

Odporność na pękanie starej stali mostowej

Eliza Mytych-Kumańska¹, Paweł Kossakowski¹

¹ Katedra Wytrzymałości Materiałów, Wydział Budownictwa i Architektury,
Politechnika Świętokrzyska, e-mail: elizak@tu.kielce.pl, kossak@tu.kielce.pl

Streszczenie: Tematyka artykułu jest związana z zagadnieniami odporności na pękanie starej stali mostowej, która została pobrana z mostu kolejowego o okresie eksploatacji przekraczającym 100 lat. Omówiono podstawowe zagadnienia mechaniki pęknięcia, a także podano szczegółowe informacje na temat procedur wyznaczania odporności na pękanie, które są stosowane w badaniach stali mostowych. Omówiono wyniki przeprowadzonych badań, w których oszacowano wartość całki J_Q , określając tym samym odporność na pękanie badanej stali.

Słowa kluczowe: odporność na pękanie, całka J, mosty, stara stal mostowa.

1. Wprowadzenie

Pękanie jest jednym z najniebezpieczniejszych zjawisk, powodujących całkowite zniszczenie zarówno elementów konstrukcyjnych jak i rozmaitych urządzeń, maszyn, obiektów inżynierskich czy nawet środków transportu.

Wystarczy choćby wspomnieć jedną z najbardziej spektakularnych i tragicznych w skutkach katastrof, jaka miała miejsce w historii – zatonięcie transatlantyka Titanic. Podstawową przyczyną jego zatonięcia było oczywiście zderzenie z górą lodową, jednak wg najnowszej hipotezy, zasadniczym czynnikiem który zadecydował o rozszczelnieniu poszycia kadłuba statku były pęknięcia (ścięcia) nitów. Do ich produkcji zastosowano materiał o zbyt wysokiej zawartości węgla, powodującego z jednej strony polepszenie jej kowalności kosztem wzrostu podatności na kruche pękanie.

Na tym przykładzie widać wyraźnie jak niebezpiecznym procesem powodującym gwałtowne niszczenie materiałów metalowych jest kruche pękanie. Problem ten został dostrzeżony już dawno w odniesieniu do szeregu stali konstrukcyjnych, co miało swój efekt w opracowaniu np. Eurokodu 1993-1-10 [1], gdzie podano wymagania w zakresie doboru materiału z uwagi na kruche pękanie i wymaganą udarność oraz ciągliwość międzywarstwową.

Jednymi z konstrukcji inżynierskich, które są szczególnie narażone na negatywne skutki pęknięcia są mosty i wiadukty metalowe o długim okresie eksploatacji. Jest to związane z procesami desktrukcyjnymi, które powodują tzw. starzenie materiału. Podstawowym zjawiskiem degradującym strukturę materiału obiektów komunikacyjnych jest zmęczenie materiału, którego fizycznym objawem są właśnie pęknięcia. Przykład stanu przedawaryjnego mostu Bay Bridge w San Francisco, gdzie pęknięciu uległ jeden z krzyżulców, pokazano na rysunkach 1 i 2.



Rys. 1 Widok mostu Bay Bridge w San Francisco z zaznaczeniem rejonu uszkodzenia [2]

Z inżynierskiego punktu widzenia, w celu oszacowania nośności elementów zawierających pęknięcia, niezbędna jest znajomość podstawowego parametru jakim jest odporności na pękanie materiału, z którego dany element konstrukcyjny został wykonany.



Rys. 2 Widok pęknięcia krzyżulca mostu Bay Bridge w San Francisco [2]

Tematyka ta została poruszona w artykule, gdzie podjęto próbę oszacowania odporności na pękanie stali mostowej, która została podbrana z mostu kolejowego o ponad stuletnim okresie eksploatacji. W oparciu o przeprowadzone badania [3] omówiono i przedyskutowano odporność na pękanie badanej stali mostowej wraz z opisem metodologii i procedur jej wyznaczania. Uzyskane rezultaty mogą być pomocne w analizach nośności i ocenie bezpieczeństwa pracy elementów konstrukcji mostów i wiaduktów o wieku przekraczającym 100 lat, które mogą być prowadzonymi zgodnie z rozwijanymi ostatnio procedurami w tym zakresie np. R-6 i FITNET.

2. Podstawowe zagadnienia i parametry mechaniki pękania

Tematyka szacowania nośności elementów z pęknięciami jest nierozzerwalnie związana ze stosunkowo młodą, interdyscyplinarną dziedziną nauki jaką jest mechanika pękania. Obejmuje ona badania zachowania się elementów z karami pod obciążeniem, podając szczegółowe rozwiązania i zależności.

Podstawowym założeniem mechaniki pękania jest przyjęcie w materiale nieciągłości w postaci szczeliny. Wraz ze wzrostem działającego obciążenia szczelina powiększa się prowadząc do zniszczenia materiału. Najogólniej mówiąc w mechanice pękania podaje się rozwiązania w zakresie obciążeń granicznych jakie materiał ze szczeliną jest w stanie przenieść lub jaki jest rozmiar maksymalnej szczeliny, która dla zadanego obciążenia nie doprowadzi do zniszczenia.

Mechanika pękania dzieli się na dwa podstawowe działy, liniowo-sprężystą i nieliniową mechanikę pękania, co jest związane z charakterem odkształceń towarzyszących rozprzestrzenianiu pęknięcia, tj. odkształceń sprężystych i plastycznych.

W zależności od orientacji obciążenia w stosunku do płaszczyzny pęknięcia i kierunku jego propagacji, w mechanice pękania wyróżnia się trzy podstawowe sposoby obciążenia elementu zawierającego szczelinę, a w efekcie trzy schematy rozwoju pęknięcia: rozrywanie (otwieranie pęknięcia), ścinanie wzdłużne i ścinanie poprzeczne. Schematy te określane są jako tzw. czyste sposoby obciążenia elementu ze szczeliną i oznaczane symbolem odpowiednio I, II i III.

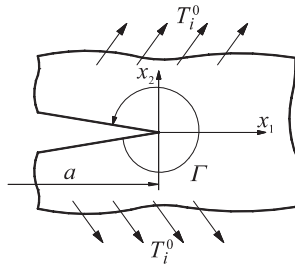
Odporność na pękanie jako właściwość materiałowa jest określana w mechanice pękania za pomocą jednego z kilku parametrów. O ile w zakresie liniowo-sprężystej mechaniki pękania używa się do tego celu krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} (gdzie $\alpha = I, II, III$ i oznacza orientację obciążenia w elemencie ze szczeliną), to w przypadku materiałów plastycznych stosuje się krytyczną wartość całki J_{Ic} oraz krytyczne rozwarście wierzchołkowe szczeliny δ_{Tc} .

W przypadku stali konstrukcyjnych stosowanych w mostownictwie, w związku z ich własnościami plastycznymi, zastosowanie znajdują metody nieliniowej mechaniki pękania.

Odporność na pękanie tego typu gatunków stali jest określana w oparciu o tzw. całkę J , a ściślej jej krytyczną wartość J_{Ic} . Całka J jest definiowana następująco:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W dx_2 - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x_i} ds \right) \quad (1)$$

gdzie: Γ – kontur w obszarze wierzchołka szczeliny, W – gęstość energii sprężystej, definiowana jako $W = \int_0^{\varepsilon_{mn}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$, T_i – składowa naprężenia normalna do konturu ($T_i = \sigma_{ij} n_j$), u_i – wektor przemieszczenia, n_j – wektor jednostkowy normalny do konturu Γ , ds – element konturu Γ wg rysunku 3.



Rys. 3 Schemat szczeliny z oznaczeniem konturu całkowania

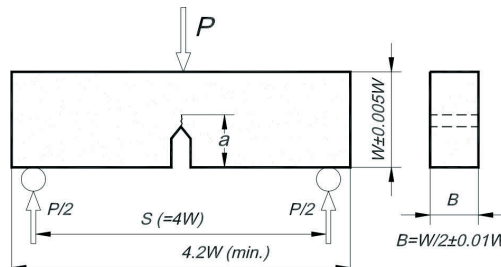
Kryterium pękania oparte na całce J opisane jest następującym związkiem:

$$J_{\alpha} \geq J_{\alpha c} \quad (2)$$

Jak wynika z kryterium (2) proces pękania jest inicjowany jeśli w trakcie obciążenia elementu ze szczeliną przekroczona zostanie krytyczna wartość całki $J_{\alpha c}$ materiału.

3. Metodyka wyznaczania odporności na pękanie za pomocą krytycznej wartości całki J_{Ic}

Istnieje kilka metod wyznaczenia krytycznej całki wartości J_{Ic} , w tym dwie podstawowe, metoda wielu próbek oraz metoda zmiany potencjału. Generalnie, wyznaczenie wartości J_{Ic} opiera się na oszacowaniu umownej wartości odporności na pękanie oznaczanej jako J_Q . W badaniach odporności na pękanie stosuje się różnego rodzaju próbki, w tym próbkę trójpunktowo zginaną z jednostronnym pęknięciem typu SEN(B), pokazana schematycznie na rysunku 4.



Rys. 4 Schemat próbki SEN(B)

Wartość J_Q jest wyznaczana w punkcie przecięcia krzywej odporności J_R oraz prostej równoległej do linii „stopnia”, poprowadzonej w odległości $\Delta a = 0,2$ mm. Umowna odporność na pękanie J_Q może być traktowana jako stała materiałowa J_{Ic} pod warunkiem

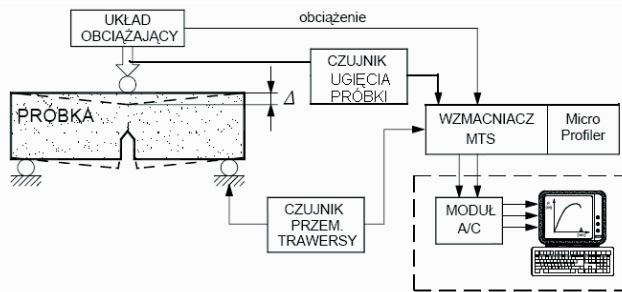
zachowania wymogów normowych podczas badań, a przede wszystkim spełnienia warunku płaskiego stanu odkształcenia (PSO) w próbce użytej podczas badań. Warunek ten w ogólnej formie przedstawia się następująco:

$$B, b_0, a_0 > 25 \frac{J_0}{\sigma_0} \quad (3)$$

gdzie: B – grubość próbki, a_0 – długość pęknięcia, b_0 – długość części próbki, która nie zawiera pęknięcia ($b_0 = W - a_0$), W – szerokość próbki.

Poniżej przedstawiono szczegółowo procedury wyznaczania odporności na pęknięcie w oparciu o metodę wielu próbek i zmiany potencjału.

Wyznaczenie odporności na pęknięcie przy zastosowaniu metody wielu próbek doczekało się w naszym kraju normalizacji i ujęte zostało w PN-88/H-04336 [4]. Metoda wielu próbek wymaga zastosowania specjalnego stanowiska i zestawu pomiarowego, którego przykładowy schemat pokazano na rysunku 5.



Rys. 5 Układu pomiarowy stosowany w metodzie wielu próbek

W celu określenia odporności na pęknięcie badanego materiału, w metodzie wielu próbek sporządza się krzywą odporności J_R dla przynajmniej czterech ważnych punktów. Na ich podstawie w oparciu o metodę najmniejszych kwadratów aproksymowana jest funkcja potęgowa $J_R = C(\Delta a)^n$. Linia poprowadzona równoległe do linii „stopnia” w odległości $\Delta a = 0,2$ mm przecina krzywą J_R , a rzędna tego punktu określa wartość umownej odporności na pęknięcie J_0 . Funkcja określająca linię „stopnia” wyznaczana jest w oparciu o własności wytrzymałościowe materiału zgodnie ze wzorem:

$$J = M \left(\frac{R_e + R_m}{2} \right) \Delta a \quad (4)$$

gdzie: M – współczynnik o wartości z zakresu 2÷4.

Dla każdej próbki dokonuje się pomiaru długości pęknięcia a_0 oraz przyrostu długości pęknięcia Δa za pomocą mikroskopu laboratoryjnego. W przypadku określania wartości Δa stosuje się uśrednienie po grubości próbki.

Zasadą metody wielu próbek jest obciążanie kolejnych próbek tak, aby uzyskane dla nich wartości całki J i przyrostu pęknięcia Δa były różne. Dla poszczególnych próbek całka J jest obliczana wg wzoru:

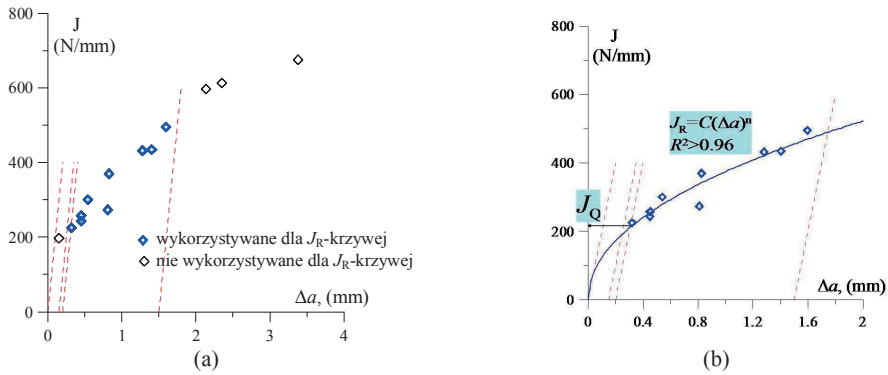
$$J = \frac{\eta A}{B(W - a_0)} \quad (5)$$

gdzie: B – grubość próbki, W – szerokość próbki, a_0 – długość pęknięcia, η – współczynnik zależny od typu próbki i wartości a_0 , A – energia wyznaczana jako pole pod wykresem siła-ugięcia próbki.

Wartość współczynnika η dla próbek typu SEN(B) spełniających warunek $0,45 < a_0/W < 0,65$ wynosi $\eta = 2$.

Wykres niezbędny do wyznaczenia odporności na pęknięcie w metodzie wielu próbek budowany jest przez nanoszenie punktów o współrzędnych odpowiadających obliczonym wartościom całki J oraz przyrostom długości pęknięcia Δa . Krzywa odporności J_R

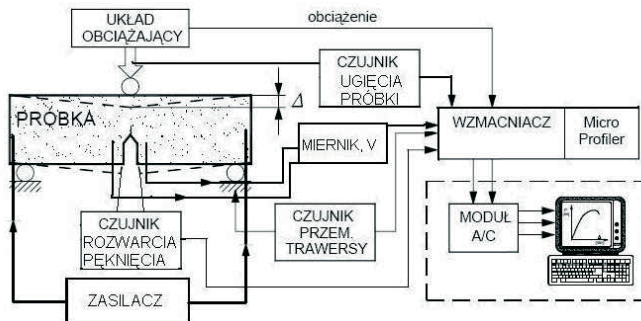
wyznaczana jest jedynie dla punktów znajdujących się pomiędzy liniami ograniczonymi wartościami $J_R = M(R_e + R_m)(\Delta a - 0.15)$ i $J_R = M(R_e + R_m)(\Delta a - 1.5)$. Schemat procedury wyznaczenia krytycznej wartości całki J_{Ic} zgodnie z metodą wielu próbek pokazano na rysunku 6.



Rys. 6 Procedura wyznaczenia krytycznej wartości całki J_{Ic} zgodnie z metodą wielu próbek

Drugą metodą stosowaną do wyznaczenia krytycznej wartości całki J_{Ic} jest metoda zmiany potencjału realizowana przy zastosowaniu jednej próbki.

W tej metodzie wyznaczenie umownej odporności na pękanie J_Q jest analogiczne jak w metodzie wielu próbek, czyli opiera się na wykresie krzywej odporności J_R przy spełnieniu warunku PSO dla badanej próbki. Inna natomiast jest metodologia wyznaczania długości przyrostu pęknięcia Δa , gdyż opiera się ona na pomiarze prądu, który jest przepuszczany przez próbkę trakcie pomiaru. Wzrost długości pęknięcia powoduje zmianę rezystancji próbki, a tym samym zmianę rejestrowanego napięcia (potencjału) prądu. Schemat zestawu pomiarowego stosowanego w metodzie zmiany potencjału pokazano na rysunku 7.



Rys. 7 Układu pomiarowy stosowany w metodzie zmiany potencjału

Przyrost długości pęknięcia Δa jest wyznaczany wg poniższego wzoru [4]:

$$\Delta a_i = \frac{\Delta V_i}{\Delta V_k} \Delta a_k \quad (6)$$

gdzie: Δa_k – całkowity przyrost długości pęknięcia, Δa_i – bieżący przyrost długości pęknięcia, ΔV_k – całkowita zmiana potencjału, ΔV_i – bieżąca zmiana potencjału.

Bieżąca wartość całki J_i w metodzie zmiany potencjału jest obliczana wg wzoru:

$$J_i = \left(J_{i-1} + \left(\frac{\eta}{b_{i-1}} \right) \frac{(A_i - A_{i-1})}{B} \right) \left(1 - \frac{a_i - a_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \quad (7)$$

gdzie: B – grubość próbki, a_i – bieżąca długość pęknięcia, a_{i-1} – długości pęknięcia dla poprzedniego kroku iteracji, b_{i-1} – długość części próbki, która nie zawiera pęknięcia dla poprzedniego kroku iteracji, A_i – bieżąca energia wyznaczana jako pole pod wykresem siła-ugięcie próbki, A_{i-1} – energia dla poprzedniego kroku iteracji, η – współczynnik zależny od typu próbki i wartości a_0 .

W porównaniu z metodą wielu próbek metoda zmiany potencjału daje możliwość uzyskania nieporównywalnie większej ilości ważnych punktów pomiarowych, bo około 1000. W metodzie wielu próbek takich punktów można uzyskać około 10 dla 15 próbek.

Z uwagi na fakt, że wynik uzyskany przy zastosowaniu metody potencjału może znacząco różnić się od wartości średniej określonej w oparciu o metodę wielu próbek, odporność na pęknięcie należy przyjmować jako minimalną wartość krytycznej całki J uzyskaną z co najmniej trzech ważnych wykresów.

4. Odporność na pęknięcie starej stali mostowej

Jak już wspomniano we wstępie, przeprowadzone badania [3] obejmowały określenie odporności na pęknięcie stali mostowej, która została pobrana z mostu kolejowego o długim okresie eksploatacji, przekraczającym 100 lat.

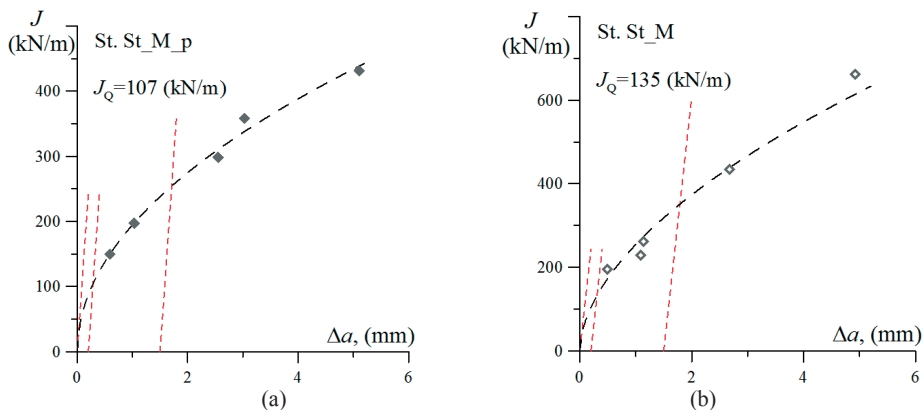
W badaniach jako parametr odporności na pęknięcie przyjęto krytyczną wartość całki J , którą wyznaczono przy zastosowaniu próbek trójpunktowo zginanych typu SEN(B), pokazanych na rysunku 4. Próbki wycinano z blach dźwigaru mostu w dwóch kierunkach, podłużnym i poprzecznym.

Badania wykonano przy zastosowaniu metody wielu próbek oraz porównawczo metody zmiany potencjału, wg omówionych wcześniej procedur.

Badana stal charakteryzuje się niskimi wartościami granicy plastyczności, która średnio wynosi $R_e = 240$ MPa. Sugeruje to mechanizm plastycznego pęknięcia oraz stosunkowo wysokich wartości charakterystyki odporności na pęknięcie.

Próbki zastosowane w badaniach wycinano z blach o grubości 10 mm, a co za tym idzie spełnienie warunków PSO było problematyczne. Aby niejako wymusić płaski stan odkształcenia w badanych próbkach, w płaszczyźnie rozwoju pęknięcia podkrytycznego wykonano dodatkowe, boczne nacięcia o głębokości 1 mm. Z uwagi na problem ze spełnieniem warunku PSO uzyskane wartości umownej odporności na pęknięcie J_Q nie mogły charakteryzować odporności na pęknięcie J_{Ic} , a jedynie mogą mieć charakter orientacyjny.

W pierwszym etapie badań wyznaczono krytyczne całki J_Q w oparciu o metodę wielu próbek. Wyniki tych badań w postaci krzywych J_R pokazano na rysunku 8.



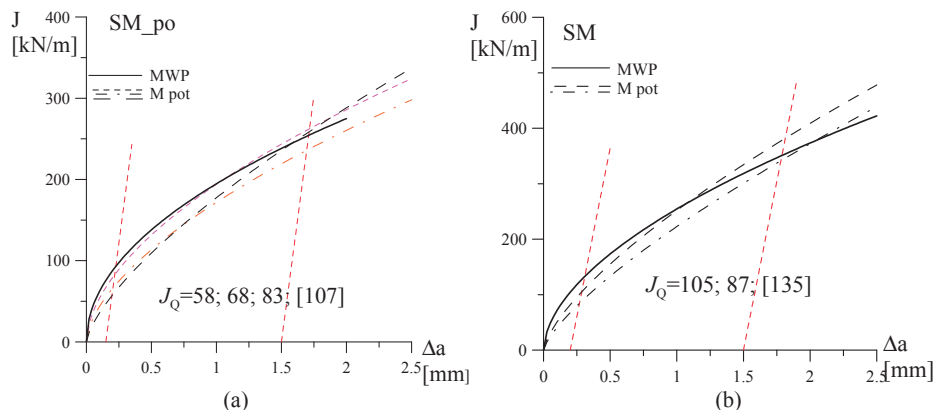
Rys. 8 Krzywe J_R wyznaczone dla próbek: poprzecznych (a) podłużnych (b)

Wartości umownej odporności na pęknięcie J_Q wyznaczone wg metody wielu próbek były następujące:

- kierunek poprzeczny: $J_Q = 107$ kN/m;
- kierunek podłużny: $J_Q = 135$ kN/m.

W kolejnym etapie badań wyznaczono odporność na pęknięcie stosując metodę zmiany potencjału. W przypadku próbek, w których przyrost długości pęknięcia Δa był mały, nie wyznaczono wartości J_Q z uwagi na brak ważnych punktów w przedziale ważności, określonym liniami granicznymi $J_R = M(R_c + R_m)(\Delta a - 0.15)$ i $J_R = M(R_c + R_m)(\Delta a - 1.5)$.

Rezultaty badań w postaci krzywych J_R , zaznaczonych liniami przerywanymi, uzyskanych na podstawie metody zmiany potencjału pokazano na rysunku 9. Dla porównania, na wykresy nałożono krzywe J_R uzyskane przy zastosowaniu metody wielu próbek w postaci linii ciągłych.



Rys. 9 Krzywe J_R wyznaczone metodą wielu próbek (MWP) i metodą zmiany potencjału (M pot) dla próbek: poprzecznych (a), podłużnych (b)

Charakterystyczne jest, że dla zarówno dla kierunku poprzecznego jak i podłużnego, krzywe J_R wyznaczone w oparciu o metodą wielu próbek znajdują się powyżej krzywych J_R wyznaczonych przy zastosowaniu metody potencjału. Skutkuje to wyższymi krytycznymi wartościami odporności na pęknięcie J_Q jakie uzyskano wg metody wielu próbek w porównaniu do metody zmiany potencjału. Przyczyn tych różnic należy szukać w daleko mniejszej ilości ważnych punktów pomiarowych w przedziale ważności, jakie uzyskano stosując metodę wielu próbek w porównaniu do metody zmiany potencjału. Efekt odwrotny miał miejsce w przypadku zastosowania metody zmiany potencjału, ilość punktów ważnych była bardzo duża i wystarczająca do poprawnego wyznaczenia krzywej J_R , a co za tym idzie poprawnego oszacowania krytycznej wartości odporności J_Q .

Umowna odporność na pęknięcie J_Q wyznaczona wg metody potencjału jest następująca:

- kierunek poprzeczny: $J_Q = 58$ kN/m;
- kierunek podłużny: $J_Q = 87$ kN/m.

Uzyskanych wyniki odporności na pęknięcie wraz z wyznaczonymi parametrami wytrzymałościowymi badanej stali mostowej zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Charakterystyki wytrzymałościowe oraz odporność na pęknięcie badanej stali mostowej

Lp.	Kierunek	R_{eL} (MPa)	R_{eH} (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (%)	Z (%)	J_{QMWP} (kN/m)	J_{QMpot} (kN/m)
1	Poprzeczny	239,5	243,8	368,0	36,1	57,3	107,0	58,0
2	Podłużny	236,5	243,3	367,3	37,6	63,0	135,0	87,0

Jak już podano, jako charakterystykę odporności na pęknięcie należy przyjmować najniższą wartość krytycznej całki J wyznaczoną w trakcie badań.

Najniższą wartość odporności na pęknięcie uzyskano dla próbek wyciętych w kierunku poprzecznym z materiału mostu

5. Dyskusja wyników i podsumowanie

Podsumowując uzyskane w pracy wyniki w zakresie odporności na pęknięcie stali mostowej o długim okresie eksploatacji, przekraczającym 100 lat należy stwierdzić kilka

interesujących zależności:

- odporność na pękanie J_Q oszacowana na podstawie metody wielu próbek jest wyższa w porównaniu do rezultatów uzyskanych wg metody potencjału; różnice wynoszą 84 % i 55 % odpowiednio dla kierunku poprzecznego i podłużnego próbek;
- w zagadnieniach inżynierskich zaleca się stosować wartości odporności na pękanie J_Q uzyskane w oparciu o metodę zmiany potencjału z uwagi na wyższą wiarygodność wyznaczonej krzywej krzywej J_R ;
- w przypadku wyznaczenia kilku krzywych J_R i uzyskaniu kilka wartości odporności J_Q w celu oszacowania odporności na pękanie badanego materiału należy przyjmować wartość najniższą;
- najniższa odporność na pękanie $J_Q = 58$ kN/m oszacowana została dla stali mostowej w przypadku badania próbek poprzecznych na podstawie metody zmiany potencjału, stanowiąc wartość referencyjną dla badanego materiału.

Z uwagi badania materiału pobranego z pojedynczego mostu, uzyskane wyniki należy traktować jako porównawcze i uzupełniające wiedzę z zakresu odporności na pękanie stali mostowych z końca XIX wieku. Jednakże uwzględniając przyjęty w badaniach konserwatywizm, przedstawione rezultaty mogą mieć zastosowanie w praktycznych zagadnieniach szacowania nośności i bezpieczeństwa konstrukcji mostowych o podobnym wieku, w których stwierdzono pęknięcia. W tego typu analizach zaleca się stosować nowoczesne metody szacowania bezpieczeństwa konstrukcji z defektami, np. procedury FITNET, w oparciu o oszacowaną w pracy wartość $J_Q = 58$ kN/m. W najogólniejszym przypadku bezpieczeństwo konstrukcji będzie zapewnione gdy wyznaczona całka J dla elementu z pęknięciem będzie niższa od $J_Q = 58$ kN/m, i jednocześnie działające obciążenie będzie niższe od obciążenia granicznego wyznaczonego dla analizowanego elementu z pęknięciem.

Literatura

- 1 PN-EN 1993-1-10:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.
- 2 <http://www.californiabeat.org/2009/09/05/breaking-structural-flaw-may-delay-bay-bridge-reopening>.
- 3 Trąmpczyński W., Kumańska E., Dzioba I. Próba jednoosiowego rozciągania. Wyznaczenie charakterystyk odporności na pękanie. Raport z badań w ramach projektu Nr R 04 007 01, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2009.
- 4 PN-88/H-04336 Metale – Metoda badania odporności na pękanie przez wyznaczanie krytycznej wartości całki J , J_{IC} .

Fracture toughness of old bridge steel

Eliza Mytych-Kumańska¹, Paweł Kossakowski¹

¹ Department of Strength of Materials and Concrete Structures, Faculty of Civil Engineering and Architecture, Kielce University of Technology, e-mail: elizak@tu.kielce.pl, kossak@tu.kielce.pl

Abstract: The subject of paper is related to problems the of fracture toughness of old steel bridge which was taken from the railway bridge, that was loaded during more than 100 years. The basic problems of fracture mechanics, as well as detailed information on the procedures of determination of material fracture toughness, which were used in the steel bridge research, are presented. The results of the study, the critical values of J_Q integral, defining the fracture toughness of investigated steel are discussed.

Keywords: fracture toughness, J integral, bridges, old bridge steel.