

Podstawowe informacje nt.
LINIOWA MECHANIKA PĘKANIA
Wytrzymałość materiałów II
©J. German

SIŁOWE KRYTERIUM PĘKANIA

Równanie (1.31) wykazuje pełną równoważność prędkości uwalniania energii i współczynnika intensywności naprężeń. Sformułowane zostało także energetyczne kryterium pęknięcia, mówiące że wzrost szczeliny może wystąpić wówczas, gdy prędkość uwalniania energii G osiąga pewną wartość krytyczną $R=2\gamma$. Ze względu na trudności w doświadczalnym wyznaczeniu energii powierzchniowej znacznie wygodniej jest stosować tzw. **kryterium siłowe**, bezpośrednio oparte na kryterium energetycznym, ale wykorzystujące koncepcję współczynnika intensywności naprężeń. Rezygnuje ono z energii powierzchniowej jako miary odporności na pęknięcie na rzecz nowej charakterystyki - krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} , określanego terminem „odporności na kruche pęknięcie”.

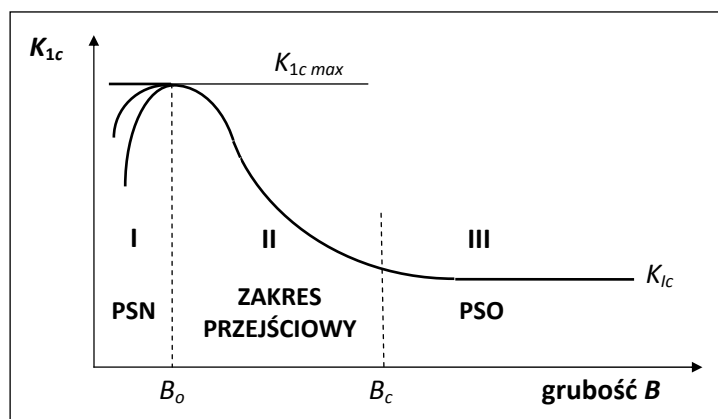
Kryterium siłowe pęknięcia przyjmuje postać:

$$K_I = K_{Ic} \quad (1.33)$$

Doświadczenia wykazują, że K_{Ic} może być uznane za stałą materiałową jedynie w PSO, a ostatnio pojawiają się poglądy, że nawet w warunkach PSO, nie jest to wielkość stała (np. prof. A. Neimitz). Niemniej jednak sposób określania K_{Ic} objęty jest normą E-399 (USA), oraz PN-87/H-4335.

Zależność parametru K_{Ic} od grubości ciała

Badania doświadczalne wykazały, że krytyczny współczynnik intensywności naprężeń jest silnie zależny od grubości ciała. W ciałach grubych dominuje w wierzchołku szczeliny płaski stan odkształcenia, a strefy plastyczne są znikomo małe w stosunku do grubości. W ciałach cienkich występuje płaski stan naprężenia, a długość przywierzchołkowych stref plastycznych jest zbliżona do grubości ciała. Ze względu na to, że strefy plastyczne ograniczają w pewnym stopniu możliwość kruchego pęknięcia, któremu towarzyszy lawinowy wzrost szczeliny prowadzący do zniszczenia elementu, przyłożone obciążenie zewnętrzne wywołujące wzrost szczeliny może być większe w porównaniu z obciążeniem dla ciała grubego. Oznaczmy przez K_{Ic} wartość współczynnika intensywności naprężeń odpowiadającą obciążeniu, przy którym następuje wzrost szczeliny w próbce o dowolnej grubości. Zależność K_{Ic} od grubości przedstawiono schematycznie na rys. 7.



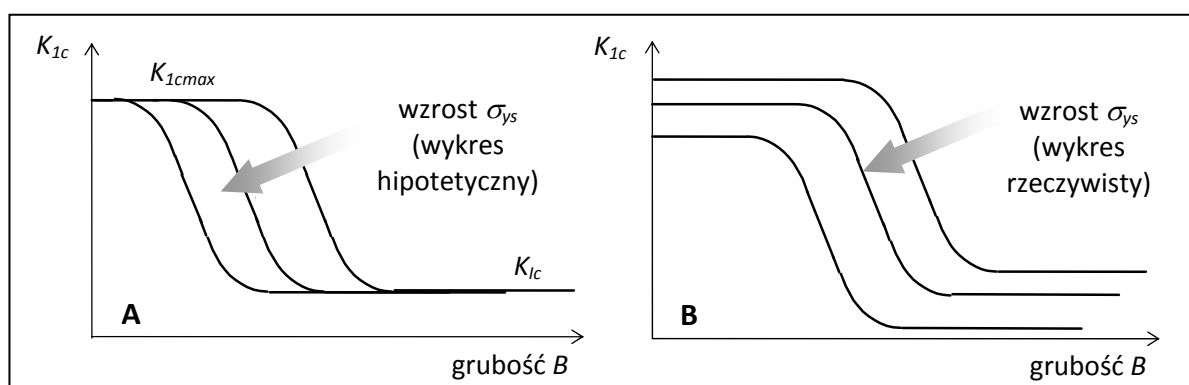
Rys. 7. Krytyczny współczynnik intensywności naprężeń w funkcji grubości.

- w ciałach o grubości przekraczającej B_c (region III) dominuje PSO, a WIN osiąga wartość minimalną K_{Ic} nie ulegającą zmianie ze wzrostem grubości ciała. K_{Ic} uznaje się zatem za stałą materiałową określającą odporność materiału na pęknięcie,

- w przejściowym obszarze grubości (region II) - wewnętrzna część ciała przylegająca do wierzchołka szczeliny znajduje się w PSO, a części przylegające do powierzchni zewnętrznych w PSN. Odporność na pękania zmienia się między minimum, tzn. K_{Ic} , a maksimum $K_{Ic\ max}$.
- w ciałach o grubościach mniejszych od B_0 dominuje PSN (region I). Rezultaty dotyczące odporności na pękanie obciążone są dużą niepewnością.
- **analiza ilościowa wpływu grubości na odporność na pękanie:**
 - aproksymacja liniowa Andersona
 - model Kraffta, Sullivana i Boyle'a.
 - model Bluhm'a
 - pół-empiryczne równanie Irwina

$$\frac{K_{Ic}}{K_{Ic}} = \sqrt{1 + \frac{1.4}{B^2} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{ys}} \right)^4} \quad (1.34)$$

Zależność parametru K_{Ic} od grubości ciała



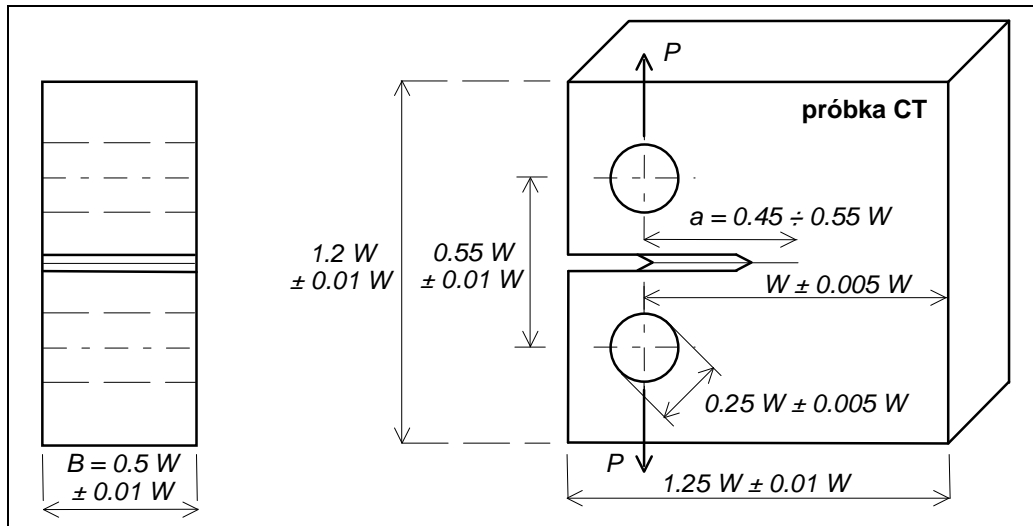
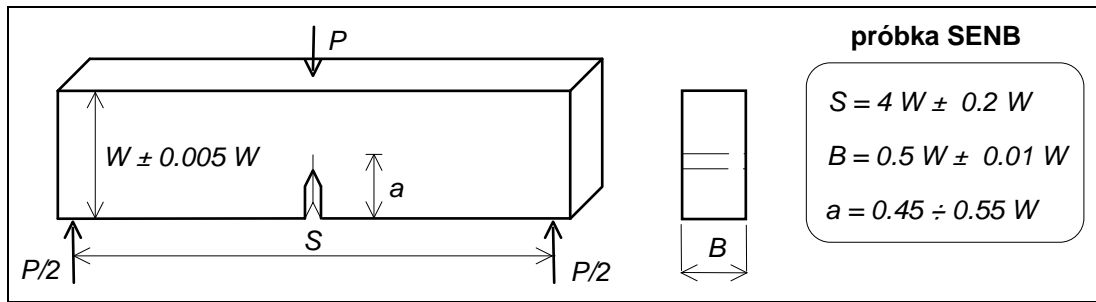
Rys. 8. Wpływ granicy plastyczności na odporność na pękanie.

- czym większa jest granica plastyczności materiału, tym strefa plastyczna jest mniejsza (większość materiału w strefie pękania znajduje się w PSO). Zmniejszanie się strefy plastycznej, osłabiającej efekt kruchego pękania oznacza zarazem względny wzrost kruchości, przejawiający się spadkiem wartości K_{Ic} . Tak więc czym wyższa jest granica plastyczności materiału, tym mniejszą ma on odporność na pękanie,
- materiały o wysokiej granicy plastyczności mają niską zarówno maksymalną odporność na pękanie $K_{Ic\ max}$ (PSN), jak i minimalną, tzn. K_{Ic} (PSO).

Wyznaczanie odporności na pękanie wg *ASTM SPECIFICATION E-399*.

Próbki testowe.

- próbka z karbem jednostronnym do trójpunktowego zginania (*ang.* **SENB** - Single Edge Notched Bend specimen)
- próbka kompaktową do próby rozciągania (*ang.* **CT** - Compact Tension specimen)
- próbka zakrzywioną w kształcie litery C (*ang.* **C-shaped** specimen).



Charakterystyczne wymiary B, W oraz a wynikają z warunków PSO (proponycja Irwina)

$$a, B \geq 2.5 \left(K_{Ic} / \sigma_{ys} \right)^2 \quad (1.35)$$

Zauważmy, że bezpośrednio wykorzystanie (1.35) przy określaniu koniecznych wymiarów próbek jest niemożliwe, gdyż obie zależności wymagają znajomości K_{Ic} , a zatem stałej, którą wartość przed wykonaniem badań nie jest znana. Z tego względu norma zaleca minimalne konieczne wymiary w zależności od stosunku granicy plastyczności σ_{ys} i modułu Younga E. Norma zaleca minimalne wymiary w zależności od stosunku σ_{ys} / E - czym jest on mniejszy, tym wymagana grubość B i dł.szczeliny a jest większa (np. dla $\sigma_{ys} / E = 0.0050 \div 0.0057$ min. grubość powinna wynosić wg. normy 7.5 cm. Oznacza to, że wysokość próbki SENB winna wynosić 15 cm, a jej długość min. 60 cm !).

Przy wyznaczaniu K_{Ic} należy korzystać z równań określających współczynniki intensywności naprężeń dla próbek SENB i CT, podanych przez Srawley'a i umieszczonych w normie E-399:

- dla próbki do trójpunktowego zginania:

$$K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \frac{3(A_w)^{1/2} \left[1.99 - A_w(1 - A_w)(2.15 - 3.93A_w + 2.7A_w^2) \right]}{2(1 + 2A_w)(1 - A_w)^{3/2}} \quad (1.36)$$

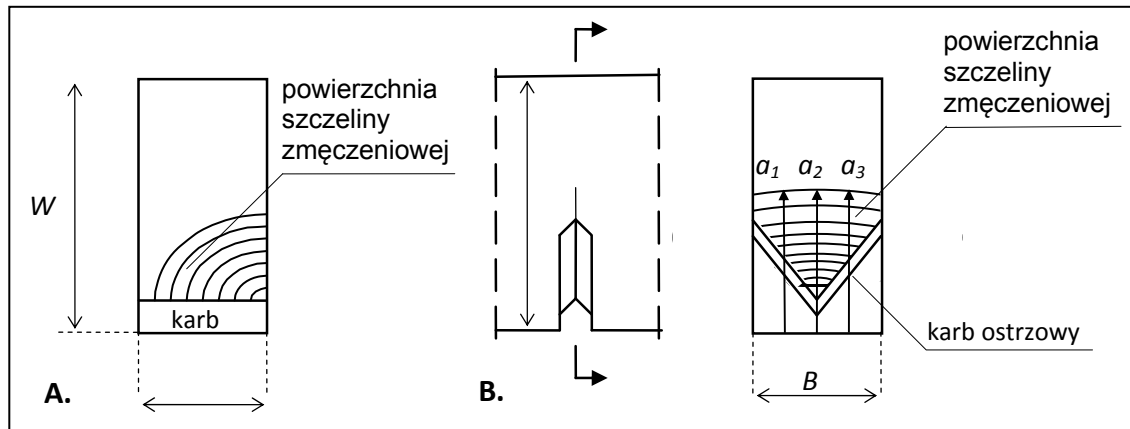
- dla próbki kompaktowej:

$$K_I = \frac{P}{BW^{1/2}} \frac{(2 + A_w) \left[0.886 + 4.64A_w - 13.32A_w^2 + 14.72A_w^3 - 5.6A_w^4 \right]}{(1 - A_w)^{3/2}} \quad (1.37)$$

gdzie: $A_w = a/W$.

Przygotowanie próbek do badań

Podstawowe znaczenie dla uznania przeprowadzonej próby za miarodajną jest uzyskanie wzrostu szczeliny w ściśle określonej płaszczyźnie, tj. płaszczyźnie prostopadłej do kierunku siły rozciągającej w przypadku próbki CT, a w przypadku próbki SENB w płaszczyźnie przekroju poprzecznego próbki.



Rys. 9. Karb ze wstępną szczeliną zmęczeniową: A. karb krawędziowy, B. karb ostrzowy.

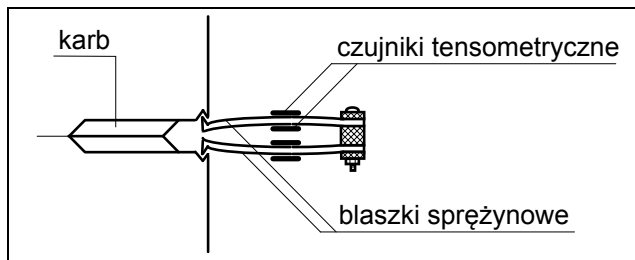
W rzeczywistej próbce kształt brzegu szczeliny powinien być bliski liniowemu. Spełnienie tych wymagań uzyskuje się poprzez wprowadzenie do próbki wstępnej szczeliny zmęczeniowej, wychodzącej z karbu ostrzowego - tzw. startera - zapewniającego wzrost szczeliny w pożądanej płaszczyźnie. W grubych próbkach ze standardowym karbem krawędziowym szczelina wychodzi zazwyczaj z jednego z jego brzegów – rys. 9A. W wyniku tego front wstępnie wprowadzonej szczeliny zmęczeniowej jest zakrzywiony, co z kolei powoduje, że właściwa szczelina rozwijająca się przy pękaniu również jest zakrzywiona. Ponadto, sposób rozwoju szczeliny jest trudno przewidywalny, a różne próbki są w zasadzie nieporównywalne.

Aby tego uniknąć należy wykonać karb ostrzowy (rys. 9B) o długości 0.45 W i promieniu dna karbu nie większym niż 0.25 mm. Następnie obciąża się próbkę obciążeniem zmęczeniowym, niskocyklicznym (norma precyzuje warunki obciążenia) tak, aby uzyskać wstępną szczelinę o długości 0.05 W. Karb ostrzowy zdecydowanie ułatwia inicjację szczeliny zmęczeniowej i „wymusza” miejsce inicjacji w połowie grubości próbki. Zapewniony jest dzięki temu niemal prostoliniowy kształt brzegu szczeliny. Musi on być sprawdzony po wykonaniu właściwej próby doświadczalnej na pękniętej próbce (tzn. po jej fragmentacji).

Powierzchnie przełomu szczeliny zmęczeniowej i właściwego pęknięcia są całkowicie różne i przy odpowiednim oświetleniu łatwo rozróżnialne. Dzięki temu można dokonać pomiaru całkowitej długości pęknięcia wstępnego (łącznie długość karbu i szczeliny zmęczeniowej).

Zgodnie z normą - długość szczeliny zdefiniowana jest jako $a = 1/3(a_1 + a_2 + a_3)$ (rys. 9B), gdzie a_2 jest pomiarzone w połowie grubości, zaś a_1 i a_3 w połowie odległości między środkiem szczeliny, a jej punktami brzegowymi. Dana próba jest uznana za nieważną, jeżeli różnica między wartościami a_1 , a_2 , a_3 i wartością średnią a przekracza 5 procent, lub długość szczeliny na zewnętrznych powierzchniach próbki różni się od a więcej niż 10 procent. Próba jest nieważna również wówczas, gdy jakkolwiek punkt frontu szczeliny oddalony jest od karbu o mniej niż 0.05 a lub 1.3 mm (miarodajne jest ograniczenie silniejsze).

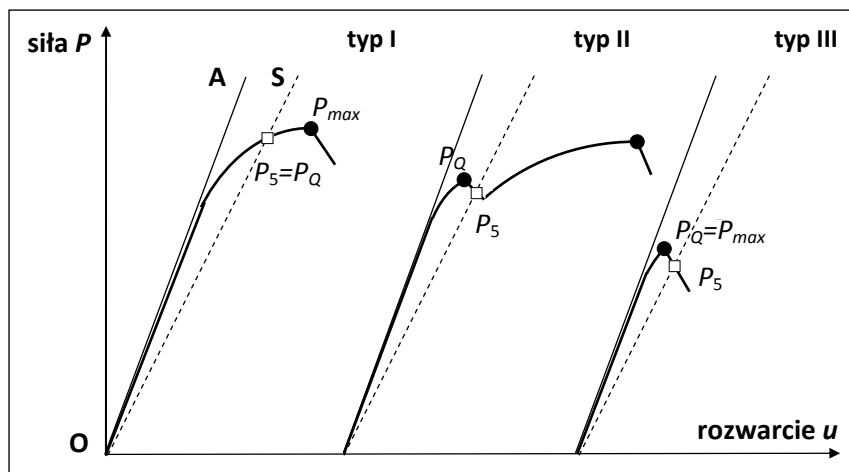
Procedura przeprowadzenia próby.



W czasie próby rejestruje się rozwarcie szczeliny u w jej "ustach" w funkcji przyłożonej siły P

Wyznaczanie wartości K_{Ic} z wykresu $P - u$.

Norma E-399 wyróżnia trzy typowe wykresy $P-u$, przedstawione na rys. 10. Typ I odpowiada nieliniowemu zachowaniu się materiału, typ II - uwzględnia efekt „pop-in”, natomiast typ III odnosi się do materiałów niemal idealnie liniowo sprężystych.



Rys. 10. Wyznaczanie siły P_Q w zależności od typu wykresu $P-u$.

Procedura wyznaczania wartości K_{Ic} poprzedzona jest wyznaczeniem tzw. warunkowej odporności na pękanie K_Q . Wymaga to wykonania prostej konstrukcji geometrycznej polegającej na nakreśleniu prostej stycznej do początkowego liniowego fragmentu wykresu $P-u$ (prosta OA na rys. 10), a następnie poprowadzeniu siecznej OS wychodzącej z początku układu współrzędnych O , o nachyleniu mniejszym o 5 procent w stosunku do nachylenia prostej stycznej OA (*ang. offset procedure*). Przyjmuje się, że 5% zmiana nachylenia odpowiada zmianie podatności wywołanej 2% wzrostem długości szczeliny. Uważa się, że dzięki takiej procedurze uwzględniony jest wpływ niewielkich stref plastycznych na odporność na pękanie. Punkt przecięcia siecznej z wykresem wyznacza wartość siły, którą oznacza się symbolem P_5 . Kolejny krok to wyznaczenie wartości tzw. siły krytycznej P_Q . Sposób jej wyznaczania zależy od typu wykresu $P-u$. Obowiązuje tu następująca reguła:

- jeżeli siła w każdym punkcie wykresu $P-u$, poprzedzającym punkt, któremu odpowiada siła P_5 jest mniejsza od P_5 , to należy przyjąć $P_Q = P_5$ (rys. 5.10 - typ I wykresu),
- jeżeli w jakimkolwiek punkcie wykresu $P-u$, poprzedzającym punkt, któremu odpowiada siła P_5 występuje lokalne maksimum siły, większe od P_5 , to siła krytyczna P_Q jest równa temu maksimum (rys. 5.10 - typ II i III wykresu).

Warunkiem uznania danej próby za ważną jest, aby stosunek maksymalnej siły P_{max} uzyskanej w trakcie próby do siły P_Q był mniejszy od 1.10 - w przeciwnym przypadku próbę należy zdyskwalifikować.

Kolejny krok to wyznaczenie warunkowej odporności na pękanie K_Q odpowiadającej sile krytycznej P_Q , korzystając w tym celu z równań (1.36) i (1.37), odpowiednio dla próbki zginanej i rozciąganej. Należy jeszcze sprawdzić warunek płaskiego stanu odkształcenia określony przez zależności (1.35) wstawiając do nich w miejsce K_{Ic} obliczoną wartość K_Q . Jeżeli oba warunki są spełnione, to odporność na kruche pękanie $K_{Ic} = K_Q$.