

MECHANIKA PĘKANIA NA TROPACH AWARII KONSTRUKCJI I DEFECTÓW MATERIAŁOWYCH

Zbigniew L. KOWALEWSKI, Tadeusz SZYMCZAK*, Jan KRASKOWSKI,
Andrzej CHOJNACKI

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa

*Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa

zkowalew@ippt.pan.pl

1. WSTĘP

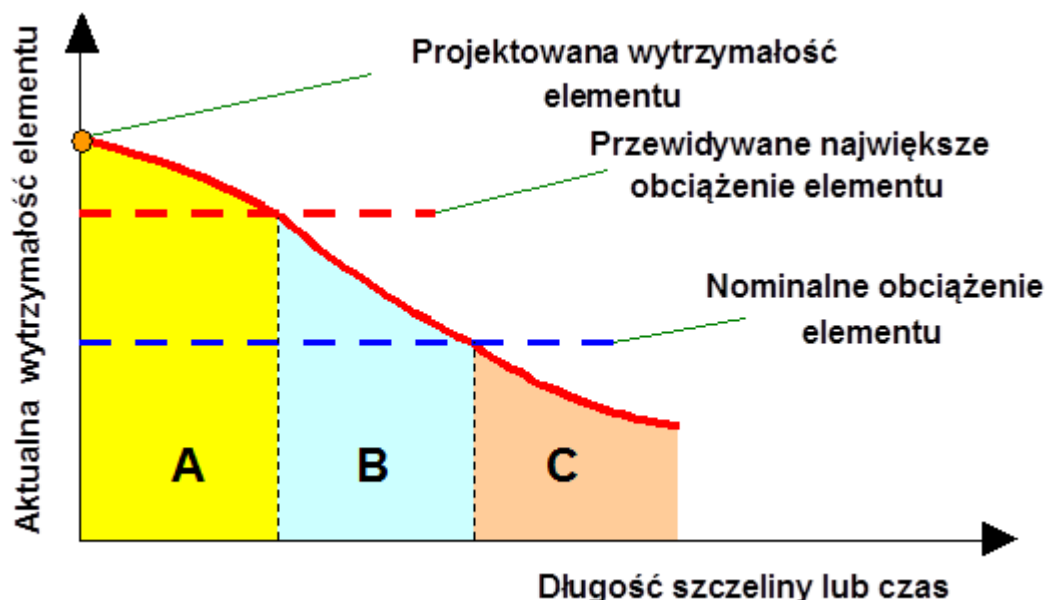
W klasycznych obliczeniach wytrzymałościowych przyjmuje się, że materiały konstrukcyjne stanowią idealne continuum. Nie tylko nie mają wad w postaci nieciągłości, ale także ich właściwości są jednorodne i zgodne z danymi katalogowymi producenta. Obliczenia składowych naprężeń, na których opiera się wymiarowanie elementów konstrukcji, nawet przy uwzględnieniu współczynników bezpieczeństwa uwzględniających niedokładność obliczeń, cechuje pewna losowość związana z właściwościami materiałów i rodzajem obciążenia, wpływem karbu, wpływem środowiska względnie zmian właściwości materiału w czasie eksploatacji, mogą okazać się zawodne, gdy w materiale znajdują się wady. Przyjmuje się, że osłabienie wytrzymałości elementu spowodowanego wadą wynika tylko z ubytku przekroju nośnego spowodowanego jej obecnością. Klasyczne obliczenia wytrzymałościowe nie uwzględniają zagrożenia związanego z wadami w postaci nieciągłości, które mogą być zarodkami pęknięć i jednocześnie nie są w stanie ocenić, w jakich warunkach w zdrowym materiale mogą powstawać mikropęknięcia, kiedy pęknięcie będzie się rozwijać i jak szybki będzie przyrost pęknięcia w warunkach pracy elementu? Odpowiedzi na te pytania daje natomiast mechanika pękania.

Defekty materiałowe w postaci nieciągłości, bądź anizotropowych właściwości powstają zarówno podczas procesów produkcyjnych, jak i w czasie eksploatacji. Do bardziej znanych wad powstających w produkcji należą pęcherze gazowe, porowatość, wtrącenia obcych materiałów, segregacje składników, rozwarstwienia, przyklejenia, pęknięcia powierzchniowe i pęknięcia wewnętrzne. Defekty powstające w czasie eksploatacji to przede wszystkim pęknięcia, uszkodzenia korozyjne i degradacja właściwości materiału. Pogorszenie parametrów wytrzymałościowych materiału jest szczególnie istotne w przypadku elementów pracujących w podwyższonych temperaturach.

Pęknięcia stanowią istotne zagrożenie dla konstrukcji, ponieważ znacznie obniżają ich wytrzymałość. Wielkość pęknięć powstałych w elementach konstrukcji można przedstawiać w postaci funkcji czasu eksploatacji lub liczby cykli obciążenia.

W miarę upływu czasu aktualna wytrzymałość elementu ulega zmianom w sposób poglądowo ujęty na rys. 1. Po pewnym czasie eksploatacji jej wartość obniża się do poziomu, przy którym element konstrukcyjny nie jest w stanie przenieść przypadkowych przeciążeń występujących w trakcie eksploatacji. Z chwilą zaistnienia takiej sytuacji należy się liczyć

z możliwością zniszczenia konkretnego elementu lub wręcz całej konstrukcji, prowadząc do katastrofy. W przypadku, gdy awaria jeszcze nie wystąpi, propagacja pęknięć postępować będzie dalej tak długo, aż wartość aktualnej wytrzymałości konstrukcji nie obniży się do poziomu, przy którym nominalne obciążenia elementu doprowadzą do jej zniszczenia. W praktyce oznacza to, że każdy element konstrukcyjny lub konstrukcja mają okres bezpiecznej eksploatacji, w którym prawdopodobieństwo wystąpienia katastroficznego w skutkach zniszczenia powinno być utrzymane na jak najniższym poziomie.



Rys. 1. Zmiany wytrzymałości elementu konstrukcyjnego w zależności od czasu eksploatacji lub długości pęknięcia

Sytuacji przedstawionych na rys. 1 nie można przewidzieć i opisać w ramach metod znanych w klasycznej wytrzymałości materiałów. Stanowiło to bezpośrednią przyczynę powstania w ubiegłym stuleciu nowej gałęzi mechaniki pod nazwą mechanika pękania. Teoria stosowana w ramach mechaniki pękania dostarczyła nowych narzędzi, za pomocą których takie zjawiska, jak pełzanie lub zmęczenie można precyzyjnie opisać.

W poniższej pracy przedstawione zostaną w dużym skrócie i uproszczeniu podstawy pękania materiałów metalowych, obejmujące podstawowe pojęcia, kryteria oraz sposoby opisu. Bardziej szczegółowe omówienie wymienionych zagadnień można znaleźć w szerszych opracowaniach, publikacjach w czasopiśmie lub książkach wyszczególnionych w załączonym spisie literatury [1-11].

2. PODSTAWY MECHANIKI PĘKANIA

2.1. Uwagi wprowadzające

Zainteresowanie rozwojem mechaniki pękania pojawiło się między innymi w następstwie spektakularnych katastrof konstrukcji zaprojektowanych zgodnie z aktualnym stanem wiedzy danej epoki. Problemy pękania były przyczynami zniszczenia konstrukcji mostowych, zbiorników ciśnieniowych, rurociągów, cystern, statków, samolotów i wielu innych, w których zastosowano nowe technologie produkcyjne wprowadzone zbyt pośpiesznie i bez odpowiednich badań testowych.

Pęknięcie następowało przy obciążeniach niższych od wartości zdolnych spowodować odkształcenie plastyczne w całym przekroju elementów konstrukcyjnych, a więc niższych od

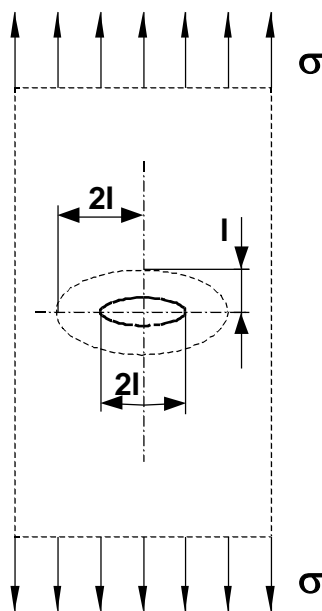
wartości naprężenia dopuszczalnego według kryteriów wytrzymałościowych. Powstały metody badania parametrów niezbędnych do oceny niebezpieczeństwa pęknięcia i zachowania się pęknięcia w pracującej konstrukcji, a więc udarności materiałów, odporność materiału na pęknięcie materiałów kruchych i materiałów wykazujących zdolność do odkształcenia plastycznego. Opracowano metody pozwalające ocenić, przy jakim obciążeniu wykryte pęknięcie będzie się rozwijać i jaka będzie prędkość narastania pęknięcia przy obciążeniach eksploatacyjnych, a więc i jaki będzie pozostały czas bezpiecznej pracy elementu, w którym wykryto pęknięcie.

Współczesny stan wiedzy dotyczący zagadnień mechaniki pęknięcia w dużej mierze zawdzięczamy pionierskim pracom A.A. Griffitha z roku 1920 [12]. Zaproponował on hipotezę energetyczną pozwalającą ocenić teoretyczną wytrzymałość kruchych ciał stałych zawierających defekty. W celu opisanego przyczyn zmniejszenia się wytrzymałości materiału wskutek pęknięć wykorzystał rozkłady naprężenia i odkształcenia występujące przy rozciąganiu nieskończonej płyty z otworem w kształcie elipsy, której większa oś jest prostopadła do kierunku działania siły rozciągającej przyłożonej w nieskończoności, rys. 2. Zgodnie z teorią A.A. Griffitha [12] w wierzchołkach szczeliny pojawia się spiętrzenie naprężenia, uzależnione od jej długości i jej promienia krzywizny przy wierzchołku. Wartość tego naprężenia można obliczyć ze wzoru

$$\sigma_s = \sigma_n \sqrt{l/r} , \quad (1)$$

gdzie

- σ_n - naprężenie nominalne,
- r - promień krzywizny szczeliny,
- $2l$ - długość szczeliny.



Rys. 2. Nieskończona płyta z otworem w kształcie elipsy poddana rozciąganiu

Spiętrzenie naprężenia w wierzchołku prowadzi do dekohezji i szczelina zaczyna się wydłużać. W wyniku tego procesu przy założeniu spełnienia prawa Hooke'a w całej płycie następuje:

- (a) odciążenie obszaru wokół szczeliny,
- (b) wydzielenie energii odkształcenia sprężystego,
- (c) wykonanie pracy na utworzenie nowych powierzchni.

Przeanalizujemy po kolei kolejne fazy rozwoju szczeliny. Dla postawionego zagadnienia płyty o nieskończenie dużych wymiarach i jednostkowej grubości poddanej rozciąganiu w kierunku prostopadłym do większej półosi eliptycznej szczeliny najpierw następuje obciążenie obszaru płyty wokół eliptycznej szczeliny o długościach półosi l oraz $2l$ i polu powierzchni $S=2\pi l^2$. Ponieważ jednostkowa energia odkształcenia sprężystego wynosi $U=\sigma^2/2E$, odciążenie płyty o polu powierzchni S wywoła w niej spadek jednostkowej energii odkształcenia sprężystego określony zależnością

$$\Delta U_s = \frac{\sigma^2}{2E} 2\pi l^2 = \frac{\pi l^2 \sigma^2}{E} . \quad (2)$$

Na powstanie szczeliny w płycie o jednostkowej grubości i o polu powierzchni $-2l \times 2 \times 1 = 4l$ niezbędna jest praca, którą można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta U_p = 4lT , \quad (3)$$

gdzie T oznacza jednostkową energię powierzchniową.

Przyrost energii na wytworzenie szczeliny jest różnicą energii wyrażonych wzorami (3) oraz (2) i wynosi

$$\Delta U = 4lT - \pi l^2 \frac{\sigma^2}{E} . \quad (4)$$

Wartość różnicy energii zależna jest od długości szczeliny. Można pokazać, że osiąga ona ekstremum przy zadanym stałym naprężeniu, gdy występuje stan krytyczny nagłej propagacji szczeliny, oraz gdy

$$\frac{d(\Delta U)}{dl} = 2T - \frac{\pi l \sigma^2}{E} = 0 . \quad (5)$$

Wynika stąd związek

$$\sigma = \sqrt{\frac{2ET}{\pi l}} , \quad (6)$$

umożliwiający obliczenie krytycznej wartości naprężenia, powyżej której szczelina zacznie propagować w sposób niekontrolowany.

Według G.R. Irwina [13] zmianę energii sprężystej wywołanej przyrostem pola powierzchni pęknięcia dS można wyrazić zależnością

$$\frac{d(\Delta U_s)}{dS} = \frac{d(\Delta U_s)}{d(2l)} = G , \quad (7)$$

gdzie:

G - jednostkowa energia niezbędna do rozwoju pęknięcia, tzw. współczynnik uwalniania energii (G.R. Irwin nazwał ją siłą wydłużającą pęknięcie).

Uwzględniając wzór A.A. Griffitha na spadek energii sprężystej (2) otrzymujemy

$$\frac{d(\Delta U_s)}{d(2l)} = \frac{2\pi l \sigma^2}{E}, \quad (8)$$

i stąd

$$d(\Delta U_s) dl = \pi l \sigma^2 / E = G. \quad (9)$$

Wzór (9) obowiązuje dla płaskiego stanu naprężenia.

Dla płaskiego stanu odkształcenia otrzymujemy wzór na jednostkową energię niezbędną do rozwoju pęknięcia w postaci

$$G = (1 - \nu^2) \frac{\pi l \sigma^2}{E}. \quad (10)$$

Propagacja pęknięcia dla obu sytuacji nastąpi wówczas, gdy G osiągnie wartość krytyczną. Wprowadzając parametr G.R. Irwina (tzw. współczynnik intensywności naprężenia)

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \quad [\text{N/m}^{\frac{3}{2}}], \quad (11)$$

otrzymujemy

$$G = \frac{K^2}{E}, \quad G = (1 - \nu^2) \frac{K^2}{E}. \quad (12)$$

Współczynnik K osiągający wartość krytyczną w chwili nieustalonego, samoistnego wzrostu pęknięcia oznacza się K_c i nazywa odpornością na rozwój pęknięcia. Szersza dyskusja wymienionych wyżej parametrów zostanie przedstawiona w punkcie 2.2.

Równoległe z dalszym rozwojem mechaniki pęknięcia i gromadzeniem doświadczeń w jej stosowaniu rozwijały się metody i aparatura do badań nieniszczących. Powstawały możliwości wykrywania coraz mniejszych nieciągłości, bardziej dokładnego wymiarowania i bardziej wiarygodnego ustalania charakteru i orientacji wykrywanych wad. Badania nieniszczące mogą dostarczać coraz bardziej dokładnych i wiarygodnych danych o defektach.

Mechanika pęknięcia zajmuje się teoretycznym opisem zachowania się pęknięć. W zastosowaniach praktycznych pozwala:

- ocenić rozmiar pęknięcia, po przekroczeniu którego w warunkach eksploatacji pęknięcie zaczyna się powiększać (jest to istotne przy ocenie rozmiaru wady dopuszczalnej);
- ocenić szybkość narastania pęknięcia, a tym samym obliczyć pozostały czas, w ciągu którego pęknięcie rozwija się do rozmiarów krytycznych, odpowiadających zniszczeniu elementu (wynik takiej oceny pozwala na bezpieczną

eksploatację elementów zawierających wady i na technicznie uzasadnione planowanie terminu remontu).

Rzeczywiste pęknięcia mają zwykle skomplikowany kształt i rozwiniętą powierzchnię. W mechanice pęknięcia modelem rzeczywistego pęknięcia w materiale elementu konstrukcyjnego jest płaska szczelina o ostrych krawędziach. Rozpatrywane są szczeliny o prostych kształtach geometrycznych, jak koło, elipsa lub półkoło (w przypadku szczelin otwartych na powierzchni) znajdujące się w idealnym ośrodku i w idealny sposób obciążane, np. szczelina w cienkiej tarczy, czy w nieograniczonej próbce znajdującej się w jednoosiowym stanie naprężenia. Przyjęcie prostych modeli materiału i pęknięć podyktowane jest trudnościami w opisie teoretycznym zachowania się wad w rzeczywistych elementach konstrukcji.

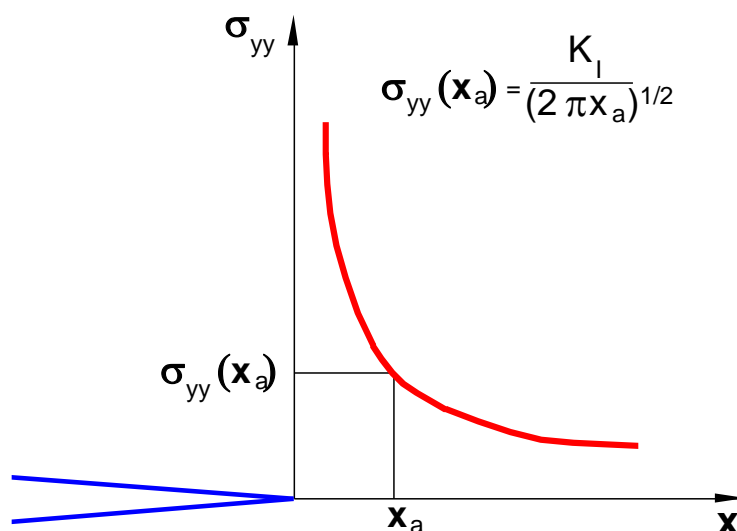
Elementy konstrukcyjne mają bardzo zróżnicowaną geometrię, są obciążane w złożony sposób, a ich materiał nie zachowuje się w pełni zgodnie z modelem przyjętym w opisie. Rozwój pęknięć w rzeczywistych elementach stwarza też inne ograniczenia w zestawieniu z przewidywaniami modeli. Im większe są różnice między właściwościami materiału, geometrią badanego elementu, rozmiarami, kształtem i orientacją nieciągłości, a także między polem naprężenia w materiale rzeczywistego elementu a odpowiednimi wielkościami modelu teoretycznego, tym większe mogą być rozbieżności w zachowaniu się rzeczywistych pęknięć i modelowych szczelin.

2.2. Podstawowe definicje w mechanice pęknięcia

2.2.1. Współczynnik intensywności naprężenia

Wprowadzony przez G.R. Irwina współczynnik intensywności naprężenia (11) definiuje się jako pole naprężenia w otoczeniu wierzchołka szczeliny rozciąganej siłą wywołującą naprężenie σ i wyraża podanym już wcześniej wzorem (11), w którym l oznacza połowę długości większej z osi szczeliny eliptycznej.

Wartość współczynnika intensywności naprężenia uzależniona jest od rodzaju obciążenia. Współczynnik ten wykorzystuje się w zależnościach określających rozkłady naprężenia i przemieszczenia wokół wierzchołka szczeliny.



Rys. 3. Poglądowa ilustracja rozkładu naprężenia wokół wierzchołka szczeliny

Na rys. 3 pokazano przykładowo rozkład naprężenia wokół szczeliny dla przypadku rozciągania. Wzrost długości szczeliny przy stałym naprężeniu roboczym prowadzi do zwiększenia wartości współczynnika intensywności naprężenia i odpowiednio wartości składowych naprężenia w pobliżu wierzchołka szczeliny.

Wartość współczynnika intensywności naprężenia K_I , przy której pęknięcie zaczyna się gwałtownie rozwijać nazywa się krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężenia (WIN) i oznacza się K_{IC} . Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężenia K_{IC} jest stałą materiałową i nazywa się odpornością materiału na pękanie. Wartości K_{IC} dla poszczególnych materiałów wyznacza się doświadczalnie na próbkach zawierających karby i wychodzące z karbów pęknięcia zmęczeniowe wytworzone celowo w teście prowadzonym przy obciążeniu cyklicznym. Sposoby wyznaczania odporności materiałów na pękanie przedstawione są w dalszej części pracy.

Gdy szczelina ma kształt inny niż na rys. 3 i gdy znajduje się w elemencie o skończonych wymiarach, to wpływ geometrii szczeliny i geometrii elementu na współczynnik koncentracji naprężenia uwzględnia współczynnik kształtu f :

$$K_{IC} = f\sigma\sqrt{\pi a}.$$

Wyrażenia na współczynnik intensywności naprężenia w przypadku obciążenia szczeliny przez ścinanie wzdłużne i poprzeczne (sposoby II i III) mają podobną postać, jak przy rozrywaniu (rys. 4). Przy rozwiązywaniu większości problemów mechaniki pękania wykorzystuje się model szczeliny obciążonej przez rozrywanie i pojęcie współczynnika intensywności naprężenia K_I i odporności na pękanie materiału K_{IC} . Jednym z powodów stosunkowo rzadkiego wykorzystywania współczynników koncentracji naprężenia przy obciążeniu szczeliny przez ścinanie podłużne i poprzeczne jest brak metod wyznaczania ich wartości.

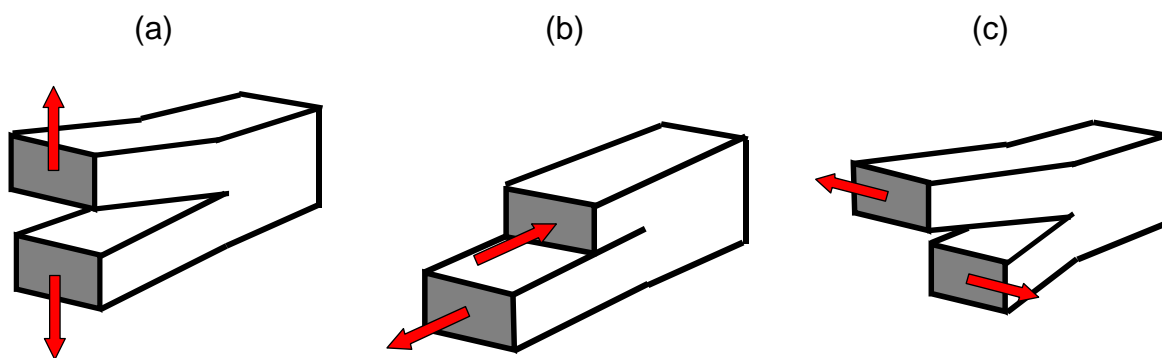
Należy podkreślić, że współczynnik K_{IC} jest dobrą miarą odporności na pękanie materiałów sprężystych o dużej wytrzymałości doraźnej, a więc materiałów o właściwościach zbliżonych do materiałów kruchych. Zaleca się wyznaczać wartość i korzystać z K_{IC} tylko w przypadku materiałów, których wartość granicy plastyczności R_e stanowi przynajmniej 1/150 część wartości modułu sprężystości podłużnej (0,0067E).

2.2.2. Rozkłady naprężenia i przemieszczenia wokół wierzchołka szczeliny

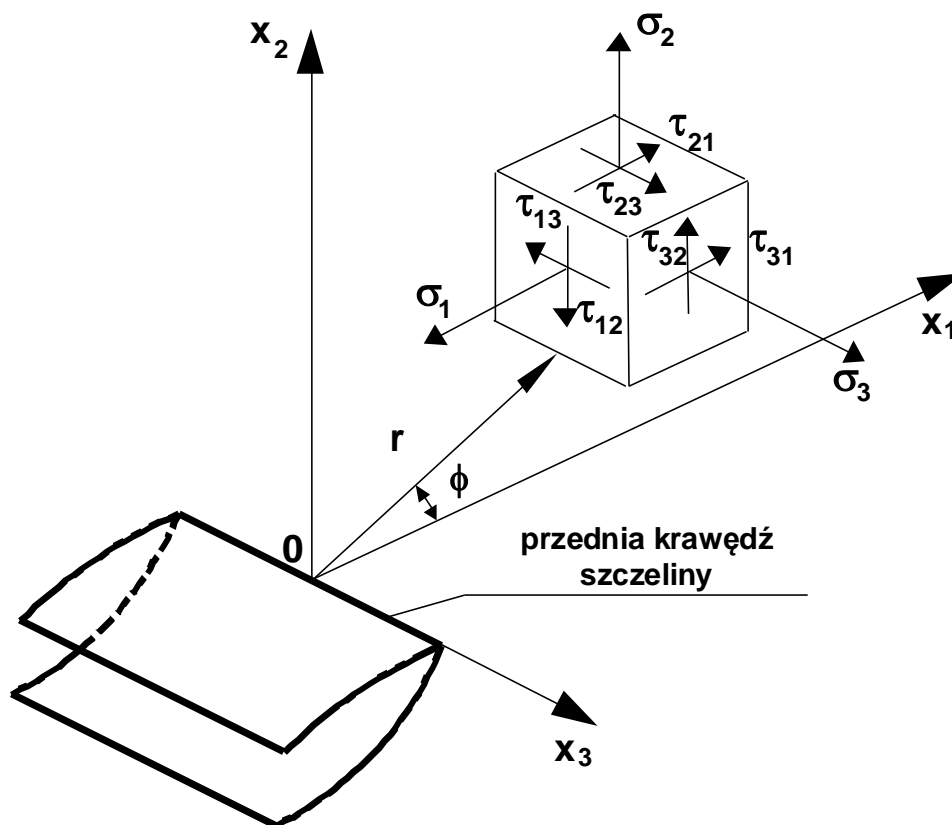
Pola naprężenia i przemieszczenia wokół wierzchołka szczeliny rozpatrywane są dla trzech podstawowych przypadków:

- 1) rozrywania, rys. 4a,
- 2) ścinania wzdłużnego, rys. 4b,
- 3) ścinania poprzecznego, rys. 4c.

Superpozycja rozwiązań dla wszystkich wymienionych wyżej przypadków pozwala opisać dowolny stan naprężenia i odkształcenia wokół wierzchołka szczeliny. Współczynnik intensywności naprężenia w zależności od rodzaju wzajemnego przemieszczania się powierzchni szczeliny oznacza się odpowiednio jako: K_I , K_{II} , K_{III} . Rozważmy teraz zależności opisujące rozkłady naprężenia i przemieszczenia wokół frontu szczeliny dla trzech wspomnianych przypadków uzyskane przez Westergaarda w biegunowym układzie współrzędnych, rys. 5.



Rys. 4. Schematy obciążenia próbek do badań rozwoju pęknięć: (a) rozrywanie, (b) ścinanie wzdłużne, (c) ścinanie poprzeczne



Rys. 5. Wierzchołek szczeliny i miejsce usytuowania biegunowego układu współrzędnych

W zależności od schematu obciążenia można zdefiniować funkcje pozwalające określić rozkłady składowych naprężenia lub przemieszczenia.

W przypadku materiału liniowo-sprężystego przy normalnym rozrywaniu lub odrywaniu, rys. 4a, zależności takie wyrażają się następującymi wzorami:

składowe naprężenia

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right) \\
 \sigma_2 &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right) \\
 \tau_{12} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta \\
 \sigma_3 &= \nu(\sigma_1 + \sigma_2), \quad \tau_{13} = \tau_{23} = 0
 \end{aligned} \tag{13}$$

składowe przemieszczenia

$$\begin{aligned}
 u &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\Theta}{2} \right) \\
 v &= \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\Theta}{2} \right) \\
 w &= 0
 \end{aligned} \tag{14}$$

- r, Θ - współrzędne biegunowego układu współrzędnych zaczepionego w wierzchołku pęknięcia,
 K - współczynnik intensywności naprężenia (WIN), indeksy przy WIN - I, II, III oznaczają sposób obciążenia,
 G - moduł Kirchhoffa.

Zależności opisujące rozkład naprężenia i przemieszczenia wokół frontu szczeliny dla materiału liniowo-sprężystego przy ścinaniu wzdłużnym, rys. 4b, przyjmują następującą postać:

składowe naprężenia

$$\begin{aligned}
 \sigma_1 &= -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta \right) \\
 \sigma_2 &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \cos \frac{\Theta}{2} \cos \frac{3}{2} \Theta \\
 \tau_{12} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\Theta}{2} \sin \frac{3}{2} \Theta \right) \\
 \sigma_1 &= \nu(\sigma_3 + \sigma_2), \quad \tau_{13} = \tau_{23} = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

składowe przemieszczenia

$$\begin{aligned} u &= \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} \left(2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\Theta}{2} \right) \\ v &= \frac{K_{II}}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\Theta}{2} \left(-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\Theta}{2} \right) \\ w &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

Z kolei zależności opisujące rozkład naprężenia i przemieszczenia wokół frontu szczeliny dla materiału liniowo-sprężystego przy ścinaniu poprzecznym, rys. 4c, można wyrazić w postaci:

składowe naprężenia

$$\begin{aligned} \tau_{13} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\Theta}{2} \\ \tau_{23} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\Theta}{2} \\ \sigma_1 &= \sigma_2 = \sigma_3 = \tau_{23} = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

składowe przemieszczenia

$$\begin{aligned} w &= \frac{K_{III}}{G} \sqrt{\frac{2r}{\pi}} \sin \frac{\Theta}{2} \\ u &= v = 0 \end{aligned} \quad (18)$$

W zapisie ogólnym funkcje rozkładu naprężenia i przemieszczenia można w formie skróconej zapisać w postaci następujących związków:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_{(\alpha)}}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\Theta), \quad (19)$$

$$u_i = \frac{K_{(\alpha)}}{\sqrt{2\pi}} \frac{1}{4G} \sqrt{r} g_i(\Theta), \quad (20)$$

gdzie:

$f_{ij}(\Theta)$, $g_i(\Theta)$ - uniwersalne funkcje kąta Θ niezależne od geometrii próbek,

$K_{(\alpha)}$ - współczynnik intensywności naprężenia,

$\alpha = I, II, III$ - zmienna identyfikująca sposób obciążenia.

2.2.3. Współczynnik Uwalniania Energii (WUE)

Współczynnik uwalniania energii określa zmianę energii potencjalnej próbki wraz z nieskończeniem małym przyrostem długości szczeliny. Definiuje się go jako pochodną energii potencjalnej względem długości szczeliny:

$$G_{(\alpha)} = -\frac{\partial U_p}{\partial a} \quad (21)$$

Według G.R. Irwina przyjmuje on następującą postać:

$$G = \frac{\beta}{E} K_I^2 + \frac{\beta}{E} K_{II}^2 + \frac{(1+\nu)}{E} K_{III}^2, \quad (22)$$

gdzie:

- $G_{(\alpha)}$ - WUE,
- U_p - energia potencjalna,
- a - długość szczeliny,
- E - moduł Younga,
- ν - współczynnik Poissona,
- $\beta=1$ - dla płaskiego stanu naprężenia,
- $\beta=1-\nu^2$ - dla płaskiego stanu odkształcenia.

2.2.4. Całka Rice'a J

J.R. Rice zaproponował całkę J jako wielkość niezależną od drogi, która jest miarą intensywności pola naprężenia i odkształcenia przed czołem pęknięć i karbów, a także może charakteryzować odporność materiałów sprężysto-plastycznych na pęknięcie [14]. Całka J jest zdefiniowana wzdłuż konturu zawierającego czoło szczeliny o długości a (rys. 6) i przedstawia zmianę energii potencjalnej próbki przypadającą na jednostkę grubości, jaka by nastąpiła, gdyby długość szczeliny wzrosła o nieskończenie małą wartość da . Zmiana energii potencjalnej jednostki grubości próbki związana z przyrostem długości szczeliny od a_1 do a_2 wyraża się całką

$$\int_{a_1}^{a_2} J da,$$

przy czym J jest zdefiniowane zależnością:

$$J = \int_C \left(W dx_2 - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds \right), \quad (23)$$

gdzie:

$$W = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij} \quad \text{- jednostkowa energia potencjalna odkształcenia (i, j = 1,2,3),}$$

C – dowolny kontur całkowania zaczynający się na dolnej krawędzi szczeliny, a kończący się na górnej,

t_i – składowa naprężenia działająca prostopadle do konturu C ,

u_i – wektor przemieszczenia wzdłuż konturu C ,

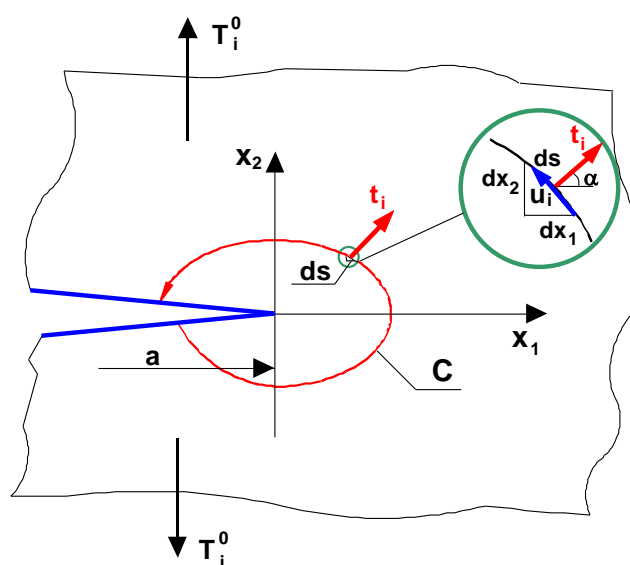
s - współrzędna mierzona wzdłuż konturu C .

Na rys. 6 pokazano znaczenie wielkości występujących w wyrażeniu określającym całkę J . Drugi człon pod całką oznacza wykonaną pracę na przyrost długości szczeliny.

Całka J przedstawia zmianę energii potencjalnej próbki przy nieskończenie małym przyroście długości szczeliny, w ogólnym przypadku również, gdy w pobliżu krawędzi szczeliny występuje odkształcenie plastyczne. Zgodnie z tym określeniem można napisać:

$$J = -\frac{\partial P^*}{\partial a} = \lim_{a_1 \rightarrow a_2} \frac{P^*(a_1) - P^*(a_2)}{a_1 - a_2}. \quad (24)$$

We wzorze (24) $P^*(a_1)$ i $P^*(a_2)$ oznaczają energię potencjalną próbki, gdy szczelina ma długość odpowiednio a_1 i a_2 . Na wartość całki J składa się część związana z odkształceniem sprężystym i z odkształceniem plastycznym. Jak widać, całka J jest równoważna współczynnikowi uwalniania energii dla materiałów sprężystych G , wzór (21).



Rys. 6. Szczelina z konturem całkowania do obliczania całki J

Wartość całki J odpowiadająca krytycznemu obciążeniu, przy którym pęknięcie zaczyna się rozwijać oznaczana J_C , jest krytyczną wartością całki, jest niezależna od geometrii próbki i stanowi miarę odporności materiału na pękanie.

Całkę J można obliczyć analitycznie, numerycznie oraz można ją określić doświadczalnie korzystając z ogólnego wzoru w postaci:

$$J = -\left(\frac{\partial U_p}{\partial a}\right)_{u_t = \text{const}} = -\int_0^{u_t} \left(\frac{\partial P}{\partial a}\right)_{u_t = \text{const}} du = \int_0^P \left(\frac{\partial u}{\partial a}\right)_{P = \text{const}} dP, \quad (25)$$

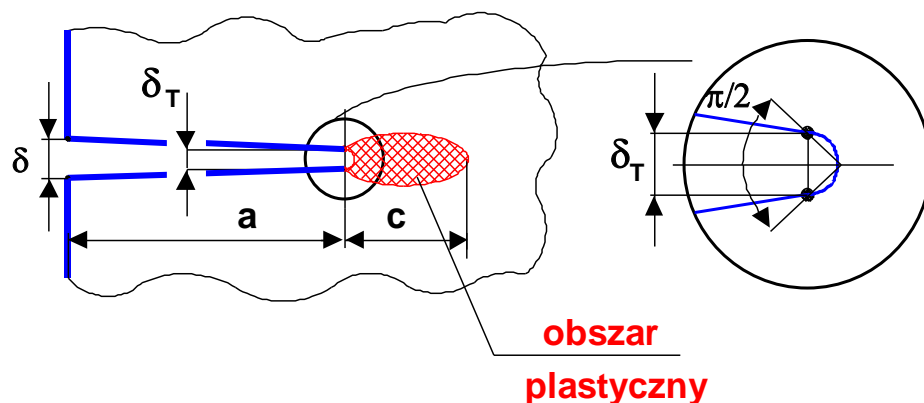
gdzie:

- u_t - przemieszczenie trawersy maszyny wytrzymałościowej,
- P - zarejestrowana siła.

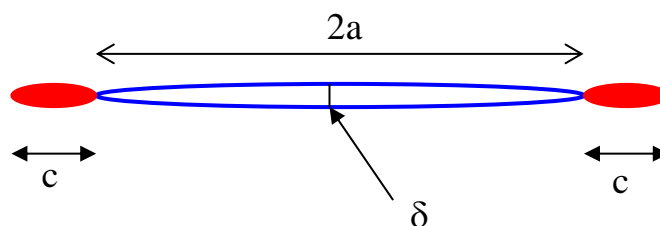
Metody wyznaczania wartości całki J i jej krytycznej wartości odpowiadającej początkowi rozwoju pęknięcia J_C można znaleźć na przykład w pracach [8-11] lub normach [15, 16, 17].

2.2.5. Pojęcia rozwarcia szczeliny i rozwarcia wierzchołkowego szczeliny

W mechanice pęknięcia często operujemy pojęciami rozwarcia szczeliny i rozwarcia wierzchołkowego szczeliny. Znaczenie obu wielkości schematycznie przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Ilustracja rozwarcia wierzchołkowego i rozwarcia szczeliny (δ_T - rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia, δ - rozwarcie pęknięcia, c - długość strefy plastycznej)



Rys. 8. Szczelina o długości $2a$ z obszarami plastycznymi o długości c przy każdej krawędzi

D.S. Dugdale [18] opisał rozwarcie szczeliny w materiale sprężysto-plastycznym bez umocnienia wykorzystując teorię sprężystości. Za rozwarcie szczeliny o długości $2a$ uważa się wielkość δ w połowie jej długości (rys. 8). Z każdej strony szczeliny występuje obszar plastyczny o długości c . W obszarach odkształconych plastycznie panują naprężenia równe granicy plastyczności R_e . Dugdale zakładając z dala od krawędzi szczeliny naprężenie $\sigma < 0.6R_e$ uzyskał wyrażenie na rozwarcie szczeliny w następującej postaci:

$$\delta = \frac{\pi\sigma^2 a}{ER_e} = \frac{K_I^2}{ER_e} = \frac{G}{R_e} \quad (26)$$

We wzorze tym G jest siłą rozwierającą szczelinę określoną przez zmianę energii potencjalnej zachodzącej wskutek zmiany powierzchni szczeliny $G = \partial P^* / \partial A$ [13].

Wartość rozwarcia wierzchołkowego szczeliny, przy której w badanym materiale szczelina zaczyna się rozwijać jest miarą odporności tego materiału na pęknięcie i nazywa się krytycznym rozwarciem wierzchołkowym szczeliny δ_c .

2.3. Kryteria pęknięcia

Kryterium pęknięcia stanowi istotny postulat dotyczący sposobu uszkodzenia materiału oparty na przesłankach fizycznych, który musi w jednoznaczny sposób określić mierzalne i obliczeniowe parametry charakteryzujące proces degradacji materiału. O jego słuszności decyduje weryfikacja doświadczalna. Biorąc pod uwagę klasyczne hipotezy wytrzymałościowe należy zauważyć, że są one oparte na takich wielkościach, jak naprężenie, odkształcenie, energia właściwa odkształcenia. Hipotezy te jednak nie mogą być bezpośrednio wykorzystywane do analizy wytrzymałości obiektów zawierających pęknięcia. W takich przypadkach wiadomo, że wyteżenie materiału nastąpi w ściśle określonym miejscu, a mianowicie przed frontem szczeliny, ponieważ w tym miejscu występuje największa koncentracja naprężenia. Największa jednak trudność tkwi w tym, że obliczany przez inżyniera poziom naprężenia jest nieskończenie wysoki niezależnie od wartości przyłożonego obciążenia zewnętrznego. Istniejące dotychczas kryteria pęknięcia można sklasyfikować w różnorodny sposób, przy czym najczęściej spotyka się podział na kryteria:

- (a) naprężeniowe,
- (b) odkształceniowe,
- (c) energetyczne.

Niezależnie od istniejących podziałów należy pamiętać, że jak dotąd nie opracowano jeszcze uniwersalnych kryteriów pęknięcia dla wszystkich materiałów konstrukcyjnych. W dalszym ciągu prowadzone są intensywne badania doświadczalne i teoretyczne ukierunkowane na ustalenie właściwych kryteriów pęknięcia, gdyż wiąże się to bezpośrednio z bezpieczeństwem eksploatacji wielu konstrukcji.

Kryterium pęknięcia powinno stanowić narzędzie służące do:

- określenia momentu inicjacji wzrostu pęknięcia,
- opisu wzrostu stabilnego powstałego pęknięcia,
- określenia momentu niekontrolowanego wzrostu po wzroście stabilnym.

Jest sprawą oczywistą, że postać kryterium uzależniona jest od rodzaju materiału. Inne będzie dla materiałów kruchych, a inne dla materiałów sprężysto-plastycznych. W przypadku materiałów kruchych badania doświadczalne dowiodły, że w wyniku obciążeń zmęczeniowych i długotrwałych obciążeń wywołujących zjawisko pełzania następuje gwałtowne zniszczenie materiału, które ma miejsce zarówno dla przypadku obciążenia przy kontrolowanym przemieszczeniu, jak i kontrolowanej sile. Dla materiałów sprężysto – plastycznych proces zniszczenia przebiega wolniej i ma dwie wyraźne fazy: faza inicjacji wzrostu szczeliny oraz faza wzrostu ustalonego.

Kryteria inicjacji wzrostu dla materiałów kruchych, jak i plastycznych można zdefiniować w oparciu o wprowadzone wcześniej parametry charakteryzujące proces pęknięcia. W przypadku materiałów kruchych ogólna forma możliwych kryteriów może być przedstawiona w następującej postaci:

$$K_{(\alpha)} (\text{obciążenie, długość szczeliny, geometria}) = K_{(\alpha)c} , \alpha = \text{I,II,III};$$

$$G_{(\alpha)} (\text{obciążenie, długość szczeliny, geometria}) = G_{(\alpha)c} , \alpha = \text{I,II,III};$$

$$\delta_T (\text{obciążenie, długość szczeliny, geometria}) = \delta_{TC};$$

$$J_I (\text{obciążenie, długość szczeliny, geometria}) = J_{IC};$$

gdzie wielkości po prawej stronie równań oznaczone literą C są uważane za stałe materiałowe odpowiadające wartościom krytycznym.

Dla materiałów plastycznych kryterium inicjacji wzrostu pęknięcia sprowadzi się do związków w postaci.

$$J_I \text{ (obciążenie, długość szczeliny, geometria)} = J_{IC} ;$$

$$\delta_T = \delta_{TC} ;$$

$$P = P_L ;$$

gdzie:

P - siła obciążająca próbkę,

P_L - obciążenie graniczne będące funkcją geometrii próbki i granicy plastyczności.

3. Wybrane procedury wyznaczania odporności na pękanie

Z uwagi na ograniczone ramy niniejszej pracy przedstawione zostaną tylko procedury określania krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia oraz krytycznego rozwarcia wierzchołkowego szczeliny.

3.1. Wyznaczanie K_{IC}

Na rys. 9 przedstawiono geometrię i wymiary próbek do wyznaczania K_{IC} w próbie zginania i rozciągania według normy ASTM 399-70T, *Tentative Method of Test for Fracture Toughness of Metallic Materials*, 1970 [19]. W celu uzyskania wiarygodnego wyniku istotne znaczenie ma ściśle przestrzeganie wymagań normy w stosunku do wymiarów próbki i sposobu obciążania. Próbki powinny mieć nacięte karby przedłużone pęknięciami wyprowadzonymi z korbów wskutek zadawanego obciążenia zmęczeniowego. Norma precyzuje wymagania w stosunku do geometrii karbu oraz długości i orientacji pęknięcia zmęczeniowego. Pęknięcie nie może być krótsze niż 1,3 mm.

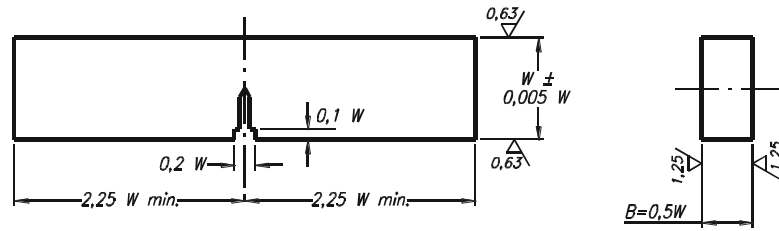
Wymagania te są tak sformułowane, aby próba była przeprowadzona w płaskim stanie odkształcenia. Zakłada się, że płaski stan odkształcenia wystąpi w próbce, jeśli jej grubość B spełnia następujący warunek:

$$B > 2,5(K_{IC}/R_e)^2 . \quad (27)$$

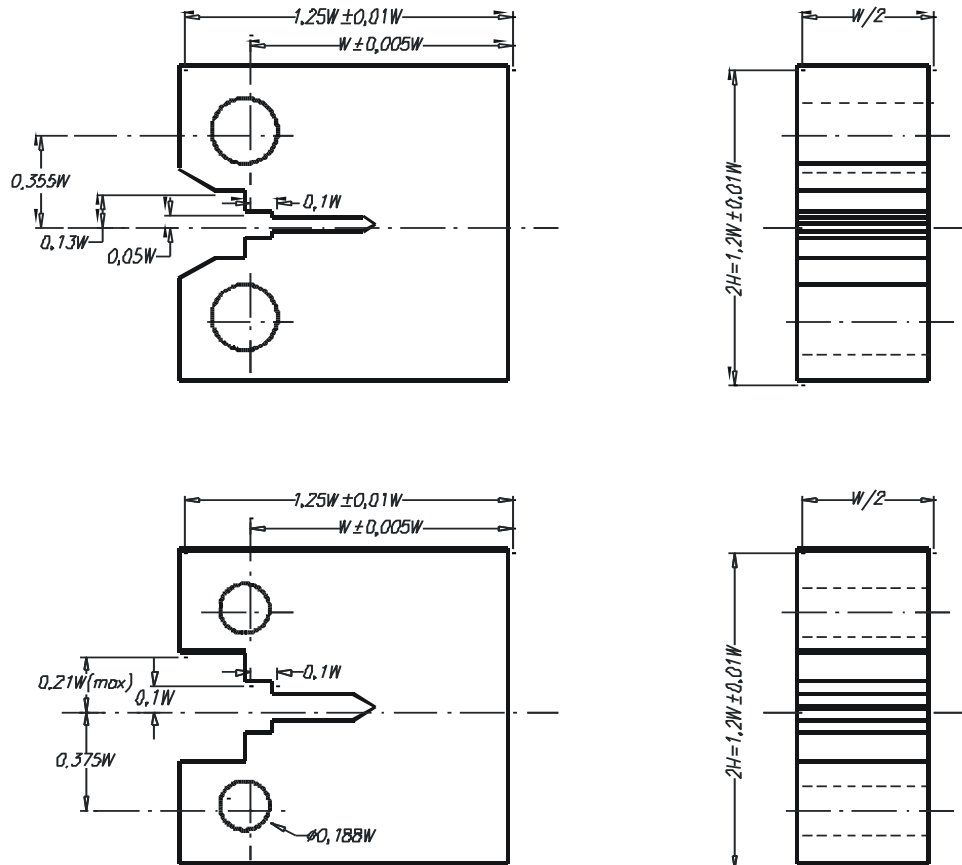
Spełnienie tego warunku można stwierdzić dopiero po wykonaniu pomiarów i obliczeniu wartości K_{IC} , którą należy wykorzystać właśnie we wzorze (27). Warunek ten nie jest spełniony w przypadku próbek o grubości mniejszej od 6,5 mm. Przy wyznaczaniu współczynnika intensywności naprężenia K_{IC} w cienkich blachach proponowane są specjalne procedury [20, 21]. Odporność na pękanie próbek nie spełniających warunku płaskiego stanu odkształcenia można wyznaczyć przez pomiar krytycznego rozwarcia dna szczeliny δ_C (opisany w następnym podpunkcie).

W czasie obciążania próbek mierzone są przyrosty rozwarcia między krawędziami karbu i wyznacza się zależność *obciążenie – rozwarcie* $P - V$. Zależność ta jest początkowo liniowa, a przy większych rozwarcjach może mieć odmienny przebieg. Dla różnych wariantów

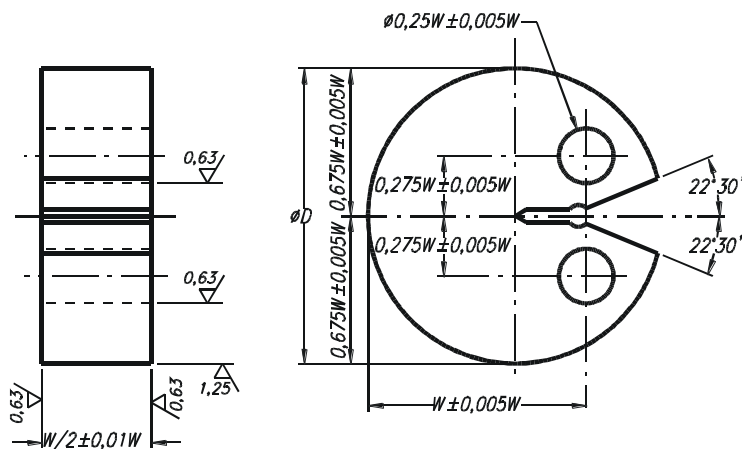
(a)



(b)



(c)



Rys. 9. Próbkę do wyznaczania parametrów mechaniki pęknięcia (K_{Ic} , J_c , δ_c):
(a) w próbie trójpunktowego zginania; (b) w próbie rozciągania (tzw. próbka kompaktowa); w próbie rozciągania (próbka w kształcie dysku)

przebiegu zależności *obciążenie-rozwarcie* norma precyzuje sposób wyznaczana krytycznej wartości obciążenia próbki, po przekroczeniu której do narastania rozwarcia wystarcza już mniejsza siła. Na podstawie wyznaczonej krytycznej wartości siły obciążającej próbkę P_C oblicza się naprężenie σ w materiale próbki z dala od krawędzi pęknięcia (w normie są gotowe wzory dla znormalizowanych próbek oraz znanych wymiarów karbu i pęknięcia) i ze wzoru (11) oblicza się wartość współczynnika intensywności naprężenia dla ciała idealnie sprężystego przy krytycznym obciążeniu próbki K_{IC} .

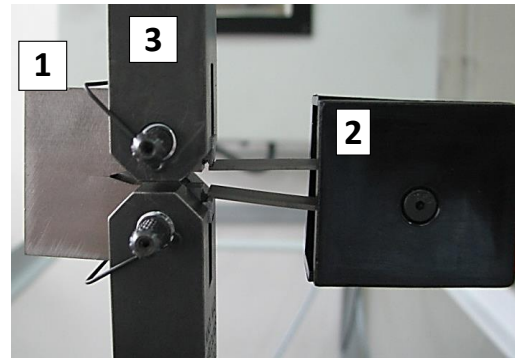
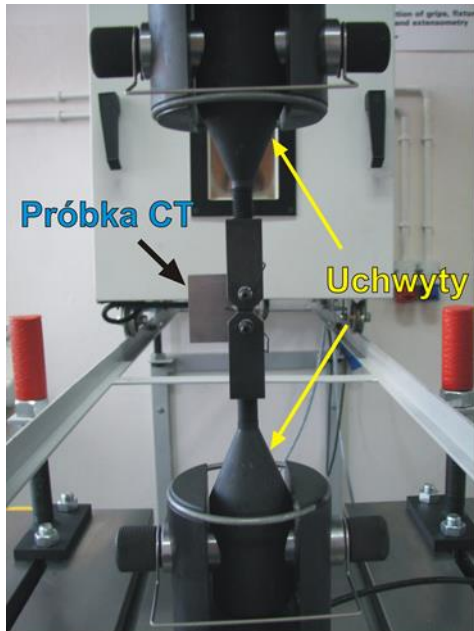
W tabeli 1 zestawione są wartości odporności na pękanie kilku materiałów konstrukcyjnych.

Tabela 1. Odporność na pękanie wybranych materiałów konstrukcyjnych K_{IC} [5].

<i>Material</i>	K_{IC}
	$MPa\sqrt{m}$
Stal 1040	54.0
Stal 4140	
• Odpuszczona w 370°C	55 - 65
• Odpuszczona w 482°C	75 - 93
Stal 4340	
• Odpuszczona w 260°C	50.0
• Odpuszczona w 425°C	87.4
Stal nierdzewna 17-7PH	
• Utwardzana wydzieleniowo w 510 °C	76
Stopy aluminium	
Stop 2024-T3	44
Stop 7075-T651	24
Stopy magnezu	
Stop AZ31B	
• wyciskany	28
Stopy tytanu	
Stop Ti-5Al-2.5Sn	
• studzony w powietrzu	71.4
Stop Ti-6Al-4V	
• ziarna równoosiowe	44 - 66

W praktyce wytworzenie pęknięcia zmęczeniowego wymaga dostępu do odpowiedniej maszyny wytrzymałościowej i oprogramowania, które muszą spełniać następujące warunki cechami:

- a) maszyna wytrzymałościowa powinna pracować w zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego;
- b) próbki należy mocować przy pomocy przegubowych uchwytów, rys. 10;

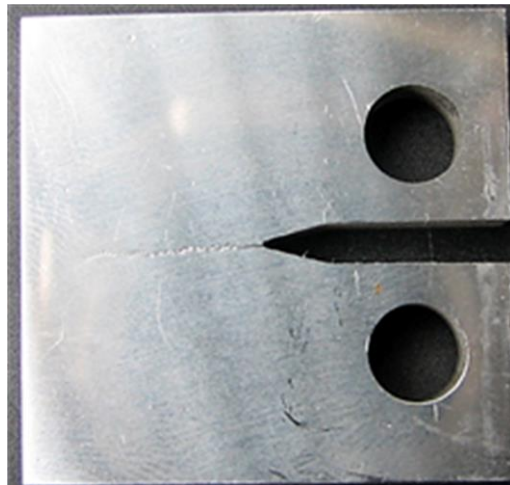


(a)

(b)

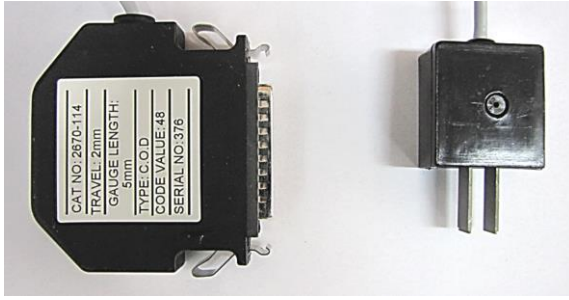
Rys. 10. Próbka kompaktowa CT: (a) zamocowana w przestrzeni roboczej maszyny; (b) wraz z ekstensometrem: 1-próbka, 2- ekstensometr, 3-cięgna

- c) maszyna wytrzymałościowa oraz oprogramowanie powinny umożliwiać realizację obciążenia cyklicznego odzerowo-tętniącego;
- d) oprogramowanie powinno umożliwiać śledzenie zmian sztywności próbki w trakcie próby oraz automatyczne zatrzymanie maszyny wytrzymałościowej przy zadanej długości pęknięcia zmęczeniowego, rys. 11;

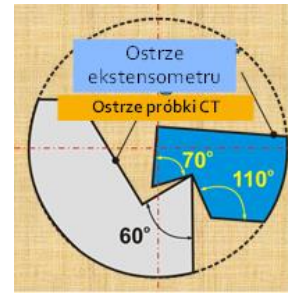


Rys. 11. Próbka kompaktowa z wypropagowaną szczeliną zmęczeniową o konkretnie zadanej długości

- e) pomiar rozwarcia karbu należy prowadzić przy użyciu odpowiedniego ekstensometru (rys. 12) mocowanego z wykorzystaniem specjalnych ostrzy przykręcanych wkrętami do badanej próbki po obydwu stronach naciętego karbu, rys. 13.

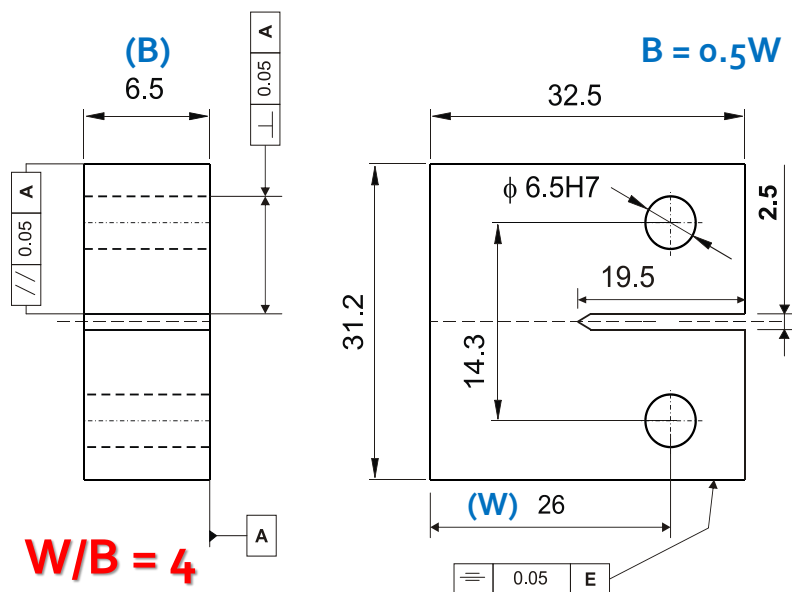


Rys. 12. Ekstensometr CTOD do pomiarów rozwarcia karbu, baza pomiarowa 5mm



Rys. 13. Istotne wymiary łożyska nożowego stosowanego do mocowania ekstensometru

W praktyce laboratoryjnej stosuje się różnego rodzaju próbki, rys. 9, przy czym najczęściej wykorzystywaną jest próbka kompaktowa, której przykładowe rzeczywiste wymiary pokazano na rys. 14. Charakteryzuje się ona naciętym karbem o promieniu wynoszącym 0.1mm oraz dwoma otworami, które wykorzystywane są do przenoszenia obciążenia.



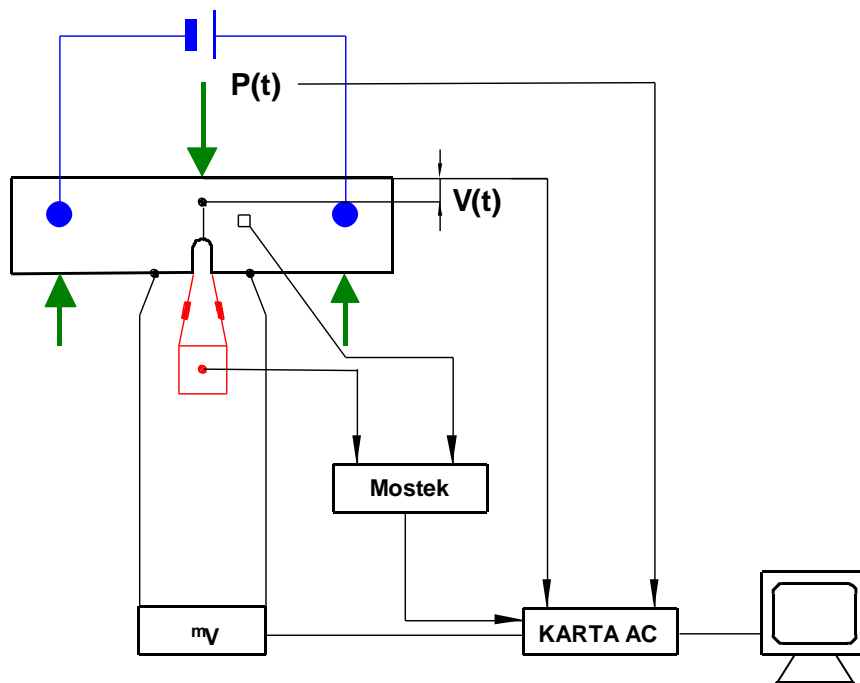
Rys. 14. Rzeczywiste wymiary próbki kompaktowej wykorzystywanej do testu walidacyjnego oraz określania odporności na kruche pękanie kompozytu typu MMC

Pomiar rozwarcia karbu prowadzony jest przy użyciu ekstensometrów określanych nazwą CTOD, rys. 12. Ich konstrukcję wyróżniają dwa płaskie ostrza zakończone kątowym podcięciem, rys. 13.

Pomiar przyrostu szczeliny w trakcie próby można prowadzić kilkoma sposobami. Najbardziej rozpowszechnione techniki w tym względzie to:

- metoda spadku potencjału,
- metoda zmiany podatności próbki.

Metoda spadku potencjału polega na zasileniu próbki prądem o dużej gęstości oraz pomiarze spadku potencjału, który towarzyszy zmianom przekroju czynnego próbki wskutek przyrostu długości szczeliny. Przyrost szczeliny zmniejsza przekrój czynny próbki. Zwiększa się opór elektryczny i przy stałym prądzie rośnie spadek potencjału między elektrodami. Typowy układ pomiarowy w tym przypadku ilustruje rys.15.



Rys.15. Schemat stanowiska pomiarowego do rejestracji przyrostu szczeliny zmęczeniowej metodą spadku potencjału

W metodzie spadku potencjału zakłada się liniową zależność między spadkiem potencjału a przyrostem długości szczeliny:

$$\Delta a_i = \frac{\Delta a_K \Delta \varphi_i}{\Delta \varphi_K}, \quad (28)$$

gdzie:

Δa_K ; - całkowity przyrost długości szczeliny,
 $\Delta \varphi_K$ - całkowita zmiana potencjału.

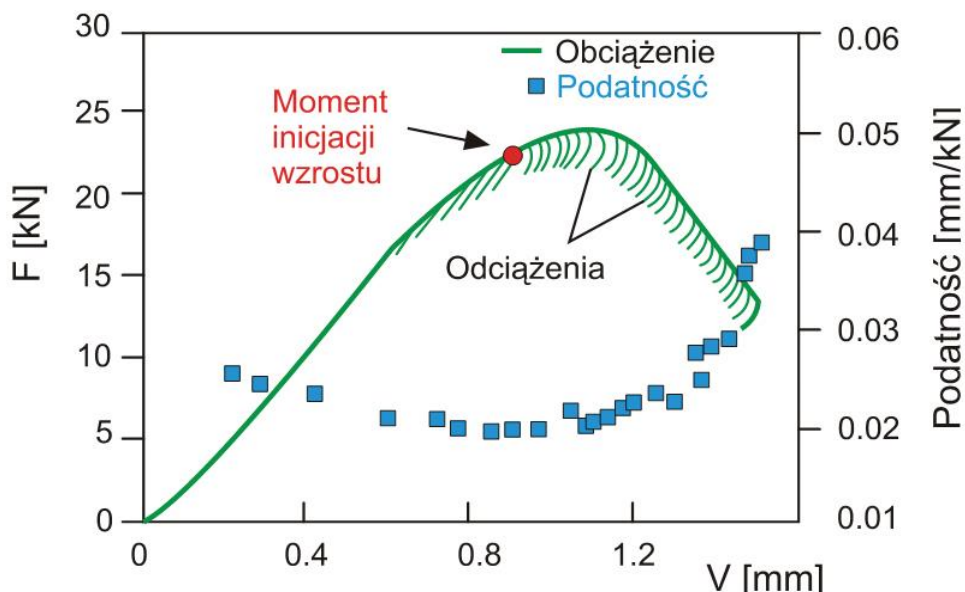
Metoda zmiany podatności próbki możliwa jest do stosowania, o ile dysponujemy nowoczesną maszyną wytrzymałościową sterowaną za pomocą komputera. Wzory do obliczania długości szczeliny w zależności od zmiany podatności próbki podaje na przykład norma ASTM E 813-88 [16]. Wzór z normy polskiej [17] ma następującą postać

$$\Delta a_i = \frac{b(C_i - C_o)}{C_o}, \quad (29)$$

gdzie:

C_i – podatność w i -tym kroku pomiarowym, C_o - podatność początkowa (minimalna wartość podatności określona z prostoliniowego odcinka zależności $P - V$, co można utożsamiać z momentem inicjacji wzrostu szczeliny).

Na rys. 16 przedstawiono przykład uzyskanych wyników z wykorzystaniem tej metody.



Rys. 16. Zmiany podatności próbki ze szczeliną w trakcie jej kolejnych obciążeń i odciążenia

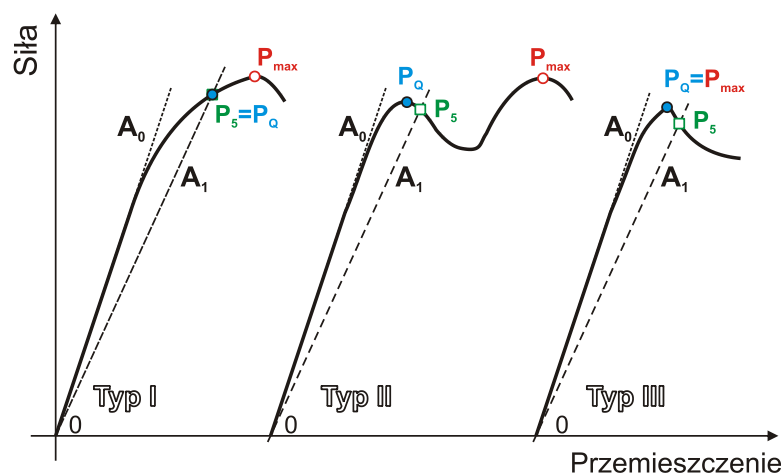
Po wytworzeniu pęknięcia zmęczeniowego, ale przed przeprowadzeniem próby rozrywania należy wykonać następujące czynności:

- sprawdzić minimalną długość pęknięcia (długość pęknięcia zmęczeniowego + długość karbu) na powierzchni próbki wynosi co najmniej $0.45W$, gdzie W jest efektywną szerokością próbki;
- skontrolować, czy oba końce pęknięcia zmęczeniowego mają długość co najmniej 1.3 mm lub $2.5\%W$ (przyjmujemy wartość większą), mierzoną od dna karbu;
- sprawdzić, czy różnica pomiędzy zmierzonymi długościami pęknięcia zmęczeniowego na obu powierzchniach nie przekracza 15% średniej wartości z obu pomiarów.

Po próbie rozrywania należy sprawdzić, czy:

- nie występuje wielopłaszczyznowe pęknięcie zmęczeniowe;
- średnia długość szczeliny w stosunku do szerokości W zawiera się w granicach $0.45 \div 0.55$;
- żadne dwa pomiary z wykonanych dziewięciu pomiarów szczeliny nie różnią się więcej niż o 10%;
- czoło pęknięcia zmęczeniowego w żadnym miejscu nie jest bliżej położone dna karbu niż 1.3 mm lub $2.5\% W$ (przyjmujemy wartość większą);
- płaszczyzna pęknięcia nie odchyła się więcej niż 10° od płaszczyzny szczeliny wstępnej.

Głównymi wynikami w teście przeznaczonym do określenia współczynnika K_{IC} są wykresy siła-przemieszczenie, rys. 17. Rysunek ilustruje trzy najczęściej spotykane kształty charakterystyk w zależności od rodzaju materiału.



Rys. 17. Rodzaje przebiegów zależności siły i przemieszczenia

Wyznaczenie wartości P_Q przeprowadza się stosując obrót stycznej do początkowego prostoliniowego odcinka zależności siła-przemieszczenie, zgodnie z ruchem wskazówek zegara, o wartość tangensa kąta jej nachylenia pomniejszony o 5%.

Wyznaczenie krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia należy poprzedzić obliczeniem wartości współczynnika K_Q i sprawdzeniu poniższego warunku

$$\frac{P_{\max}}{P_Q} \leq 1.10, \quad (30)$$

gdzie: P_{\max} jest maksymalną siłą na wykresie siła-przemieszczenie; P_Q określa największą wartość obciążenia na odcinku OP_5

$$K_Q = (P_Q/BW^{0.5})f(a/W) \quad (31)$$

$$f(a/W) = \frac{(2 + a_o/W) \cdot [0.866 + 4.64 a_o/W - 13.32 \cdot (a_o/W)^2 + 14.72 \cdot (a_o/W)^3 - 5.6 \cdot (a_o/W)^4]}{(1 - a_o/W)^{3/2}} \quad (32)$$

Jeżeli jest spełniony warunek na graniczną wartość przyrostu pęknięcia zmęczeniowego w postaci,

$$\Delta a_i \geq 0.05 \left(\frac{K_{IC}}{R_{0.2}} \right)^2, \quad (33)$$

to wykorzystując wzór (31), można obliczyć współczynnik K_Q , w którym funkcja $f(a/W)$ jest wielomianem czwartego stopnia (wzór 32), tab. 2. W przypadku nie spełnienia warunku (30), możliwe jest jedynie wyznaczenie współczynnika wytrzymałości próbki.

Tabela 2. Wartości $f(a/w)$ dla wybranego stosunku a/W według [22]

Lp	a/W	$f(a/W)$	a/W	$f(a/W)$	Lp	a/W	$f(a/W)$	a/W	$f(a/W)$
1	0.450	8.340	0.500	9.659	2	0.455	8.458	0.505	9.810
3	0.460	8.579	0.510	9.964	4	0.465	8.704	0.515	10.123
5	0.470	8.830	0.520	10.286	6	0.475	8.960	0.525	10.453
7	0.480	9.093	0.530	10.625	8	0.485	9.230	0.535	10.802
9	0.490	9.369	0.540	10.984	10	0.495	9.512	0.550	11.364

Obliczona wartość K_Q może być utożsamiana ze współczynnikiem K_{IC} , gdy spełnione są jednocześnie następujące zależności [22]:

$$2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{0.2}} \right) < B, \quad (34)$$

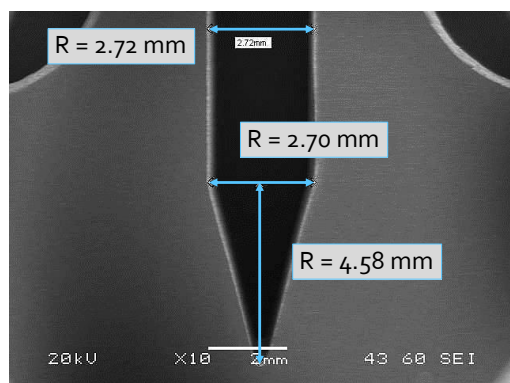
$$2.5 \left(\frac{K_Q}{R_{0.2}} \right) < a. \quad (35)$$

W przeciwnym przypadku test wyznaczania współczynnika K_{IC} nie może być uznany jako ważny z punktu widzenia wymagań normowych

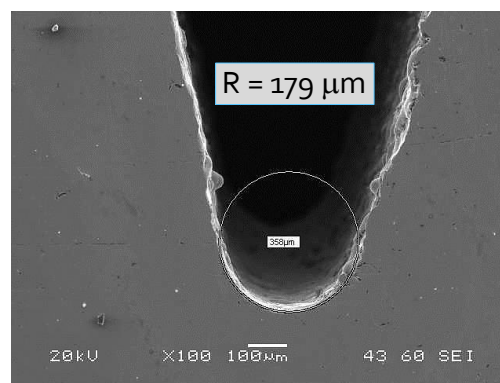
3.1.1. Przykładowe wyniki z testów wyznaczania K_{IC}

W celu ilustracji procedury określania krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężenia przedstawione zostaną wybrane wyniki badań stali 40H oraz kompozytu o matrycy ze stopu aluminium 44200 zbrojonego włóknami ceramiki Al_2O_3 .

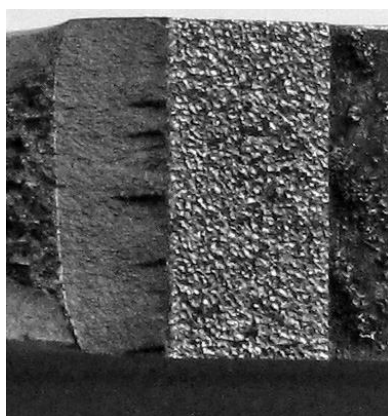
Jak już wspomniano, każda próba określania odporności na kruche pęknięcie powinna być poprzedzona kontrolą wszystkich wymiarów próbki, obejmującą między innymi szerokość karbu, wymiary w strefie zwężenia (rys. 18) oraz promień w jego dnie, rys 19. Oba rysunki pokazują przykłady próbek nie spełniających wymagań normowych.



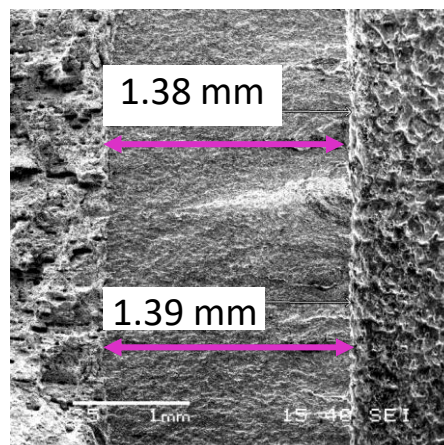
Rys. 18. Kontrola wymiarów



Rys. 19. Promień w dnie karbu



Rys. 20. Strefa pęknięcia zmęczeniowego



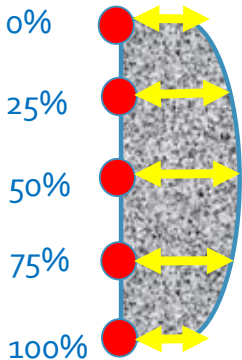
Rys. 21. Długość frontu pęknięcia zmęczeniowego

Zgodnie z wymaganiami norm dla obu materiałów próbki poddawano obciążeniu odzerow-
tętniacemu utrzymywanemu do chwili uzyskania odpowiedniej długości frontu pęknięcia, rys.
20, 21. Wymagana długość pęknięcia zmęczeniowego została zidentyfikowana przez
odpowiednie procedury ujęte w oprogramowaniu sterującym maszyną wytrzymałościową na
podstawie zmian sztywności próbki. Końcowy etap badań każdego z materiałów polegał na
rozerwaniu próbki z wypropagowaną szczeliną zmęczeniową.

Ważny etap procedury stanowiły pomiary długości frontu pęknięcia po rozerwaniu
badanych próbek. Pomiary prowadzono w pięciu punktach rozmieszczonych wzdłuż wymiaru
stanowiącego grubość próbki. Następnie obliczano średnią długość oraz 10% jej wartości, które
stanowią kryterium wykorzystywane do oceny jakości wytworzonej szczeliny zmęczeniowej.
W tab. 3 przedstawiono przykładowo komplet wyników badanych próbek stali 40H.

Tabela 3. Wyniki pomiarów długości frontu pęknięcia uzyskane w badaniach stali 40H

Nr	1	2	3	
		CT1 [mm]	CT2 [mm]	
A	0%	1.3720	1.2870	0%
B	25%	1.5285	1.7555	25%
C	50%	1.4736	1.5755	50%
D	75%	1.4300	1.5130	75%
E	100%	1.1545	1.1500	100%
Średnia		1.4774	1.6147	
10% Średniej (BCD)		0.1477	0.1615	



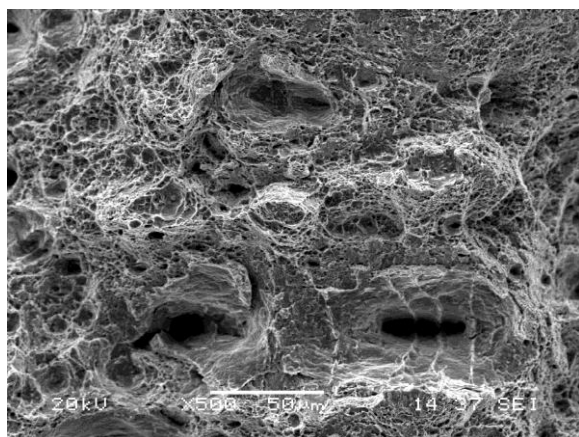
Wyznaczone wartości długości frontu pęknięcia przy pominięciu skrajnych punktów
pomiarowych, wykorzystano zgodnie z zaleceniem normy do obliczenia różnic między nimi,
tab. 4. Uzyskane wartości porównywano z wartością stanowiącą 10% średniej (tab. 3). Wyniki,
które przekraczają 10% średniej stanowią podstawę do uznania próby jako nieważnej i
w rezultacie skutkuje wykluczeniem również pozostałych wyników takiej próbki ze zbioru
danych istotnych dla określenia współczynnika K_{IC} .

Tabela 4. Wyniki obliczeń różnic w długościach frontu pęknięcia uzyskane w badaniach stali
40H

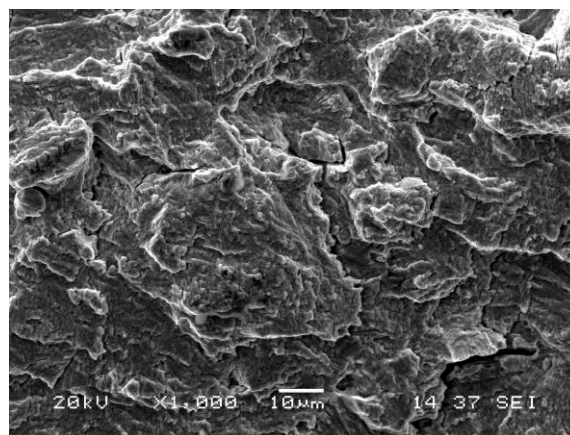
Nr	Równanie	CT 1	CT 2
1	= C2-B2	0.0549	0.1800
2	= D2-C2	0.0436	0.0625
3	= D2-B2	0.0985	0.2425

Jak widać, próbka CT1 spełnia taki warunek, natomiast próbka CT2 niestety nie, a zatem wynik
dla niej otrzymany nie może być brany pod uwagę. Współczynnik K_{IC} dla próbki CT1 wyniósł
38.8 MPa m^{1/2}.

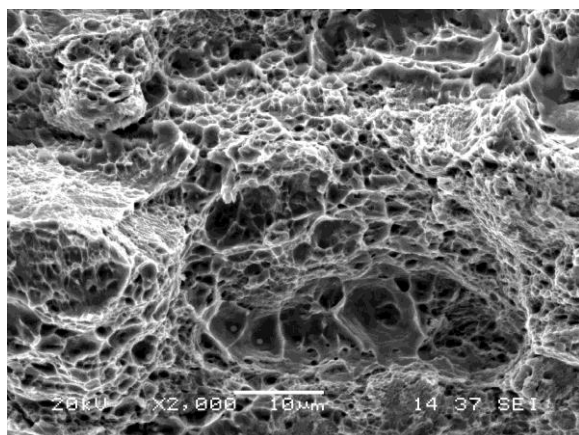
Jakość strefy przełomu zmęczeniowego można również oceniać na podstawie badań SEM, rys. 22÷25. Dają one dodatkowo możliwość obserwowania wielopłaszczyznowości przełomu (rys. 22, 23) oraz prążków zmęczeniowych (rys. 24, 25) identyfikujących sposób obciążania.



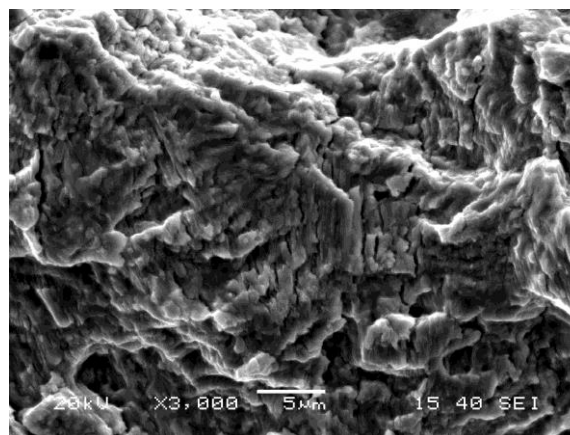
Rys. 22. Strefa pęknięcia ciągliwego stali 40H, powiększenie 500×



Rys. 23. Strefa pęknięcia ciągliwego stali 40H, powiększenie 1000×



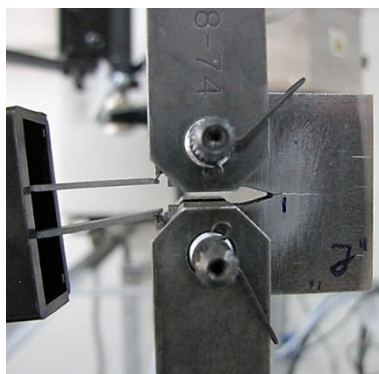
Rys. 24. Strefa pęknięcia zmęczeniowego stali 40H, powiększenie 2000×



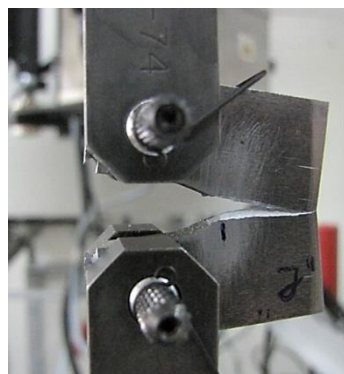
Rys. 25. Strefa pęknięcia zmęczeniowego stali 40H, powiększenie 3000×

Taką samą procedurę zastosowano do zbadania odporności na kruche pęknięcie kompozytu (MMC – metal matrix composite) o osnowie ze stopu aluminium zbrojonego włóknami Saffil o różnej ich zawartości procentowej [23]. W przypadku tego rodzaju kompozytu pęknięcie propagowało prostopadle do przeciwległego boku próbki, zgodnie z wymaganym kryterium ważności testu, rys. 26, 27. Kształt wykresu siły rozciągającej w funkcji wartości rozwarcia karbu, rys. 28, wskazywał na pierwszy typ pęknięcia (por. rys. 17). Dla każdego z wykresów określono funkcje opisujące zależność siła-COD (rys. 29), które wykorzystano do wyznaczenia siły P_Q . W przypadku badanego kompozytu strefa zmęczeniowa, w przeciwieństwie do obszaru pęknięcia zmęczeniowego w stali 40H, nie miała typowych cech dla tego rodzaju procesów. Występował brak prążków zmęczeniowych oraz granicy wyraźnego rozdzielania między strefą pęknięcia zmęczeniowego a doraźnego, rys. 30, 31.

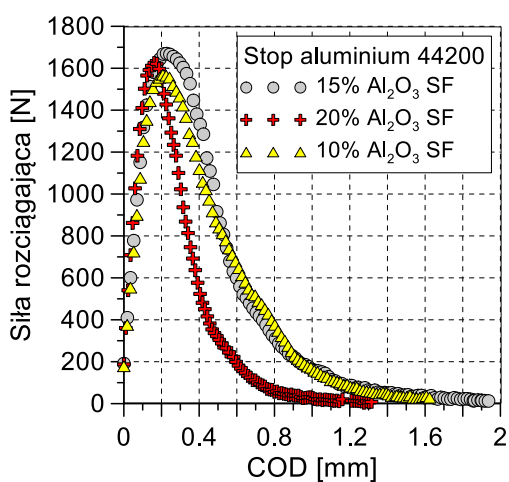
Ze względu na brak istotnych różnic w wartościach krytycznego współczynnika intensywności naprężenia kompozytu z różną zawartością zbrojenia określono wartość uśrednioną tego parametru, który wyniósł $12.07 \text{ MPa m}^{1/2}$, tab. 5.



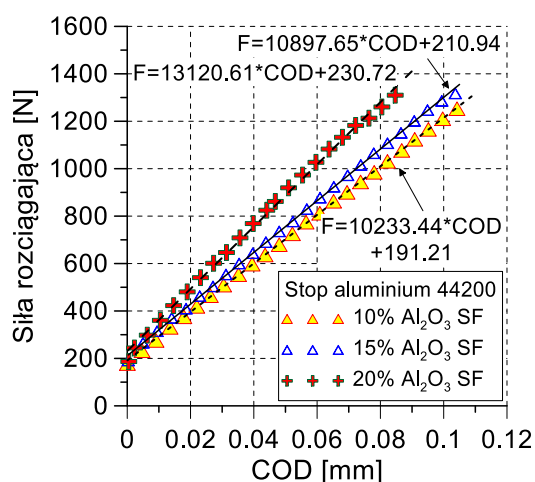
Rys. 26. Początkowy etap rozrywania próbki kompozytowej 44200 + 20% włókien Saffil



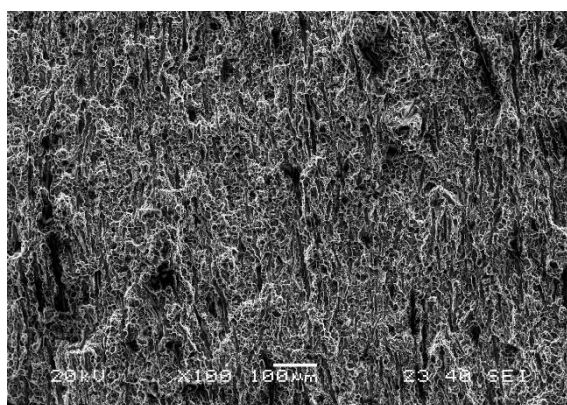
Rys. 27. Końcowy etap rozrywania próbki kompozytowej 44200 + 20% włókien Saffil



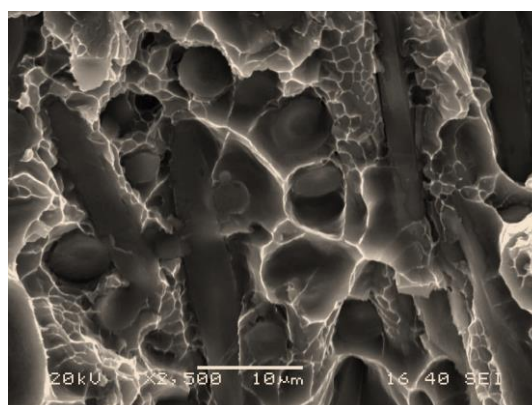
Rys. 28. Zmiany siły rozciągającej w funkcji rozwarcia karbu w testach kompozytu o osnowie ze stopu aluminium 44200 z różną zawartością zbrojenia Al₂O₃



Rys. 29. Początkowe odcinki wykresów siła rozciągająca-COD zamieszczonych na rys. 28



Rys. 30. Strefa pęknięcia zmęczeniowego kompozytu 44200+20% włókien Saffil, powiększenie 100×



Rys. 31. Strefa pęknięcia zmęczeniowego kompozytu 44200+20% włókien Saffil, powiększenie 2500×

Tabela 5. Krytyczne wartości współczynnika intensywności naprężenia kompozytu o osnowie aluminium zbrojonego włóknami Saffil

Lp.	Rodzaj materiału	K_{IC} [MPa m ^{1/2}]
1	44200+10% Al ₂ O ₃ włókna Saffil	12.2
2	44200+15% Al ₂ O ₃ włókna Saffil	12.1
3	44200+20% Al ₂ O ₃ włókna Saffil	11.9
	Średnia	12.07

3.2. Wyznaczanie krytycznego rozwarcia wierzchołkowego szczeliny δ_c

Liniowa mechanika pękania nie opisuje zachowania się pęknięć w materiałach o istotnych własnościach plastycznych. W roku 1961 A.A. Wells [24] zaproponował wykorzystanie rozwarcia wierzchołkowego szczeliny (Crack Tip Opening Displacement) jako wielkości charakteryzującej pole odkształcenia w pobliżu czoła szczeliny i odporności na pęknięcie materiałów konstrukcyjnych, do których nie stosuje się liniowa mechanika pękania. Wells zaproponował też technikę wyznaczania wartości rozwarcia szczeliny, która stała się podstawą wielu norm, np.: BS 5762 (1979) i ASTM 1290-89 i E 1290-93.

Rozwarcie szczeliny δ wyznacza się na podstawie doświadczalnej zależności zmiany siły obciążającej w funkcji przemieszczenia, tj. rozwarcia krawędzi karbu V , którego przedłużeniem jest badane pęknięcie zmęczeniowe. Rozwarcie, przy którym pęknięcie zaczyna się rozwijać nazywane jest krytycznym rozwarciem szczeliny i oznacza się je przez δ_c . Wartość δ_c wyznaczona w sposób zgodny z normą jest niezależna od geometrii próbki i jest miarą odporności materiału próbki na pęknięcie.

W odróżnieniu od K_{IC} pomiar δ_c może być wykonany, gdy próbka nie spełnia warunku płaskiego stanu odkształcenia. Najczęściej stosowany sposób pomiaru opisuje norma brytyjska BS DD 1972 *Methods of Crack Opening Displacement (COD) Testing* [25].

Aktualnie próby CTOD (Crack Tip Opening Displacement) przeprowadza się również bazując na:

1. Wytycznych zawartych w normie przedmiotowej ASTM E 1290 “Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement”;
2. Wskazówkach znajdujących się w normie ASTM E-399, “Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials”;
3. Wymaganiach zamieszczonych w PN-EN 15653 „Materiały metalowe – Metoda badania dotycząca wyznaczania quasistatycznej odporności na kruche pęknięcie spoin”;
4. Wytycznych zawartych w normie branżowej API STANDARD 1104 „Welding of Pipelines and Related Facilities” z dodatkiem;
5. Wymaganiach opisanych w BS 7910:2005 „Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures”.

Nieco mniej restrykcyjna, alternatywna ocena jakości obwodowych połączeń spawanych rurociągów z uwzględnieniem mechaniki zniszczenia jest przedstawiona w opracowaniu pt. „Welding of Pipelines and Related Facilities” przygotowanym pod auspicjami American National Standards Institute i American Petroleum Institute i wydanym jako ANSI/API STANDARD 1104 - 1994, Eighteenth Edition, May 1994. Podstawą tej kwalifikacji są badania odporności na pęknięcie polegające na wyznaczeniu przemieszczenia rozwarcia wierzchołka pęknięcia zmęczeniowego, określanego w skrócie jako CTOD (Crack Tip Opening

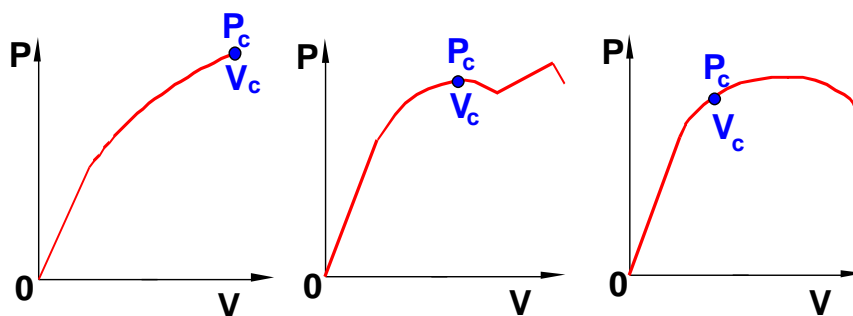
Displacement) standardowej próbki wyciętej ze strefy połączenia spawanego. Wartość CTOD wyznaczano stosunkowo najczęściej na podstawie normy brytyjskiej (BS 7448 z 1991 roku).

Zgodnie z normą API 1104 program badań rurociągów powinien obejmować:

1. Wykonanie dwóch kompletów próbek, po trzy próbki ze szczeliną usytuowaną w środku spawu i w strefie wpływu ciepła wycięte z pozycji godzinowej odpowiadającej godzinie 12, 3 i 6 o grubości nominalnej równej grubości rury pomniejszonej o minimalną warstwę materiału niezbędną do uzyskania prostopadłościenną próbkę normową, jaką można uzyskać z przekroju rury. Próbki powinny być wycięte z kwalifikowanego złącza spawanego, w którym nie stwierdzono wad metodami nieniszczącymi (ultradźwiękowymi, radiograficznymi).
2. Wytrawienie wzdłużnego przekroju wyciętych próbek w celu uwidocznienia kształtu i położenia spawu. Wstępne nacięcie i powstałe następnie pęknięcie zmęczeniowe dla badań spawu powinno być zlokalizowane w środku spawu.
3. Wykonanie pomiarów mikrotwardości w celu określenia strefy o najwyższej mikrotwardości, przez którą powinno przebiegać wstępne nacięcie i powstałe następnie pęknięcie zmęczeniowe dla badań strefy wpływu ciepła.
4. Wykonanie wstępnych pęknięć zmęczeniowych zgodnie z normą BS 7448.
5. Wykonanie prób rozwarcia pęknięcia zmęczeniowego w temperaturze obniżonej o 15°C w stosunku do najniższej przewidywanej temperatury pracy rurociągu.
6. Po wykonaniu badań CTOD należy sprawdzić spełnienie warunków ważności badań dotyczących geometrii czoła pęknięcia zmęczeniowego zgodnie z normą BS 7448.
7. Próbki nieprawidłowo obrobione, nie spełniające warunków dopuszczalnego kształtu czoła pęknięcia zmęczeniowego lub wykazujące w przekroju poprzecznym po rozerwaniu obecność wad spawalniczych przyległych do pęknięcia zmęczeniowego uznawane są za nieważne.

Na rys. 9 (a) pokazano zalecany kształt próbki przeznaczonej do wyznaczania δ_c w próbie rozwarcia pęknięcia podczas trójpunktowego zginania, natomiast na rys. 9 (b), (c) podczas monotonicznego rozciągania.

Podczas próby zginania rejestruje się zmiany obciążenia próbki P i odpowiadające im przyrosty rozwarcia krawędzi szczeliny na powierzchni próbki V . Zmierzone wartości rozwarcia karbu na powierzchni próbki V pozwalają wyliczyć krytyczne rozwarcie wierzchołkowe szczeliny δ_c . W normie podane są związki analityczne umożliwiające takie obliczenie w zależności od rodzaju próbki. Związki te uzyskano metodą elementów skończonych dla próbek spełniających wymagania normy. Na podstawie wykresu *obciążenie P - rozwarcie szczeliny V* wyznacza się krytyczną wartość obciążenia P_c , przy którym rozpoczął się rozwój istniejącego w próbce pęknięcia zmęczeniowego. Norma opisuje sposób wyznaczania krytycznego momentu próby dla różnych kształtów zależności *obciążenie - przemieszczenie*. Praktyczne przykłady przedstawiono na rys.32.



Rys. 32. Wykresy obciążenie-przemieszczenie do wyznaczania krytycznej wartości rozwarcia pęknięcia

W przypadku trudności wyznaczenia krytycznego momentu na podstawie wykresu, chwilę rozpoczęcia propagacji szczeliny wyznacza się na podstawie wskazań metod nieniszczących czułych na długość pęknięcia, jak metoda prądów wirowych, czy metoda spadku potencjału.

3.2.1. Przykładowe badania CTOD – wytyczne z norm, procedury postępowania, wyniki i ich interpretacja

W celu zilustrowania przebiegu wyznaczania krytycznego rozwarcia wierzchołkowego szczeliny przedstawiono poniżej wybrane wyniki badań stali stosowanej na rury do gazociągów.

Podstawowym zadaniem oceny jakości połączeń spawanych rurociągów jest określenie rozmiarów wad krytycznych, które mogą doprowadzić do zniszczenia pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych. Wykrycie wad materiałowych i spawalniczych metodami ultradźwiękowymi, czy radiograficznymi nie daje jeszcze podstaw do oceny, w jakim stopniu wykryte wady wpłyną na obniżenie właściwości wytrzymałościowych rurociągu. Podstawą takiej oceny może być mechanika zniszczenia i badania doświadczalne typu niszczącego.

Przed przystąpieniem do realizacji programu oceny jakości połączeń spawanych rurociągów należy ustalić wytyczne prowadzenia testów odporności na pękanie złączy obwodowych.

W rozpatrywanym przypadku badania prowadzono na podstawie normy API 1104, która podaje alternatywne kryterium oceny dopuszczalności wad wykorzystujące mechanikę pęknięcia materiału oraz zasadę dopasowywania wyników do ogólnych danych doświadczalnych w celu określenia dopuszczalnych wymiarów wad spawania.

Kryterium alternatywne stosuje się dla złączy rur o jednakowej grubości ścianek pod warunkiem, że poddane zostały badaniom nieniszczącym. Nie stosuje się dla złączy naprawianych oraz tych, które ulegały odkształceniu plastycznemu.

W celu ustalenia kryterium dopuszczalności wad w ramach mechaniki pęknięcia materiału należy określić odporność na pękanie złączy spawanych bez wad za pomocą próby CTOD, którą należy wykonać według zaleceń normy BS 7448 przy jednoczesnym spełnieniu uzupełniających wymagań normy API 1104, a zwłaszcza w odniesieniu do temperatury badań. Badania powinny być wykonywane w temperaturze o 15°C niższej od najmniejszej spodziewanej temperatury pracy gazociągu. Dopuszczalne wymiary wad określa się dla danego poziomu największych wartości naprężenia osiowego, jakim może być poddany gazociąg dla jednego z dwóch poziomów minimalnej odporności na pękanie: CTOD = 0.127 mm, oraz CTOD = 0.254 mm.

Próbki do badań odporności na pękanie pobiera się ze złącza obwodowego w ten sposób, aby szerokość próbki CTOD była równoległa do osi rury, natomiast linia wierzchołka karbu powinna być usytuowana wzdłuż grubości ścianki rury. Grubość próbki powinna być równa lub nieznacznie mniejsza od grubości rury. Zmniejszenie grubości ma miejsce w przypadku zastosowania obróbki skrawaniem jej zewnętrznych powierzchni w celu otrzymania prostokątnego przekroju poprzecznego. W każdym przypadku nadlewy lica i grani spoiny muszą być usunięte.

W ten sposób przygotowane próbki poddaje się trawieniu dla uwidocznienia kształtu spoiny i strefy wpływu ciepła oraz w celu zapewnienia wykonania karbu w żądanym miejscu.

Dla próbek CTOD z karbem w strefie wpływu ciepła wymagane jest przeprowadzenie pomiarów twardości na wytrawionej próbce. Celem tych pomiarów jest zlokalizowanie obszaru o największej twardości, ponieważ wierzchołek karbu powinien być umiejscowiony właśnie w tym obszarze. Zazwyczaj obszar ten znajduje się w strefie wpływu ciepła w pobliżu linii wtopienia ostatniego ściegu.

Po wykonaniu próby CTOD sprawdza się zgodnie z normą BS 7448 warunki ważności próby. Warunki te związane są z geometrią frontu pęknięcia zmęczeniowego i obejmują:

- 1) Sprawdzenie wymiarów i tolerancji próbek przed wykonaniem pęknięcia zmęczeniowego,
- 2) Przed wykonaniem próby zniszczenia należy sprawdzić następujące fakty:
 - minimalna długość pęknięcia (a) na powierzchni próbki wynosi co najmniej $0.45W$, gdzie W jest efektywną szerokością próbki,
 - oba końce pęknięcia zmęczeniowego mają długość co najmniej 1.3 mm lub $2.5\%W$ (przyjmujemy wartość większą), mierzoną od dna karbu
 - różnica pomiędzy zmierzonymi długościami pęknięcia zmęczeniowego na obu powierzchniach nie przekracza 15% średniej wartości z obu pomiarów,
 - płaszczyzna pęknięcia zmęczeniowego nie odchyła się więcej niż 10° od płaszczyzny karbu wstępnego,
- 3) Po próbie zniszczenia należy sprawdzić, czy
 - nie występuje wielopłaszczyznowe pęknięcie zmęczeniowe,
 - średnia długość szczeliny w stosunku do szerokości W zawiera się w granicach $0.45 - 0.55$,
 - żadne dwa pomiary z wykonanych dziewięciu pomiarów szczeliny nie różnią się więcej niż o 10% ,
 - czoło pęknięcia zmęczeniowego w żadnym miejscu nie jest bliżej położone dna karbu niż 1.3 mm lub $2.5\% W$ (przyjmujemy wartość większą),
 - płaszczyzna pęknięcia zmęczeniowego nie odchyła się więcej niż 10% od płaszczyzny szczeliny wstępnej,
- 4) Inne wymagania
 - współczynnik intensywności naprężenia w trakcie wykonywania pęknięcia zmęczeniowego zawarty jest w granicach określonych w normie BS 7448,
 - współczynnik asymetrii cyklu zmęczeniowego R nie przekracza wartości 0.1 .

Protokół z badań powinien zawierać wszystkie elementy wymagane przez normę BS 7448. Szczególną uwagę należy zwrócić na zapis położenia próbki w złączu spawanym, oraz na wskazanie parametru reprezentującego wartość CTOD. Do protokołu należy załączyć czytelną kopię przebiegu obciążenia i przemieszczenia oraz opis wyglądu powierzchni zniszczonej.

W celu uznania technologii spawania muszą być przeprowadzone kwalifikacyjne próby CTOD materiału spoiwa i strefy wpływu ciepła. Każde badanie powinno zawierać co najmniej trzy udane próby przeprowadzone w temperaturze o 15 stopni niższej niż najniższa przewidywana temperatura eksploatacji gazociągu. Z materiału obwodowego złącza spawanego pobierane są po 3 próbki w miejscach odpowiadających pozycji dla godziny 12; 3 oraz 6. Gdy jedna z trzech próbek pobranych z wyżej wymienionych miejsc da wynik niezadowolający (tj. wynik nie spełniający wymagań kruche pęknięcia), wówczas badaniu poddaje się dodatkową serię trzech próbek. Wyniki pięciu z sześciu zbadanych próbek muszą spełniać wymaganą odporność na kruche pęknięcie. Próbki, które nie spełniają zalecanych tolerancji wymiarów, nie spełniają kryterium dotyczącego krzywizny frontu pęknięcia zmęczeniowego oraz podczas próby rozrywania wykazują dużych rozmiarów wady w strefie spawu w części przylegającej do frontu pęknięcia należy odrzucić i zastąpić je próbkami nowymi pochodzącymi z miejsc podobnie usytuowanych w rurze gazociągu.

Próby CTOD wykonywano zarówno w temperaturze pokojowej, jak i obniżonej do poziomu -10°C , aby sprawdzić, jakie znaczenie ma temperatura w ocenie odporności materiału na kruche pęknięcie.

W przypadku badań CTOD w temperaturze pokojowej faza rozrywania prowadzona była bezpośrednio po wypropagowaniu pęknięcia zmęczeniowego.

Tabela 6. Przykładowy komplet wyników dla próbki spełniającej wymagania normowe

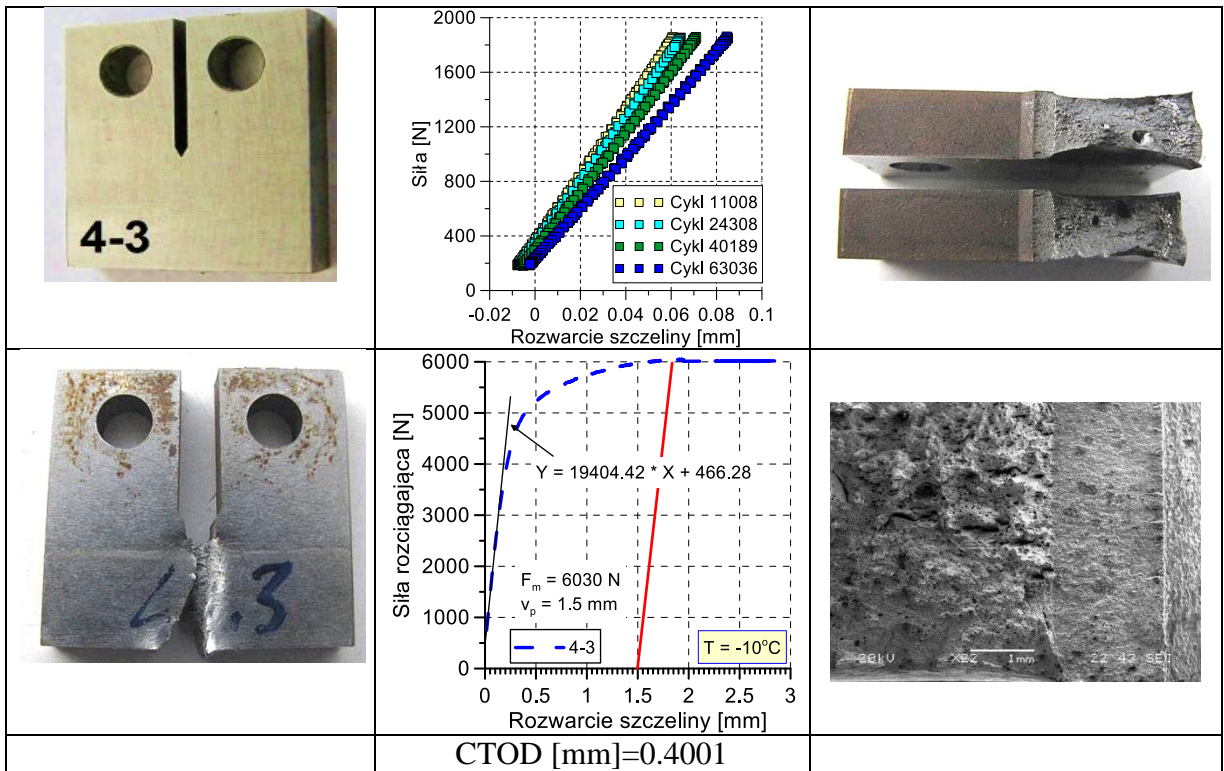
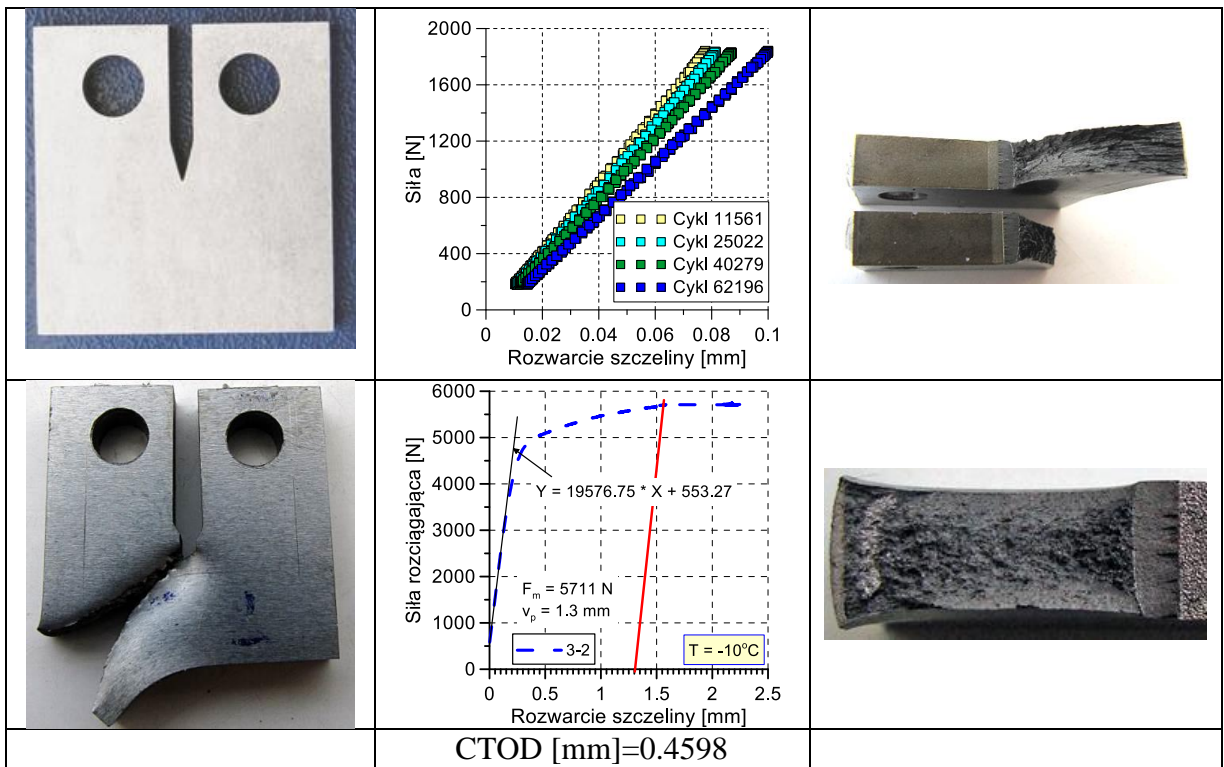


Tabela 7. Przykładowy komplet wyników dla próbki niespełniającej wymagań normowych



Dla drugiej partii próbek po wykonaniu pęknięcia zmęczeniowego obniżano temperaturę do poziomu -10°C , a następnie prowadzono jednoosiowe rozciąganie w celu rozerwania

próbki. Przebieg eksperymentu rejestrowany był na bieżąco przez komputer oraz zapisywany na twardym dysku w celu dalszego opracowania uzyskanych rezultatów. Próby rozrywania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej przy sterowaniu przemieszczeniem. W czasie próby utrzymywano stałą wartość temperatury z dokładnością do $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Bieżących pomiarów temperatury próbki dokonywano przy pomocy termopar przymocowanych do jej bocznej powierzchni.

Pomimo, że parametr CTOD w przypadku materiałów wykazujących wysoką plastyczność nie może być wykładnikiem do oceny odporności na kruche pękanie, to jednak może być wskaźnikiem szacunkowym do określenia różnic w zachowaniu materiału ze szczeliną zmęczeniową w warunkach jednoosiowego rozciągania. Wyżej wspomniana sytuacja dotyczyła testowanego materiału. Aby uzyskać szacunkowe wartości parametru CTOD, przeprowadzono obliczenia na podstawie następującej zależności:

$$\delta_c = \frac{K^2(1-v^2)}{(2 \cdot R_{e(0.2)} \cdot E)} + \frac{r_p(W-a_o)v_p}{r_p(W-a_o) + a_o + z},$$

gdzie:

$$K = \frac{YF}{BW^{0.5}},$$

oraz

$$Y = \frac{(2 + a_o/W) \cdot [0.866 + 4.64a_o/W - 13.32 \cdot (a_o/W)^2 + 14.72 \cdot (a_o/W)^3 - 5.6 \cdot (a_o/W)^4]}{(1 - a_o/W)^{3/2}},$$

natomiast

$$r_p = 0.4 \cdot (1 + \alpha),$$

$$\alpha = 2 \left[(a_o/b_o)^2 + a_o/b_o + 1/2 \right]^{1/2} - 2(a_o/b_o + 1/2).$$

Symbole w powyższych wzorach reprezentują:

F – siłę rozciągającą odpowiadającą maksymalnej jej wartości w przypadku materiału o dużej ciągliwości;

v - współczynnik Poissona;

$R_{e(0.2)}$ – odpowiednio: wyraźną i umowną granicę plastyczności;

E – moduł Younga;

v_p - trwałe rozwarcie szczeliny przy sile maksymalnej;

Z – odległość od osi obciążenia do punktów mocowania ostrzy ekstensometru;

r_p - współczynnik plastycznego obrotu.

Przykładowe wykresy CTOD w funkcji siły dla próbek, w których szczelina umiejscowiona była w strefie wpływu ciepła pokazano w tabelach 6 i 7. Tabele te oprócz wspomnianych wykresów zawierają także fotografie próbek przed badaniami i po rozerwaniu oraz wykresy przedstawiające zmiany sztywności próbek podczas realizacji obciążenia cyklicznego w celu uzyskania wstępnego pęknięcia o wymaganej długości nie mniejszej niż 1.3 mm.

Otrzymane wyniki z badań wszystkich próbek (18 sztuk) wykazały stosunkowo niską powtarzalność pomimo faktu, że próbki były pobierane z jednakowego obszaru badawczego. Siła maksymalna różniła się o ok. 1000 N, natomiast wartości rozwarcia o 50%. Tego rodzaju wynik świadczy o występowaniu obszarów o zróżnicowanej odporności na kruche pękanie, a zatem należy się liczyć z możliwością wystąpienia tzw. „słabego ogniwa”, które przy określonych warunkach obciążenia może stanowić miejsce potencjalnej inicjacji pęknięcia.

Przeprowadzone testy CTOD obejmujące materiał rodzimy rury, strefę wpływu ciepła oraz spoinę pokazały, że ich wyniki nie są wiążące z punktu widzenia norm API STANDARD 1104 oraz BS 7448. Wszystkie wypropagowane pęknięcia zmęczeniowe pod względem wymiarowym i kształtu frontu spełniały warunki normowe. Warunków normowych nie spełniały jednak przełomy rozrywanych próbek w drugiej fazie testów CTOD (faza rozrywania próbki z wypropagowaną szczeliną zmęczeniową), tabela 7. Wszystkie próbki wykazywały przełom o charakterze plastycznym, przy czym w zdecydowanej większości testów rozrywania płaszczyzna pęknięcia zmęczeniowego odchyłała się znacznie więcej niż dopuszczalne 10% od płaszczyzny szczeliny wstępnej, co automatycznie dyskwalifikuje próbę według wymienionych wyżej i aktualnie obowiązujących norm. Pomimo otrzymania negatywnego wyniku w świetle obowiązujących norm, przeprowadzono obliczenia wartości CTOD w celu uzyskania orientacyjnych wartości. Analiza tych wartości pokazała, że zdecydowana ich większość mieściła się powyżej wartości minimalnej wynoszącej 0.127 mm według norm BS7448 oraz API1104, dla której określa się dopuszczalne wymiary wad przy danym poziomie największych wartości naprężenia osiowego, jakiemu może być poddawany rozpatrywany gazociąg.

4. Podsumowanie

Powyższe opracowanie w sposób syntetyczny przedstawia wybrane elementy mechaniki pękania ze szczególnym naciskiem na parametry pozwalające identyfikować wady materiałowe lub uszkodzenia powstające pod wpływem obciążeń eksploatacyjnych.

Dla rozwoju defektu w postaci szczeliny lub karbu istotne są rozkłady naprężenia i odkształcenia materiału w pobliżu ich krawędzi, które pojawiają przy obciążaniu elementu.

Pęknięcia w materiałach kruchych rozwijają się w sposób gwałtowny. W tych materiałach nie ma powolnego, stabilnego i przewidywalnego w warunkach pracy rozwoju pęknięć, jak to ma miejsce w przypadku materiałów zdolnych do plastycznej deformacji. Opis rozwoju szczelin w materiale kruchym okazał się łatwiejszym od opisu pękania materiałów plastycznych i stąd nauka o pękaniu zaczęła się rozwijać od opisu zachowania się szczeliny w materiale kruchym (liniowa mechanika pękania).

Pęknięcie materiałów plastycznych jest zjawiskiem bardzo skomplikowanym i do opisu rozwoju szczeliny w tych materiałach (nieliniowa mechanika pękania) stosuje się uproszczone modele materiału. Istotne osiągnięcia uzyskano przy założeniu sztywno plastycznego modelu materiału (bez umocnienia). Jednak ogromna większość metali konstrukcyjnych umacnia się przy odkształceniu plastycznym na zimno i zdolność umacniania się jest ich ważną zaletą. Jest to bezpośrednia przyczyna prowadzenia współczesnych programów badawczych właśnie nad doskonaleniem opisu rozwoju pęknięć w materiałach ze wzmocnieniem.

Stan obciążenia materiału w pobliżu krawędzi szczelin i zachowanie się wad przy obciążeniu elementu, w którego materiale się ona znajduje, charakteryzują trzy wielkości:

- współczynnik intensywności naprężenia K opisujący koncentrację naprężenia w pobliżu krawędzi szczeliny – wielkość uwzględniająca tylko odkształcenie sprężyste, wprowadzona dla materiałów kruchych zgodnie z zasadami liniowej mechaniki pękania,
- rozwarcie dna szczeliny δ - wielkość uwzględniająca zarówno odkształcenia sprężyste, jak i plastyczne,

- całka J opisująca prędkość uwalniania energii w funkcji długości szczeliny – wielkość wprowadzona w ramach nieliniowej mechaniki pęknięcia uwzględniająca zarówno odkształcenia sprężyste, jak i plastyczne.

Wartości wymienionych parametrów, przy których rozpoczyna się propagacja pęknięcia nazywane są wartościami krytycznymi i oznaczane K_{IC} , δ_c i J_c . Dla każdego materiału przyjmują określone wartości, które stanowią miarę ich odporności na pęknięcie.

Pomiary odporności na pęknięcie materiałów konstrukcyjnych K_{IC} , δ_c i J_c należą grupy zadań trudnych, ponieważ wymagają spełnienia wielu rygorystycznych warunków. Wyniki pomiarów są zwykle obarczone znacznym rozrzutem, dlatego wiarygodne wartości odporności na pęknięcie są najczęściej wartościami średnimi z wielu pomiarów.

Wzory mechaniki pęknięcia są wyprowadzone w oparciu o modele idealizujące zachowanie się materiału w warunkach eksploatacji. Korzysta się też z wielu współczynników, których wartości wyznaczone są na próbkach także w idealnych warunkach obciążenia. Zarówno właściwości materiału elementów konstrukcyjnych, jak i warunki obciążenia występujących w nich defektów mogą znacznie odbiegać od przyjmowanych modeli i laboratoryjnych warunków obciążenia. Stąd też wyniki obliczeń prędkości rozwoju pęknięcia i czasu eksploatacji do osiągnięcia krytycznych rozmiarów należy traktować jako przybliżone.

Pomimo istotnego postępu w zakresie mechaniki pęknięcia nadal odczuwa się brak zadowalającej wiedzy o związkach między odpornością materiałów konstrukcyjnych na pęknięcie, a ich właściwościami, które są wyznaczone w klasycznych badaniach wytrzymałościowych, względnie metalograficznych, takich jak na przykład: granica plastyczności, wytrzymałość doraźna na rozciąganie, współczynnik umocnienia przy odkształceniu plastycznym na zimno, twardość, wielkość ziarna, zawartość wtrąceń, itp.

Od strony doświadczalnej odporność na pęknięcie materiałów jest głównie wyznaczana dla pierwszego sposobu obciążenia. Nie ma skutecznych metod wyznaczania odporności na pęknięcie materiału dla sposobów II i III, a zatem w dalszym ciągu mamy ograniczone możliwości w rozwiązywaniu konkretnych zagadnień praktyki inżynierskiej w tym zakresie. Jednak przy wszystkich wymienionych niedostatkach mechanika pęknięcia pozwala znacznie dokładniej oceniać wytrzymałość pracujących elementów konstrukcji zawierających defekty niż było to możliwe za pomocą klasycznej wytrzymałości materiałów i co jest bardzo istotne obliczenia na podstawie mechaniki pęknięcia, chociaż mało dokładne, dają wyniki gwarantujące większe bezpieczeństwo.

Na świecie istnieje wiele narodowych zaleceń dotyczących sposobów oceny wytrzymałości i niezawodności elementów zawierających stwierdzone lub przypuszczalnie istniejące wady typu pęknięcia, np.: USA – API 579, Japonia – WES 2805, Wielka Brytania BS 7910 i BS PD 6493, Francja – A 16 i RSE-M.

W literaturze z zakresu mechaniki pęknięcia można wskazać szereg wartościowych pozycji wymienionych na końcu pracy, które wyczerpująco omawiają wiele problemów, także i tych wymagających dalszych intensywnych badań. Oprócz cytowanych w tekście pozycji warto również zapoznać się z pozycjami [26-31], które istotnie uzupełniają opis stanu wiedzy w zakresie rozwoju mechaniki pęknięcia.

Literatura

- [1] Gołaski L., Pilcer S., Metody laboratoryjnych badań wytrzymałościowych. Część I. Mechanika pękania. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1979.
- [2] Gołaski L., Elementy doświadczalnej mechaniki pękania, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992.
- [3] Bochenek A., Elementy mechaniki pękania, Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998.
- [4] Neimitz A., Mechanika pękania, PWN, Warszawa 1998.
- [5] Callister W.D., Jr, Materials Science and Engineering – An Introduction, John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [6] Neimitz A., Ocena wytrzymałości elementów konstrukcyjnych zawierających pęknięcia (podstawowe elementy procedur SINTAP), Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004.
- [7] Kowalewski Z.L, Deputat J., Identyfikacja wad materiałowych w ujęciu mechaniki pękania – podstawy teoretyczne, Dozór Techniczny, nr 5, 105-109, nr 6, 128-134, 2005.
- [8] Kowalewski Z.L, Deputat J., Ocena wad materiałowych na podstawie mechaniki pękania, Nieniszczące Badania Materiałów, Wykłady jedenastego seminarium szkoleniowego, Zakopane 8-11 marca 2005, str. 63-93, IPPT PAN, Biuro Gamma, 2005.
- [9] Kowalewski Z.L, Deputat J., Metody doświadczalne identyfikacji wad materiałowych na podstawie analizy parametrów mechaniki pękania, Dozór Techniczny, 2, 26-31, 2006.
- [10] Kowalewski Z.L, Współczesne badania wytrzymałościowe – kierunki i perspektywy rozwoju, Biuro Gamma, Warszawa 2008, (stron 198).
- [11] Kowalewski Z.L, Kierunki i perspektywy rozwoju badań wytrzymałościowych, Wydawnictwo ITS, Warszawa, 2008, (stron 227).
- [12] Griffith A.A., The phenomenon of rupture and flow in solids, Phil.Trans. Royal Soc., Series A, 1920, 221
- [13] Irwin G.R., Fracture, Springer Encyclopedia of Physics , Vol.VI, 1958, str.551
- [14] Rice J.R., Fracture. An advanced treatise. Vol. II: Mathematical Fundamentals, New York – London: Academic Press, 1968.
- [15] ASTM E 1737 – 96 Standard Test Method for J – Integral Characterization of Fracture Toughness.
- [16] ASTM E 813-88, Standard Test Method for JIC – a measure of fracture toughness, Annual book of ASTM Standards, Vol. 03.01, Philadelphia, 1988.
- [17] PN-H-04336:1998, Metale, Metoda badania odporności na pękanie przez wyznaczenie krytycznej wartości całki J, JIC.
- [18] Dugdale D.S., Yielding of steel set containing slits, J. Mech. Phys. Solids, 8, 1960, 100
- [19] ASTM 399 – 70T, Tentative Method of Test for Plane –Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, 1970.
- [20] Agatonovic P., Die Restfestigkeit bestimmen. Spannungs-Dehnungs-Annehrung – ein neues Verfahren . Materialprüfung, 41,1999, 24-30.
- [21] Agatonovic P., KI mittels Spannungs-Dehnungs-Annärung abschätzen. Materialprüfung, 41,1999,77-84.
- [22] Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, Annual Book of ASTM Standards, Metals Test Methods and Analytical Procedures, Metals-Mechanical Testing: Elevated and Low-Temperature Tests; Metallography, Vol. 03.01, 509-539, 1993.
- [23] Szymczak T., Kowalewski Z.L, Badanie odporności kompozytów metalowo-ceramicznych na kruche pękanie przy użyciu próbek kompaktowych (CT), Transport Samochodowy, 3, 2012, 119-131.
- [24] Wells A.A., British Welding Journal, 13, 1965, 2.
- [25] BS DD 1972 Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing.

- [26] Paris P., Erdogan F., A critical analysis of crack propagation laws, *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME, December 1963, 538-534.
- [27] Forman R.G, Kearney V.E., Engle R.M., Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures, *Journal of Basic Engineering*, Trans. ASME, ser D, September 1967, 459-464.
- [28] Joyce J.A., *Manual on Elastic-Plastic Fracture – Laboratory Test Procedures*. ASTM Manual Series: MNL 27, West Conshohocken, PA, 1996.
- [29] Directive 97/23/EC of the European Parliament and of the Council of 29 May 1997 on the approximation of the laws of the Member States concerning pressure equipment (Pressure Equipment Directive –P.E.D.).
Patrz także omówienie tej dyrektywy: M.Zdankiewicz, *Dyrektywa dotycząca urządzeń Ciśnieniowych. Omówienie ogólne. Wymagania dotyczące materiałów. Dozór Techniczny*, 1,1998, 1 – 9.
- [30] Biel-Gołaska M., Gołaski L., Ocena bezpieczeństwa eksploatacji niektórych urządzeń poddózorowych na podstawie wykresu pęknięcia FAD, *Dozór Techniczny*, 1,1998, 10-12.
- [31] Toyosada M., Gotoh K., Niwa T., Fatigue life assessment for welded structures without initial defects: an algorithm for predicting fatigue crack growth from a sound site. *International Journal of Fatigue*. 26 (2004) 993-1002.