

ANALIZA WPŁYWU POŁOŻENIA OTWORÓW MONTAŻOWYCH NA PRĘDKOŚĆ PROPAGACJI PĘKNIĘĆ ZMĘCZENIOWYCH W DŹWIGARACH MOSTÓW STALOWYCH

AN INFLUENCE ANALYSIS OF THE MOUNTING HOLES LOCALIZATION ON THE PROPAGATION RATE OF FATIGUE CRACKS IN STEEL BRIDGE GIRDERS

Artur Duchaczek – Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych imienia generała Tadeusza Kościuszki we Wrocławiu

Zbigniew Mańko – Międzynarodowa Wyższa Szkoła Logistyki i Transportu we Wrocławiu

W artykule dokonano oceny wpływu lokalizacji otworów montażowych wykonywanych w stalowych dźwigarach głównych mostów niskowodnych, na ich trwałość zmęczeniową poprzez analizę wartości współczynnika intensywności naprężeń K . Przedmiotem analiz był stalowy dwuteownik o wysokości 400 mm i długości całkowitej 5,60 m, dla którego wykonano model środnika umożliwiający prowadzenie obliczeń numerycznych z zastosowaniem oprogramowania FRANC2D.

This paper is presented an influence analysis of the mounting holes localization made in the steel girders of low-water bridges on their fatigue life by analyzing the stress intensity factor K . The subject of the analysis was the steel I-beam with a height of 400 mm and an overall length of 5.60 m. The computational model of the web was enabled an implementation of numerical calculations by using the software FRANC2D.

Wstęp

Obecnie, dla inżyniera podstawowym narzędziem do analizy konstrukcji są programy komputerowe wykorzystujące wybrane metody obliczeniowe. Jedną z najbardziej rozpowszechnionych metod komputerowych jest Metoda Elementów Skończonych (MES). Obszar stosowania tej metody w obrębie szeroko rozumianej mechaniki i wytrzymałości materiałów jest dość znaczny. Metoda MES zostaje wykorzystywana również w obszarze mechaniki pęknięcia do analizy rozwoju pęknięć zmęczeniowych w oparciu między innymi o wielkość zwaną współczynnikiem intensywności naprężeń K . W analizach zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych naukowcy często posługują się tak zwanym kryterium siłowym [1], które w przypadku rozwoju pęknięcia zmęczeniowego w jednoosiowym stanie obciążenia następuje, gdy współczynnik intensywności naprężenia K_I (dla pierwszego sposobu obciążenia) w obszarze wierzchołka pęknięcia osiągnie wartość krytyczną K_{Ic} , będącą odpornością materiału na kruche pęknięcie.

Przykładem oprogramowania, które pozwala na obliczanie wartości współczynnika intensywności naprężeń K może być aplikacja o nazwie FRANC2D umożliwiająca prowadzenie analiz dotyczących rozwoju pęknięć zmęczeniowych w konstrukcjach powierzchniowych (np. w tarczach). Jednocześnie zastosowanie w analizach zmęczeniowych tego programu komputerowego wymaga stworzenia stosunkowo prostego dwuwymiarowego modelu powierzchniowego.

Obiekty budowlane, to zazwyczaj skomplikowane konstrukcje inżynierskie o znacznych gabarytach. Zatem bezpośrednie wykorzystanie programu FRANC2D do analiz zmęczeniowych staje się z reguły znacznie utrudnione.

W przypadku tworzenia modeli uproszczonych newralgicznym punktem, oprócz wybrania sposobu podparcia (blokowania więzi na odpowiednich kierunkach), jest dobór rodzaju i wielkości obciążenia zastępczego wywołującego w wybranym fragmencie elementu konstrukcyjnego (budowli)

rozkładu naprężeń zgodnego z rozkładem naprężeń w modelu całego elementu konstrukcyjnego. W pracy [2] przedstawiono przykłady tworzenia uproszczonych modeli środnika dźwigara głównego mostu niskowodnego.

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę dotyczącą rozwoju pęknięć zmęczeniowych w obrębie otworów montażowych w środniku dwuteownika przy zastosowaniu oprogramowania FRANC2D dla jednego z przyjętych w pracy [2] modeli obliczeniowych. Bezpośrednim celem pracy jest ocena wpływu lokalizacji otworów montażowych wykonywanych w stalowych dźwigarach głównych mostów niskowodnych na ich trwałość zmęczeniową, poprzez analizę wartości współczynnika intensywności naprężeń K .

Model obliczeniowy dźwigara stalowego

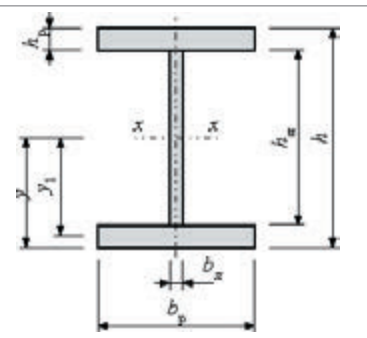
Do analiz numerycznych przyjęto stalowy dwuteownik INP 400 o długości całkowitej $l_c = 5,60$ m, na którym A. Duchaczek i Z. Mańko [3] przeprowadzili badania zmęczeniowe w roku 2006 w Laboratorium Badawczym Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej.

Przy wyborze tego dwuteownika kierowano się jego powszechną dostępnością na polskim rynku, szczególnie w gatunkach stali S235 i S355. Przyjęcie dźwigara o takiej długości z kolei wynikało przede wszystkim z faktu stosowania podobnych długości elementów w wojskowych mostach niskowodnych [4]. Przyjęta długość całkowita dźwigara umożliwiała analizę przęsła o rozpiętości teoretycznej równej $l_t = 5,00$ m oraz wynikała z możliwości wykonawczych polskiej armii, która posiada na swoim wyposażeniu m.in. urządzenia do baterijnego wbijania pali (UBWP) zamontowane na pontonach z parku PP-64, umożliwiające budowę podpór pośrednich właśnie w rozstawie osiowym 5,00 m.

Modelując analizowany dwuteownik, podobnie jak w pracach [2] i [5], dokonano pewnych korekt w jego geometrii, zaokrąglając niektóre jego wymiary do pełnych milimetrów

Tab. 1. Podstawowe wymiary dwuteownika przyjętego w procesie jego modelowania [5]

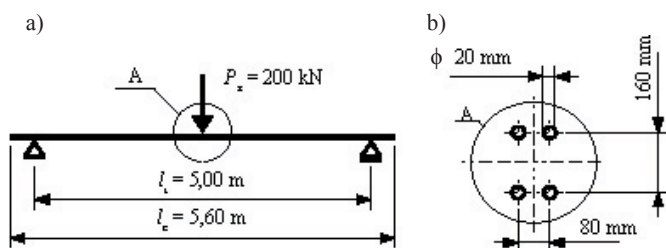
Lp.	Wyszczególnienie	Wielkości
1.	Wysokość dwuteownika h	400 mm
2.	Szerokość pasa b_p	156 mm
3.	Grubość środnika b_{sr}	14 mm
4.	Średnia grubość pasa h_p	22 mm
5.	Promień wyokrąglenia r	0 mm
6.	Moment bezwładności przekroju dwuteownika J_x	$298,10 \times 10^{-6} \text{ m}^4$
7.	Wskaźnik przekroju dwuteownika na zginanie W_x	$1490,51 \times 10^{-6} \text{ m}^3$
8.	Wskaźnik przekroju środnika na zginanie W_{zast}	$296,00 \times 10^{-6} \text{ m}^3$



(tab. 1). Dokonane modyfikacje miały jednak niewielki wpływ na końcowe wartości pola przekroju poprzecznego konstrukcji A , momentu bezwładności J_x oraz wskaźnika przekroju na zginanie W_x . Zastosowane korekty nie miały zatem znaczącego wpływu na końcowe wyniki prowadzonych analiz, a znacznie ułatwiły sam proces modelowania konstrukcji.

Według normy [6] wartość wskaźnika przekroju na zginanie W_x dla dwuteownika INP 400 wynosi 1460 cm^3 , a zatem przyjęty schemat dwuteownika przedstawiony w tabeli 1 charakteryzował się podobną „odpornością” na zginanie, co element rzeczywisty.

Modelując dźwigar stalowy przyjęto jego schemat statyczny w postaci belki swobodnie podpartej obciążonej siłą skupioną o wartości równej $P_z = 200 \text{ kN}$ ustawionej w połowie jego długości (rys. 1a). W połowie rozpiętości teoretycznej analizowanego dźwigara wykonano również cztery otwory montażowe zgodnie ze schematem zaprezentowanym na rysunku 1b.



Rys. 1. Schemat: a) statyczny dwuteownika przyjęty do obliczeń, b) rozmieszczenia otworów montażowych zlokalizowanych w środniku w połowie długości dwuteownika [2]

Badany element konstrukcyjny został zamodelowany jako ustrój powłokowy. Wpływ na wybrany rodzaj modelu obliczeniowego (zastosowane elementy skończone) miał fakt, że docelowo obliczenia zmęczeniowe wykonane zostały przy użyciu oprogramowania FRANC2D umożliwiającego wykorzystanie tylko powierzchniowych elementów skończonych.

W przypadku elementów powłokowych w procesie modelowania konstrukcji wykorzystano metodę siatkowania Coons z zastosowaniem przede wszystkim elementów powierzchniowych czworokątnych 4-węzłowych oraz trójkątnych 3-węzłowych tylko w obrębie otworów. Model ten zawierał 3455 elementów skończonych.

W procesie modelowania na większości obszaru kształtownika przyjęto maksymalny rozmiar elementu skończonego równy 50 mm oraz dokonywano także zagęszczania siatki elementów skończonych w obrębie analizowanych otworów montażowych, przyjmując liczbę węzłów na obwodzie koła (będącego konturem otworu) równą 100.



Rys. 2. Fragment mapy rozkładu naprężeń normalnych w obrębie otworów montażowych w środniku analizowanego dwuteownika dla modelu powłokowego [2]

Wartości naprężeń normalnych odczytywane były w strefie włókien rozciąganych w przekroju dwuteownika w połowie jego rozpiętości teoretycznej. Naprężenia te w obrębie otworów montażowych wynosiły; od strony podpory nieprzesuwnej $\sigma_{o1} = 204,69 \text{ MPa}$ i podpory przesuwnej $\sigma_{o2} = 208,84 \text{ MPa}$, a w pasie dolnym $\sigma_{max} = 163,79 \text{ MPa}$ oraz na połączeniu środnika z pasem dolnym $\sigma_{sr} = 144,43 \text{ MPa}$.

Na rysunku 2 zaprezentowano fragment mapy rozkładu naprężeń normalnych w obrębie otworów montażowych w środniku analizowanego dwuteownika. Ich analiza wykazała jednoznacznie, że otwory te są zdecydowanymi koncentratorami naprężeń.

Należy dodać, że maksymalny moment zginający w połowie rozpiętości analizowanej konstrukcji wynosił $M_{max} = 250 \text{ kNm}$, a odpowiadające mu maksymalne naprężenie normalne w pasie dolnym dwuteownika wynosiło $\sigma_{max} = 167,78 \text{ MPa}$.

Znając rozkład naprężeń w strefie rozciąganej badanego dwuteownika określono wartość naprężeń maksymalnych w jego środniku na poziomie $\sigma_{sr} = 149,33 \text{ MPa}$. Analizując zatem wartości naprężeń normalnych uzyskanych zarówno z obliczeń analitycznych, jak i analiz numerycznych stwierdzono, że dla celów praktyki inżynierskiej są one zbliżone na zadowalającym poziomie dokładności.

Uproszczony model obliczeniowy środnika

Wykorzystując uproszczony model obliczeniowy środnika dźwigara określono wartość momentu zastępczego M_{zast} jaki jest potrzebny aby wywołać maksymalne naprężenia normalne równe naprężeniom w połowie rozpiętości teoretycznej w modelu odwzorowującym pełny dwuteownik (tj. oba pasy i środnik) na połączeniu środnika z pasem dolnym (σ_{sr}):

$$M_{zast} = W_{zast} \sigma_{sr} = 44,20 \text{ kNm} \quad (1)$$

gdzie W_{zast} oznacza wartość wskaźnika przekroju środnika na zginanie (tab. 1).

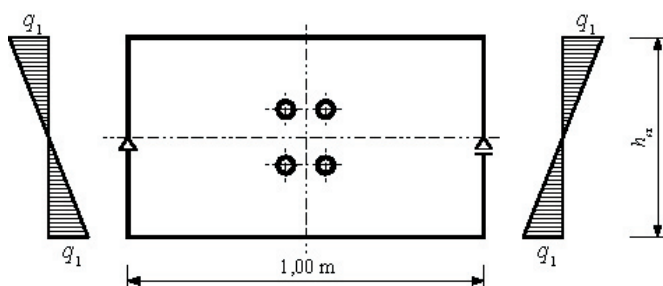
Uwzględniając rozkład naprężeń w środku dźwigara zginanego oraz wykorzystując regułę „pary sił” określono wartość siły skupionej P wywołującej w środku naprężenia o wartości odpowiadającej działaniu momentu zginającego M_{zast} :

$$P = \frac{3M_{zast}}{2h_{sr}} = 186,23 \text{ kN.} \quad (2)$$

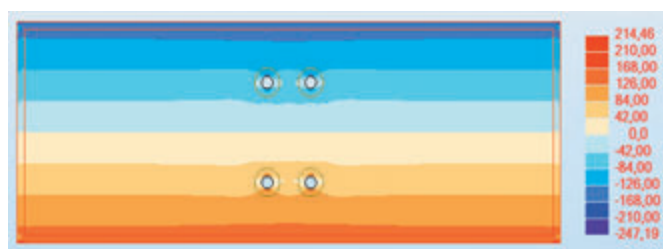
Następnie określono wartość obciążenia liniowo rozłożonego w kształcie trójkąta o maksymalnej wartości q_1 wywołującego w środku dźwigara naprężenia o wartości odpowiadającej działaniu momentu zginającego pochodzącego od pary sił skupionych P (2) według zależności (3):

$$q_1 = \frac{4P}{h_{sr}} = 2092,54 \text{ kN/m.} \quad (3)$$

Przyjęcie zatem schematu obliczeniowego pokazanego na rysunku 3 zapewniło wystąpienie w wybranym fragmencie środka naprężenia σ_{sr} zbliżonego do wartości naprężeń występujących w środku dźwigara zamodelowanego jako cały element konstrukcyjny wykonany z dwuteownika INP 400. Wykorzystując zaprezentowany schemat obliczeniowy dokonano obliczeń naprężeń normalnych w uproszczonym modelu środka dwuteownika stalowego.



Rys. 3. Schemat obciążenia fragmentu środka [2]



Rys. 4. Mapa rozkładu naprężeń normalnych w obrębie otworów montażowych w przyjętym modelu środka analizowanego dwuteownika [2]

Analizując mapę rozkładu naprężeń normalnych przedstawioną na rys. 4, jak i wartości naprężeń w punktach charakterystycznych analizowanego modelu, tzn. w skrajnych włóknach środka na połączeniu z pasem dolnym w połowie jego rozpiętości, które wynosiły $\sigma_{sr} = 153,06 \text{ MPa}$ oraz w obrębie otworów montażowych od strony podpory nieprzesuwnej $\sigma_{o1} = 209,26 \text{ MPa}$ i przesuwnej $\sigma_{o2} = 214,45 \text{ MPa}$, można uznać że przyjęty uproszczony schemat obliczeniowy (rys. 3) daje wartości zbliżone do wartości otrzymanych dla modelu obliczeniowego całego dwuteownika stalowego (rys. 2).

Przyjęty do obliczeń schemat obliczeniowy środka dźwigara miał jednak dość poważną wadę, gdyż pomijał bezpośredni

wpływ obciążenia skupionego P_z na rozkład naprężeń zarówno prostopadłych od osi obojętnej kształtownika, jak i naprężeń tnących w połowie długości dźwigara. Z tego względu w trakcie prowadzenia obliczeń zmęczeniowych dla takiego schematu obciążenia należało mieć na uwadze, że pominięcie wpływu siły skupionej P_z może mieć znaczny wpływ na uzyskane wyniki dotyczące prędkości rozwoju potencjalnych pęknięć zmęczeniowych rozwijających się bezpośrednio od otworów montażowych [7].

Wydaje się zatem, że aby wyniki obliczeń numerycznych prowadzonych przy użyciu oprogramowania komputerowego były wiarygodniejsze tzn. bardziej zbliżone do wyników uzyskanych z badań laboratoryjnych należało skorzystać również z jeszcze innego schematu obliczeniowego, co zostanie zrealizowane przez autorów w kolejnej ich pracy. Omawiane zjawisko może mieć szczególne znaczenie, jeżeli zamierza się uwzględnić zarówno pęknięcia rozwijające się według I, jak i II sposobu pęknięcia, a także mieszany układ złożony z obu tych stanów [1, 8, 9].

Określenie wartości współczynnika intensywności naprężeń K

Jednym z podstawowych parametrów wykorzystywanych podczas analiz związanych z oceną trwałości eksploatacyjnej obiektów stalowych, mających uszkodzenie o określonej wielkości, jest współczynnik intensywności naprężeń K . Należy mieć jednak na uwadze fakt, że dokładność analiz zmęczeniowych elementów konstrukcyjnych mostów stalowych uzależniona jest od dostępu do właściwych wzorów i programów umożliwiających jego obliczanie.

Znaczna część wzorów opisujących prędkość wzrostu pęknięć zmęczeniowych (np. wzory Parisa lub Formana) wykorzystuje współczynnik intensywności naprężeń K , i dlatego również w niniejszej pracy skupiono się nad określeniem tej właśnie wielkości. Przyjęto, że dostępne dane na temat wielkości wartości współczynnika intensywności naprężeń K oraz stałych materiałowych C i m występujących we wzorach Parisa w pełni umożliwiają określenie wpływu położenia otworów montażowych na trwałość zmęczeniową elementów składowych przęsła mostu stalowego.

Wszystkie obliczenia zmęczeniowe zrealizowano przy wykorzystaniu specjalistycznego programu FRANC2D (<http://www.cfd.cornell.edu/index.htm>) [10], który umożliwia wykonywanie obliczeń wartości współczynnika intensywności naprężeń K m.in. przy zastosowaniu metody korelacji przemieszczeń DCT (*Displacement Correlation Technique*) [11].

A. R. Ingraffea i P. Wawrzynek w pracy [11] (na podstawie pracy [12]) podali, że metoda korelacji przemieszczeń DCT jest jedną z najprostszych i historycznie jedną z pierwszych metod używanych do określania współczynnika intensywności naprężeń K , przy wykorzystaniu wyników uzyskanych metodą elementów skończonych. Jedno z możliwych rozwiązań w tej metodzie zakłada, że wartość współczynnika intensywności naprężeń K jest obliczana dla serii punktów zbliżających się do wierzchołka pęknięcia. Następnie sporządza się krzywą z otrzymanych rezultatów i ekstrapoluje się tę funkcję do r równego zero [11] (patrz też praca [8]).

Tworząc model obliczeniowy dźwigara stalowego założono, że krytyczna długość pęknięcia a znajdować się będzie w obszarze jego środka. Znając z kolei rozkład naprężeń

normalnych w zginanym dwuteowniku przyjęto, że dla potrzeb analizy propagacji szczeliny wystarczy przeanalizować tylko rozkład naprężeń w samym jego środku.

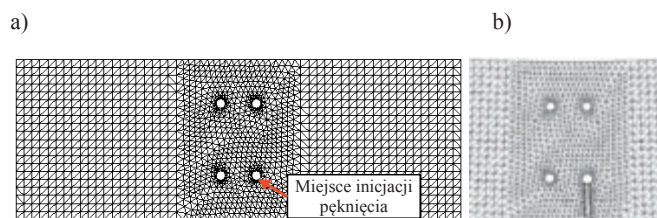
W tym przypadku do modelowania rozwoju pęknięcia stali w środku dźwigara wykorzystano program oparty na metodzie elementów skończonych FRANC2D, natomiast model geometryczny dźwigara oraz generację siatki elementów skończonych wykonano w programie CASCA (rys. 5) [10]. Ustalając metodykę prowadzonych obliczeń, podobnie jak w pracy [13], opierano się na metodologii opisanej szczegółowo przez D. Rozumka w pracy [9].

Tworząc uproszczony model obliczeniowy dźwigara (rys. 3) ograniczono się jedynie do modelowania jego środka. Model obliczeniowy analizowanego dźwigara został poddany obciążeniu liniowemu rozłożonemu po trójkącie q_1 (rys. 3), co wywołało w jego środku naprężenia normalne zbliżone do występujących w trakcie badań doświadczalnych w rzeczywistym dźwigarze przy obciążeniu skupionym o wielkości 200 kN [3]. W modelu tym przyjęto jedno podparcie przegubowo-przesuwne (odebrany został jeden stopień swobody) i jedno przegubowo-nieprzesuwne (odebrano dwa stopnie swobody) umiejscowione w osi obojętnej środka.

W modelu obliczeniowym dźwigara w programie FRANC2D pęknięcie zainicjowano na krawędzi dolnego prawego otworu montażowego w postaci szczeliny przebiegającej na wskroś grubości środka o długości 2 mm (rys. 5). Wierzchołek szczeliny został zamodelowany z użyciem elementów skończonych w postaci rozety, składającej się z ośmiu trójkątnych elementów skończonych, a w każdym z nich występowało po sześć węzłów [11]. Początkowa minimalna liczba elementów skończonych na długości pęknięcia wynosiła dwa.

Obliczenia przeprowadzono przyjmując liniowo-sprężystą analizę przyrostową. Siatka elementów skończonych modelu dźwigara została wygenerowana automatycznie i składała się z ponad 3200 trójkątnych sześciowęzłowych izoparametrycznych elementów skończonych. Analizowany w tych badaniach wzrost długości pęknięcia podzielono na odcinki o długościach po 5 mm, które zrealizowano za pomocą programu FRANC2D (rys. 5b). Obliczenia przeprowadzono dla pięciu schematów obliczeniowych, różniących się położeniem otworów montażowych. Przyjęto, że rozstaw osiowy otworów montażowych wzdłuż osi podłużnej dźwigara jest stały i wynosi 80 mm, natomiast odległość otworów montażowych od osi obojętnej przekroju w kierunku włókien rozciąganych lub ściskanych zmieniała się skokowo co 20 mm, to znaczy wynosiła odpowiednio: 40, 60, 80, 100, 120 mm.

Prowadząc analizę propagacji pęknięcia w środku dźwigara wykorzystano dostępną w tym programie opcję automa-



Rys. 5. Widok: a) modelu numerycznego środka przy rozmieszczeniu otworów montażowych w odległości 80 mm od osi obojętnej dźwigara, b) środka w obrębie otworów montażowych oraz pęknięcia zmęczeniowego z uwzględnieniem deformacji

tycznego wyboru kierunku wzrostu długości pęknięcia φ . Do obliczeń przyjęto stal o parametrach wytrzymałościowych zbliżonych do gatunku S235 (St3S), opisując ją jako materiał liniowy o module Younga $E = 210$ GPa i współczynniku Poissona $\nu = 0,3$.

Wyniki oraz ich analiza

Na wykresach przedstawionych na rysunku 6 zaprezentowano wyniki obliczeń propagacji szczeliny zmęczeniowej przy stałej wartości obciążenia równej $q_1 = 2,09$ kN/mm (3). Obliczeń wielkości współczynnika intensywności naprężeń K dokonano dla otworów montażowych położonych w odległości 40, 60, 80, 100 i 120 mm od osi obojętnej dźwigara.

Na rysunku 7 zaprezentowano wyniki obliczeń wartości współczynnika intensywności naprężeń K w zależności od długości tzw. szczeliny zastępczej a_z , obliczanej jako suma rzeczywistej długości szczeliny zmęczeniowej a i odległości danego (rozważanego) otworu montażowego od otworu montażowego umieszczonego w odległości 40 mm od osi obojętnej. Stąd, dla otworów montażowych położonych w odległości 40 mm od osi obojętnej kształtownika, długość szczeliny zastępczej a_z była równa długości szczeliny rzeczywistej a .

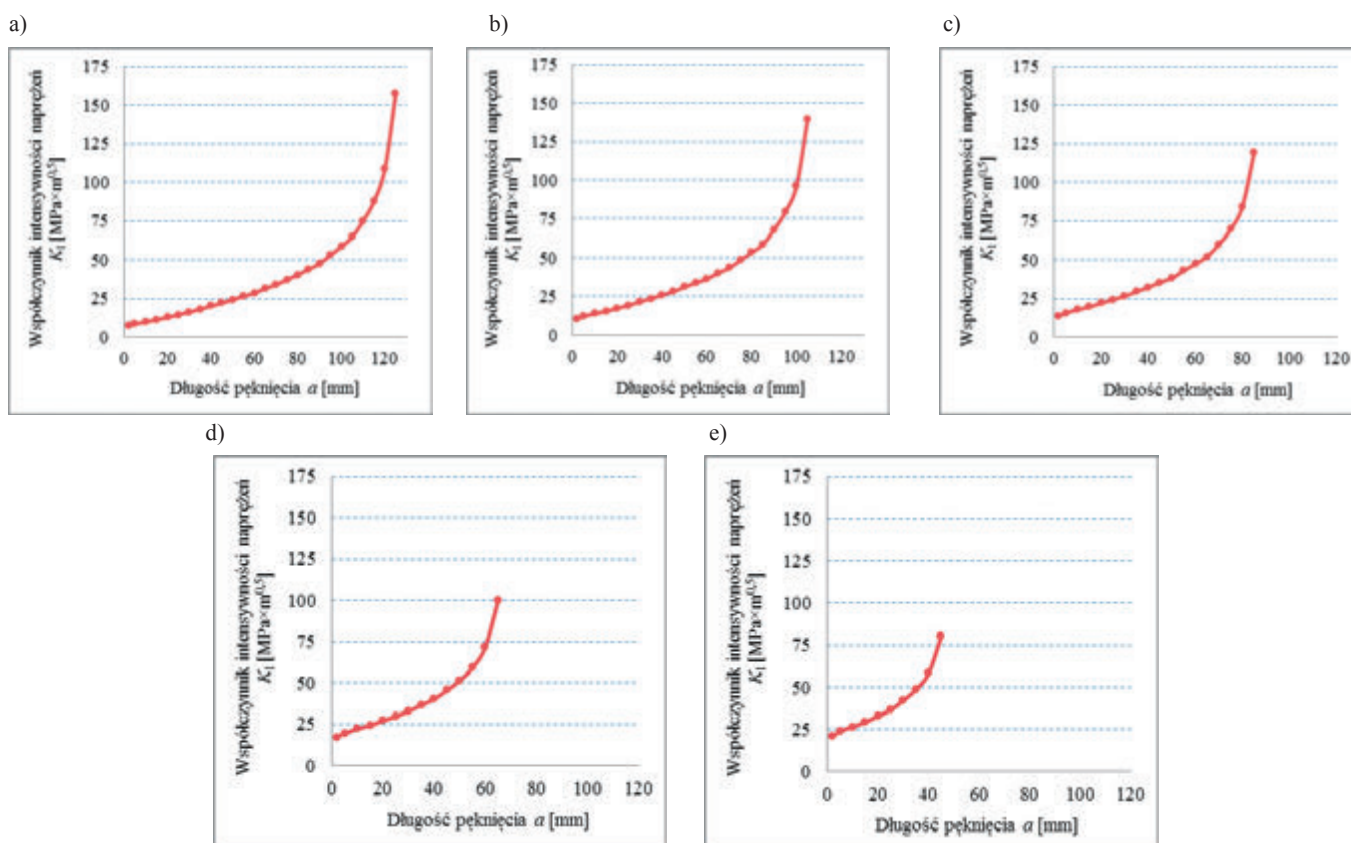
Analizując wykresy zaprezentowane na rysunku 7 stwierdzono, że zwiększenie odległości położenia otworów montażowych od osi obojętnej środka wpływa korzystnie na wartość współczynnika intensywności K . Można zatem stwierdzić, że odsunięcie otworów montażowych od osi obojętnej przekroju wpływa korzystnie na trwałość propagacyjną pęknięć zmęczeniowych rozwijających się od otworów montażowych (4). Przykładowo dla szczeliny o długości zastępczej $a_z = 90$ mm, wartość współczynnika intensywności naprężeń K dla otworów montażowych umieszczonych w odległości 120 mm od osi obojętnej środka jest dwukrotnie mniejsza niż dla otworów umieszczonych w odległości 40 mm od tej samej osi. Oczywiście zwiększenie odległości położenia otworów montażowych wpływa niekorzystnie na możliwość wystąpienia inicjacji takiego pęknięcia [5], ale to zagadnienie nie jest przedmiotem rozważań w niniejszej pracy.

Analiza wyników obliczeń zaprezentowanych na rysunku 7 oznacza, że prowadzenie obliczeń prędkości propagacji pęknięć zmęczeniowych w oparciu tylko o schemat rozmieszczenia otworów umieszczonych w odległości 40 mm od osi obojętnej [7] jest bardzo „konserwatywne”, i dlatego może być wykorzystane tylko do wstępnej oceny zmęczeniowej tego typu pęknięć.

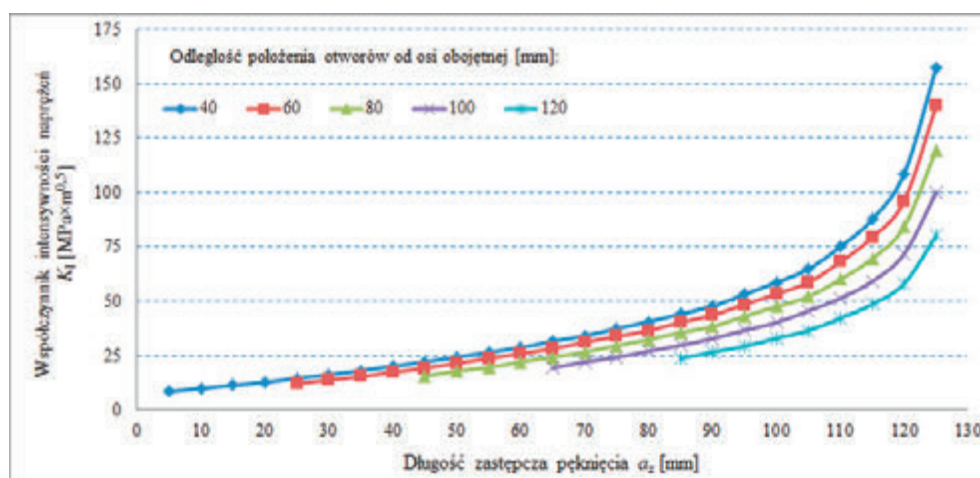
Większość równań opisujących prędkość wzrostu wielkości szczeliny zmęczeniowej w analizowanym elemencie konstrukcyjnym otrzymuje się na podstawie wyników uzyskanych z badań eksperymentalnych. Zarówno wyniki otrzymane z badań laboratoryjnych, jak i obserwacje użytkowanych rzeczywistych obiektów mostowych wykazują, że uszkodzenia zmęczeniowe mierzone, zazwyczaj długością szczeliny a , są efektem oddziaływania bardzo wielu czynników [1]. Jednak spośród wielu zależności opisujących powyższy proces najczęściej używa się *równania Parisa* w formie ogólnej (4) [1]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m, \quad (4)$$

gdzie C i m są to stałe materiałowe uzyskane na podstawie badań laboratoryjnych.



Rys. 6. Wyniki obliczeń propagacji szczeliny zmęczeniowej w zależności od odległości położenia otworów montażowych od osi obojętnej dźwigara wynoszącej: a) 40, b) 60, c) 80, d) 100 i e) 120, mm



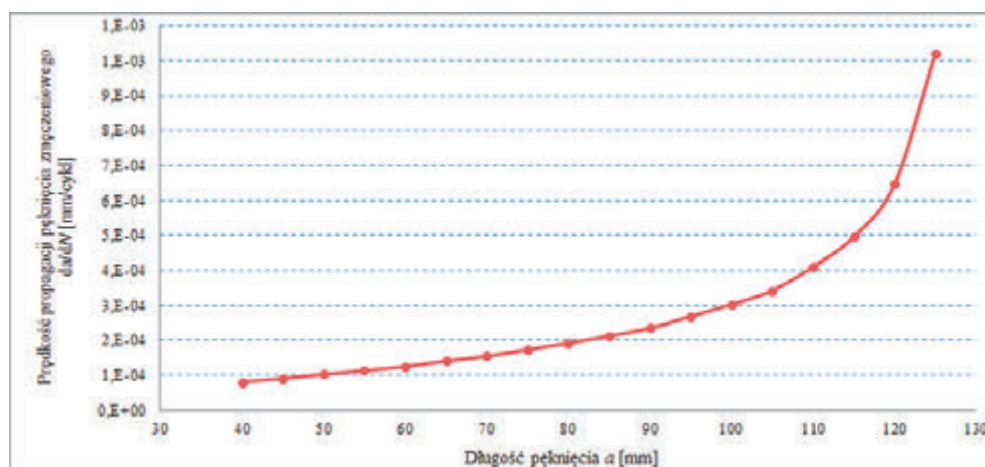
Rys. 7. Wyniki obliczeń propagacji szczeliny zmęczeniowej dla różnych odległości położenia otworów montażowych od osi obojętnej dźwigara

E. Kumańska i P. Kossakowski w pracy [14] zaprezentowali wyniki badań, na podstawie których wyznaczono prędkości wzrostu pęknięcia próbek wykonanych ze stali St3S, dla której średnie wartości granicy plastyczności R_e i wytrzymałości doraźnej R_m wyniosły odpowiednio: 298 MPa oraz 448 MPa. Przeprowadzona przez nich analiza statystyczna z zastosowaniem metody regresji pozwoliła na wyznaczenie krzywych $da/dN(\Delta K)$ dla badanego gatunku stali, zgodnie z równaniem Parisa (4), uzyskując średnie wartości współczynników materiałowych z tego równania równe $m = 1,233$ oraz $C = 2 \times 10^{-6}$ (dla $\log(\Delta K) > 1,45$) [14].

W przypadku eksploatacji dźwigarów stalowych w mostach wojskowych zazwyczaj ma się do czynienia z cyklem obciążeń

zbliżonym do tętniących. Wynika to bezpośrednio m.in. z faktu, że w tego typu obiektach występuje stosunkowo niewielki ciężar własny konstrukcji przęsła w porównaniu do przenoszonego obciążenia użytkowego. Można zatem z pewnym przybliżeniem założyć, że zakres zmienności współczynnika intensywności naprężeń ΔK jest równoważny z maksymalną wartością współczynnika intensywności naprężeń K .

Na rysunku 8 zaprezentowano przykładowy wykres prędkości wzrostu szczeliny zmęczeniowej w funkcji jej długości a . Analizie poddano szczelinę propagującą od otworów montażowych wykonanych w odległości 40 mm od osi obojętnej dwuteownika. Obliczenia zrealizowano w oparciu o równanie



Rys. 8. Wykres prędkości wzrostu szczeliny zmęczeniowej da/dN w zależności od jej długości a

(4), z wykorzystaniem stałych materiałowych zaczerpniętych z pracy [14]. Biorąc pod uwagę przedstawione tam ograniczenia ($\log(\Delta K) > 1,45$) początek wykresu pokazanego na rysunku 8 rozpoczęto od wielkości szczeliny zmęczeniowej a równej 40 mm, dla której, dla przyjętego schematu obciążenia, wartość zakresu zmienności współczynnika intensywności naprężeń wynosiła $\Delta K = 20,19 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-0,5}$.

Analiza wyników zaprezentowanych na rysunkach 6a i 7 potwierdza wniosek, że wzrost długości szczeliny zmęczeniowej powoduje zwiększenie wartości współczynnika intensywności naprężeń K , a to przekłada się bezpośrednio na wzrost prędkości propagacji powstałej szczeliny (rys. 8), co w konsekwencji powoduje błyskawiczny i niekontrolowany wzrost pęknięcia zmęczeniowego (III faza kinematycznego wykresu pęknięcia [1]).

Podsumowanie

Realizacja pełnej analizy wytrzymałościowej dźwigara stalowego z otworami montażowymi jest trudna do osiągnięcia w wyniku rozważań opartych tylko o tradycyjne metody analityczne, i dlatego do tego celu wykorzystywane są obecnie zazwyczaj metody komputerowe.

W Wyższej Szkole Oficerskiej Wojsk Lądowych we Wrocławiu od kilku lat prowadzone są zarówno badania poligonowe,

jak i analizy numeryczne, dotyczące stalowych mostów niskowodnych. Badania te dotyczą zarówno wprowadzania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, jak również oceny trwałości zmęczeniowej tych konstrukcji i ich połączeń montażowych.

Literatura przedmiotu dotycząca projektowania konstrukcji przeszłonowych mostów niskowodnych z zastosowaniem kształtowników stalowych jest stosunkowo uboga. Aktualnie obowiązujący podręcznik „Mosty wojskowe” [4] zawiera kilka bardzo ciekawych i racjonalnych rozwiązań wykorzystania kształtowników stalowych, ale nie przedstawia on analizy efektywności tych rozwiązań pod względem trwałości konstrukcji.

W aktualnie dostępnej literaturze przedmiotu brak jest wyników analiz uwzględniających wpływ otworów montażowych na wytrzymałość zmęczeniową dźwigarów stalowych mostów niskowodnych. W wyniku przeprowadzonych badań uzyskano w sposób pośredni (tj. poprzez analizę zmiany wartości współczynnika intensywności naprężeń K) odpowiedź na pytanie, jaki jest wpływ lokalizacji otworów montażowych na prędkość propagacji hipotetycznych pęknięć zmęczeniowych.

Określenie nowych procedur projektowych uwzględniających to zagadnienie pozwoli na zwiększenie poziomu dopuszczalnego wyężenia konstrukcji przeszł, a co za tym idzie, także na zwiększenie ekonomiki projektowania nowych konstrukcji mostów niskowodnych.

Literatura

- [1] German J., *Podstawy mechaniki pęknięcia*. Politechnika Krakowska, Kraków 2011
- [2] Duchaczek A., *Simplified models of calculation of webs in low-water bridge girders*. Selected Engineering Problems, vol. 4, 2013. Redakcja czasopisma Selected Engineering Problems, grudzień 2013
- [3] Mańko Z., Duchaczek A., *Badania niskocyklowe dwuteowników stalowych wykorzystywanych do budowy mostów niskowodnych*. Cz. 1. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych, 2006, nr 4, s. 54–65
- [4] *Mosty wojskowe. Podręcznik*. Ministerstwo Obrony Narodowej, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Warszawa 1994, sygn. inż. 563/92
- [5] Duchaczek A., Mańko Z., *Optymalizacja położenia otworów montażowych w dźwigarach stalowych mostów niskowodnych*. Redakcja Zeszytów Naukowych Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych, marzec 2013
- [6] PN-91/H-93407: *Stal. Dwuteowniki walcowane na gorąco*
- [7] Duchaczek A., Mańko Z., *Analiza rozwoju pęknięć zmęczeniowych w stalowych dźwigarach mostów niskowodnych*. Redakcja Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, kwiecień 2013
- [8] Nemitz A., *Mechanika pęknięcia*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1998
- [9] Rozumek D., *Mieszane sposoby pęknięcia zmęczeniowego materiałów konstrukcyjnych*. Politechnika Opolska, Opole 2009
- [10] Wawrzynek P., Ingraffea A., *FRANC2D. A Two Dimensional Crack Propagation Simulator. User's Guide. Version 3.1.* [online].[dostęp:

- 26.06.2012]. Dostępny w Internecie: http://www.cfd.cornell.edu/software/software_documentation.htm
- [11] 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 Ltd., Oxford, England, 2003. online]. [dostęp: 26.06.2012]. Dostępny w Internecie: <http://www.cfd.cornell.edu/education/education.htm>
- [12] Chan S. K., Tuba I. S., Wilson W. K., *On the Finite Element Method in Linear Fracture Mechanics*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 2, 1970, pp. 1–17
- [13] Duchaczek A., Mańko Z., *Ocena bezpośredniej metody określania wartości współczynnika intensywności naprężeń*. Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Oficerskiej Wojsk Lądowych, Wrocław 2012, nr 3/2012, s. 336–346
- [14] Kumańska E., Kossakowski P., *Podkrytyczny wzrost pęknięcia zmęczeniowego stali St3S oraz stuletniej stali mostowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 276, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 58 (3/11/II), s. 365–372

