

Procedury R-6 i FITNET – innowacyjne narzędzia oceny nośności i bezpieczeństwa pracy konstrukcji metalowych zawierających defekty

Dr inż. Paweł Kossakowski, Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji Betonowych, Politechnika Świętokrzyska, Kielce

1. Wprowadzenie

Elementy konstrukcyjne w trakcie wieloletniej eksploatacji są narażone na różne uszkodzenia, prowadzące w sytuacjach ekstremalnych do awarii, a nawet katastrof budowlanych. Szczególnie niebezpieczne są pęknięcia lub nieciągłości struktury materiałowej, diagnozowane w konstrukcjach metalowych, które charakteryzują się wysoką wrażliwością na tego typu defekty. Lokalne koncentracje naprężeń, do których dochodzi w otoczeniu wierzchołków pęknięć, inicjują ich rozwój, co może prowadzić do globalnej redukcji nośności danego elementu, a czasami nawet całego ustroju nośnego. W sytuacji stwierdzenia tego typu uszkodzeń, niezbędne jest wykonanie ekspertyzy technicznej obejmującej analizę nośności i bezpieczeństwa pracy konstrukcji.

Zagadnienie nośności elementów zawierających defekty jest przedmiotem prowadzonych badań i publikacji naukowych od wielu lat. Choć literatura obejmująca ten temat jest coraz bogatsza, a problematyka wciąż aktualna, to należy zauważyć, że w naszym kraju nie doczekała się ona opracowań w postaci procedur normowych. W zasadzie, oprócz warunków i wytycznych w zakresie odporności na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową, które podano np. w Eurokodzie 1993-1-10:2007 [1], w pozostałych normach trudno znaleźć precyzyjne informacje umożliwiające prowadzenie analiz bezpieczeństwa elementów konstrukcyjnych zawierających najczęściej diagnozowane uszkodzenia. Informacji takich należy poszukiwać w krajowej literaturze specjalistycznej, np. [2–4]. Szerokie w tym zakresie są doświadczenia innych krajów, gdzie od wielu już lat prowadzono programy badawcze mające na celu opracowanie metod pozwalających na szacowanie nośności uszkodzonych elementów w warunkach eksploatacji. Opracowane i wprowadzone do tej pory do użytku procedury, to: PB6493 [5], BS9710 [6], R5 [7], R6 [8], SINTAP [9],

API [10] oraz FITNET [11, 12]. Z wymienionych metod na uwagę zasługują procedury FITNET, będące aktualnie jednym z najnowszych i najbardziej innowacyjnych narzędzi. Są one owocem szeroko zakrojonego Europejskiego Programu Badawczego Nr GIRT-CT-2001-05071 [13], a swą nazwę zawdzięczają skrótowi od terminu *FITness-for-service NETWORK*. Podstawy teoretyczne oraz wiele przykładów praktycznego zastosowania procedur FITNET podano w publikacji [14].

W opracowanych do tej pory procedurach, zasadniczym elementem było wyważenie wymagań stawianych konstrukcjom zawierającym defekty przy uwzględnieniu aspektów ekonomicznych. Dotyczy to restrykcyjności (konserwatywności) uzyskiwanych rezultatów w kontekście możliwości dopuszczenia danego elementu do dalszej eksploatacji. Jest to związane z defektami, które mogą powstawać w elementach zarówno w trakcie ich wykonywania, jak i późniejszej eksploatacji, a niekiedy obniżają ich nośność w stopniu stanowiącym zagrożenie awarią bądź całkowitym zniszczeniem. Dlatego też w wielu opracowanych procedurach zastosowano analizy wielopoziomowe. Przy większej ilości danych wstępnych, możliwe jest prowadzenie symulacji na wyższych poziomach, dających dokładniejsze, ale i zarazem mniej restrykcyjne wyniki, w porównaniu z poziomami podstawowymi. Istotną jest również możliwość szacowania pozostałego czasu bezpiecznej eksploatacji elementu z defektem, czyli określenie jego trwałości.

Wraz z degradacją wielu konstrukcji budowlanych, naturalną koniecznością jest szacowanie ich nośności i bezpieczeństwa użytkowania, szczególnie w przypadku elementów uszkodzonych, zawierających np. defekty w postaci pęknięć. Zastosowanie w tym zakresie może mieć kilka wymienionych już wcześniej metod, jednak największe możliwości w odniesieniu do elementów konstrukcyjnych mają procedury R-6 i FITNET, które przedstawiono

w artykule. Mając na względzie możliwości praktycznego ich zastosowania, w artykule podano ogólne informacje na temat odporności na pękanie materiału, podstawowego parametru, na którym oparto metody R-6 i FITNET. W dalszej części omówiono założenia oraz metodologię szacowania bezpieczeństwa konstrukcji z defektami w oparciu o kod R-6 i procedury FITNET, korzystając z informacji podanych w [3, 14]. Podano również przykłady mogące mieć zastosowanie w analizach elementów uszkodzonych, które są wykonane ze stali konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie.

2. Odporność na pękanie materiału – podstawowe parametry i kryteria pękania

Podstawowym parametrem determinującym nośność elementów zawierających defekty w postaci pęknięć oraz nieciągłości strukturalnych jest odporność na pękanie materiału określana zgodnie z zasadami i teorią mechaniki pękania, będącej podstawową dziedziną nauki zajmującą się analizą wytrzymałościową elementów z karami pod obciążeniem.

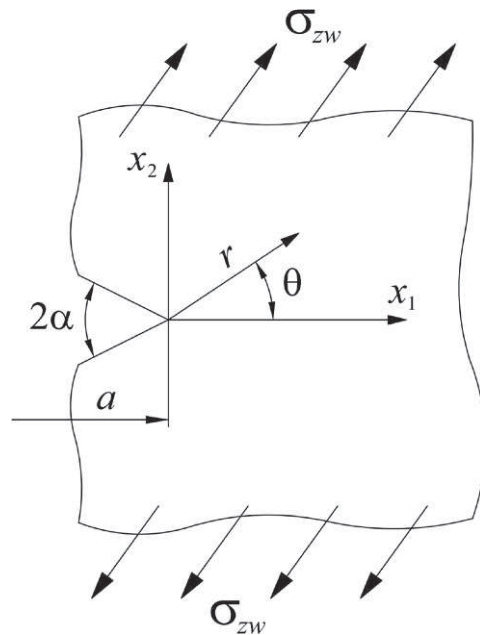
Mechanika pękania przyjmuje istnienie nieciągłości w materiale w postaci szczeliny, która modeluje fizyczne pęknięcie. Wzrost obciążenia powoduje powiększanie się szczeliny, prowadzące do zniszczenia materiału. W zakresie rozwiązań mechaniki pękania podaje się obciążenia graniczne, jakie jest w stanie przenieść element z pęknięciem wykonany z danego materiału lub określany jest maksymalny rozmiar szczeliny, która nie doprowadzi do zniszczenia przy danym poziomie obciążenia.

Odporność na pękanie materiału jest określana dla trzech podstawowych sposobów obciążenia elementu ze szczeliną, a co za tym idzie – trzech sposobów propagacji pęknięcia: rozrywania (otwierania pęknięcia), ścinania wzdłużnego i ścinania poprzecznego (rys. 1). Są one określane mianem czystych sposobów obciążenia i oznaczane symbolem odpowiednio I, II i III.

Parametrami stosowanymi jako bezpośrednie miary odporności na pękanie materiałów są krytyczne wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{ac} , współczynnika uwalniania energii G_{ac} , całki J_{ac} oraz krytyczne rozwarcie wierzchołkowe szczeliny δ_{Tac} , gdzie indeks α oznacza sposób obciążenia elementu ze szczeliną ($\alpha = I, II, III$). W dalszej części artykułu zdefiniowano

i omówiono parametry odporności na pękanie materiału oraz kryteria pękania, które są stosowane w procedurach R-6 i FITNET.

W odniesieniu do materiałów metalowych, podstawowym parametrem stosowanym w analizie zjawiska pękania jest współczynnik intensywności naprężeń K_{ac} , określane często skrótem WIN. Współczynnik ten jest definiowany jako miara pola naprężeń i przemieszczeń w otoczeniu wierzchołka szczeliny lub karbu, pokazanych schematycznie na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat karbu. Dla wartości kąta $\alpha = 0^\circ$ otrzymujemy szczelinę (na podstawie [3])

Naprężenia σ_{ij} w otoczeniu wierzchołka szczeliny w najogólniejszej postaci wyrażają się zależnością [3]:

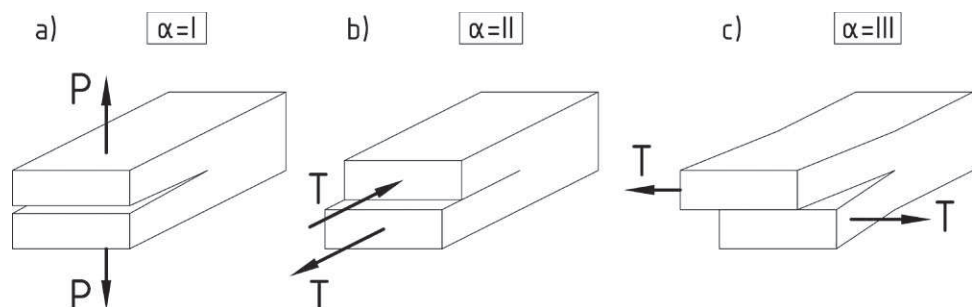
$$\sigma_{ij} = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(1)\alpha}(\theta) + \sum_{n=2}^{\infty} C_\alpha^{(n)} r^{(n-2)/2} f_{ij}^{(n)\alpha}(\theta),$$

(1)

$\alpha = I, II, III$

gdzie: $f_{ij}^{(n)\alpha}$ – uniwersalna funkcja kąta θ (niezależna od obciążenia zewnętrznego i geometrii próbki), r – odległość od wierzchołka szczeliny, K_α – współczynnik intensywności naprężeń, $C_\alpha^{(n)}$ – współczynnik zależny od geometrii próbki i obciążenia zewnętrznego,

Rys. 1.
Podstawowe sposoby obciążenia elementu ze szczeliną: I – rozrywanie, II – ścinanie wzdłużne, III – ścinanie poprzeczne



i, j – indeksy o wartościach 1, 2 lub 3 wskazujące na odpowiednią składową wielkości tensorowej lub wektorowej w układzie współrzędnych $\{x_i\}$, α – indeks oznaczający sposób obciążenia elementu ze szczeliną. Wyrażenie (1) jest najczęściej stosowane w mechanice pęknięcia w postaci uwzględniającej jedynie pierwszy jego człon [3]:

$$\sigma_{ij} = \frac{K_\alpha}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}^{(\alpha)}(\theta) + \dots + O(r^0),$$

$$\alpha = I, II, III \quad (2)$$

Współczynnik intensywności naprężeń K_α występujący w wyrażeniach (1) i (2) jest jedyną wielkością, która odróżnia od siebie elementy zawierające szczelinę. Współczynnik K_α zależy od wielkości obciążenia zewnętrznego σ_{zw} , długości szczeliny a oraz geometrii elementu, która jest uwzględniona przez współczynnik Y , zgodnie z ogólną zależnością:

$$K_\alpha = f(\sigma_{zw}, a, Y), \quad \alpha = I, II, III \quad (3)$$

We wzorach od (1) do (3) współczynniki K_α odpowiadają podstawowym schematom obciążenia i oznaczane są jako K_I, K_{II} i K_{III} (por. rys. 1).

Proces pęknięcia materiału jest inicjowany, jeśli współczynnik K_α osiągnie pewną charakterystyczną dla danego materiału wartość krytyczną $K_{\alpha c}$, a warunek pęknięcia opisany jest jako:

$$K_\alpha(\sigma_{zw}, a, Y) = K_{\alpha c}, \quad \alpha = I, II, III \quad (4)$$

Kryterium (4), oparte na współczynniku intensywności naprężeń, opisującym rozkład i wartości naprężeń w otoczeniu wierzchołka szczeliny, określane jest mianem lokalnego lub siłowego.

Kolejnym z przedstawianych parametrów określających odporność na pęknięcie materiałów jest tzw. całka J . Znajduje ona zastosowanie w zagadnieniach nieliniowej mechaniki pęknięcia i jest definiowana następująco [2]:

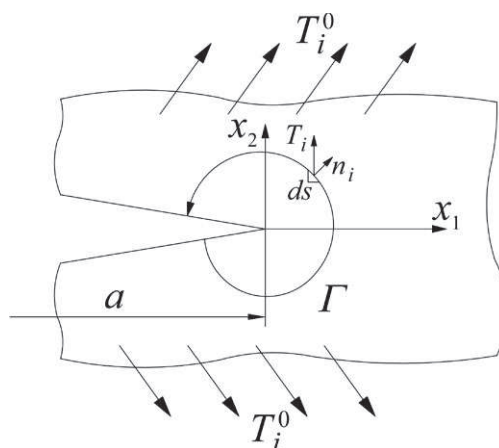
$$J = \int_\Gamma \left(W dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds \right) \quad (5)$$

gdzie: Γ – kontur obejmujący wierzchołek szczeliny, W – gęstość energii sprężystej, określana jako

$$W = \int_0^{\epsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\epsilon_{ij}$$

T_i – wektor naprężenia działający na kontur Γ ($T_i = \sigma_{ij} n_j$), u_i – wektor przemieszczenia, n_j – wektor jednostkowy normalny do konturu Γ , ds – element konturu Γ (rys. 3).

Kryterium pęknięcia wyrażone przez całkę J , które jest stosowane w nieliniowej mechanice pęknięcia, jest następujące:



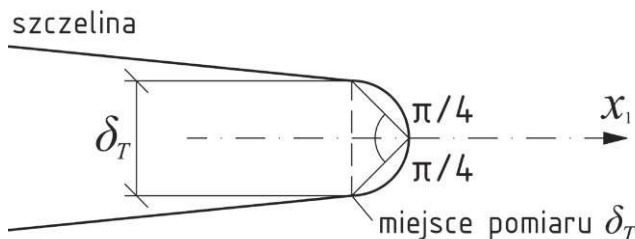
Rys. 3. Schemat szczeliny wraz z konturem całkowania Γ (na podstawie [3])

$$J_\alpha(\sigma_{zw}, a, Y) = J_{\alpha c}, \quad \alpha = I, II, III \quad (6)$$

Jak wynika z warunku (6), do inicjacji procesu pęknięcia dochodzi w momencie, gdy całka J_a osiągnie wartość krytyczną J_{ac} .

Omówione krytyczne wartości współczynnika intensywności naprężeń $K_{\alpha c}$ i całki J_{ac} przy spełnieniu pewnych wymagań mogą być traktowane jako stałe materiałowe, a tym samym można je utożsamiać z wielkościami charakteryzującymi odporność na pęknięcie materiału.

Kolejnym parametrem stosowanym w zagadnieniach odporności na pęknięcie materiałów jest rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia, oznaczane symbolem δ_{Ta} (rys. 4). Kryterium pęknięcia materiałów ciągliwych wykorzystujące ten parametr jest podawane w postaci:



Rys. 4. Określenie miejsca pomiaru rozwarcia wierzchołkowego pęknięcia δ_{Ta} (na podstawie [3])

$$\delta_{T\alpha}(\sigma_{zw}, a, Y) = \delta_{T\alpha c}, \quad \alpha = I, II, III \quad (7)$$

Do inicjacji pęknięcia dochodzi w sytuacji, gdy zmierzone rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia δ_{Ta} osiąga wartość krytyczną $\delta_{T\alpha c}$.

Ostatnim z przedstawianych kryteriów pęknięcia jest kryterium obciążenia granicznego. Określa ono maksymalną wartość obciążenia, czyli obciążenie graniczne P_0 , jakie jest w stanie przenieść element z pęknięciem. Kryterium to określone jest zależnością:

$$P = P_0 \quad (8)$$

Do inicjacji pęknięcia dochodzi w sytuacji, gdy obciążenie P działające na element osiągnie wartość graniczną P_0 .

Podsumowując przedstawione informacje dotyczące podstawowych parametrów odporności na pęknięcie oraz stosowanych kryteriów pęknięcia należy zauważyć, że mechanika pęknięcia jest dyscypliną relatywnie młodą, ale w wielu obszarach bardzo dobrze rozwiniętą. Opracowane do tej pory kryteria i metody szacowania odporności na pęknięcie mają mocne podstawy teoretyczne i doświadczalne. W pewnych jednak przypadkach należy zaznaczyć, że prowadzone analizy mogą być wrażliwe na wiele czynników i parametrów, które w sytuacjach pośrednich mogą być stosowane z pewną dowolnością. Dotyczy to np. problemów ze stosowaniem kryteriów liniowej i nieliniowej mechaniki pęknięcia. Zasadniczym elementem w tym zakresie jest ocena wielkości i kształtu strefy plastycznej na podstawie wielu akceptowalnych metod. Również wybór parametrów analizy nie jest ściśle określony i inne wyniki będą uzyskane w przypadku przyjęcia wielkości średnich, a inne na podstawie wartości minimalnych. Szereg problemów można napotkać niestety również w trakcie analiz pęknięcia elementów wykonanych ze stali konstrukcyjnych stosowanych w budownictwie. Dotyczy to głównie sytuacji pełnego uplastycznienia, kiedy to problemem jest prawidłowe wyznaczenie odporności na pęknięcie z uwagi na trudność z pomiarem krytycznej wartości całki J_{ac} . Dlatego też w trakcie prowadzonych analiz należy brać pod uwagę wszystkie omówione aspekty i problemy, a uzyskane wyniki poddawać weryfikacji i dyskusji.

3. Metoda krzywych R-6

Metoda krzywych R-6 stanowi obecnie jedno z najbardziej zaawansowanych narzędzi opracowanych do analiz elementów konstrukcyjnych zawierających defekty. Została ona opracowana jako rozwinięcie procedur zawartych w normie PD6493 [5]. Obecnie metoda krzywych R-6 jest komercyjnym programem, w którym zawarto wiele procedur obliczeniowych i pomiarowych wraz z biblioteką współczynników intensywności naprężeń i obciążeń granicznych dla wielu różnych elementów z pęknięciami.

Analiza bezpieczeństwa pracy uszkodzonego elementu w metodzie R-6 została oparta o tzw. diagram zniszczenia FAD, będącym skrótem od anglojęzycznego terminu *Failure Assessment Diagram*. Jest to podstawowy wykres umożliwiający stwierdzenie, czy dany element pracuje bezpiecznie, istnieje prawdopodobieństwo jego zniszczenia lub czy ryzyko zniszczenia jest wysokie. Diagram zniszczenia FAD jest sporządzany w oparciu o dwa podstawowe kryteria pęknięcia: kryterium współczynnika intensywności naprężeń i obciążenia granicznego. W konsekwencji wykres ten jest budowany

na podstawie dwóch wielkości związanych z tymi kryteriami, oznaczanymi odpowiednio jako K_r i S_r . W metodzie R-6 oba kryteria pęknięcia są ze sobą sprzężone przez wyznaczenie pewnej krzywej (funkcji) granicznej, która określa obszar bezpiecznej pracy analizowanego elementu, zgodnie z ogólną zależnością:

$$K_r = f(S_r) \quad (9)$$

gdzie: K_r – funkcja krzywej granicznej, S_r – wielkość określająca kryterium obciążenia granicznego.

Sprawdzenie bezpieczeństwa elementu z defektem polega na przyjęciu dla danego przypadku krzywej granicznej K_r i określeniu współrzędnych punktu (S_r, K_r) znajdującego się na ścieżce obciążenia. Jeśli punkt znajduje się wewnątrz obszaru ograniczonego krzywą graniczną K_r , element będzie pracował bezpiecznie, natomiast jeśli znajduje się on poza tym obszarem, to należy się spodziewać, że prawdopodobieństwo zniszczenia elementu jest wysokie. Zasadę prowadzenia analizy wytrzymałościowej elementu z defektem na podstawie metody R-6 scharakteryzowano w dalszej części artykułu.

W metodzie krzywych R-6 zastosowano podejście umożliwiające prowadzenie obliczeń na jednym z trzech poziomów, w zależności od posiadanych danych wejściowych oraz zakładanego konserwatywności i dokładności wyników. Poziom pierwszy jest najprostszymi i najmniej wymagający, jeśli chodzi o ilość informacji na temat parametrów mechanicznych materiału. Co za tym idzie, uzyskane wyniki są najbardziej konserwatywne, ale i najmniej precyzyjne. Dokładność, stopień skomplikowania analizy i wymagania co do niezbędnych danych materiałowych wzrastają na kolejnych poziomach, dzięki czemu kryteria zniszczenia są mniej restrykcyjne w porównaniu do poziomu pierwszego. W dalszej części przedstawiono poszczególne poziomy analizy stosowane w metodzie krzywych R-6.

Poziom pierwszy analizy R-6 oparty jest na opisanym już wcześniej diagramie zniszczenia FAD. Poziom ten stosowany jest w przypadku materiałów, które nie wykazują silnego początkowego umocnienia. Poziom ten jest również stosowany w sytuacji, gdy brak jest szczegółowych danych na temat pełnej krzywej naprężenie-odkształcenie, a znana jest tylko granica plastyczności σ_y i doraźna wytrzymałość na rozciąganie σ_m . Jeśli materiał charakteryzuje się nieciągłością na poziomie granicy plastyczności, analizę prowadzi się w jedynie w zakresie do osiągnięcia obciążenia granicznego. Jest to poziom najprostszymi, bo wymaga jedynie podstawowej wiedzy na temat parametrów wytrzymałościowych materiału. W konsekwencji, poziom pierwszy charakteryzuje się dużym konserwatywnością, który zapewnia wysoki stopień bezpieczeństwa. Sugeruje się, aby analizy zaczynać właśnie od tego poziomu, gdyż w przypadku stwierdzenia, że element pracuje bezpiecznie, automatycznie nie ma konieczności prowadzenia bardziej skomplikowanych analiz na poziomach wyższych.

Poniżej podano szczegółowe informacje na temat analizy elementu z defektem wg pierwszego poziomu metody R-6 w odniesieniu do stali miękkiej, z uwagi na możliwości praktycznej aplikacji tej procedury w odniesieniu do stali stosowanych w budownictwie. Podane zależności oraz funkcje szczegółowe przedstawiono wykorzystując informacje zawarte w [3].

Jak już wspomniano, metoda krzywych R-6 opiera się na pewnej funkcji – krzywej granicznej zniszczenia oznaczanej symbolem K_r , która jest funkcją parametru S_r . Uogólniając, wielkość S_r jest funkcją parametru L_r określającego stosunek obciążenia zewnętrznego do obciążenia granicznego zgodnie ze wzorem:

$$L_r = \frac{P}{P_0} \quad (10)$$

gdzie: P – obciążenie zewnętrzne przyłożone do elementu, P_0 – obciążenie graniczne elementu osłabione go defektem (pęknięciem) w stanie plastycznym.

Wielkość S_r jest funkcją parametru L_r , granicy plastyczności σ_y i doraźnej wytrzymałości na rozciąganie materiału σ_m według następującej zależności:

$$S_r = \frac{2L_r\sigma_y}{\sigma_y + \sigma_m} \quad (11)$$

gdzie: σ_y – granica plastyczności, σ_m – doraźna wytrzymałość na rozciąganie.

Wielkość K_r jest wzajemną relacją pomiędzy współczynnikiem intensywności naprężeń i odpornością na pękanie materiału w postaci:

$$K_r = \frac{K_1}{K_{ef}} \quad (12)$$

gdzie: K_1 – współczynnik intensywności naprężeń, K_{ef} – efektywny współczynnik intensywności naprężeń określający odporność na pękanie materiału.

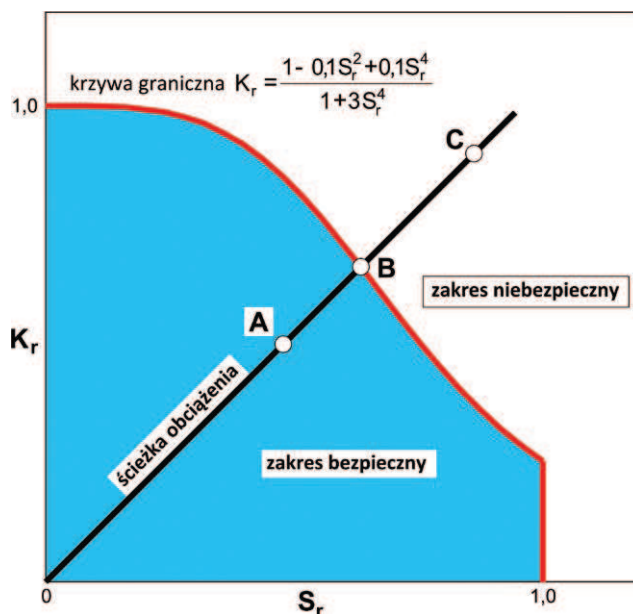
Krzywa graniczna K_r dla stali miękkiej określona jest zależnością:

$$K_r = \frac{1 - 0,1S_r^2 + 0,1S_r^4}{1 + 3S_r^4} \quad \text{dla } S_r < 1$$

$$K_r = 0 \quad \text{dla } S_r \geq 1 \quad (13)$$

W oparciu o zdefiniowane funkcje parametrów K_r i S_r oraz krzywą graniczną K_r można sporządzić diagram zniszczenia FAD, na którym wykreśla się ścieżkę obciążenia. Przykładowy diagram zniszczenia dla stali miękkiej pokazano na rysunku 5.

Bezpieczeństwo elementu z defektem szacowane jest na podstawie analizy położenia punktu znajdującego się na ścieżce obciążenia w odniesieniu do obszaru ograniczonego krzywą graniczną K_r (rys. 5). Element nie



Rys. 5. Diagram zniszczenia FAD dla stali miękkiej wg pierwszego poziomu analizy R-6 (na podstawie [3])

jest zagrożony zniszczeniem w sytuacji, gdy analizowany punkt znajduje się wewnątrz obszaru bezpiecznego, czyli pod krzywą graniczną, co odpowiada punktowi oznaczonemu na rysunku 5 jako A. Jeśli punkt znajduje się na krzywej granicznej (punkt B), sytuacja jest krytyczna i prawdopodobne jest, że może dojść do zniszczenia elementu. Najwyższe prawdopodobieństwo zniszczenia elementu jest w sytuacji, gdy analizowany punkt znajduje się poza obszarem bezpiecznym, czyli poza krzywą graniczną K_r (punkt C).

W przypadku drugiego poziomu analizy, niezbędna jest znajomość większej liczby parametrów wytrzymałościowych, w stosunku do poziomu pierwszego, a mianowicie pełnej krzywej „rzeczywiste” naprężenie – „rzeczywiste” odkształcenie oraz granicy plastyczności σ_y i doraźnej wytrzymałości na rozciąganie σ_m . Poziom ten stosowany jest w odniesieniu do materiałów silnie umacniających się. Zastosowanie poziomu drugiego w analizie bezpieczeństwa elementu z defektem pozwala na uwzględnienie zakresu powyżej obciążenia granicznego, co może być niezbędne w pewnych sytuacjach, gdy z analizy na poziomie pierwszym wynika, że punkt na diagramie zniszczenia leży w obszarze niebezpiecznym, ale blisko krzywej granicznej dla niskich poziomów wartości współrzędnych K_r . Trzeci poziom analizy pozwala na uzyskanie najdokładniejszych wyników spośród omawianych poziomów oraz charakteryzuje się niższym konserwatyzmem. Konieczna jest niestety znajomość większej ilości parametrów wytrzymałościowych, w tym przede wszystkim całki J oraz pełnej krzywej naprężenie-odkształcenie dla analizowanego materiału. Poziom trzeci jest zalecany w sytuacji występowania obciążenia złożonego, będącego superpozycją podstawowych schematów obciążeń pokazanych na rysunku 1.

4. Procedury FITNET

Najnowszą z opracowanych metod analiz bezpieczeństwa elementów konstrukcyjnych z defektami są procedury FITNET, które w istocie stanowią rozwinięcie i udoskonalenie procedur opracowanych do tej pory. Procedury FITNET są szeroko stosowane przez producentów i projektantów we wszystkich fazach „życia” produktu czy elementu konstrukcyjnego, od etapu projektowania, produkcji aż po jego eksploatację. W odniesieniu do konstrukcji budowlanych, szczególnie interesujące jest zastosowanie ich w trakcie eksploatacji elementów, które uległy uszkodzeniu i zachodzi poważna obawa zagrożenia awarią czy katastrofą budowlaną. Zakres stosowania procedur FITNET jest bardzo szeroki i obejmuje elementy obciążone w sposób statyczny, dynamiczny, zmęczeniowy, jak również cieplny.

W przypadku elementów obciążonych monotonicznie procedury FITNET pozwalają na prowadzenie analiz opartych na dwóch podejściach:

- diagramach zniszczenia FAD (*Failure Assessment Diagram*),
- wykresach uogólnionej siły powodującej wzrost pęknięcia CDF (*Crack Driving Force*).

Analogicznie do metody krzywych R-6, również w procedurach FITNET zastosowano kilka poziomów analizy, które scharakteryzowano w dalszej części artykułu. Analiza prowadzona na najniższym poziomie wymaga jedynie podstawowych danych materiałowych, a wynik jest najmniej dokładny, ale też najbardziej rygorystyczny. Przy wyższych poziomach, analizy są coraz bardziej skomplikowane i wymagają większej ilości informacji na temat charakterystyk materiałowych, dzięki czemu uzyskane wyniki są o wiele dokładniejsze, a kryteria zniszczenia mniej konserwatywne.

W metodzie FITNET dokonywana jest analiza wrażliwości uzyskanych wyników pod kątem zmian wielkości danych wejściowych. W tym celu wykorzystuje się współczynniki zapasu, definiowane na podstawie dowolnego parametru analizy, jako iloraz wartości krytycznej do bieżącej.

W dalszej części scharakteryzowano podejścia stosowane w procedurach FITNET, a mianowicie diagramy zniszczenia FAD i wykresy uogólnionej siły powodującej wzrost pęknięcia CDF, stosowane w analizach elementów z pęknięciami obciążonych w sposób monotoniczny, opierając się na informacjach przedstawionych w [14].

4.1. Podejście FAD

Analiza FITNET bazująca na diagramie zniszczenia FAD jest analogiczna jak w przypadku metody krzywych R-6. Diagram ten opiera się na dwóch podstawowych wielkościach K_r i L_r , które łączą w sobie kryteria współczynnika intensywności naprężeń i nośności granicznej w postaci różnych zależności funkcyjnych, oraz krzywej granicznej K_r .

Wielkość L_r jest definiowana jako stosunek obciążenia zewnętrznego, które jest przyłożone do elementu z pęknięciem, do obciążenia granicznego lub naprężenia do naprężenia powodującego plastyczne płygnięcie materiału, zgodnie z zależnościami:

$$L_r = \frac{P}{P_0} \quad \text{lub} \quad L_r = \frac{\sigma}{\sigma_y} \quad (14)$$

gdzie: P – obciążenie zewnętrzne przyłożone do elementu, P_0 – obciążenie graniczne elementu osłabionego defektem (pęknięciem) w stanie plastycznym, σ – naprężenie zewnętrzne, σ_y – naprężenie powodujące płygnięcie plastyczne pękniętego elementu, najczęściej utożsamiane z granicą plastyczności.

Z kolei wielkość K_r określa stosunek współczynnika intensywności naprężeń do odporności na pęknięcie materiału, określanej w metodzie FITNET jako K_{mat} :

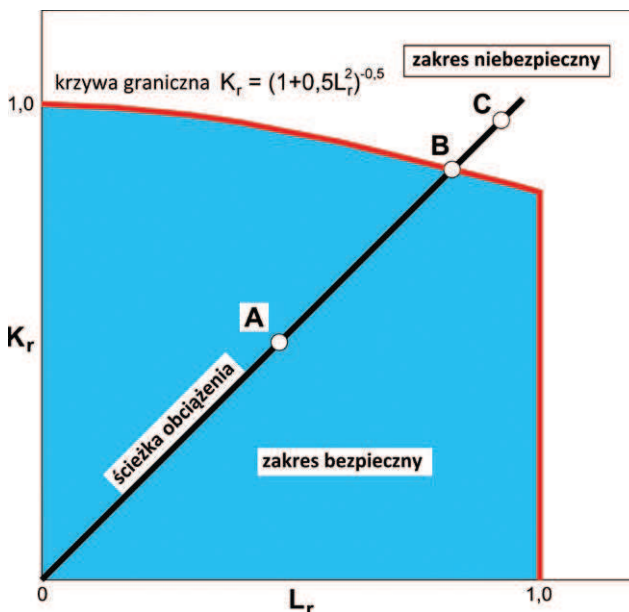
$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (15)$$

gdzie: K_I – współczynnik intensywności naprężeń, K_{mat} – współczynnik określający odporność na pęknięcie materiału.

Przykładowo, krzywa graniczna K_r dla stali z wyraźną granicą plastyczności (np. stale miękkie) dla zerowego poziomu analizy określona jest zależnością:

$$K_r = (1 + 0,5L_r^2)^{-0,5} \quad (16)$$

Zasada budowy diagramu zniszczenia FAD wg procedur FITNET jest analogiczna jak w metodzie krzywych R-6. Przyjmując określone funkcje wielkości K_r i L_r , na wykresie nanosi się ścieżkę obciążenia analizowanego ele-



Rys. 6. Diagram zniszczenia FAD dla stali z wyraźną granicą plastyczności wg zerowego poziomu analizy FITNET (na podstawie [14])

mentu oraz odpowiednią dla danego poziomu analizy i materiału krzywą graniczną K_r . Tym samym diagram zniszczenia FAD wg procedur FITNET przyjmuje postać pokazaną na rysunku 6, gdzie schematycznie zaprezentowano przypadek analizy odnoszącej się do stali miękkiej wg poziomu zerowego.

Szacowanie bezpieczeństwa pracy elementu i ryzyka jego uszkodzenia jest identyczne jak w przypadku omówionej poprzednio metody krzywych R-6. Polega ono na analizie położenia punktu o współrzędnych (L_r, K_r) znajdującego się na ścieżce obciążenia w stosunku do krzywej granicznej K_r (rys. 6). Jeśli punkt leży w obszarze bezpiecznym (punkt A), to element nie ulegnie uszkodzeniu i może być nadal użytkowany. W przypadku, gdy punkt znajduje się na krzywej granicznej K_r (punkt B) należy liczyć się z możliwością jego uszkodzenia, które jest bardzo prawdopodobne w przypadku, gdy punkt leży poza krzywą graniczną K_r w obszarze niebezpiecznym (punkt C).

4.2. Podejście CDF

Według tego podejścia, analiza wytrzymałościowa elementu z defektem oparta jest na wykresie uogólnionej siły powodującej wzrost pęknięcia, oznaczanego skrótem CDF. Krzywa CDF jest sporządzana w funkcji parametru L_r , który określa kryterium nośności granicznej i zdefiniowany został poprzednio. Parametrami określającymi odporność na pęknięcie materiału są całka J bądź rozwarcie wierzchołkowe pęknięcia δ . Krzywa CDF oparta o całkę J , w najprostszym przypadku określona może być następującym wzorem:

$$J = J_e [f(L_r)]^2 \quad (17)$$

gdzie: $J_e = K_I^2/E'$, $E' = E$ dla płaskiego stanu naprężenia (PSN) lub $E' = E/(1-\nu^2)$ dla płaskiego stanu odkształcenia (PSO).

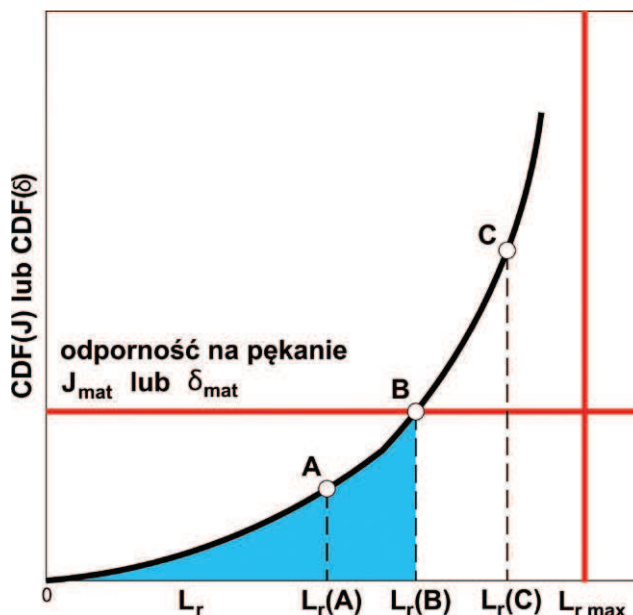
W przypadku zastosowania w analizie rozwarcia wierzchołkowego pęknięcia δ można korzystać z następującej zależności:

$$\delta = \delta_e [f(L_r)]^2 \quad (18)$$

gdzie: $\delta_e = K_{II}^2/E'\sigma_e$, σ_e – wyraźna lub umowna granica plastyczności.

Na wykresie uogólnionej siły powodującej wzrost pęknięcia nanosi się również linię graniczną $L_{r \max}$ oraz linie oznaczające graniczne wartości odporności na pęknięcie, odpowiednio J_{mat} lub δ_{mat} .

Ocena bezpieczeństwa elementu z defektem w oparciu o wykres CDF jest podobna jak w przypadku diagramu zniszczenia FAD i polega na analizie położenia punktu kontrolnego o współrzędnych (L_r, CDF) w stosunku do linii granicznych $L_{r \max}$ oraz J_{mat} lub δ_{mat} (rys. 7). Jeśli punkt znajduje się poniżej linii granicznej określającej odporność na pęknięcie, J_{mat} lub δ_{mat} , i przed linią $L_{r \max}$ (punkt A), to element nie jest zagrożony zniszczeniem



Rys. 7. Wykres uogólnionej siły powodującej wzrost pęknięcia CDF (na podstawie [14])

i może być dalej eksploatowany. W przypadku, gdy punkt znajduje się na linii granicznej J_{mat} lub δ_{mat} możliwe jest uszkodzenie elementu (punkt B). W pozostałych przypadkach należy się liczyć z wysokim prawdopodobieństwem uszkodzenia elementu (punkt C).

4.3. Poziomy analizy FITNET

Jak już wspomniano, procedury FITNET umożliwiają prowadzenie obliczeń wielowariantowych, na 6 różnych poziomach, od 0 do 5. W zależności od analizowanego przypadku oraz posiadanych informacji na temat właściwości materiałowych, inżynier prowadzący obliczenia ma możliwość wyboru odpowiedniego poziomu analizy w dość szerokim zakresie. Należy jednak liczyć się z faktem, że decydując się na obliczenia przy zastosowaniu podstawowego poziomu analizy, uzyskane rezultaty będą najmniej dokładne i jednocześnie najbardziej restrykcyjne, z uwagi na wysoki konserwatywizm przyjętych kryteriów zniszczenia. Poziomy analizy FITNET przedstawiono poniżej.

Poziom 0 (Default). Wymagane parametry to jedynie wyraźna lub umowna granica plastyczności σ_e oraz odporność na pęknięcie K_{mat} , wyznaczona np. w próbie udarności.

Poziom 1 (Podstawowy). Stosowany w odniesieniu do materiałów jednorodnych, dla których niezbędna jest znajomość wyraźnej lub umownej granicy plastyczności σ_e , wytrzymałości doraźnej σ_m przy rozciąganiu i odporności na pęknięcie K_{mat} , określonej na podstawie wartości K_{Ic} lub J_{Ic} .

Poziom 2 (Mismatch). Ma zastosowanie w przypadku elementów spawanych. Niezbędne dane materiałowe to znajomość wyraźnej lub umownej granicy plastyczności σ_e , wytrzymałości doraźnej σ_m przy rozciąganiu

i odporność na pękanie K_{mat} , przyjmowane zarówno dla materiału elementu jak i spoiny.

Poziom 3 (Stress-strain). Poziom ten ma zastosowanie zarówno w odniesieniu do elementów spawanych, jak i litych. Oprócz niezbędnych danych materiałowych, takich jak znajomość wyraźnej lub umownej granicy plastyczności σ_e , wytrzymałości doraźnej σ_m przy rozciąganiu i odporność na pękanie K_{mat} dla materiału elementu jak i spoiny, konieczna jest również znajomość pełnej krzywej naprężenie-odkształcenie.

Poziom 4 (Analiza całki J). Wymagana jest pełna wiedza na temat własności wytrzymałościowych materiału, w tym wartości K_{Ic} i J_{Ic} oraz pracy w zakresie sprężysto-plastycznym elementu zawierającego defekt.

Poziom 5 (Uwzględnienie więzów geometrycznych – Constraints allowance). Oprócz pełnych informacji na temat właściwości materiałowych, na tym poziomie wymagana jest dodatkowa znajomość współczynników określających wpływ więzów geometrycznych na wartość K_{mat} , które są uwzględniane w analizie.

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule procedury R-6 i FITNET to obecnie jedne z najbardziej zaawansowanych i nowoczesnych narzędzi umożliwiających prowadzenie analiz wytrzymałościowych elementów zawierających defekty.

W zakresie szacowania nośności i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcji budowlanych, obiecujące są możliwości procedur FITNET, czego przykładem mogą być np. badania przeprowadzone przez autora [15, 16]. Wydaje się, że wiele przypadków analizowanych klasycznymi metodami, które opracowano do tej pory, powinno być weryfikowanych w oparciu o bardziej zaawansowane, ale też dające lepsze jakościowo wyniki procedury, takie jak R-6 czy FITNET. Dlatego też z zainteresowaniem należy obserwować postęp, jaki zachodzi w zakresie rozwijanych obecnie metod obliczenio-

wych i badawczych, jak również podejmować próby adaptacji tych procedur do analiz konstrukcji budowlanych zawierających uszkodzenia.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1993-1-10:2007 Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową
- [2] Gołaski L., Elementy doświadczalnej mechaniki pękania. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1992
- [3] Neimitz A., Mechanika pękania. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998
- [4] Rykaluk K., Pęknięcia w konstrukcjach stalowych. DWE, Wrocław 2000
- [5] BS PD 6493:1991 Guidance on methods for assessing the acceptability of flaws in fusion welded structures. British Standards Institution
- [6] BS 7910:2005 Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures. British Standards Institution
- [7] R5: Assessment procedure for the high temperature response of structures. British Energy Generation Report R5, Issue 3, 2003
- [8] R6: Assessment of the integrity of structures containing defects. British Energy Generation Report R/H/R6, Revision 4, 2001
- [9] SINTAP: Structural integrity assessment procedures for European industry. Brite-Euram Project No. BE95-1426, Contract No. BRPR-CT95-0024, Final Report, 1999
- [10] API 579 Recommended practice for Fitness-for-Service, 1st Edition. American Petroleum Institute 2000
- [11] Koçak M., Hadley I., Szavai S., Tkach Y., Taylor N., FITNET Fitness-for-Service (FFS) Procedure – Volume 1, Revision MK8. Joint Research Centre, GKSS Research Centre Geesthacht, 2008
- [12] Koçak M., Hadley I., Szavai S., Tkach Y., Taylor N., FITNET Fitness-for-Service (FFS) Annex – Volume 2, Revision MK8. Joint Research Centre, GKSS Research Centre Geesthacht, 2008
- [13] Project European Thematic Network FITNET FFS-GIRT-CT-2001-05071
- [14] Neimitz A., Dzioba I., Graba M., Okrajni J., Ocena wytrzymałości, trwałości i bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcyjnych zawierających defekty. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008
- [15] Kossakowski P., Ocena nośności elementów konstrukcji stalowych metodami R-6 i FITNET. Materiały konferencyjne 56. Konferencji Naukowej KILiW PAN i KN PZITB, Krynica 2010
- [16] Kossakowski P., Zastosowanie procedur FITNET w ocenie nośności stalowych uszkodzonych elementów konstrukcyjnych. Inżynieria i Budownictwo, nr 3, 156–159, 2012

„Przedsiębiorstwo Produkcyjno–Usługowo–Handlowe Styropmin spółka z ograniczoną odpowiedzialnością z siedzibą w Mińsku Mazowieckim informuje, iż używając w obrocie gospodarczym znaków złota ściana, złota podłoga, złote styropiany mogła wprowadzić w błąd potencjalnych nabywców styropianowych płyt izolacyjnych co do podobieństwa lub tożsamości wyrobów styropianowych Termo Organika spółki z ograniczoną odpowiedzialnością z siedzibą w Krakowie, oznaczonych nazwą styropian złoty i styropian gold”.