

Artur DUCHACZEK¹
Zbigniew MAŃKO²

ANALIZA ROZWOJU PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH W DŹWIGARACH MOSTÓW STALOWYCH Z ZASTOSOWANIEM WŁAŚCIWOŚCI CAŁKI J

W wojskowych mostach niskowodnych dźwigary główne są wykonywane przezwaźnie z kształtowników stalowych dostępnych na obszarze danego kraju. W różnych sytuacjach kryzysowych mosty te są używane także przez ludność cywilną. W pracy przedstawiono koncepcję konstrukcji przęsła mostu wojskowego, w którym użyto śrub do montażu stężeń poprzecznych. Ten typ połączeń wymaga wykonania otworów w środnikach dźwigarów głównych, które osłabiają nie tylko ich strukturę, ale też całego przęsła, tym bardziej, że otwory te znajdują się w strefie rozciągania i są bezpośrednim miejscem koncentracji naprężeń. Mogą się więc stać miejscem inicjacji pęknięć zmęczeniowych. W pracy przedstawiono wyniki obliczeń propagacji pęknięć zmęczeniowych, rozwijających się w dźwigarach mostów stalowych rozchodzących się od otworów montażowych. Analizę przeprowadzono za pomocą oprogramowania komputerowego FRANC2D wykorzystującego MES dla dwóch przyjętych modeli fizycznych materiału z zastosowaniem właściwości całki J . Przeprowadzone w pracy analizy wykazały, że przyjęcie określonych właściwości materiału ma dość istotny wpływ na wartości uzyskanych wyników obliczeń. W analizowanym przykładzie było to szczególnie widoczne w przypadku określenia kierunku kąta propagacji pęknięcia φ . Istotne dla praktyki inżynierskiej okazało się również porównanie wyników wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I (oraz jego wartości ekwiwalentnej K_{eq}) dla materiału liniowego i nieliniowego. Otrzymane wyniki potwierdziły, że przyjęcie materiału liniowego do analiz zmęczeniowych jest dość konserwatywne, a tym samym bardziej bezpieczne dla konstrukcji inżynierskiej.

Słowa kluczowe: most stalowy, wytrzymałość materiałów, pęknięcie zmęczeniowe

¹ Autor do korespondencji/corresponding author: Artur Duchaczek, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki we Wrocławiu, ul. Czajkowskiego 109, 51-150 Wrocław, tel. 71 765-85-25, e-mail: aduchaczek@poczta.wp.pl

² Zbigniew Mańko, Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu, ul. Sołtysowicka 19B, 51-168 Wrocław, e-mail: zbigniew.manko@wp.pl

1. Wprowadzenie

Mosty niskowodne to stosunkowo proste konstrukcje inżynierskie przeznaczone przede wszystkim do zabezpieczania mobilności pododdziałów wojskowych. Jednak w sytuacjach kryzysowych (np. podczas powodzi) konstrukcje te są również wykorzystywane przez ludność cywilną, przy czym wówczas przęsa są wykonywane przeważnie z różnych kształtowników stalowych dostępnych na danym obszarze kraju.

A. Nemitz [1] określił związki konstytutywne zalecane do stosowania w analizach pęknięć różnych materiałów konstrukcyjnych. Dla wysokowytrzymałych gatunków stali zaproponował związek liniowo-sprężysty, natomiast w przypadku stali nisko- i średniowytrzymałych zalecał korzystać ze związków sprężysto-plastycznych lub plastycznych.

Kształtowniki stalowe dostępne w Polsce są najczęściej wykonywane ze stali nisko- i średniowytrzymałych, do których można zaliczyć przede wszystkim wszystkie stale gatunków S235, S275 i S355 [2]. Rozpatrując parametry wytrzymałościowe tych stali, wydaje się, że dla tego typu konstrukcji mostowych analiza rozwoju pęknięć zmęczeniowych w materiale oparta na związkach konstytutywnych liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia może nie być najbardziej adekwatna.

Celem niniejszej pracy jest zatem przedstawienie wyników obliczeń rozwoju pęknięć zmęczeniowych przy przyjęciu modelu materiału o liniowej i nieliniowej charakterystyce, a dokładnie precyzując model materiału idealnie sprężystego i materiału idealnie sprężystego z liniowym wzmocnieniem plastycznym. Znaczna część wzorów opisujących prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych (np. wzory Parisa lub Formana [1]) wykorzystuje wielkość zwaną współczynnikiem intensywności naprężeń K . Z tego też względu w pracy skupiono się głównie nad określaniem tej wielkości z zastosowaniem metody wykorzystującej właściwości całki J [1]. Wszystkie obliczenia zrealizowano specjalistycznym programem FRANC2D (<http://www.cfd.cornell.edu/index.htm>) [3].

2. Podstawy teoretyczne stosowania całki J

A. Nemitz w pracy [1] podaje, że pojęcie całki J jako całki niezmiennej od drogi całkowania w dwuwymiarowym stanie naprężeń zostało wprowadzone do mechaniki pęknięcia niezależnie od siebie przez dwóch autorów, tj. J. Rice'a [4] i G.P. Cherepanova [5]. Jednak praktycznie jako podstawowe pojęcie do mechaniki pęknięcia wprowadził je J.D. Eshelby [6], stosując ją do ciała zawierającego już wstępne defekty. Zdefiniował on w ten sposób uogólnioną siłę działającą na defekt w postaci (1) [1]:

$$J = \int_C w dx_2 - t_i \frac{\partial u_i}{\partial x_1} ds = \int_C (wn_1 - \sigma_{ij}n_j u_{i,1}) ds \quad (1)$$

gdzie: w – gęstość energii odkształcenia

$$w = \int_0^{\varepsilon_{ij}} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}, \quad i, j = 1, 2, 3, \quad (2)$$

t_i – wektor naprężenia działający na kontur C ,

u_i – wektor przemieszczenia określony w tym samym miejscu, co wektor t_i ,

$$t_i = \sigma_{ij}n_j,$$

n – jednostkowy wektor normalny do konturu C .

Niezmiennosc całki J od drogi całkowania można wykazać jedynie w przypadku materiału, dla którego gęstość energii odkształcenia w jest jednoznaczna funkcją odkształcenia $w(\varepsilon_{ij})$, a naprężenia definiowane są jako (3) [1]:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial w(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (3)$$

Jak podaje A. Nemitz [1], zależność (3) jest prawdziwa dla liniowych i nieliniowych ciał sprężystych oraz dla ciał plastycznych według deformacyjnej teorii plastyczności, ale uwarunkowana proporcjonalnością obciążeń.

J. German w pracy [7] podaje, że w nieliniowej mechanice pęknięcia całka J stanowi podstawowy parametr w opisie pola naprężeń, jak i energii potencjalnej, dzięki czemu można zbudować oparte na niej kryterium pęknięcia materiałów sprężysto-plastycznych. Całka J stanowi zatem podstawową charakterystykę pól naprężenia i odkształcenia w wierzchołku szczeliny w materiale nieliniowo-sprężystym. Równie ważnym parametrem charakteryzującym te pola jest współczynnik wzmocnienia n .

Dla ciał o charakterystykach liniowych (gdy współczynnik wzmocnienia n jest równy 1) odpowiednie współczynniki intensywności naprężeń K można wyrazić poprzez całkę J następującymi sposobami [1, 8]:

- w płaskim stanie odkształcenia

$$K_I = \sqrt{\frac{EJ_I}{1-\nu^2}}, \quad K_{II} = \sqrt{\frac{EJ_{II}}{1-\nu^2}} \quad (4)$$

- w płaskim stanie naprężeń

$$K_I = \sqrt{EJ_I}, \quad K_{II} = \sqrt{EJ_{II}} \quad (5)$$

A. Nemitz w pracy [1] stwierdził, że całka J jest dość dobrym narzędziem do stosowania w analizach wytrzymałościowych stabilnego wzrostu pęknięć przy niewielkich przyrostach długości szczeliny, które szacuje się na ok. 5-6% długości niepękniętego odcinka przed frontem zasadniczego pęknięcia. W pracy tej autor podkreślił również, że jeżeli strefa plastyczna (promień strefy plastycznej r_p) jest większa niż 1% długości jednego z wymiaru elementów (np. długości szczeliny) to wzory (4) i (5) na określenie wartości współczynnika intensywności naprężeń K są dokładne jedynie dla ciał o charakterystyce liniowej (ciała liniowe).

Jednak w niniejszym opracowaniu do celów porównawczych, w przypadku ciał sprężysto-plastycznych dla wyrażania całki J w jednostkach współczynnika intensywności naprężeń K , użyto sformułowania „współczynnik intensywności dla ciał nieliniowych”, zdając sobie sprawę, że jest to tylko określenie umowne.

3. Obliczenie współczynnika intensywności naprężeń za pomocą programu FRANC2D

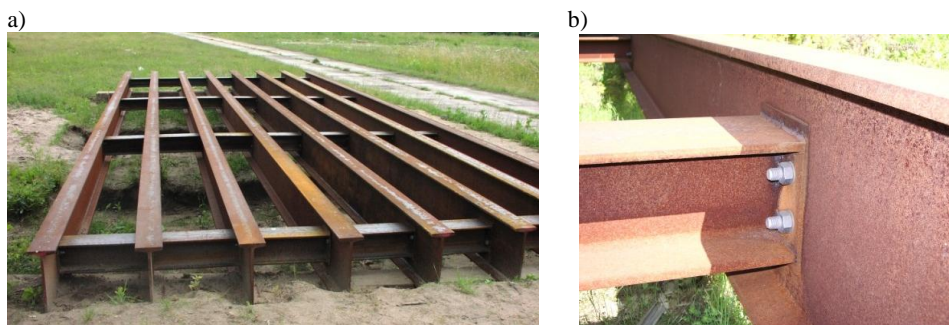
Dla współczesnego inżyniera-konstruktora obiektów stalowych najbardziej uniwersalnym narzędziem do wyznaczania odpowiednich wartości współczynnika intensywności naprężeń K są algorytmy wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES).

Znaczne grono naukowców zajmujących się problematyką rozwoju pęknięć zmęczeniowych w elementach stalowych nie jest zwolennikiem metody określania trwałości eksploatacyjnej konstrukcji inżynierskich opartej na kryteriach naprężeniowych, tj. na współczynniku intensywności naprężeń K . M. Szata w pracy [9] zaprezentował wady metod opartych na tym kryterium, proponując w zamian opis rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w ujęciu energetycznym. Ciekawą propozycję kryteriów energetycznych przedstawił również D. Rozumek w monografii [10]. Kryteria te oparte są na gęstości energii odkształcenia W , będącej iloczynem naprężenia i odkształcenia lub parametrze J , zwanym całką J , które mogą być z dużym powodzeniem stosowane do analizy różnych materiałów w całym zakresie rozwoju pęknięcia [10].

W niniejszej pracy do modelowania rozwoju pęknięcia elementu stalowego wykorzystano program oparty na metodzie elementów skończonych FRANC2D [3]. Model geometryczny rozpatrywanego dźwigara oraz generację siatki elementów skończonych wykonano w programie CASCA. Ustalając metodykę prowadzonych obliczeń, opierano się na metodzie opisanej przez D. Rozumka w pracy [10].

Do analizy numerycznej przyjęto model stalowego dźwigara głównego rzeczywistego wojskowego mostu niskowodnego (rys. 1.) [11]. W przyjętym schemacie obliczeniowym (rys. 2a) pominięto wpływ stężeń poprzecznych (rozpordek) na rozkład naprężeń w dźwigarach głównych. W analizach obliczenio-

wych uwzględniono jedynie samodzielnie pracujący dźwigar główny w postaci dwuteownika normalnego wysokości 400 mm.



Rys. 1. Widok konstrukcji nośnej przęsła tzw. mostu niskowodnego (a), połączenia montażowego na śruby (b), na podstawie [11]

Fig. 1. A view of carrying structure of a military nonstandard fixed bridge span (a), screws assembly connection (b), based on [11]

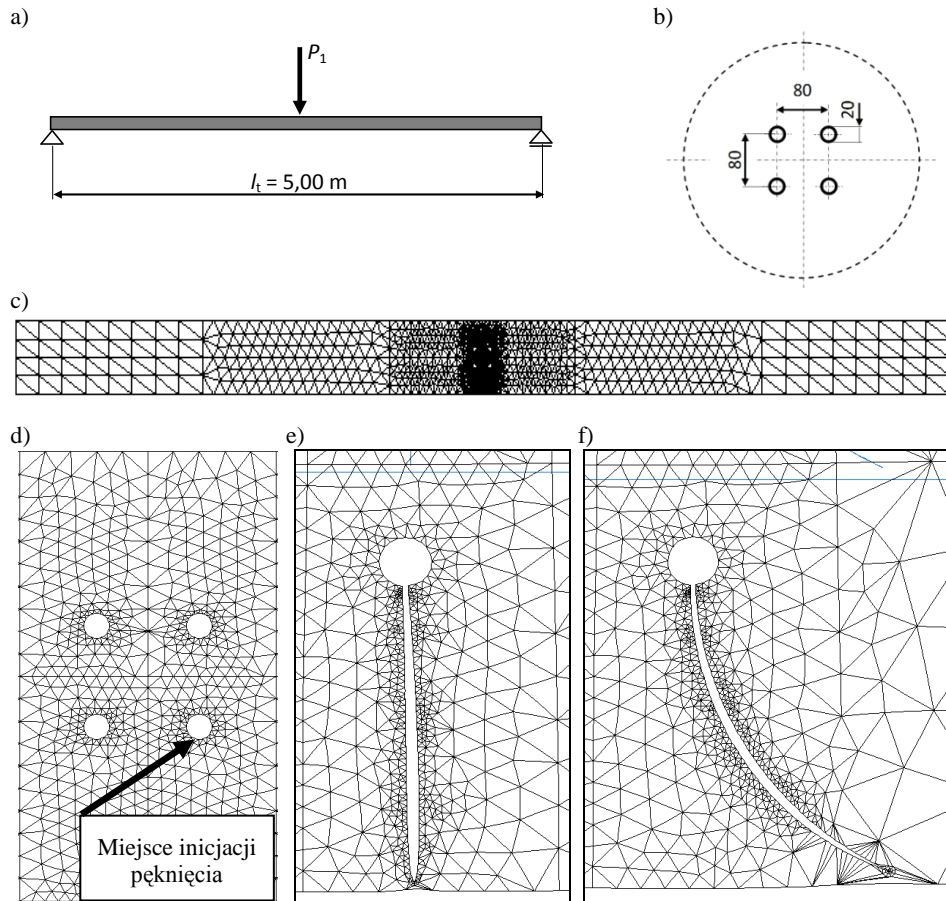
Tworząc model obliczeniowy dźwigara, przyjęto jego schemat statyczny w postaci belki swobodnie podpartej (rys. 2a), przy czym modelowano jedynie środnik analizowanego kształtownika (rys. 2c). W związku z tym model obliczeniowy dźwigara został obciążony siłą skupioną o wielkości 64,815 kN, co wywołało w jego środniku naprężenia normalne zbliżone do występujących w trakcie przeprowadzonych badań doświadczalnych na rzeczywistym obiekcie przy obciążeniu 320 kN [12]. W modelu tym zastosowano jedną podpórę przegubowo-przesuwną oraz jedną przegubowo-nieprzesuwną, które umiejscowiono w osi obojętnej środnika.

W modelu obliczeniowym dźwigara stalowego założono, że krytyczna długość pęknięcia a będzie się znajdować w obszarze jego środnika. Znając rozkład naprężeń normalnych w zginanym dwuteowniku, przyjęto, że w przypadku analizy propagacji szczeliny wystarczy przeanalizować tylko rozkład naprężeń w samym jego środniku (rys. 2c).

W modelu obliczeniowym dźwigara w programie FRANC2D pęknięcie w połowie jego długości zainicjowano na krawędzi dolnego otworu (rys. 2d) w postaci pęknięcia środnika na wskroś o długości 2 mm. Wierzchołek szczeliny został zamodelowany z użyciem specjalnych elementów skończonych w postaci rozety [3, 8] składającej się z ośmiu trójkątnych elementów skończonych, a każdy z nich miał sześć węzłów. Początkowa minimalna liczba elementów skończonych na długości pęknięcia wynosiła dwa.

Obliczenia prowadzono w zależności od przyjętego typu materiału w modelu obliczeniowym, przyjmując liniowo-sprężystą lub plastyczno-sprężystą analizę przyrostową [10]. Siatka elementów skończonych modelu dźwigara została

wygenerowana automatycznie i składała się z ponad 5000 trójkątnych sześciowzłowych izoparametrycznych elementów skończonych. Analizowany w tym eksperymencie wzrost pęknięcia podzielono na odcinki o długościach po 5 mm, które zrealizowano za pomocą programu FRANC2D (rys. 2e, f).



Rys. 2. Widok przyjętego schematu obliczeniowego dźwigara stalowego (a), rozmieszczenia otworów montażowych (b), modelu numerycznego środnika dźwigara (c), w obrębie otworów montażowych w środniku oraz pęknięcia z uwzględnieniem deformacji (d) dla materiału liniowego (e) i nieliniowego (f), na podstawie [13]

Fig. 2. A view of the adopted numerical model of a steel girder (a), distribution of assembly holes in a web girder (b), a numerical model (discretisation) of the whole web girder (c), a fragment of a numerical model of this web near assembly holes and two fracture types taking into account deformation of (d), linear (e) and non-linear material (f), based on [13]

Prowadząc propagację pęknięcia w środku dźwigara, wykorzystano dostępną w tym programie opcję automatycznego wyboru kierunku wzrostu długości pęknięcia. W przypadku wyboru tej opcji propagacji pęknięcia użytkownik oprogramowania podaje długość przyrostu pęknięcia Δa (w analizowanym przypadku pierwsze trzy kroki po 1 mm, następne po 5 mm) oraz określa liczbę iteracji zależną od długości pęknięcia a (125÷130 mm). Wielkość przyjętego przyrostu długości szczeliny Δa wpływa znacząco na wartość otrzymanych wyników symulacji komputerowych propagacji szczeliny zmęczeniowej. Jak podano w pracy [14], przyjęcie bardzo małych wartości Δa nie zapewnia automatycznie otrzymania wyników symulacji komputerowych zgodnych z wynikami z przeprowadzonego eksperymentu. Przyjęcie małych wartości Δa wiąże się również z wystąpieniem trudności podczas prowadzenia obliczeń numerycznych (włącznie z samoczynnym zamknięciem aplikacji FRANC2D).

W programie FRANC2D są dostępne trzy kryteria wyboru kierunku propagacji, a mianowicie:

- maksymalnych naprężeń obwodowych (SIG-THET MAX) [15],
- szybkości uwalniania energii (G MAX) [16],
- gęstości energii odkształcenia (S MIN) [17].

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki obliczeń przeprowadzonych tylko z zastosowaniem kryterium maksymalnych naprężeń obwodowych (opcja domyślna programu FRANC2D), ponieważ obliczenia wykonane według pozostałych kryteriów wyboru kierunku propagacji dawały bardzo zbliżone wyniki. W przypadku kryterium maksymalnych naprężeń obwodowych propagacja pęknięcia odbywa się wzdłuż kierunku wyznaczonego od wierzchołka szczeliny pod kątem θ , dla którego naprężenia σ_θ osiągają wartość maksymalną. Kryterium to zostało szczegółowo opisane m.in. w pracach [1, 14].

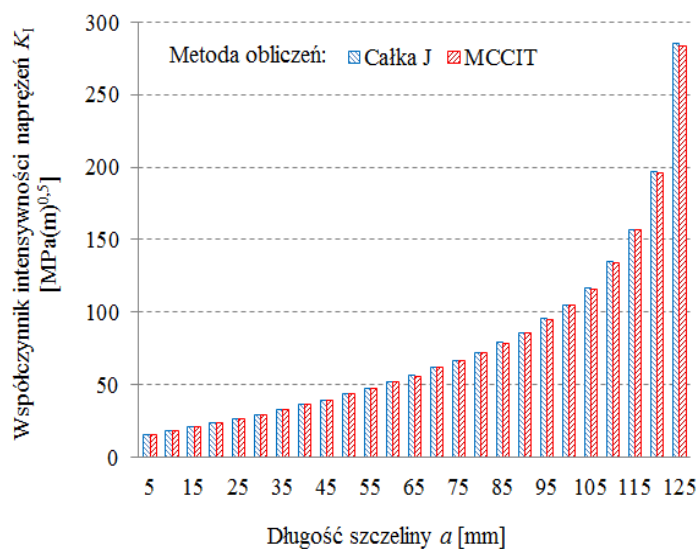
Uwalnianie węzłów podczas przyrostu długości pęknięcia Δa jest przeprowadzane w kilku etapach. Uwzględniając kierunek propagacji oraz wartość przyrostu długości pęknięcia Δa , program automatycznie usuwa węzły znajdujące się w pobliżu przewidywanego wierzchołka szczeliny zmęczeniowej. W miejscu tym (podobnie jak podczas inicjacji pęknięcia) wstawiany jest specjalny element skończony w postaci rozety składającej się z ośmiu trójkątnych elementów skończonych [8]. Następnie program automatycznie generuje dobrze uformowane elementy trójkątne typu T6 [3], uzupełniając brakujący fragment siatki elementów skończonych wokół wierzchołka szczeliny zmęczeniowej. Siatka jest generowana automatycznie i przedstawiona użytkownikowi do zatwierdzenia. Dzięki przyjętemu sposobowi modelowania można było uzyskać mapy odkształceń i naprężeń dla każdego analizowanego w eksperymencie przyrostu pęknięcia.

Do obliczeń przyjęto stal o parametrach wytrzymałościowych zbliżonych do gatunku S355, opisując ją dwiema charakterystykami materiałowymi, tj. liniową (o module Younga $E = 210$ GPa i współczynnikiem Poissona $\nu = 0,3$) oraz

nieliniową (o module Younga $E = 210$ GPa, współczynnika Poissona $\nu = 0,3$, granicy plastyczności $R_e = 355$ MPa, module umocnienia $E_{SH} = 2,7$ GPa [18]).

Program FRANC2D umożliwia wykonanie obliczeń wartości współczynnika intensywności naprężeń K za pomocą jednej z trzech metod, a mianowicie metody Modified Crack Closure Integral Technique (MCCIT), J -Integral (całki J) oraz Displacement Correlation Technique (DCT). W niniejszej pracy obliczenia zrealizowano, stosując jedynie metodę J -Integral, opisaną szczegółowo w pracy [8]. Program ten oblicza całkę J wykorzystując ekwiwalentny obszar całkowania [3]. Dokładną charakterystykę użytej metody całkowania zaprezentowano w pracy [8], nawiązując m.in. do opracowania [19], gdzie szczegółowo opisano zasadę tworzenia ekwiwalentnego obszaru całkowania oraz [20], gdzie omówiono zastosowanie metody wirtualnego przyrostu pęknięcia.

Określenie wartości zakresów współczynnika intensywności naprężeń ΔK jest niezwykle istotne, ponieważ na ich podstawie, wykorzystując m.in. równanie Parisa, można stosunkowo łatwo, znając liczbę cykli obciążeń, określić trwałość obiektu mostowego mającego wstępne pęknięcie zmęczeniowe o określonej długości.



Rys. 3. Porównanie wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I uzyskanych dla materiału liniowego za pomocą metod MCCIT i całki J , na podstawie [13]

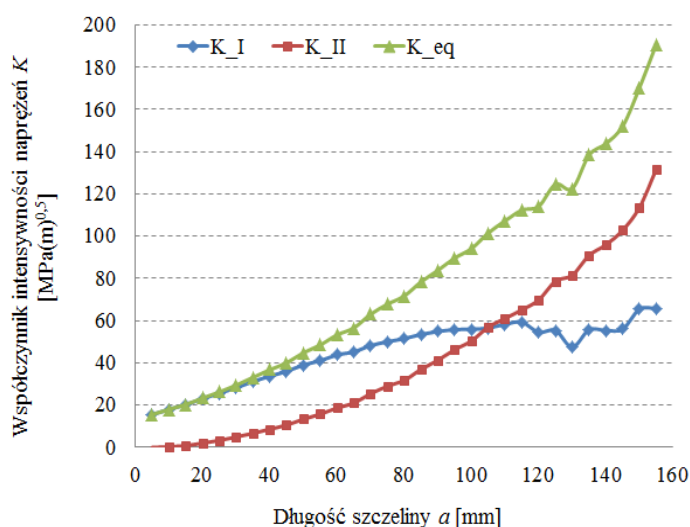
Fig. 3. Comparison of values of the stress intensity factor K_I obtained for linear material using MCCIT and J -integral method, based on [13]

4. Wyniki obliczeń i ich analiza

W pierwszym etapie badań nad propagacją pęknięcia do obliczeń przyjęto materiał o charakterystyce liniowej. Na rysunku 3. porównano wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I uzyskanych przy użyciu metody MCCIT (przy czym wyniki zaczerpnięto z pracy [13]) i metody całki J z zastosowaniem wzoru (5) dla materiału liniowego.

Uzyskane wartości współczynników intensywności naprężeń K_I oraz kierunku rozwoju analizowanego pęknięcia były niemal identyczne. W tym przypadku wartość współczynnika intensywności naprężeń dla II trybu pęknięcia K_{II} była zbliżona do zera i mogła być pominięta w dalszych obliczeniach zmęczeniowych.

Kolejne analizy wykonano, przyjmując w obliczeniach materiał o charakterystyce nieliniowej. Na rysunku 4. porównano wartości współczynnika intensywności naprężeń K uzyskane dla takiego materiału przy użyciu całki J i wzoru (5), zarówno dla I, jak i II trybu pęknięcia (K_I i K_{II}). Analizując te wykresy, zauważono, że przy przyjęciu w obliczeniach materiału nieliniowego wartość współczynnika intensywności naprężeń dla drugiej metody pęknięcia K_{II} jest na tyle duża, że nie powinna zostać pominięta w obliczeniach zmęczeniowych.



Rys. 4. Porównanie wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I uzyskanych dla materiału nieliniowego przy użyciu całki J i wzoru (5) dla I i II trybu pęknięcia oraz wartość ekwiwalentna

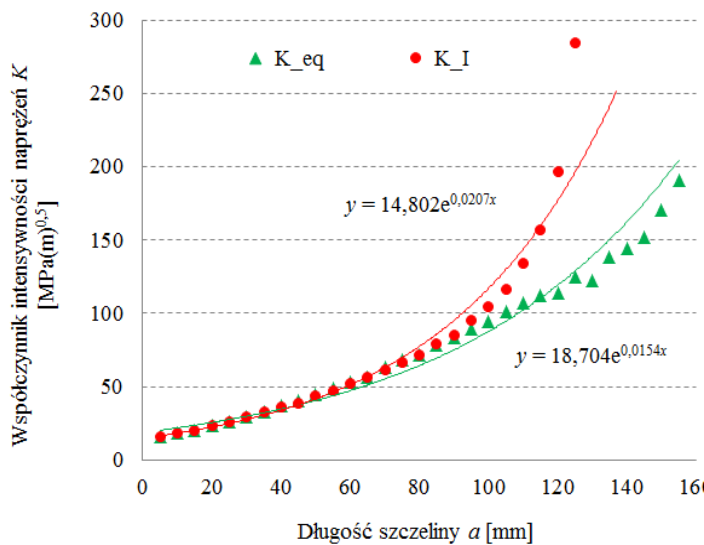
Fig. 4. Comparison of values of the stress intensity factor K_I obtained for non-linear material using the J -integral and formula (5) for cracking of modes I and II and its equivalent value K_{eq}

D. Rozumek w pracy [10] podaje również, że w przypadku złożonych stanów naprężenia należy posługiwać się naprężeniem ekwiwalentnym i zamiast K_I należy stosować ekwiwalentny współczynnik intensywności naprężeń K_{eq} . Następnie tę właśnie wielkość opisującą dany konkretny stan naprężenia w materiale należy porównać z odpornością materiału na kruche pęknięcie K_{Ic} .

W pracy zaprezentowano także tzw. *kryterium Pooka* na określenie wielkości ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężeń K_{eq} , dla mieszanego, tj. obejmującego I i II modę pęknięcia w formie wyrażenia (6) [10]:

$$K_{eq} = \cos \frac{\phi}{2} \left(K_I \cos^2 \frac{\phi}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \phi \right) \quad (6)$$

w którym kąt kierunku wzrostu pęknięcia ϕ występuje w zakresie od $-70,5^\circ$ do $+70,5^\circ$. Na rysunku 4. zaprezentowano również wykres wartości ekwiwalentnej współczynnika intensywności naprężeń K_{eq} określonej według kryterium Pooka [10], zgodnie ze wzorem (6).



Rys. 5. Porównanie wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I uzyskanego dla materiału liniowego i wartości ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężeń K_{eq} uzyskanego dla materiału nieliniowego z użyciem całki J i wzoru (5)

Fig. 5. Comparison of values of the stress intensity factor K_I obtained for linear material and the value of the equivalent stress intensity factor K_{eq} obtained for non-linear material, using the J -integral and formula (5)

Na rysunku 5. porównano wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I uzyskane dla materiału liniowego i wartości ekwiwalentnego współczynnika intensywności naprężeń K_{eq} uzyskane dla materiału nieliniowego za pomocą metody opartej na całce J i wzorze (5). Na uwagę zasługuje fakt, że do długości szczeliny równej ok. 100 mm wartości obu współczynników intensywności naprężeń były zbliżone do siebie, a zatem można było przyjąć, że był to okres stabilnego (powolnego) wzrostu wielkości szczeliny. Ewidentna różnica w wynikach tych wielkości zaczęła pojawiać się jednak już dla szczeliny o długości równej 120 mm. Stąd wydaje się, że na ten fakt istotny wpływ ma właśnie przyjęty model materiału konstrukcyjnego.

5. Podsumowanie

Przeprowadzone w pracy analizy wykazały, że przyjęcie określonych właściwości materiału ma istotny wpływ na wartości uzyskanych wyników obliczeń. W analizowanym przykładzie było to widoczne szczególnie w przypadku określenia kierunku propagacji pęknięcia ϕ (rys. 2e, f). Istotne dla praktyki inżynierskiej okazało się natomiast porównanie wyników wartości współczynnika intensywności naprężeń K_I dla materiału liniowego i jego wartości ekwiwalentnej K_{eq} dla materiału nieliniowego. Otrzymane wyniki potwierdziły, że przyjęcie materiału liniowego do analiz zmęczeniowych jest bardziej „konserwatywne”, a tym samym przez to bardziej bezpieczne dla konstrukcji inżynierskich.

Ponieważ prowadzenie badań doświadczalnych w zakresie obciążeń zmęczeniowych na tak dużych obiektach, jakimi są konstrukcje przęsł mostowych jest często niemożliwe (m.in. ze względów ekonomicznych), wydaje się zatem, że inżynierom (lub osobom odpowiedzialnym za eksploatację takich obiektów) pozostaje często przede wszystkim stosowanie metod numerycznych. Wiarygodność wyników tych obliczeń wzrasta wraz ze zwiększeniem liczby rozpatrywanych modeli obliczeniowych oraz użytych metod określania wartości współczynnika intensywności naprężeń K .

Uwzględniając przedstawione w pracy analizy, można stwierdzić, że zastosowanie programu FRANC2D do wyznaczania współczynnika intensywności naprężeń K w zastosowaniach stricte inżynierskich jest bardzo praktyczne, a przez to może być powszechnie stosowane przez inżynierów w analizach rozwoju już istniejących lub hipotetycznie występujących pęknięć zmęczeniowych w mostach stalowych.

Literatura

- [1] Nemitz. A.: Mechanika pęknięcia. Wydaw. Naukowe PWN, Warszawa 1998.
- [2] PN-EN 10027-1:2007: Systemy oznaczania stali. Cz. 1. Znaki stali.
- [3] Wawrzynek P., Ingraffea A.: FRANC2D. A two dimensional crack propagation simulator. User's Guide. Version 3.1.

-
- [4] Rice J.R.: A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, 1968, pp. 379-386.
- [5] Cherepanov G.P.: Crack propagation in continuous media. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 31, 1967, issue 3, pp. 503-512.
- [6] Eshelby J.D.: The force on an elastic singularity. *Phil. Trans. R. Soc., London* 1951, 244, pp. 87-112.
- [7] German J.: *Podstawy mechaniki pękania*. Politechnika Krakowska, Kraków 2011.
- [8] Ingraffea A.R., Wawrzynek P.: Finite element methods for linear elastic fracture mechanics. Chapter 3.1 in *Comprehensive Structural Integrity*, R. de Borst and H. Mang (eds). Elsevier Science, Oxford, England 2003.
- [9] Szata M.: *Opis rozwoju zmęczeniowego pękania w ujęciu energetycznym*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002.
- [10] Rozumek D.: *Mieszane sposoby pękania zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych*. Politechnika Opolska, Opole 2009.
- [11] Mańko Z., Kamyk Z., Zielonka M., Sadowski W.: *Racjonalizacja wykorzystania materiałów miejscowych do budowy mostów niskowodnych. Etap III: Badania poligonowe*. Praca Naukowo-Badawcza WIW/439, Wyższa Szkoła Oficerska im. gen. T. Kościuszki, Wrocław 2001.
- [12] Mańko Z., Duchaczek A.: *Badania niskocyklowe dwuteowników stalowych wykorzystywanych do budowy mostów niskowodnych. Cz. 1. Zeszyty Naukowe WSOW Łąd, nr 4, 2006, s. 54-65.*
- [13] Duchaczek A., Mańko Z.: *Ocena bezpośredniej metody określania wartości współczynnika intensywności naprężeń*. *Zeszyty Naukowe WSOW Łąd, nr 3, 2012, s. 336-346.*
- [14] Dolbow J.E.: *An extended finite element method with discontinuous enrichment for applied mechanics*. Ph.D. Thesis. December 1999, <http://dolbow.cee.duke.edu/phd.html> (13.11.2013).
- [15] Erdogan F., Sih G.C.: On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *ASME, Journal of Basic Engineering Trans.*, vol. 85(4), 1963, pp. 519-527.
- [16] Hussain M.A., Pu S.L., Underwood J.: *Strain energy release rate for a crack under combined mode I and II*. *Fracture Analysis*. American Society for Testing Materials. Committee E-24 on Fracture Testing of Metals. National Symposium on Fracture Mechanics, 1974, pp. 2-28.
- [17] Sih G.C.: *Strain-energy-density factor applied to mixed-mode crack problems*. *International Journal of Fracture*, vol. 10, 1974, pp. 305-321.
- [18] Simões da Silva L., Rebelo C., Nethercot D., Marques L., Simões R., Vila Real P.M.M.: *Statistical evaluation of the lateral-torsional buckling resistance of steel I-beams. Part 2: Variability of steel properties*. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 65, April 2009, issue 4, pp. 818-831.
- [19] Li F.Z., Shih C.F., Needleman A.: *A Comparison of Methods for Calculating Energy Release Rates*. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 21, 1985, issue 2, pp. 405-421.
- [20] Banks-Sills L., Sherman D.: *On the computation of stress intensity factors for three-dimensional geometries by means of the stiffness derivative and J -integral methods*. *International Journal of Fracture*, vol. 53, 1992, issue 1, pp. 1-20.

ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF FATIGUE CRACKS IN THE STEEL BRIDGE GIRDERS USING THE PROPERTIES OF INTEGRAL J

Summary

The main girders of spans in the military nonstandard fixed bridges are made mostly from steel sections available in a given area of the country. In a variety of crisis situations, these bridges are also used by the civilian population. The article is presented a concept of span structure of a military bridge in which screws were used in assembly of sway braces. This type of sway brace assembly requires holes in main girders which weaken their structure and thus the entire spans, especially the more that these holes are located in the stretch zone (extensions) of these girders and thus are a place of stress concentration, and can very quickly become a place of fatigue crack initiation. The paper is presented the results of calculations of the propagation of fatigue cracks growing in the main girders of steel bridges and extending from the mounting holes. Analyses were performed by using the computer software FRANC2D based on the FEM for the two adopted physical material models of structure, (linear and nonlinear) using the properties of the J-integral. Some more findings resulting from analyses conducted as part of this work encompass showing that the adoption of particular material properties has significant influence on the value of the obtained calculation results. In the analysed example, this was clearly visible when the value of the direction of crack propagation φ was determined. Another issue, which is essential from the perspective of engineering practice, was the comparison of the values of the stress intensity factor KI (and its equivalent value K_{eq}) for a linear material and a non-linear material. The obtained results confirmed that adoption of the linear material characteristics to fatigue analysis is more conservative, and thus a more safely for design of engineering structures.

Keywords: steel bridge, strength of materials, fatigue crack

Przesłano do redakcji: 02.03.2014 r.

Przyjęto do druku: 02.06.2014 r.

DOI:10.7862/rb.2014.2