
**XIV Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 4-7 marca 2008**

OCENA ZAGROŻENIA JAKIE POWODUJE WADA

Julian Deputat, Sławomir Mackiewicz

IPPT PAN Warszawa

juliandeputat@aster.pl, smackiew@ippt.gov.pl

1. Wstęp

W klasycznych obliczeniach wytrzymałościowych zakłada się, że materiał w całej objętości ma takie same własności mechaniczne i nie zawiera wad (nieciągłości). Zniszczenie obciążonego elementu konstrukcji (pęknięcie) następuje gdy obciążenie F osiągnie wartość graniczną F_Y , która dla materiałów sprężystych (kruchych) odpowiada naprężeniu w całym przekroju równym granicy sprężystości, a dla materiałów wykazujących własności plastyczne, granicy plastyczności, albo wytrzymałości doraźnej czy granicy płynięcia. W przypadku materiałów wykazujących własności plastyczne zniszczenie poprzedzane jest odkształceniem plastycznym w całym przekroju elementu. Mówi się wtedy o *zniszczeniu przez pęknięcie plastyczne*.

W klasycznej wytrzymałości materiałów kryterium zniszczenia ma postać:

$$(1) \quad F < F_Y$$

Ewentualność wad, niejednorodności własności materiału i losowych zmian obciążeń zewnętrznych uwzględnia się przez wprowadzanie zwiększonych przekrojów, co ma tworzyć zapas bezpieczeństwa. Współczynniki bezpieczeństwa często są ustalane arbitralnie, bez należytego uzasadnienia technicznego. Wprowadza się pojęcie wad dopuszczalnych i niedopuszczalnych. Rozmiary wad dopuszczalnych są także często ustalane arbitralnie na podstawie doświadczenia z eksploatacji podobnych konstrukcji.

Mechanika pękania zajmuje się zniszczeniem w wyniku pękania, zniszczeniem na skutek odkształcenia plastycznego w całym przekroju i w wyniku zmęczenia. Rozwiązania mechaniki pękania proponują racjonalne sposoby oceny wytrzymałości elementów konstrukcji przy uwzględnieniu obecności wad. Mówi się, że mechanika pękania pozwala ocenić integralność konstrukcji (*structural integrity*) zawierającej wady. Na pojęcie „integralność konstrukcji” składa się jej *wytrzymałość, niezawodność, trwałość i bezpieczeństwo eksploatacji* [1]. Ocena taka ma dać odpowiedź na pytanie, czy oceniany element, albo oceniana konstrukcja nadaje się do spełniania celu, do którego została przeznaczona i czy będzie pracowała właściwie i bezpiecznie. Ocena prowadzona pod kątem badania przydatności konstrukcji do spełniania celu jest nazywana *fitness-for-purpose assessment*.

Obecność wad w pracującym elemencie powoduje, że całe obciążenie zewnętrzne przejmie materiał w przekroju elementu poza wadą i w nim powstanie większe naprężenie, niż było projektowane. Szczególna sytuacja wystąpi przy wierzchołku pęknięcia. W pobliżu wierzchołka pęknięcia naprężenie może być znacznie wyższe niż wynikałoby to z podzielenia siły obciążającej element przez pozostały (poza wadą) przekrój elementu. Stopień spiętrzenia naprężenia w pobliżu

wierzchołka pęknięcia z jednej strony i odporność materiału na pęknięcie z drugiej strony decydują o tym, czy pęknięcie będzie się rozwijać czy nie.

W liniowej mechanice pęknięcia opisującej zachowanie się materiałów sprężystych (pękających krucho, bez odkształcenia plastycznego) miarą intensywności (spiętrzenia) naprężenia przy wierzchołku pęknięcia jest Współczynnik Intensywności Naprężenia (WIN) oznaczany K_I . Miarą odporności takich materiałów na pęknięcie jest krytyczna wartość tego współczynnika K_{IC} . Gdy K_I osiągnie wartość równą oporności materiału na pęknięcie K_{IC} pęknięcie zacznie się gwałtownie rozwijać i *element zostanie zniszczony przez pęknięcie kruche*. Kryterium kruchego pęknięcia ma postać:

$$(2) \quad K_I \leq K_{IC}$$

Opisem pęknięcia w materiałach wykazujących istotne własności plastyczne zajmuje się nieliniowa mechanika pęknięcia. Pole naprężeń i odkształceń przy krawędzi pęknięcia w materiałach wykazujących własności plastyczne charakteryzuje wierzchołkowe rozwarście szczeliny δ i całka Rice'a J . Krytyczne wartości wierzchołkowego rozwarścia szczeliny δ_C i całki J_C są miarą odporności na pęknięcie tych materiałów.

Dla oceny zagrożenia jakie powoduje wada w materiale pracującego elementu kluczowe znaczenie ma umiejętność wiarygodnego oszacowania pola naprężenia przy krawędzi wady i znajomość odporności materiału na pęknięcie. Odporność materiału na pęknięcie wyznacza się doświadczalnie, a istniejące procedury pozwalają uzyskać wiarygodne wyniki [2,3]. Nie ma metod doświadczalnych pozwalających na wyznaczenie pola naprężeń przy krawędzi wykrytej wady i na określenie wartości współczynnika K_I , całki J i wierzchołkowego rozwarścia szczeliny δ które to pole charakteryzują. Wartość K_I , J i δ dla konkretnego elementu i wykrytej w nim wady, oraz dla istniejącego obciążenia można obliczyć numerycznie, albo za pomocą uproszczonych wzorów, których dostarcza mechanika pęknięcia. Mechanika pęknięcia jest młodym, szybko się rozwijającym działem mechaniki ciała stałego. Dlatego też zawarte w normach i przepisach procedury oceny stopnia szkodliwości wad są ciągle doskonalone.

Przed opisaniem zasad oceny wytrzymałości konstrukcji, w której materiale znajdują się nieciągłości przypomnimy jak charakteryzuje się pole naprężeń i odkształceń przy wierzchołku pęknięcia w materiałach sprężystych i sprężysto – plastycznych.

2. Opis pola naprężeń i odkształceń przy krawędzi pęknięcia

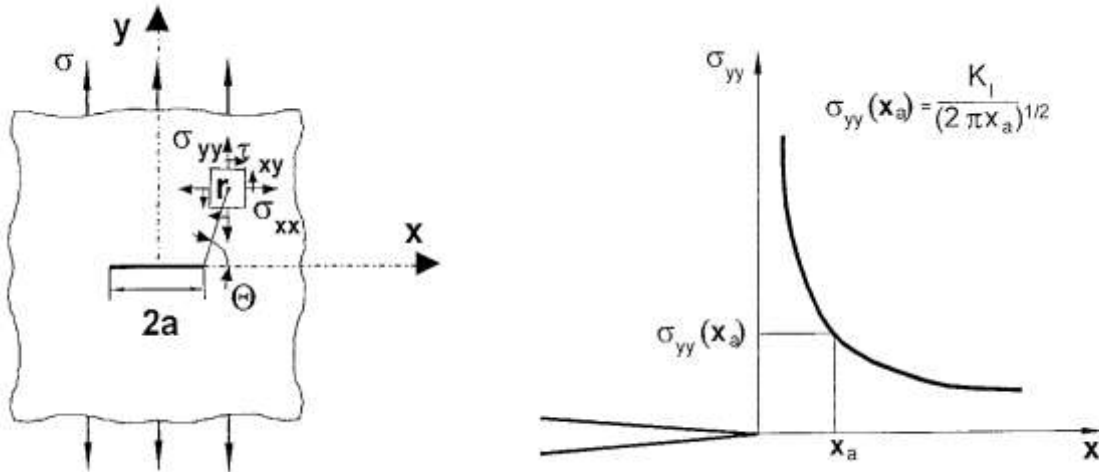
K_I - Współczynnik Intensywności Naprężenia (WIN)

Pierwsze opisy pola naprężeń i odkształceń przy krawędzi pęknięcia dotyczyły sytuacji jaka ma miejsce w materiale idealnie sprężystym, a więc takim, który pod wpływem narastającego obciążenia materiał odkształca się sprężysto i bez odkształcenia plastycznego pęka krucho (łupliwie) gdy osiągnięta zostanie granica wytrzymałości doraźnej.

W opisie mechaniki pęknięcia karb, który stanowi wada materiałowa, a w szczególności pęknięcie reprezentowany jest przez wąską, ostrą szczelinę o idealnym kształcie (*szczelina Griffith'a*). Na rys 1 pokazano taką modelową szczelinę o długości $2a$ w nieskończenie dużej cienkiej tarczy zorientowaną prostopadle do kierunku rozrywającego naprężenia σ . W materiale sprężystym rozkład naprężeń przy wierzchołku szczeliny opisują wzory:

$$(3) \quad \begin{aligned} \sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \end{aligned}$$

Litera r we wzorach (3) oznacza odległość rozpatrywanego punktu pola od wierzchołka szczeliny.



a) b)
 Rys.1. Szczelina o długości $2a$ w nieskończenie dużej, cienkiej tarczy sprężystej a)
 i rozkład składowej naprężenia σ_{yy} w funkcji odległości x od wierzchołka szczeliny b)

Wartość współczynnik K_I występującego we wzorach (3) określa stopień zwiększenia naprężenia σ w poszczególnych punktach obszaru przy krawędzi szczeliny. Współczynnik ten nazywa się Współczynnikiem Intensywności Naprężeń (WIN). W materiale idealnie sprężystym, w którym nie występują odkształcenia plastyczne, wyraża się on wzorem:

$$(4) \quad K_I = \sigma \sqrt{\pi a} [N / m^{3/2}]$$

Gdy narasta naprężenie σ obciążające tarczę, a także gdy zwiększa się długość pęknięcia a rośnie wartość współczynnika WIN. Łatwo przewidzieć, że zarówno wzrost naprężenia jak i długości szczeliny przybliżają stan, w którym w pobliżu krawędzi pęknięcia powstanie szczelina zacznie się rozwijać. Nawet przy niskiej wartości średniego naprężenia σ w przekroju obciążonego elementu przy krawędzi pęknięcia mogą powstawać naprężenia powodujące lokalne odkształcenia plastyczne, a więc i rozwój pęknięcia. To wyjaśnia narastanie pęknięcia zmęczeniowego przy naprężeniu średnim o wartości mniejszej od granicy plastyczności materiału. Wartość współczynnika K_I w materiałach sprężystych jest miarą siły działającej na wierzchołek pęknięcia w kierunku jego rozwoju (*Crack Driving Force – CDF*). W rzeczywistych elementach pęknięcia nie mają kształtu identycznego z kształtem szczeliny modelowej, a na rozkład naprężenia w pobliżu krawędzi pęknięcia wpływają także wymiary i kształt ocenianego elementu. We wzorze na WIN uwzględnia się to przez wprowadzenie współczynnika kształtu f :

$$(5) \quad K_I = f \sigma \sqrt{\pi a}$$

W specjalistycznych podręcznikach i katalogach podawane są wzory na K_I dla elementów o różnej geometrii.

W odróżnieniu od materiałów idealnie sprężystych w rzeczywistych materiałach po przekroczeniu granicy sprężystości występują odkształcenia plastyczne i wzory (3) opisujące rozkład naprężeń w pobliżu krawędzi pęknięcia zachowują sens tylko przy założeniu, że strefa odkształceń plastycznych jest mała w porównaniu z długością pęknięcia.

Fakt występowania obszarów odkształceń plastycznych w pobliżu krawędzi pęknięcia w rzeczywistych materiałach uwzględnia się między innymi wprowadzając pojęcie efektywnej długości szczeliny. Efektywna długość szczeliny to długość szczeliny powiększona o długość odkształconego plastycznie obszaru przed wierzchołkiem pęknięcia.

W wyrażeniu na WIN uwzględniającym własności plastyczne materiału występuje granica plastyczności materiału R_e :

$$(6) \quad K_I = \sigma \sqrt{\pi \left(a + \frac{K_I^2}{2\pi R_e^2} \right)}$$

Wartość współczynnika K_I , przy której zaczyna się rozwijać pęknięcie nazywa się krytyczną wartością współczynnika intensywności naprężeń (WIN) i oznacza się K_{IC} . Krytyczna wartość współczynnika intensywności naprężeń K_{IC} jest stałą materiałową i nazywa się odpornością materiału na pęknięcie.

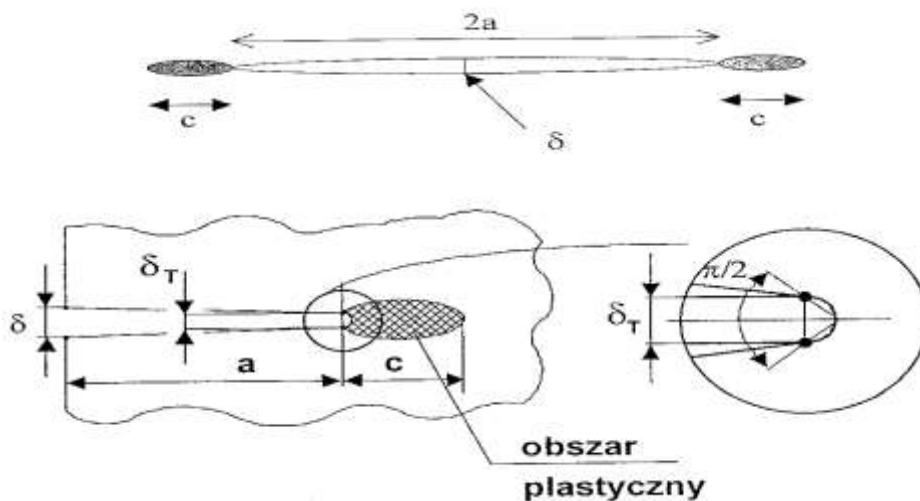
K_{IC} jest dobrą miarą odporności na pęknięcie materiałów sprężystych o dużej wytrzymałości doraźnej, a więc materiałów o własnościach materiałów kruchych. Zaleca się korzystać z tej miary odporności na pęknięcie tylko w przypadku materiałów, których wartość granicy plastyczności R_e stanowi przynajmniej 1/150 część modułu sprężystości E . Wiele stosowanych materiałów konstrukcyjnych wykazuje istotne własności plastyczne i rozmiary obszarów odkształconych plastycznie przy krawędzi pęknięć nie spełniają warunku „minimalnej wielkości” w stosunku do długości pęknięcia. Zachowanie się pęknięć w takich materiałach lepiej opisuje nieliniowa mechanika pęknięcia. Jako miary obciążenia wierzchołka szczeliny, a więc miary siły działającej na wierzchołek pęknięcia (COD) w nieliniowej mechanice pęknięcia stosuje się pojęcia - Rozwarcia Wierzchołkowego Szczeliny (CTOD) oznaczanego przez δ i całkę Rice'a oznaczaną J .

δ - Rozwarcie Wierzchołkowe Szczeliny (CTOD)

Rysunki 2a i 2b wyjaśniają znaczenie pojęć: *rozwarcie szczeliny COD (Crack Opening Displacement)* oznaczane przez δ i *wierzchołkowe rozwarcie szczeliny CTOD (Crack Tip Opening Displacement)*, które oznacza się δ_T . Rozwarcie szczeliny w materiale sprężysto-plastycznym bez umocnienia opisuje przybliżony wzór:

$$(7) \quad \delta = \frac{\pi \sigma^2 a}{ER_e} = \frac{K_I^2}{ER_e} = \frac{G}{R_e}$$

We wzorze (7) G jest siłą rozwierającą szczelinę, określoną przez zmianę energii potencjalnej jaka następuje w wyniku przyrostu powierzchni szczeliny $G = \frac{\partial P}{\partial A}$, zaś A jest powierzchnią szczeliny.



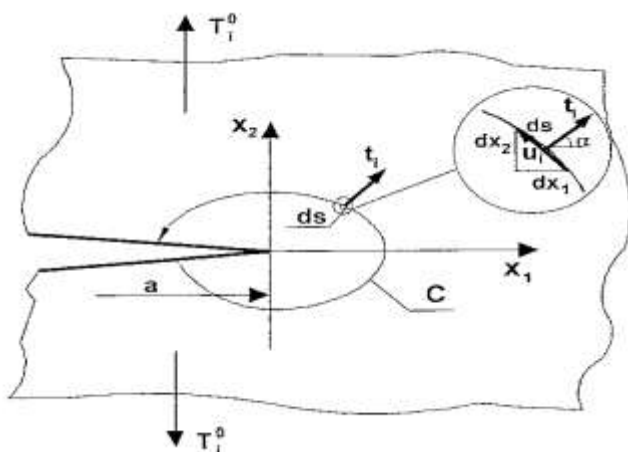
Rys.2. Ilustracja pojęć: rozwarcie szczeliny δ i wierzchołkowe rozwarcie szczeliny δ_T . Literą c oznaczono na rysunkach długość obszarów odkształcenia plastycznego.

J - Całka Rice'a

Całka J podobnie jak wierzchołkowe rozwarcie szczeliny δ_T jest miarą pola naprężeń i odkształceń w obszarze przy wierzchołku szczeliny w materiałach sprężysto-plastycznych. Całka J przedstawia zmianę energii potencjalnej próbki przy nieskończenie małym przyroście długości szczeliny również wtedy, gdy przy krawędzi szczeliny występują odkształcenia plastyczne. Całka J składa się z części związanej z odkształceniem sprężystym J_e i z części związanej z odkształceniem plastycznym J_p . Przybliżoną wartość części sprężystej całki Rice'a można obliczyć za pomocą wzoru:

$$(8) \quad J_e = \frac{K_I^2}{E}$$

We wzorze (8) E dla płaskiego stanu naprężeń jest modułem Younga, a dla płaskiego stanu odkształceń $E' = E/(1-\nu^2)$, gdzie ν jest współczynnikiem Poissona. Przybliżone wzory na całkę J znajdują się w opisach procedur oceny wytrzymałości elementów z wadami i podręcznikach mechaniki pękania.



Rys 3. Szczelina z konturem całkowania do obliczania całki J .

Podobnie jak K_{IC} krytyczne wartości rozwarcia wierzchołkowego szczeliny δ_c i całki J_c są odpornością materiałów na pęknięcie.

3. Procedury oceny integralności konstrukcji

Oparte na mechanice pęknięcia sposoby oceny aktualnego stanu i pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji konstrukcji, w których materiale znajdują się wady były proponowane od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku i są ciągle intensywnie rozwijane i doskonalone. Pierwszą propozycją sposobu oszacowania wytrzymałości konstrukcji zawierających wady były Krzywe Projektowe - *Design Curves* opracowane w Brytyjskim Instytucie Spawalnictwa (Wells, Burdekin i Dawes 1971 [4]). Wykorzystano w nich pojęcie siły działającej na wierzchołek pęknięcia (*Crack Driving Force CDF*), której miarą jest wartość wierzchołkowego rozwarcia pęknięcia δ lub całki Rice'a J . Wartości δ i całki Rice'a J obliczano z przybliżonych wzorów opisujących zależność δ i J od znormalizowanego odkształcenia $\varepsilon/\varepsilon_y$ (ε_y – odkształcenie odpowiadające granicy plastyczności). Udoskonalane krzywe projektowe były podstawą procedur zalecanych w wielu normach narodowych i przepisach przemysłowych powszechnie stosowanych w ocenie konstrukcji spawanych (BS 7910: 1999, CSA Z 662, API 104). W polskim piśmiennictwie krzywe te nazwane są wykresami uogólnionej siły działającej na wierzchołek pęknięcia. W nieco zmienionej postaci Failure Assessment Diagram FAD (krzywa zniszczenia FAD) są powszechnie stosowane i ciągle rozwijane (Dowling, Townley [5]).

W energetyce najbardziej rozpowszechnione są obecnie procedury zawarte w zaawansowanym profesjonalnym programie R-6 Code opracowane w UK Central Electricity Generating Board. W procedurach R-6, podany jest zestaw wzorów na obliczanie współczynników K_I dla wielu konstrukcji i połączeń spawanych, wzory zalecane do wyliczania obciążeń granicznych F_y dla pęknięcia plastycznego elementów o różnej geometrii i wad o różnym charakterze. Istotną wartością są zawarte w procedurach R-6 możliwości uwzględniania wpływu na proces pęknięcia takich czynników jak naprężenia własne (w tym spawalnicze), zmiany temperatury w kierunku grubości elementu, wzajemne oddziaływanie bliskich sobie wad, czy możliwość opisu propagacji pęknięcia przy obciążeniu zmiennym. Program R-6 pozwala szybko uzyskać odpowiedź na pytania, które są zwykle stawiane, gdy wykryta zostanie wada:

- wielkość dopuszczalnego obciążenia elementu, w którym wykryto wadę,
- rozmiar dopuszczalnej wady w określonych warunkach pracy,
- prędkość rozwoju pęknięcia,
- przyrost długości wady w określonym czasie,
- współczynnik bezpieczeństwa dla elementu zawierającego wadę,
- spodziewany czas bezpiecznej eksploatacji konstrukcji,
- w przypadku zbiorników – czy przed niszczącym rozwojem pęknięcia wystąpi przeciek.
- wrażliwość wytrzymałości na przyrost rozmiaru wady i zmiany obciążenia

W wielu ośrodkach prowadzone są prace mające na celu doskonalenie i rozszerzenie zastosowań metod oceny wpływu wad na wytrzymałość konstrukcji. Oprócz badawczych programów narodowych i branżowych prowadzone są prace, w których współpracuje wiele krajów. W roku 2004 w wyniku programu badawczego Unii Europejskiej opracowana została procedura oceny integralności konstrukcji SINTAP (**S**tructural **I**NTegrity **A**ssessment **P**rocedure), która ma być podstawą przyszłej normy europejskiej. Wykorzystano w niej, udoskonalono, rozszerzono i zweryfikowano różne znane dotychczas metody[1]. Wspólne prace nad rozwojem europejskiej procedury prowadzone były w ramach projektu FITNET (Fitness for Service Network), zakończonego w roku 2006. Idee wykresów zniszczenia FAD i CDF spełniają też zasadniczą rolę w tych najnowszych procedurach.

Należy podkreślić, że stosowanie procedur oceny integralności opartych na mechanice pęknięcia jest bezpieczne. Procedury te nazywa się konserwatywnymi, w znaczeniu: *ostrożnymi, z niewielkim ryzykiem*. Zmniejszenie ryzyka osiąga się przez bardziej dokładne (ale i bardziej skomplikowane i bardziej kosztowne) obliczenia i przez wykorzystywanie bardziej wszechstronnych danych dotyczących kształtu, rozmiarów, sposobu obciążenia badanych elementów, własności mechanicznych materiału, oraz rozmiarów, charakteru, lokalizacji i wzajemnego oddziaływania wad. Potrzeba dokładnych wiadomości o wadach była też pewnie powodem, że oceny integralności konstrukcji z wadami w materiale rozwinęły się dopiero wtedy, gdy nieniszczące metody wykrywania i oceny wewnętrznych nieciągłości były dobrze ugruntowane.

Krzywe zniszczenia FAD

Wykres zniszczenia FAD uwzględnia zarówno kryterium zniszczenia przez pęknięcie kruche $K_I \leq K_{IC}$ jak i przez pęknięcie plastyczne $F < F_Y$. Na osi pionowej Y wykresów zniszczenia FAD odłożone są wartości siły działającej na wierzchołek pęknięcia K_I , lub J lub δ znormalizowane przez krytyczne wartości tych wielkości, czyli przez odporność materiału na pęknięcie:

$$(8) \quad K_r = K_I / K_{IC}; \quad K_r = J / J_C; \quad K_r = \delta / \delta_C,$$

Na osi poziomej X odłożone jest obciążenie zewnętrznego elementu F znormalizowane przez obciążenie granicznego F_Y powodujące uplastycznienie materiału w przekroju elementu wolnym od wad:

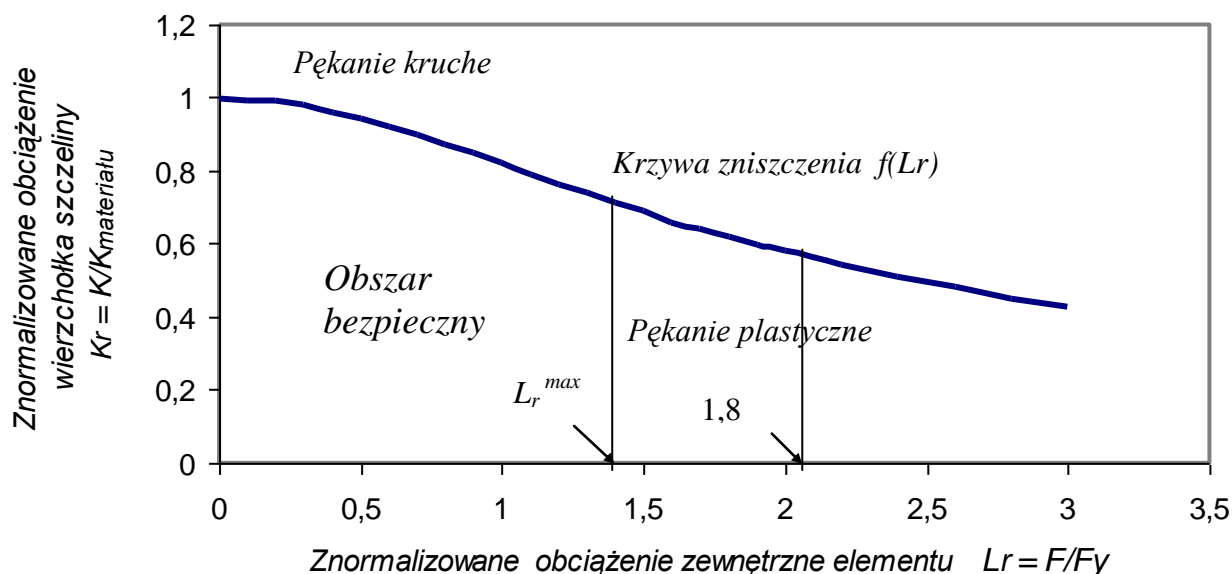
$$(9) \quad L_r = F / F_Y$$

Unormowanie wartości K_I , J i δ przez podzielenie przez krytyczną wartość tych wielkości oraz unormowanie obciążenia zewnętrznego F przez podzielenie przez krytyczną wartość odpowiednio obciążenia F_Y sprawia, że wykresy zniszczenia są niezależne od geometrii badanego elementu. Geometria elementu wpływa natomiast na wartości jakie przyjmują K_I , J i δ , co musi być uwzględnione przy obliczeniach. Unormowane wartości K_I / K_{IC} , J / J_C i δ / δ_C oznaczają stopień zagrożenia rozwojem pęknięcia. Gdy wartość tych wielkości jest mniejsza od 1, pęknięcie nie rozwija się. Gdy osiąga wartość 1 w materiałach kruchych nastąpi kruche pęknięcie, a w materiałach wykazujących własności plastyczne pęknięcie zacznie się rozwijać. Podobnie unormowana wartość F / F_Y jest miarą stopnia zagrożenia przekroczeniem granicy plastyczności materiału w przekroju elementu poza pęknięciem plastycznym. Plastyczne obciążenie krytyczne odpowiada $F / F_Y = 1$.

Kształt krzywej zniszczenia FAD jest zależny od zastosowanych wzorów opisujących zjawiska zachodzące przed krawędzią pęknięcia, a te wybiera się w zależności od własności materiału badanego elementu (opisywany modelem liniowo-sprężystym czy sprężysto-plastycznym, z uwzględnieniem czy bez uwzględniania umocnienia w wyniku odkształcenia plastycznego) i od przyjętego poziomu analizy, a więc od tego na jakie granice ryzyka trafności wyniku analizy godzimy się. Wyższy poziom analizy prowadzący do bardziej dokładnej oceny wymaga użycia większej liczby i bardziej dokładnych danych materiałowych, uwzględnienia dokładniejszego opisu zjawisk i zastosowania dokładniejszych obliczeń. W procedurze SINTAP przewidzianych jest 7 poziomów analizy. Poziom 0 jest rekomendowany gdy do dyspozycji jest tylko wartość granicy plastyczności (wyraźnej lub umownej) i ewentualnie wyniki próby Charpy'ego.

Na rys.4 pokazana jest krzywa zniszczenia obliczona według wzorów procedury SINTAP dla materiału z wyraźną granicą plastyczności przy poziomie analizy 0 (najmniej dokładny). Stany elementu reprezentowane przez punkty leżące poniżej krzywej albo na samej krzywej zniszczenia odpowiadają stanom stabilnym. W tych stanach wada nie rozwija się, nie powinna być uznana

za niedopuszczalną i nie przedstawia istotnego ryzyka zniszczenia. Stany, którym odpowiadają punkty leżące powyżej krzywej FAD oznaczają, że wada jest niedopuszczalna i przy tym obciążeniu może spowodować zniszczenie elementu.



Rys.4. Krzywa zniszczenia FAD obliczona według procedury SINTAP przy poziomie analizy 0 dla stali z wyraźną granicą plastyczności. Dla typowych stali spoin niskostopowych położenie krzywej odcięcia jest bliskie wartości 1,15, a dla stali austenitycznej bliskie 1,8.

Wzór wykorzystany do obliczenia pokazanej na Rys.4 krzywej zniszczenia $f(L_r)$ dla materiału z wyraźną granicą plastyczności przy analizie na poziomach od 0 do 3 ma postać:

$$(11) \quad f(L_r) = 1 + 0,5L_r^{2,5}$$

Natomiast dla materiału nie wykazującego wyraźnej granicy plastyczności wykorzystuje się zależności:

$$(12) \quad f(L_r) = 1 + 0,5L_r^{2,5} \left[0,3 + 0,7 \exp(-\mu L_r^6) \right]$$

Graniczną wartość znormalizowanego obciążenia (punkt odcięcia) wylicza się ze wzoru:

$$(13) \quad L_r^{max} = 1 + \left(\frac{150}{R_{02}} \right)^{2,5}$$

R_{02} we wzorze (13) jest umowną granicą plastyczności.

W analizie na wyższych poziomach wymagane są szersze informacje o własnościach materiału, a do wyliczenia krzywej zniszczenia stosuje się bardziej skomplikowane wzory.

Do elementów spawanych, w których granica plastyczności materiału spoiny i materiału spawanego różni się nie więcej niż o 10% (mówimy: współczynnik niedopasowania jest mniejszy większy od 10%), stosuje się drugi poziom analizy. Potrzebna jest tu już znajomość granicy plastyczności i wytrzymałości doraźnej materiału spoiny i materiału spawanego. Jeśli współczynnik niedopasowania jest większy od 10%, do przeprowadzenia analizy potrzebna jest już znajomość przebiegu całych krzywych rozciągania. Bardziej złożone są też obliczenia funkcji $f(L_r)$ i wartości L_r^{max} . Przy opisie zachowania się wady w układzie materiał łączony – materiał

spoiny wykorzystuje się pojęcie *materiału efektywnego*, który zastępuje układ złożony z materiału spawanego i materiału spoiny.

Najwyższy, szósty poziom analizy stosowany jest do oceny odpowiedzialnych elementów ciśnieniowych. Są to analizy bardzo zaawansowane. Mogą one być wykonane tylko przez doświadczony zespół dysponujący pełnymi danymi dotyczącymi materiału ocenianych elementów i wykrytych wad i zweryfikowane oprogramowanie specjalistyczne pozwalające na przeprowadzenie obliczeń. Odpowiednie doświadczenie, szczegółowe oprogramowanie i wiedza są tworzone i w organizacjach przemysłowych, które stać na kosztowne prace rozwojowe i weryfikację wyników rozwiązań teoretycznych i stanowią ich chronioną własność.

Wykres CDF– Uogólniona Siła Działająca na Wierzchołek Szczeliny.

Na osi pionowej wykresów CDF odłożone są wartości siły działającej na wierzchołek szczeliny (całki J lub wierzchołkowego rozwarcia szczeliny δ), a na osi poziomej unormowana wartość obciążenia zewnętrznego elementu $F_r = F / F_Y$. Przy wartości całki J lub odpowiednio δ odpowiadającej odporności materiału na pęknięcie prowadzi się linię poziomą do przecięcia z krzywą przedstawiającą zależność $J(L_r)$ lub odpowiednio $\delta(L_r)$.

W procedurach SINTAP wykorzystywane są przybliżone wzory na J i δ w postaci:

Całka Rice'a:

$$(14) \quad J = \frac{J_e}{f(L_r)},$$

Gdzie J_e jest sprężystą składową całki Rice'a:

$$(15) \quad J_e = \frac{K_I^2}{E'}$$

We wzorze (15) E jest modułem Younga, $E' = E$ dla płaskiego stanu naprężeń, ν jest współczynnikiem Poissona, $E' = E / (1 - \nu^2)$, a funkcja $f(L_r)$ – jest krzywą FAD. Wzór na krzywą FAD dla materiału z wyraźną granicą plastyczności przytaczany był wyżej (), a zestaw wzorów dla poszczególnych przypadków podany jest w opisie procedury SINTAP.

Wierzchołkowe Rozwarcie Szczeliny (CTOD):

Przybliżone wzory na CTOD mają postać:

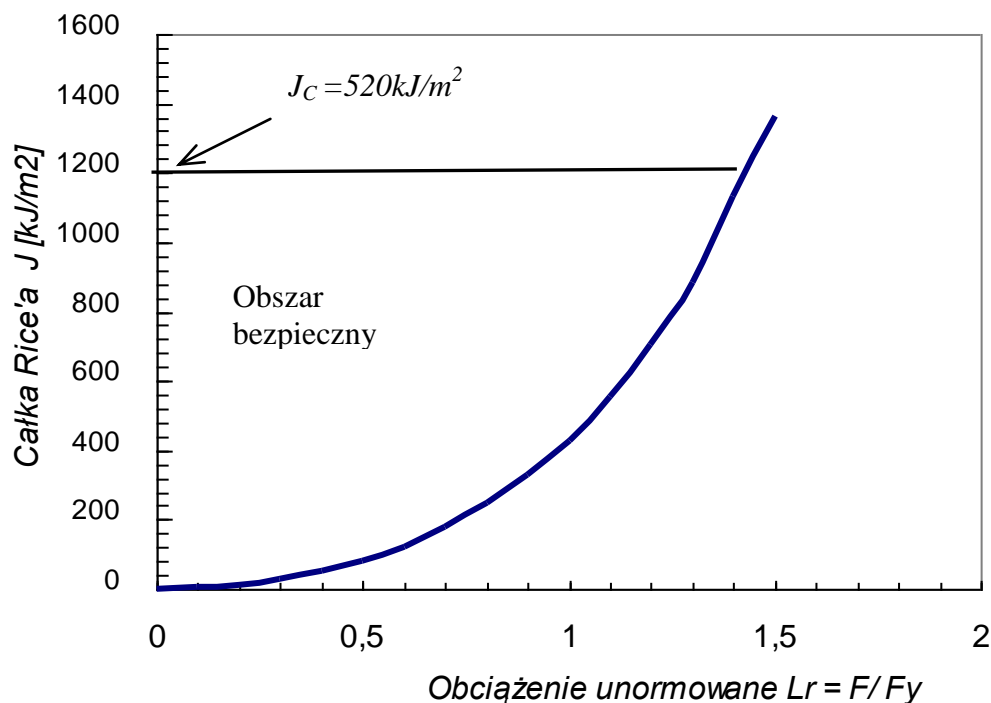
$$(16) \quad \delta = \frac{\delta_e}{f(L_r)}$$

Gdzie δ_e jest sprężystą składową wierzchołkowego rozwarcia szczeliny:

$$(17) \quad \delta_e = \frac{K_I^2}{E' R_e}$$

R_e jest granicą plastyczności (wyraźną lub umowną), a $f(L_r)$ funkcją FAD określoną w opisie podejścia FAD (na przykład wzory 11 lub 12)

Jeśli na wykresach CDF wartości J lub δ będą znormalizowane, to wtedy kształt krzywej jest niezależny od geometrii ocenianego elementu. Wynik oceny integralności konstrukcji jest taki sam niezależnie od tego czy analiza będzie przeprowadzona za pomocą wykresu zniszczenia FAD czy CDF.



Rys.5. Przykład wykresu CDF

4. Modele wad. Pęknięcia zastępcze

Ogromna różnorodność i skomplikowany kształt zarówno płaskich wad wewnętrznych jak rozwarstwienia, przyklejenia czy pęknięcia, jak i wad objętościowych jak pęcherze, żuźle czy wtrącenia metaliczne powoduje konieczność przyjmowania do obliczeń geometrycznie prostszych kształtów. Wszystkie obliczenia związane z oceną zagrożenia jakie stanowią wady dla zdolności konstrukcji do bezpiecznej eksploatacji prowadzi się wykorzystując płaskie modele rzeczywistych wad wykrytych w materiale. Są to płaskie szczeliny, stanowiące dobre przybliżenia rzeczywistych płaskich pęknięć. Ze względów rachunkowych dla modeli wybiera się proste kształty (jak koło, elipsa, prostokąt, pół koła – dla pęknięć powierzchniowych, ... itd), dla których łatwiej otrzymać matematyczne opisy zachowania się w czasie obciążeń eksploatacyjnych. Rozważane są więc wyidealizowane wady umowne, nazywane także wadami zastępczymi, które powinny być równoważne pod względem skutków zachowania się w stosunku do wad rzeczywistych. Oczywiście natychmiast powstaje problem różnicy zagrożenia ze strony wady objętościowej jak pęcherz gazowy czy żuźel i szkodliwości wady płaskiej jak pęknięcie czy przyklejenie. Dla uzyskania równoważności szkodliwości różnym rodzajom wad objętościowych przypisuje się niższe współczynniki szkodliwości, a ich wartość ustala się także na podstawie wyników doświadczeń. Modelowa umowna wada równoważna zawiera w swym konturze wadę rzeczywistą.

Wymiary wad zastępczych wykorzystuje się w obliczeniach wartości współczynnika intensywności naprężeń i granicznych obciążeń ocenianych elementów. Sytuacja jest więc podobna do występującej przy ocenie rozmiaru wady na podstawie amplitudy echa w badaniach ultradźwiękowych. Wykrytej wadzie przypisuje się *równoważną wadę idealną* o takiej średnicy, by ustawiona w miejscu wady wykrytej prostopadle do osi wiązki padających fal powodowała powstanie echa o takiej samej amplitudzie jak oceniana wada naturalna.

Zasady łączenia wad opisane są w licznych normach i przepisach. Istnieje wiele uzgodnionych przepisów, norm czy zaleceń dotyczących metody oceny wad z uwzględnieniem wymagania, by konstrukcja dobrze spełniała przewidziane zadania. Istnieje wiele uzgodnionych procedur oceny wad w elementach instalacji petrochemicznych, energetyki cieplnej, energetyki jądrowej, itd. Jednakże zasady określone w poszczególnych dokumentach różnią się. Jednak w każdej procedurze występuje modelowanie wad, obliczenia rozwoju pęknięć, przewidywania naprężeń powodujących zniszczenie i ocena dopuszczalności wad w badanych elementach z uwzględnieniem ich przeznaczenia. Bierze się pod uwagę możliwość wzajemnego oddziaływania pól naprężeń i odkształceń wad (szczególnie wad leżących w jednej płaszczyźnie przekroju elementu), własności materiału i związany z tym przewidywany sposób zniszczenia w warunkach pracy ocenianego elementu. Inne są zasady ustalania wymiarów pęknięcia zastępczego gdy przeważa pęknięcie kruche ($K_r/L_r > 1,1$), gdy dominującym jest pęknięcie ciągliwe ($K_r/L_r < 0,4$) i w przypadku pośrednim $0,4 < K_r/L_r < 1,1$.

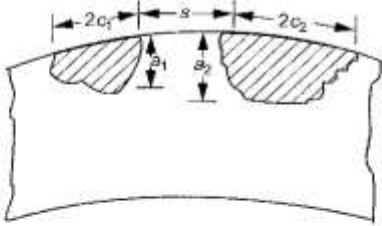
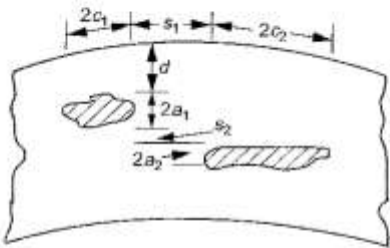
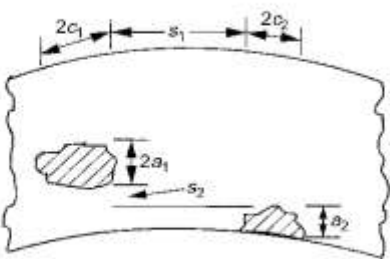
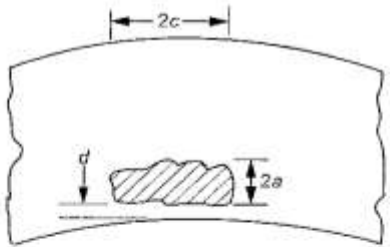
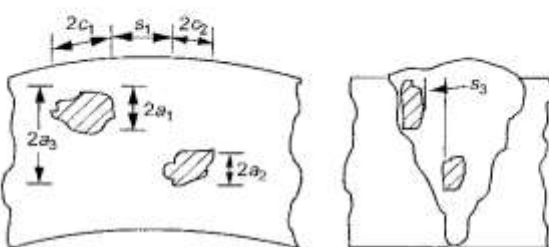
Przykłady ustalania wymiarów pęknięć zastępczych według normy API 1104, wydanie dziewiętnaste, wrzesień 1999 pokazuje rys. 6.

5. Rozwój pęknięcia zmęczeniowego

Zmęczenie jest procesem prowadzącym do zniszczenia przez stabilny rozwój pęknięcia pod wpływem powtarzającego się obciążenia aż do momentu gdy pęknięcie osiągnie krytyczny rozmiar i nastąpi gwałtowne pęknięcie kruche albo pęknięcie plastyczne pozostałego przekroju elementu. Jeśli ocenimy, że przy istniejącym pęknięciu element może jeszcze pracować bezpiecznie, to trzeba określić jak szybko będzie rozwijać się pęknięcie i po jakim czasie osiągnie krytyczny rozmiar. W każdym cyklu obciążenia dN następuje przyrost długości pęknięcia o skończona wartość da . Przyrost długości pęknięcia da w cyklu obciążenia jest tym większy im większa jest w tym cyklu zmiana współczynnika intensywności naprężenia ΔK_I i zależy też od rodzaju materiału. Opisuje to równanie:

$$(18) \quad \frac{da}{dN} = A \Delta K_I^m$$

Gdzie: $\Delta K_I = \Delta \sigma (\pi a)^{1/2}$, zaś A i m są stałymi zależnymi od rodzaju materiału. Wartości tych stałych dla wielu stali i stopów aluminium o różnych własnościach plastycznych są jednak podobne, tak, że przyjmuje się, że procesy zmęczeniowe są niezależne od mikrostruktury. Doświadczenie wskazuje też, że w stalach gdy wartość współczynnika K_I pozostaje poniżej pewnego progu, to pęknięcie nie rozwija się. Równanie (18) stanowi podstawę do obliczania ilości cykli obciążenia N , w czasie których pęknięcie rozwinię się od długości początkowej do rozmiaru krytycznego, przy którym wystąpi zniszczenie. Krytyczny rozmiar pęknięcia można określić korzystając z wykresu zniszczenia FAD. Szczegółowe opisy rozwoju pęknięć i oceny pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji elementu zawierającego pęknięcie zmęczeniowe znajdują się w cytowanych opisach procedur i podręcznikach mechaniki pęknięcia.

| Polozenie i oznaczenie wymiarów wad | Warunek istnienia oddziaływania wad | Skuteczne wymiary wady zastępczej |
|--|---|--|
| <p>1</p>  | $s < c_1 + c_2$ | $a_e = a_2$ $2c_e = 2c_1 + s + 2c_2$ |
| <p>2</p>  | $s_1 < c_1 + c_2$ and $s_2 < a_1 + a_2$ | $2a_e = 2a_1 + s_2 + 2a_2$ $2c_e = 2c_1 + s_1 + 2c_2$ |
| <p>3</p>  | $s_1 < c_1 + c_2$ and $s_2 < a_1 + a_2/2$ | $a_e = 2a_1 + s_2 + a_2$ $2c_e = 2c_1 + s_1 + 2c_2$ |
| <p>4</p>  | $d < a$ | $a_e = d + 2a$ $2c_e = 2c$ |
| <p>5</p>  | $s_1 < c_1 + c_2$ and $s_3 < a_1 + a_2$ | $2a_e = 2a_3$ $2c_e = 2c_1 + s_1 + 2c_2$ |

Rys.6. Warunki istnienia oddziaływania wad, zasady łączenia i wymiary wad zastępczych według normy API 1104 - 1999.

6. Przykłady oceny zagrożenia spowodowanego przez pęknięcia

Korzystając z wykresów FAD i CDF pokazanych na rysunkach 4 i 5 ocenimy zagrożenie jakie powoduje wada wykryta w ściance cylindrycznego naczynia ciśnieniowego podczas ultradźwiękowych badań głowicą skośną wiązką skierowaną w kierunku obwodowym. Wadą jest pęknięcie podłużne o długości $2c$ i głębokości a wychodzące z wewnętrznej powierzchni ścianki. (Rys. 7).

Znane parametry:

Granica plastyczności (wyrażna): $R_{02}=460MPa$

Wytrzymałość doraźna na rozciąganie: $R_m=625MPa$

Moduł sprężystości podłużnej $E = 20600MPa$

Odporność materiału na pękanie: $K_{IC} = 120MPa\cdot m^{1/2}$

Odporność materiału na pękanie: $J_C = 350kJ/m^2$

Naprężenie płynięcia $\sigma_{płynięcia} = \frac{1}{2}(R_{02}+R_M) = \frac{1}{2}(460+625) MPa=545MPa$

Naprężenie działające w kierunku obwodowym przy wewnętrznej ściance naczynia

$\sigma=380MPa$

Współczynnik kształtu pęknięcia (występujący we wzorze na K_I): $f=1,12$

Grubość ścianki: $d = 40mm$

Ocena za pomocą wykresu FAD

1. Przypadek pęknięcia o wymiarach głębokość $a = 8mm$, długość $2c = 15mm$

Należy znaleźć położenie punktu o współrzędnych (K_r, L_r) na wykresie FAD (rys. 4).

Wycinamy myślowo element zawierający pęknięcie o szerokości pęknięcia $2c = 15mm$ (rys.7).

Obciążenie eksploatacyjne elementu: $F=\sigma\cdot 2c\cdot d = 380MPa\cdot 0,015\cdot 0,040m^2$

Powierzchnia przekroju elementu, która przenosi to obciążenie: $2c\cdot d - 2c\cdot a = 0,00048m^2$

Obciążenie graniczne powierzchni przenoszącej obciążenie : $F_Y = \sigma\cdot 2c(d-a)\cdot \sigma_{płynięcia}$

Współrzędna $L_r = F/F_Y = 0,88$

Według wzoru (5) obliczamy wartość współczynnika koncentracji naprężenia przy wierzchołku pęknięcia:

$$K_I = 380MPa\cdot 1,12(3,14\cdot 8mm)^{1/2} = 67,5MPa\cdot m^{1/2}$$

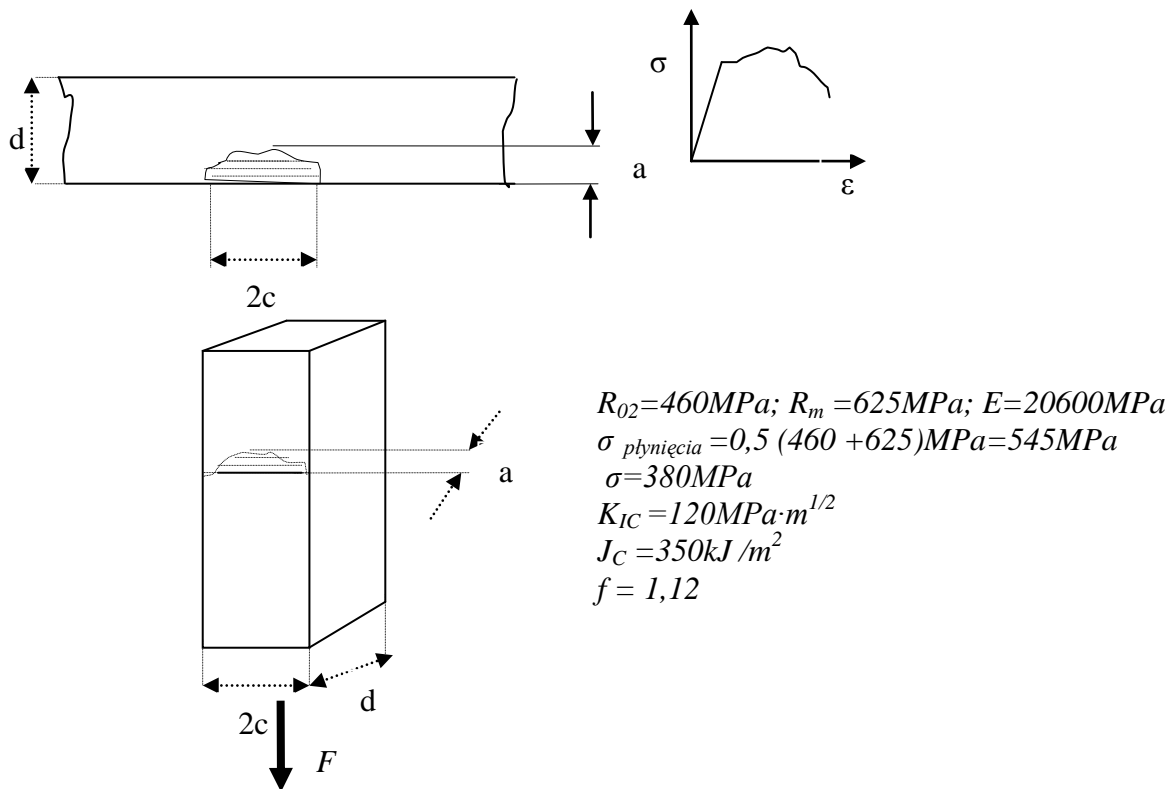
Współrzędna $K_r=K_I/K_{IC} = 67,5/120 = 0,56$

Punkt o współrzędnych $(L_r=0,88, K_r=0,56)$ charakteryzujący stan elementu z pęknięciem o głębokości 8 mm i długości 15 mm na wykresie FAD (Rys. 4) znajduje się w obszarze bezpiecznym.

2. Przypadek pęknięcia o wymiarach: głębokość $a=15\text{mm}$, długość $2c=28\text{mm}$

Postępując tak samo jak w poprzednim przypadku obliczamy współrzędne punktu reprezentującego zagrożenie spowodowane tym pęknięciem: ($L_r = 1,1$; $K_r = 0,77$)

Położenie tego punktu na wykresie FAD wskazuje na zagrożenie pęknięciem plastycznym materiału w przekroju przenoszącym obciążenie



Rys. 7. Ilustracja do przykładów oceny zagrożenia spowodowanego pęknięciem

Ocena za pomocą wykresu CDF

Pęknięcie o głębokości $a=15\text{mm}$ i długości $2c=28\text{mm}$

Współrzędna L_r punktu reprezentująca znormalizowane obciążenie jest taka sama jak w przypadku oceny za pomocą krzywej zniszczenia FAD: $L_r = 1,1$

Dla obliczenia wartości całki J ze wzoru (14) obliczamy najpierw potrzebne wartości współczynnika K_I i krzywej FAD dla $L_r=1,1$ [odpowiednio wzory: (5) i (11)].

$$K_I = 380 \cdot 1,12 (3,14 \cdot 0,015)^{1/2} \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} = 92,5 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$$

$$f(L_r) = f(1,1) = [1 + 0,5 \cdot (1,1)^2]^{-1/2} = 0,79$$

$$\text{Wartość składowej sprężystej całki Rice'a: } J_e = (92,5 \text{MPa})^2 / 20600 \text{MPa} = 415 \text{kJ}/\text{m}^2$$

$$\text{Wartość Całki Rice'a: } J = J_e / [f(L_r)]^2 = 670 \text{kJ}/\text{m}^2$$

Punkt reprezentujący zagrożenie pęknięciem $a=15\text{mm}$ i $2c=28\text{mm}$ leży poza obszarem bezpiecznym wykresu CDF (Rys.5).

Literatura

- [1] Neimitz Andrzej, *Ocena wytrzymałości elementów konstrukcyjnych zawierających pęknięcia (Podstawowe elementy procedur SINTAP)*. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004.
- [2] BS 7448, *Fracture mechanics toughness tests: Part 1 : 1991. Method for determination of K_{IC} , critical CTOD and critical J values of metallic materials*. London ; British Standards Institution, 1991.
- [3] ASME 1820-99, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, American Society of Testing materials, Philadelphia, PA, 1999.
- [4] Burdekin F.M., Dawes M.G., *Practical use of linear elastic and yielding fracture mechanics with particular reference to pressure vessels*. Inst.Mech.Eng.Conf. London , 1971
- [5] Dowling A.R., Townley C.H., *The effects of defects on structural failure: a two criteria approach*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, T.3, 1989, 77-137
- [6] Milne I., Anisworth R.A., Dowling A.R., Steward A.T., *Assessment of the integrity of structures containing defects*. CEGB Report R/H/R6-Revision 3, 1999.

Podręczniki

1. Gołaski L., *Elementy doświadczalnej mechaniki pękania*, Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992.
2. Kocańda S., *Podstawy konstrukcji maszyn*, WNT, Warszawa, 1995
3. Neimitz A., *Mechanika pękania*, PWN, Warszawa 1998.
4. Bochenek A., *Elementy mechaniki pękania*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1998.A.,

Inne publikacje

1. Ainsworth R.A., A.C. Banister, U. Zerbst, *An overview of the European flaw assessment procedure SINTAP and its validation*. International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 77, Issues 14-15, 869-876.
2. British Standard BS 7910: 1999, *Guide on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures*, London BSI
3. British Standard BS 7910: 2005, *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*, London; British Standards Institution, 2005
4. http://www.twi.co.uk/profesional/protected.band_3/kscsw0005.html, *The principles of fracture mechanics-based fitness-for-purpose assessments of structures or components containing flaws*. 2007-12-26.
5. Laham S.A.I., *Stress intensity factors and limit load handbook*, Nuclear Electric Report

EOD/GEN/REP/ 0316, 1998.

6. Kasegawa Kunio, Miyazaki Katsumasa, Alignment and Combination rules on Multiple Flaws in Fitness-for-Service Procedures. *Key Engineering Materials*, Vol. 345/346 (2007); Part I, 411-416.
7. Xue H., Shi Y., CTOD design curve in consideration of material strain hardening, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 75, 1998, 567-573.
8. Kumar V., German M.D., Elastic-plastic analysis of through-wall and surface flaws in *cylinders*, EPRI Report NP-5596, 1988.
9. API Standard 1104, wrzesień 1999, *Welding of Pipelines and Related Facilities*, American Petroleum Institute.
10. Biel-Gołaska M., Golaski L., *Ocena bezpieczeństwa eksploatacji niektórych urządzeń poddopozorowych na podstawie wykresu pęknięcia FAD*. *Dozór Techniczny*, 1, 1998. 10-12
11. Kozakowski S., Elementy mechaniki pęknięcia w badaniach nieniszczących, *Materiały Seminarium „Ultradźwiękowe Badania Materiałów”*, Zakopane 12-14 marca 1997. str. 3.1-3.16.
12. Kowalewski Z., Deputat J., Ocena wad w materiałach na podstawie mechaniki pęknięcia. *Materiały 11 Seminarium ‘Nieniszczące Badania Materiałów’*, Zakopane, 8-11 marca 2005, 63- 90. Patrz także: Kowalewski Z., Deputat J., *Dozór Techniczny*, nr. 5/2005, 6/2005 i 2/2006.