymałościowej (zakres przemieszczenia siłownika i obciążenia).
- 5° Ustawić w MicroProfilerze program sterujący próbą (wg zaleceń prowadzącego zajęcia).
- 6° Sprawdzić czy sygnałem sterującym jest przemieszczenie trawersy, a następnie uruchomić maszynę wytrzymałościową. W przeciwnym razie przed ustawieniem próbki należy dokonać zmiany sygnału sterującego.
- 7° Ustawić próbkę w przyrządzie do trójpunktowego zginania i za pomocą elementów centrujących dokonać regulacji położenia podpór dolnych w stosunku do stempla górnego tak, aby ich osie były równoległe.
- 8° Wyregulować położenie trawersy maszyny tak, aby stempel górny po uruchomieniu maszyny przylegał do powierzchni próbki.
- 9° Zamocować ekstensometr.
- 10° Sprawdzić prawidłowość ustawienia próbki na podporach (symetrię w stosunku do stempla obciążającego oraz prostopadłość osi wzdłużnej próbki w stosunku do osi wzdłużnej stempla).
- 11° Sprawdzić kalibrację torów pomiarowych siły i rozwarcia pęknięcia.
- 12° Dokonać zerowania sygnałów pomiarowych.
- 13° Uruchomić jednocześnie program sterujący (przycisk „RUN” na sterowniku MTS) oraz program do rejestracji wyników (klawisz F9).
- 14° Po przeprowadzeniu próby dokonać zapisu wyników pomiarowych.
- 15° Dokonać wygrzania próbki w temp. ok. 300°C (lepszy kontrast przełomu).
- 16° Dołamać próbkę.
- 17° Dokonać pomiaru długości pęknięcia na przełomie próbki (karb plus pęknięcie zmęczeniowe przy wykorzystaniu mikroskopu warsztatowego).

6.10. SPRAWOZDANIE

Opracowanie wyników z przeprowadzonej próby polega na wyznaczeniu krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} lub współczynnika wytrzymałości próbki R_{sx} .

Sprawozdanie z przeprowadzonego ćwiczenia powinno zawierać:

- 1° Cele ćwiczenia.
- 2° Opis przebiegu przeprowadzonej próby.
- 3° Informacje dotyczące próbki i warunków badania takie, jak:
 - materiał próbki oraz kształt materiału, z którego pobrano próbkę,
 - oznaczenie kształtu próbki (trójpunktowo zginania, zwarta, zwarta okrągła, łukowa), oznaczenie siły (rozciąganie T, zginanie B), kod orientacji płaszczyzny,
 - temperatura w czasie badania,
 - szybkość obciążania (przemieszczenie stempla w (mm/s),
 - geometria próbki (długość pęknięcia, grubość próbki, szerokość próbki),
 - umowna granica plastyczności.

Powyższe informacje powinny być zawarte w tabeli jak poniżej:

Materiał próbki				
Kształt materiału wyjściowego				
Oznaczenie kształtu próbki				
Temperatura w czasie badania				
Szybkość obciążania				
Numer próbki	σ_Y (MPa)	Rozmiary próbki		
		a (mm)	B (mm)	W (mm)
1.				
...				

- 4° Narysować wykres siła–rozwarcie powierzchni pęknięcia i określić K_Q .
- 5° Sprawdzić warunki (6.5) i (6.11).
- 6° Wyznaczyć K_{IC} lub R_{sx} .
- 7° Podsumowanie i wnioski.

Literatura

1. WILLIAMS M. L.: On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Appl. Mech.* 1957 tom 24 s. 109-114
2. IRWIN G. R.: Plastic Zone Near a Crack and Fracture Toughness. *Sagamore Research Conference Proceedings* 1961 tom 4
3. LIEBOWITZ H.: Fracture - an advanced. tom 3, *Academic Press* (1968), New York
4. MURAKAMI Y. i in.: Stress intensity factors handbook. *Pergamonn Press* 1988 tom 1, 2
6. IRWIN G. R.: Analysis of stresses and strains near the end of crack traversing a plate *Trans. ASME. J. Appl. Mech.* 1957 tom 24 s. 361-364
7. NEMITZ A.: Mechanika pęknięcia. Warszawa: PWN 1998.

8. ASTM E 399-83: Standard Test Method for Plane - Strain Fracture Toughness of Metallic Measurement.
9. PN-87/H-4335: Metoda badania odporności na pękanie w płaskim stanie odkształcenia.
10. BROEK D., Elementary Engineering Fracture Mechanics, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht/Boston/London, 1991.