

TOMASZ SIWOWSKI¹⁾

PROCEDURA OCENY ZMĘCZENIA POMOSTÓW METALOWYCH W OBIEKTACH MOSTOWYCH

STRESZCZENIE. Pomosty są jednymi z najbardziej podatnych na uszkodzenia elementów obiektami mostowymi. W przypadku pomostów metalowych do najczęstszych uszkodzeń należą pęknięcia zmęczeniowe i dlatego ocena ich zmęczenia jest jedną z ważniejszych procedur projektowych. W artykule opisano główne etapy procedury oceny zmęczenia pomostów metalowych według Eurokodów, bazując na metodzie bezwarunkowej żywotności, zastosowanej w konwencji naprężeń nominalnych. Przedstawiono także przykład zastosowania tej procedury do oceny zmęczenia pomostu aluminiowego. Na podstawie analizy numerycznej i obliczeń zmęczeniowych ustalono i omówiono główne czynniki wpływające na nośność zmęczeniową pomostu. Przedstawiona procedura może być stosowana analogicznie w ocenie zmęczenia dowolnego pomostu metalowego.

SŁOWA KLUCZOWE: aluminium, Eurokody, most, nośność zmęczeniowa, pomost metalowy

1. WSTĘP

Pomosty są jednymi z najbardziej podatnych na uszkodzenia elementów obiektami mostowymi. Każdy z współcześnie stosowanych typów pomostów lub płyt pomostowych (żelbetowych, metalowych, kompozytowych, hybrydowych, itp.) ma określony rodzaj uszkodzeń, powodujących znaczne zmniejszenie lub ograniczenie jego trwałości [1]. W przypadku pomostów metalowych (stalowych, aluminiowych) do

¹⁾ dr hab. inż. – profesor na Wydziale Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej

takich uszkodzeń należą głównie rysy i pęknięcia zmęczeniowe, powstające zazwyczaj w tzw. karbach konstrukcyjnych, którymi są najczęściej połączenia spawane pomiędzy elementami pomostów [2], [3]. Uszkodzenia te powodują stopniową utratę sztywności pomostów oraz szybką degradację izolacji i nawierzchni, co prowadzi do zmniejszenia trwałości całego obiektu i wzrostu kosztów jego utrzymania. Dlatego ocena zmęczenia pomostów metalowych jest jedną z ważniejszych procedur projektowych, których przeprowadzenie – przy zastosowaniu spójnego systemu norm konstrukcyjnych (ang. *code checking*) – jest konieczne zarówno w przypadku nowo projektowanych obiektów mostowych, jak również przy ocenie dalszej przydatności eksploatacyjnej obiektów istniejących.

Od kwietnia 2010 r., wraz z wycofaniem ze zbioru aktualnych norm krajowych dotychczasowych norm służących do projektowania mostów, status aktualnych polskich norm mają tzw. Eurokody konstrukcyjne wraz z załącznikami krajowymi. Procedura oceny zmęczenia spawanych pomostów metalowych jest oparta na zaleceniach Eurokodów 1, 3 i 9 [4 - 6]. Metody oceny zmęczenia podane w Eurokodach opierają się na ogólnej zasadzie, polegającej na porównaniu efektów oddziaływań w postaci zakresów naprężeń w sprawdzanym przekroju (połączeniu) do wytrzymałości zmęczeniowej tego karbu. Takie porównanie jest możliwe tylko wtedy, gdy oddziaływania zmęczeniowe są określane za pomocą parametrów zmęczeniowych podanych w Eurokodach. Oddziaływania do oceny zmęczenia przyjmuje się zgodnie ze specyficznymi wymaganiami, które są różne od oddziaływań przyjmowanych przy sprawdzaniu innych stanów granicznych nośności i użyteczności [4]. Ocenę zmęczenia konstrukcji metalowych wg Eurokodów przeprowadza się stosując jedną z następujących metod: metodą bezwarunkowej żywotności (ang. *safe life design*) lub metodą tolerowanych uszkodzeń (ang. *damage tolerant design*). Metoda bezwarunkowej żywotności zapewnia odpowiednią niezawodność konstrukcji bez konieczności regularnych kontroli na okoliczność uszkodzeń zmęczeniowych w okresie eksploatacji. Metodę tę stosuje się, gdy lokalne pęknięcie mogłyby doprowadzić do zniszczenia elementu i/lub konstrukcji. Metoda tolerowanych uszkodzeń zapewnia odpowiednią niezawodność konstrukcji pod warunkiem, że w okresie eksploatacji konstrukcja jest poddawana cyklicznej kontroli i zabiegom utrzymaniowym, mającym na celu wykrycie i usunięcie uszkodzeń zmęczeniowych. Obie normy dopuszczają także stosowanie metody oceny zmęczenia za pomocą badań (ang. *design by testing*). Jednakże metoda ta jest stosowana tylko wówczas, gdzie dane konieczne do oceny zmęczenia, np. obciążenie zmęczeniowe, poziomy naprężeń w konstrukcji odpowiadające tym obciążeniom, wytrzymałość zmęczeniowa detali lub dane dotyczące propagacji rys, nie są dostępne w Eurokodach lub innych źródłach naukowych. W projektowaniu nowych konstrukcji metalowych powszechnie jest stosowana metoda bezwarunkowej żywotności, będąca najbardziej konserwatywną, lecz zapewniającą maksymalną niezawodność projektowanej konstrukcji. Metodę tolerowanych uszkodzeń stosuje się tylko w przypadku, gdy żywotność zmęczeniowa wyznaczona dla projektowego widma obliczeniowego metodą bezwarunkowej żywotności jest krótsza od projektowanego okresu eksploatacji konstrukcji.

Stalowe pomosty ortotropowe to powszechnie znane i najczęściej stosowane rozwiązania konstrukcyjne wśród pomostów metalowych. Problematyka ich nośności zmęczeniowej była przedmiotem bardzo licznych badań, których wyniki posłużyły do ustalenia wytrzymałości zmęczeniowej elementów i typowych karbów w tego typu pomostach [7 - 10]. Pomosty aluminiowe są wykonywane w obiektach mostowych od ponad 75 lat [11]. Współczesne pomosty aluminiowe drogowych obiektów mostowych są wykonywane z aluminiowych kształtowników wyciskanych, łączonych w panele przez spawanie, zgrzewanie tarciove lub za pomocą łączników mechanicznych [12]. Jak wykazały liczne badania, zmęczenie jest zazwyczaj decydującym stanem granicznym nośności aluminiowych pomostów obiektów mostowych [3], [13 - 16]. Zatem w obu przypadkach właściwa ocena zmęczenia już na etapie projektowania pomostu może okazać się decydująca dla trwałości obiektu mostowego. W pracy opisano główne etapy procedury oceny zmęczenia pomostów metalowych na podstawie Eurokodów, bazując na metodzie bezwarunkowej żywotności. Przedstawiono także przykład zastosowania tej procedury do oceny zmęczenia typowego pomostu aluminiowego, zaprojektowanego na podstawie badań przeprowadzonych przez autora [12]. Na podstawie obliczeń numerycznych i zmęczeniowych ustalono główne czynniki wpływające na nośność zmęczeniową pomostu metalowego. Opisana procedura może być stosowana analogicznie w ocenie zmęczenia dowolnego pomostu metalowego.

2. OCENA ZMĘCZENIA POMOSTÓW METALOWYCH WEDŁUG EUROKODÓW

Procedura oceny zmęczenia pomostów metalowych za pomocą metody bezwarunkowej żywotności składa się z następujących głównych etapów:

- identyfikacja miejsc w konstrukcji, wrażliwych na zmęczenie (tzw. karbów),
- ustalenie zdarzeń obciążających, tj. określonej sekwencji obciążenia konstrukcji, powodującej przyrost w historii naprężeń, która zwykle powtarza się określoną liczbę razy podczas eksploatacji konstrukcji,
- analiza historii naprężeń, tj. rejestr lub obliczenie zmienności naprężeń, w miejscach wrażliwych na zmęczenie, podczas każdego zdarzenia obciążającego,
- wyznaczenie widma zakresów zmienności naprężeń za pomocą jednej z metod zliczania cykli oraz wyznaczenie widma obliczeniowego,
- wybór stosownej kategorii zmęczeniowej (tj. wytrzymałości zmęczeniowej) dla miejsc wrażliwych na zmęczenie oraz wyznaczenie żywotności obliczeniowej dla poszczególnych zakresów zmienności naprężeń z widma obliczeniowego,
- obliczenie liniowej kumulacji uszkodzeń D_L za pomocą reguły Palmgren - Minera,
- obliczenie bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej i sprawdzenie, czy jest dłuższa od projektowanego okresu eksploatacji konstrukcji.

Każdy z głównych etapów procedury oceny zmęczenia scharakteryzowano za pomocą metody bezwarunkowej żywotności w zastosowaniu do pomostów metalowych obiektów mostowych.

Identyfikacja miejsc wrażliwych na zmęczenie (karbów) w stalowych pomostach ortotropowych bazuje na opisach karbów, ujętych w tablicach 8.8 i 8.9 Eurokodu 3-1-9 [5]. Według tego normatywu ocenie zmęczenia podlegają następujące karby konstrukcyjne:





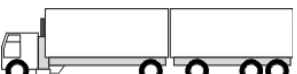
- połączenie spawane żebra podłużnego z poprzecznicą oraz przekrój żebra po obu stronach poprzecznicy,
- połączenie spawane żebra podłużnego na długości (tylko w przypadku żeber zamkniętych),
- przekrój krytyczny w środku poprzecznicy w miejscu otworu do przepuszczenia żebra podłużnego,
- połączenie spawane blachy pomostu z żebrą podłużnym.

Do oceny zmęczenia wykorzystuje się zakresy zmienności naprężeń w żebrach podłużnych i w środkach poprzecznic przy połączeniach obu elementów pomostu, a także zakres zmienności naprężeń w blasze pomostu w połączeniu z żebrami podłużnymi. Natomiast we współczesnych spawanych pomostach aluminiowych miejscami wrażliwymi na zmęczenie są spoiny czołowe jednostronne lub dwustronne płyty górnej i dolnej kształtowników wyciskanych, obciążone poprzecznie lub podłużnie do kierunku osi spoiny. Karby te opisano w tablicach J-5 i J-7 Eurokodu 9-1-3 [6].

Ustalenie zdarzeń obciążających, tj. określonej wielkości i sekwencji obciążenia pomostu należy wykonać zgodnie z Eurokodem 1-2 [4]. Do oceny zmęczenia konstrukcji mostowych Eurokod ten zaleca aż pięć modeli obciążeń zmęczeniowych, składających się z różnych układów sił pionowych. Modele obciążeń zmęczeniowych nr 1, 2 i 3 są zalecane do stosowania przy wyznaczaniu naprężeń maksymalnych i minimalnych w miejscach wrażliwych na zmęczenie. Natomiast modele nr 4 i 5 są zalecane do stosowania przy wyznaczaniu widm zakresów naprężeń wywołanych przejazdem samochodów ciężarowych o charakterystykach opisanych w tych modelach. Ponadto modele nr 1 i 2 służą głównie do sprawdzania czy trwałość zmęczeniowa konstrukcji mostowej może być uznana za nieograniczoną przy danej stałej granicy amplitudy naprężeń zmęczeniowych. Natomiast modele nr 3, 4 i 5 są stosowane w ocenie trwałości zmęczeniowej elementu przez odniesienie efektu oddziaływań do krzywych zmęczeniowych podanych w Eurokodach 3 i 9. Dlatego w procedurze oceny zmęczenia pomostów metalowych przyjęcie tych właśnie modeli jest najbardziej odpowiednie. Model nr 3 jest stosowany do bezpośredniego sprawdzania konstrukcji pomostu metodami uproszczonymi, w których wpływ rocznego natężenia ruchu i niektórych wymiarów konstrukcji jest uwzględniany w postaci zależnego od materiału (stal, aluminium) współczynnika dostosowawczego. Model nr 4 jest dokładniejszy niż model nr 3 w przypadku zróżnicowanego natężenia ruchu. Natomiast model nr 5 jest najbardziej ogólnym modelem obciążenia zmęczeniowego, wykorzystującym rzeczywiste dane o prognozowanym ruchu na moście. Ponadto Eurokod 1-2 [4] zaleca, aby w obliczeniach zmęczeniowych określono kategorię ruchu na moście za pomocą co najmniej liczby pasów ruchu powolnego (tj. pasów ruchu używanych głównie przez samochody ciężarowe) oraz liczby N_{obs} samochodów ciężarowych (o maksymalnym ciężarze całkowitym większym od 100 kN), zmierzonej lub przewidywanej w roku na jeden pas ruchu powolnego.

W przedstawionej procedurze oceny zmęczenia pomostów metalowych zastosowano model obciążenia zmęczeniowego nr 4. Jest to tzw. zestaw standardowych samochodów ciężarowych, które zastosowane łącznie wywołują efekty obciążeniowe równoważne tym, jakie mają miejsce na obiektach mostowych obciążonych typowym natężeniem ruchu na drogach europejskich. W ocenie zmęczenia obiektów mostowych jest zalecane rozpatrywanie zestawu samochodów ciężarowych właściwych dla ruchu mieszanego przewidzianego na trasie, zgodnie z tablicami 1 i 2. Model obciążenia zmęczeniowego nr 4 składa się z pięciu standardowych samochodów ciężarowych. Każdy samochód jest opisany liczbą osi i ich rozstawem podłużnym i poprzecznym, równoważnym obciążeniem każdej osi oraz wymiarami pola kontaktu kół samochodów z płytą pomostu. W przypadku pomostów metalowych, gdy decydujące o ich wytrzymałości są głównie efekty obciążenia lokalnego (tj. pojedynczym kołem), pojazdy modelu należy ustawić osiowo na pasach umownych, przyjmując ich rozmieszczenie w dowolnym miejscu jezdni. Ponieważ w przypadku pomostów metalowych również poprzeczne położenie pojazdów ma znaczący wpływ na badane efekty, w obliczeniach należy uwzględnić statystyczny rozkład położenia poprzecznego zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 1.

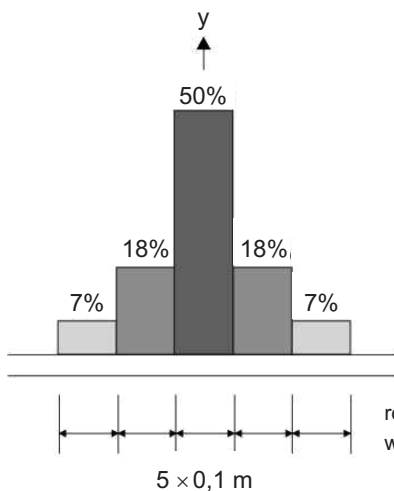
Tablica 1. Model obciążenia zmęczeniowego nr 4 wg Eurokodu 1-2.
Zestaw równoważnych samochodów ciężarowych
Table 1. Fatigue Load Model 4 according to Eurocode 1-2.
Set of equivalent lorries

| Typ pojazdu | | | Rodzaj ruchu | | | |
|---|--------------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | długo- dystansowy | średnio- dystansowy | ruch lokalny | typ koła |
| Samochód ciężarowy | rozstaw osi (m) | obciążenia osi (kN) | % sam. ciężarowych | % sam. ciężarowych | % sam. ciężarowych | |
|  | 4,5 | 70 130 | 20,0 | 40,0 | 80,0 | A B |
|  | 4,2 1,3 | 70 120 120 | 5,0 | 10,0 | 5,0 | A B B |
|  | 3,2 5,2 1,3 1,3 | 70 150 90 90 90 | 50,0 | 30,0 | 5,0 | A B C C C |
|  | 3,4 6,0 1,8 | 70 140 90 90 | 15,0 | 15,0 | 5,0 | A B B B |
|  | 4,8 3,6 4,0 1,3 | 70 130 90 80 80 | 10,0 | 5,0 | 5,0 | |

Tablica 2. Model obciążenia zmęczeniowego nr 4 wg Eurokodu 1-2. Określenie wymiarów kół i osi

Table 2. Fatigue Load Model 4 according to Eurocode 1-2. Definition of wheels and axles

| Typ koła/osi | Określenie wymiarów |
|--------------|---------------------|
| A | |
| B | |
| C | |



Rys. 1. Rozkład częstości położenia poprzecznego osi pojazdu według Eurokodu 1-2
Fig. 1. Frequency distribution of transverse location of centre line of vehicle according to Eurocode 1-2

rozkład wielkości obciążenia pomostu na 50 cm szerokości w podziale na pasma o szerokości 10 cm

Analizę zmienności naprężeń w miejscach wrażliwych na zmęczenie podczas każdego zdarzenia obciążającego można wykonać różnymi metodami. Jednakże w przypadku pomostów metalowych, w których mamy zazwyczaj do czynienia z interakcją trzech różnych układów naprężeń (σ_x , σ_y , τ), najlepszą i niezawodną metodą ich identyfikacji oraz oszacowania wartości jest analiza 3D metodą elementów skończonych. Metoda ta pozwala bowiem na odpowiednie zamodelowanie detali wrażliwych na zmęczenie i uwzględnienie koncentracji naprężeń, spowodowanej geometrią połączenia. Inne korzyści wynikające ze stosowania MES w analizie zmęczeniowej oraz wskazówki do jej wykorzystania podaje m.in. Eurokod 9-1-3 [6]. Celem analizy zmęczeniowej MES jest wyznaczenie naprężeń maksymalnych i minimalnych w rozpatrywanym detalu konstrukcyjnym oraz zakresów zmienności naprężeń w każdym cyklu zmiany obciążenia, tzn. różnic algebraicznych naprężeń, wynikających z przejazdu wybranego pojazdu po pomoście. Ze względu na konstrukcję pomostów metalowych oraz decydujący wpływ obciążeń lokalnych na wyężenie elementów pomostu, w analizie zmęczeniowej wystarczy zazwyczaj wyznaczyć naprężenia pochodzące od obciążenia pojedynczym kołem, niezależnie od układu kół w osi oraz układu osi pojazdu. Jak wykazały bowiem liczne analizy pomostów metalowych (stalowych, aluminiowych) wpływ sąsiadujących kół i osi na wyężenie badanego przekroju pod płaszczyzną bezpośredniego obciążenia jest niewielki i może być pominięty w obliczeniach zmęczeniowych.

Procedury oceny nośności zmęczeniowej konstrukcji spawanych bazują zasadniczo na czterech metodach [17]. Trzy z nich polegają na wykorzystaniu krzywych zmęczeniowych $S-N$, wyznaczonych dla ocenianego detalu (karbu, połączenia) w funkcji różnego rodzaju naprężeń i są podstawą do uregulowań normowych oraz mają zastosowanie w projektowaniu. Czwarta metoda opiera się na analizie propagacji rysy zmęczeniowej za pomocą liniowo-sprężystej mechaniki pęknięcia (LEFM) i jest stosowana do oceny resztkowej wytrzymałości zmęczeniowej połączenia z wadami. Dokładny opis wszystkich czterech metod oraz stosowne analizy porównawcze można znaleźć m.in. w pracach [18] i [19].

Metody bazujące na krzywych zmęczeniowych $S-N$ dzielą się w zależności od rodzaju analizowanych naprężeń następująco:

- a) metoda naprężeń nominalnych (*nominal stresses*) lub zmodyfikowanych naprężeń nominalnych (*modified nominal stresses*),
- b) metoda naprężeń geometrycznych (*geometric stresses, structural stresses, hot spot stresses*),
- c) metoda naprężeń lokalnych w otoczeniu karbu (*local notch stresses, effective notch stresses*).

Najbardziej rozpowszechnioną w zastosowaniach projektowych jest metoda oparta na krzywych zmęczeniowych, wyznaczonych dla naprężeń nominalnych. Tę metodę zastosowano także w niniejszej analizie. Naprężenia nominalne to naprężenia w materiale rodzimym lub w spoinie połączenia, w pobliżu miejsca potencjalnego pęknięcia, obliczone na podstawie teorii sprężystości bez uwzględnienia efektów

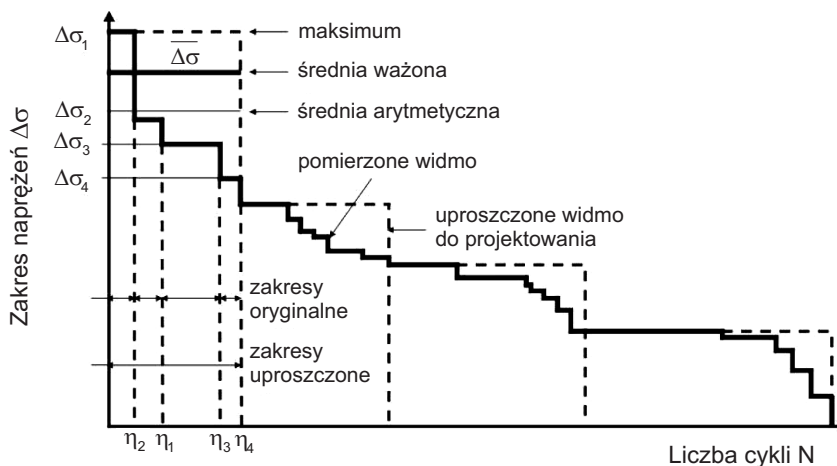
spiętrzenia, wywołanych karbem. Natomiast zmodyfikowane naprężenia nominalne to naprężenia nominalne pomnożone przez odpowiedni współczynnik spiętrzenia naprężeń k_f , uwzględniający nieciągłość geometryczną, która nie znalazła odzwierciedlenia przy klasyfikacji określonego detalu. Metoda naprężeń nominalnych jest stosowana w większości norm projektowych. Także Eurokody 3-1-9 [5] i 9-1-3 [6] zalecają jej stosowanie w przypadku, gdy analizowany detal (karb, połączenie) nie odbiega znacząco od detali scharakteryzowanych w cytowanych tablicach tych norm, dla których podają one odpowiednio naukowo uzasadnione krzywe zmęczenia.

Kolejnym etapem procedury oceny zmęczenia jest wyznaczenie widma zakresów zmienności naprężeń za pomocą jednej z powszechnie stosowanych metod zliczania cykli. Metoda zliczania cykli jest procedurą zamiany złożonej historii naprężeń na wygodne w użyciu widmo opisane za pomocą poszczególnych zakresów naprężeń $\Delta\sigma$ i odpowiadającej im liczby cykli n . Widmo to histogram częstości występowania wszystkich różnych co do wielkości zakresów zmienności naprężeń $\Delta\sigma$, zarejestrowany lub obliczony dla określonego zdarzenia obciążeniowego. Zbiór wszystkich widm zakresów zmienności naprężeń w przewidywanym okresie eksploatacji pomostu stanowi tzw. widmo obliczeniowe, miarodajne do oceny zmęczenia pomostu. Eurokod 1-2 [4] zaleca, aby widmo zakresów naprężeń i odpowiadającą mu liczbę cykli wywołanych każdą zmianą naprężeń podczas przejazdu poszczególnych pojazdów wyznaczano jedną z dwóch metod zliczania cykli: „zbiornikową” (*reservoir method*) lub „deszczową” (*rainflow method*). Dla krótkich historii naprężeń, gdy wielokrotnie powtarza się pojedyncze zdarzenie obciążeniowe, zalecana jest metoda „zbiornikowa”. Metoda jest łatwa do wizualizacji i prosta w użyciu. Natomiast, gdy historia naprężeń jest długa i złożona (np. otrzymana z pomiarów tensometrycznych rzeczywistej konstrukcji) jest zalecana metoda „deszczowa”. Obie metody są powszechnie znane, a ich opis można znaleźć w większości norm zmęczeniowych i przedmiotowych publikacji naukowych.

Wykres liczby cykli n w porządku zmniejszającej się wartości amplitud $\Delta\sigma$ stanowi widmo naprężeń. Niekiedy dla ułatwienia obliczeń upraszcza się rozbudowane zazwyczaj widmo, redukując je do grup amplitud naprężeń o liczbie cykli, będącej sumą cykli dla poszczególnych zakresów (rys. 2). Najbardziej konserwatywną metodą redukcji jest przyjęcie dla całej grupy jako charakterystycznej maksymalnej wartości amplitudy. Dokładniejsza metoda zakłada przyjęcie wartości amplitudy dla grupy jako średniej ważonej dla poszczególnych zakresów zebranych w grupie według wzoru:

$$\overline{\Delta\sigma} = \left[\frac{\sum n\Delta\sigma^m}{\sum n} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

gdzie m jest nachyleniem krzywej zmęczeniowej dla analizowanej kategorii detalu (karbu). Natomiast przyjęcie wartości amplitudy dla grupy jako średniej arytmetycznej dla poszczególnych zakresów zebranych w grupie jest mało bezpieczne [5], [6].



Rys. 2. Uprozczone widmo obliczeniowe naprężeń

Fig. 2. Simplified stress range spectrum

W celu wyznaczenia na podstawie widma obliczeniowego żywotności obliczeniowej N_i dla poszczególnych zakresów zmienności naprężeń $\Delta\sigma_i$ jest konieczny wybór odpowiedniej kategorii zmęczeniowej dla analizowanych miejsc konstrukcji, wrażliwych na zmęczenie (karbów). Kategoria zmęczeniowa to wartość liczbowo przypisana określonemu detalowi konstrukcyjnemu (karbowi), wskazująca krzywą miarodajną do oceny zmęczenia i odpowiadająca normatywnej wytrzymałości zmęczeniowej $\Delta\sigma_c$. Wszystkie krzywe zmęczeniowe zawarte w normach projektowania konstrukcji metalowych ustanowiono na podstawie analizy liniowej regresji wyników badań zmęczeniowych, zakładając 97,7% prawdopodobieństwo przetrwania. Ze względu na konieczność uwzględnienia wpływu rozciągających naprężeń wewnętrznych, większość wyników będących podstawą krzywych normowych uzyskano z badań zmęczeniowych całych konstrukcji oraz próbek poddanych obciążeniom wywołującym wysokie naprężenie średnie [20]. Kategoria (krzywa) zmęczeniowa dla pojedynczego detalu konstrukcyjnego uwzględnia zawsze następujące czynniki: kierunek naprężeń zmiennych, miejsce inicjacji pęknięcia w detalu konstrukcyjnym oraz geometrię samego detalu. Ponadto w przypadku konstrukcji aluminiowych kategoria zależy także od: formy produktu (produkt walcowany lub wyciskany), metody spawania oraz od poziomu jakości spawania.

Kategoria zmęczeniowa dla każdego detalu konstrukcyjnego jest opisana zazwyczaj parą liczb $(\Delta\sigma_c, m_1)$, charakteryzującą kolejno wytrzymałość zmęczeniową detalu dla liczby $N_c = 2 \times 10^6$ cykli obciążenia oraz nachylenie normowej krzywej zmęczeniowej dla danego detalu, przedstawianej na skali podwójnie logarytmicznej. Normowa krzywa zmęczeniowa (tzw. krzywa projektowa) to krzywa średnia wyznaczona na podstawie wyników badań, której wartości obniżono o dwa odchylenia standardowe w stosunku do średniej. Podstawowy wzór opisujący krzywą projektową dla wartości $N_i < 5 \times 10^6$ cykli ma postać:

$$N_i = 2 \times 10^6 \times \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_i} \frac{1}{\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}} \right)^{m_1}, \quad (2)$$

gdzie:

- N_i – trwałość (żywość zmęczeniowa), tj. przewidywana liczba cykli do zniszczenia przy amplitudzie naprężeń $\Delta\sigma_i$,
- $\Delta\sigma_C$ – normatywna wytrzymałość zmęczeniowa dla $N_C = 2 \times 10^6$ cykli, zależna od rodzaju detalu,
- $\Delta\sigma_i$ – amplituda (zakres zmienności) naprężeń głównych w obciążonym detalu,
- m_1 – nachylenie normowej krzywej zmęczeniowej D_L na skali podwójnie logarytmicznej, zależne od rodzaju detalu,
- γ_{Ff} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa, uwzględniający niepewności wyznaczenia obciążenia (dla konstrukcji projektowanych zgodnie z zaleceniami Eurokodów 1, 3 i 9 $\gamma_{Ff}=1,0$),
- γ_{Mf} – częściowy współczynnik bezpieczeństwa, uwzględniający niepewności wyznaczenia właściwości materiałowych (dla konstrukcji projektowanych zgodnie z zaleceniami Eurokodów 3 i 9 $\gamma_{Mf}=1,0$).

Wytrzymałość zmęczeniowa trwała przy stałej amplitudzie $\Delta\sigma_D$, tj. graniczna wartość zakresu zmienności naprężeń przy stałej amplitudzie, poniżej której nie występują w badaniach uszkodzenia zmęczeniowe, została przyjęta w obu Eurokodach dla $N_D = 5 \times 10^6$ cykli (rys. 3). Jednakże ze względu na możliwość okazjonalnego występowania wartości większych od N_D , dla liczby cykli pomiędzy 5×10^6 oraz 10^8 zmniejszono nachylenie krzywych normowych do wartości $m_2 = m_1 + 2$. Wartość graniczną (tzw. wytrzymałość zmęczeniową trwałą $\Delta\sigma_L$), poniżej której zmienność naprężeń nie ma wpływu na kumulację uszkodzeń przyjęto dla $N_L = 10^8$ cykli. W tablicach 3 i 4 podano wartości służące do oceny nośności zmęczeniowej spawanych pomostów metalowych (stalowych i aluminiowych) zgodnie z odpowiednimi Eurokodami. Wybrano tylko te dane, które dotyczą detali konstrukcyjnych specyficznych dla obu rodzajów pomostów oraz mogących występować w tych karbach miejsc inicjacji pęknięć. W przypadku pomostów aluminiowych wszystkie dane dotyczą spoin czołowych typu MIG. Dane dotyczące wytrzymałości zmęczeniowej coraz bardziej popularnych w konstrukcjach aluminiowych połączeń zgrzewanych tarciovo (FSW – ang. *friction stir welding*) można znaleźć np. w pracy [12].

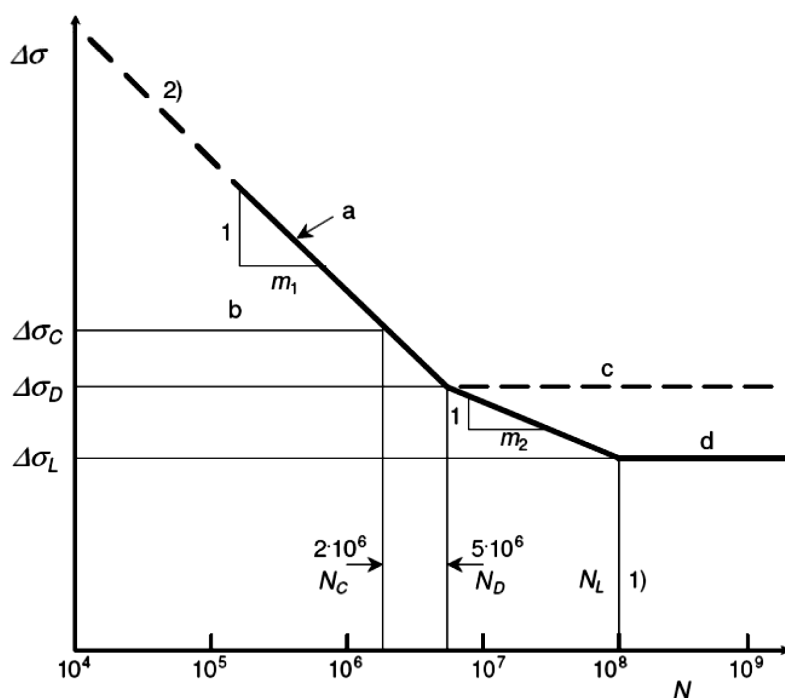
Ostatnim etapem procedury oceny zmęczenia pomostu jest obliczenie liniowej kumulacji uszkodzeń D_L dla projektowanego okresu eksploatacji T_L pomostu oraz obliczenie bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej T_S i sprawdzenie, czy jest dłuższa od projektowanego okresu eksploatacji pomostu T_L . Do obliczenia liniowej kumulacji uszkodzeń D_L stosuje się powszechnie znaną regułę sumacyjną Palmgrena - Minera pomimo, że jej dokładność, wraz z dostępnością coraz większej liczby wyników badań

zmęczeniowych, jest czasami kwestionowana [21]. Pomimo tego reguła ta jest ciągle uniwersalną zasadą używaną do oceny żywotności zmęczeniowej konstrukcji metalowych poddanych obciążeniu cyklicznemu o zmiennej amplitudzie, bazującą na krzywych zmęczeniowych D_L , wyznaczonych dla stałej amplitudy naprężeń. Reguła zakłada, że efekt zmęczeniowy rzeczywistej historii naprężeń o zmiennej amplitudzie jest taki sam jak suma efektów spowodowanych składowymi historiami naprężeń o stałej amplitudzie oraz że kumulację uszkodzeń D obliczyć można wg wzoru:

$$D = \sum_i D_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i}, \quad (3)$$

gdzie:

- n_i – liczba cykli naprężeń o amplitudzie $\Delta\sigma_i$ w widmie obliczeniowym,
- N_i – trwałość zmęczeniowa wyznaczona na podstawie krzywej zmęczeniowej, odpowiadająca zakresowi naprężeń $\Delta\sigma_i$.



Rys. 3. Krzywa zmęczeniowa w układzie $\log \Delta\sigma - \log N$ (a – krzywa zmęczeniowa, b – normatywna wytrzymałość zmęczeniowa, c – wytrzymałość zmęczeniowa trwała przy stałej amplitudzie, d – trwała wytrzymałość zmęczeniowa)

Fig. 3. Fatigue strength curve $\log \Delta\sigma - \log N$ (a – fatigue strength curve, b – reference fatigue strength, c – constant amplitude fatigue limit, d – cut-off limit)

Tablica 3. Kategorie zmęczenia i wartości wytrzymałości zmęczeniowych [MPa] dla detali konstrukcyjnych spawanych pomostów ortotropowych wg Eurokodu 3-1-9

Table 3. Detail categories and fatigue strengths [MPa] for orthotropic decks according to Eurocode 3-1-9

| Opis detalu (karbu) | Kategoria zmęczenia | Nachylenie krzywej m_1 | Liczba cykli N | | |
|---|------------------------------|--------------------------|------------------|------------------------|------|
| | | | 2×10^6 | 5×10^6 10^8 | |
| zębra zamknięte (np. trapezowe) | | | | | |
| Połączenia żeber podłużnych z poprzecznicami | 80 ($t < 12$ mm) | 3,0 | 80,0 | 59,0 | 32,4 |
| | 71 ($t > 12$ mm) | 3,0 | 71,0 | 52,3 | 28,7 |
| Żebra podłużne po obu stronach poprzecznic | 36 | 3,0 | 36,0 | 26,5 | 14,6 |
| Połączenia żeber podłużnych za pomocą pełnej spoiny czołowej | 71 (jednostronna) | 3,0 | 71,0 | 52,3 | 28,7 |
| | 112 (dwustronna) | 3,0 | 112,0 | 82,5 | 45,3 |
| Przekrój krytyczny w poprzecznic (wycięcie na zebro podłużne) | 71 | 3,0 | 71,0 | 52,3 | 28,7 |
| Spoiny łączące blachę pomostu z zebrami podłużnymi | 71 (czołowa) | 3,0 | 71,0 | 52,3 | 28,7 |
| | 50 (pachwinowa) | 3,0 | 50,0 | 36,9 | 22,7 |
| zębra otwarte (np. płaskownik) | | | | | |
| Połączenia żeber podłużnych z poprzecznicami | 80 ($t < 12$ mm) | 3,0 | 80,0 | 59,0 | 32,4 |
| | 71 ($t > 12$ mm) | 3,0 | 71,0 | 52,3 | 28,7 |
| | 56 (naprężenia zastępcze) | 3,0 | 56,0 | 41,3 | 22,7 |

Tablica 4. Kategorie zmęczenia i wartości wytrzymałości zmęczeniowych dla detali konstrukcyjnych spawanych pomostów aluminiowych wg Eurokodu 9-1-3

Table 4. Detail categories and fatigue strengths [MPa] for welded aluminium decks according to Eurocode 9-1-3

| Opis detalu (karbu) | Kategoria zmęzeniowa | Nachylenie krzywej m_f | Liczba cykli N | | |
|--|-----------------------|--------------------------|------------------|------------------------|------|
| | | | 2×10^6 | 5×10^6 10^8 | |
| naprężenia podłużne (równoległe do spoiny) | | | | | |
| Spoina czołowa MIG łącząca kształtowniki wyciskane | 56 (otwarte) | 4,3 | 56,0 | 45,3 | 28,1 |
| | 45 (zamknięte) | 4,3 | 45,0 | 36,4 | 22,6 |
| naprężenia poprzeczne (prostopadłe do spoiny) | | | | | |
| Spoina czołowa MIG jednostronna, łącząca kształtowniki wyciskane | 32 | 3,4 | 32,0 | 24,4 | 14,0 |
| | 45 (szlifowana) | 7,0 | 45,0 | 39,5 | 28,3 |
| Spoina czołowa MIG dwustronna, łącząca kształtowniki wyciskane | 36 (nieszlifowana) | 3,4 | 36,0 | 27,5 | 15,8 |

Znając zakładany z góry projektowany okres eksploatacji konstrukcji T_L oraz całkowitą kumulację uszkodzeń D_L , bezwarunkową żywotność zmęczeniową T_S obliczyć można ze wzoru:

$$T_S = \frac{T_L}{D_L}. \quad (4)$$

Nośność zmęczeniowa konstrukcji jest wystarczająca, gdy $T_S \geq T_L$ czyli $D_L \leq 1,0$.

Jeżeli ocena zmęczenia wykonana wg przedstawionej procedury da wynik negatywny, to jest możliwe jedno z następujących działań:

- przeprowadzenie powtórnej oceny zmęczenia metodą tolerowanych uszkodzeń, z uwzględnieniem procedury kontroli, którą narzuca ta metoda,
- przeprojektowanie konstrukcji lub elementu w celu obniżenia poziomu naprężeń,
- zmiana detalu (np. rodzaju połączenia) na rozwiązanie mające wyższą kategorię (wytrzymałość) zmęczeniową.

3. PRZYKŁADOWA OCENA NOŚNOŚCI ZMĘCZENIOWEJ POMOSTU ALUMINIOWEGO

Procedurę przedstawioną w punkcie 2 zastosowano do oceny nośności zmęczeniowej pomostu aluminiowego, zaprojektowanego w ramach prac badawczych nad wdrożeniem stopów aluminium do budownictwa mostowego [12]. Karbem decydującym o nośności zmęczeniowej pomostu aluminiowego jest spoina czołowa MIG w płycie górnej, bezpośrednio (lokalnie) obciążona kołami pojazdów. Identyczna spoina w płycie dolnej, obciążona jedynie w wyniku zginania globalnego panelu pomostu, jest w znacznie mniejszym stopniu narażona na zmęczenie, gdyż zarówno poziom jak i zmienność naprężeń są zdecydowanie mniejsze niż w płycie górnej.

Do oceny nośności zmęczeniowej pomostu przyjęto dwa warianty kategorii ruchu i rodzaju ruchu na moście (wg Eurokodu 1-2 [4]):

- a) wariant 1 (DK) – kategoria ruchu 2, tj. drogi ze średnim udziałem potoku samochodów ciężarowych ($N_{obs} = 500$ tys. pojazdów na rok) oraz długodystansowym rodzajem ruchu; wariant ten odpowiada w przybliżeniu drogom krajowym,
- b) wariant 2 (DW) – kategoria ruchu 3, tj. drogi z małym udziałem potoku samochodów ciężarowych ($N_{obs} = 125$ tys. pojazdów na rok) oraz średnidystansowym rodzajem ruchu; wariant ten odpowiada w przybliżeniu drogom wojewódzkim.

Jako zdarzenie obciążające przyjęto model obciążenia zmęczeniowego nr 4 wg Eurokodu 1-2 [4]. Wartości N_{obs} przyjęto również wg Eurokodu 1-2 [4], aczkolwiek znacznie odbiegają one (w górę) od typowych warunków spotykanych na większości polskich dróg krajowych i wojewódzkich. W tablicy 1 podano charakterystyki pojazdów oraz udział procentowy poszczególnych samochodów w całkowitej liczbie N_{obs} pojazdów na rok. Ponieważ w przypadku płyty górnej pomostu decydujący wpływ na jej wyteżenie ma bezpośredni nacisk pojedynczego koła, normowe zdarzenie

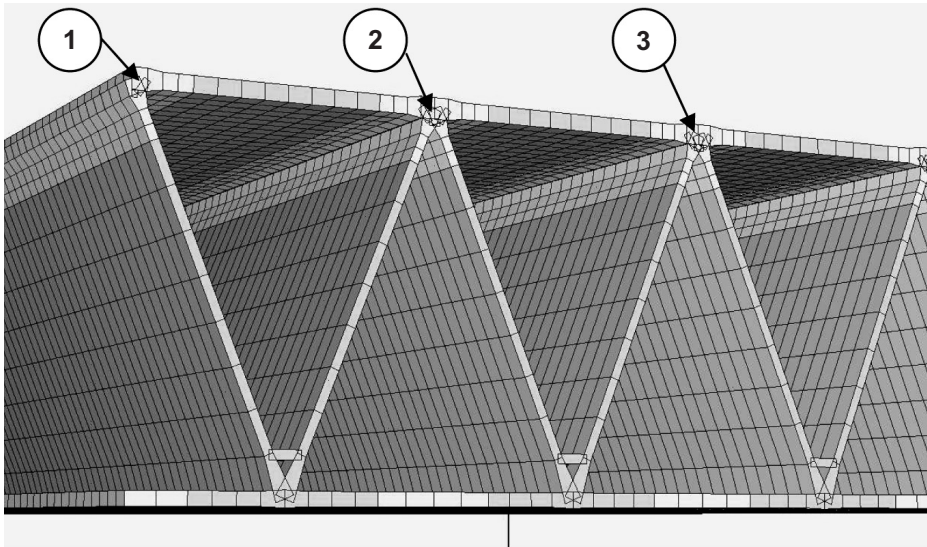
obciążające rozłożono na naciski pojedynczych kół, przyjmując wartości sił oraz pole powierzchni zgodnie z danymi podanymi w tablicach 1 i 2. Liczbę poszczególnych nacisków (kół) na pomoście w ciągu roku obliczono, mnożąc N_{obs} dla danego typu pojazdu przez liczbę kół danego rodzaju w każdym z pięciu pojazdów normowych. Zestawienie poszczególnych nacisków kół wraz z ich liczbą na pomoście w ciągu roku podano w tablicy 5.

Tablica 5. Charakterystyka poszczególnych nacisków kół wraz z ich liczbą na pomoście w ciągu roku [12]

Table 5. The wheel contact areas with the equivalent load of each wheel and the total number of wheels per year to be considered for the whole deck [12]

| Typ nacisku | Charakterystyka koła według tablicy 2 | | | | Siła P [kN] | Nacisk [kN/ m ²] | Liczba DK | Liczba DW |
|-------------|---------------------------------------|---------|---------|-----------------------|---------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | typ | a [m] | b [m] | F [m ²] | | | | |
| N1 | A | 0,22 | 0,32 | 0,0704 | 35 | 497 | 500000 | 125000 |
| N2 | C | 0,27 | 0,32 | 0,1728 | 65 | 376 | 150000 | 56250 |
| N3 | C | 0,27 | 0,32 | 0,1728 | 60 | 347 | 50000 | 25000 |
| N4 | C | 0,27 | 0,32 | 0,1728 | 75 | 434 | 250000 | 37500 |
| N5 | B | 0,54 | 0,32 | 0,0864 | 45 | 521 | 800000 | 118750 |
| N6 | C | 0,27 | 0,32 | 0,1728 | 70 | 405 | 75000 | 18750 |
| N7 | C | 0,27 | 0,32 | 0,1728 | 45 | 260 | 150000 | 37500 |
| N8 | B | 0,54 | 0,32 | 0,0864 | 40 | 463 | 100000 | 12500 |

Dla każdego z kół (nacisków) scharakteryzowanych w tablicy 5 wyznaczono naprężenia w miejscach pomostu, wrażliwych na zmęczenie. Do analizy przyjęto wszystkie spoiny czołowe płyty górnej, leżące w płaszczyźnie bezpośredniego obciążenia danym kołem. Dla kół typu A i C były to dwie spoiny (środkowa i sąsiednia), natomiast dla koła typu B (tandem) analizą objęto trzy spoiny. Naprężenia nominalne σ_{max} w każdym z analizowanych miejsc wyznaczono za pomocą obliczeń numerycznych MES, wykorzystując zweryfikowany doświadczalnie model numeryczny pomostu (rys. 4). Zakresy zmienności naprężeń nominalnych $\Delta\sigma$ wyznaczono przy skrajnie niekorzystnym założeniu, że naprężenia w elemencie rosną od 0 do wartości maksymalnej, czyli $\Delta\sigma = \sigma_{max}$. Pominięto ewentualne naprężenia od obciążeń stałych (ciężar pomostu, nawierzchnia), ze względu na ich niewielką wartość. Uwzględniono jedynie naprężenia prostopadłe do osi spoiny, gdyż jak wykazała analiza numeryczna i przeprowadzone badania panelu pomostu, naprężenia równoległe do osi spoiny są bardzo małe i mają przeważnie znak ujemny (ściskanie), w związku z tym pominięto je w ocenie zmęczenia pomostu [12]. Wartości wyznaczonych numerycznie naprężeń nominalnych dla poszczególnych nacisków od kół pojazdów podano w tablicy 6, natomiast na rys. 5 pokazano przykładowy wykres zmienności naprężeń w osi (element 1 według rys. 4) od pojedynczego przejazdu zestawu pięciu standardowych samochodów wg modelu zmęczeniowego Eurokodu 1-2 [4].



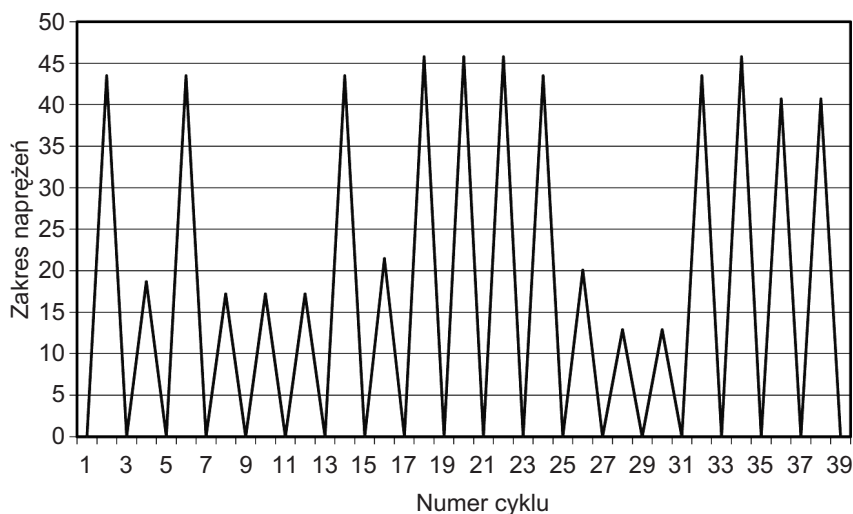
Rys. 4. Model MES pomostu aluminiowego oraz lokalizacja elementów skończonych, wybranych do oceny nośności zmęczeniowej pomostu [12]

Fig. 4. FEM model of aluminium deck and the location of elements chosen for deck fatigue assessment [12]

Tablica 6. Wartości naprężeń nominalnych w spoinach dla poszczególnych nacisków od kół pojazdów [12]

Table 6. Nominal stresses in welds for particular wheels [12]

| Typ nacisku koła | Nacisk [kN/m ²] | Zakres nominalnych naprężeń poprzecznych $\Delta\sigma_x$ w elementach [MPa] | | |
|-------------------------------|-----------------------------|--|---------------------------------|---------------------------------|
| | | element (1) $a = 0$ cm (oś) | element (2) $a = 13$ cm (oś) | element (3) $a = 26$ cm (oś) |
| N1 | 497 | 43,5 | 12,4 | -8,0 |
| N2 | 376 | 18,7 | 24,3 | 6,3 |
| N3 | 347 | 17,2 | 22,4 | 5,8 |
| N4 | 434 | 21,5 | 28,1 | 7,3 |
| N5 | 521 | 45,8 | 11,8 | -12,3 |
| N6 | 405 | 20,1 | 26,2 | 6,8 |
| N7 | 260 | 12,9 | 16,8 | 4,4 |
| N8 | 463 | 40,7 | 11,8 | -10,9 |
| Udział w widmie obliczeniowym | | 50% | 36% | 14% |

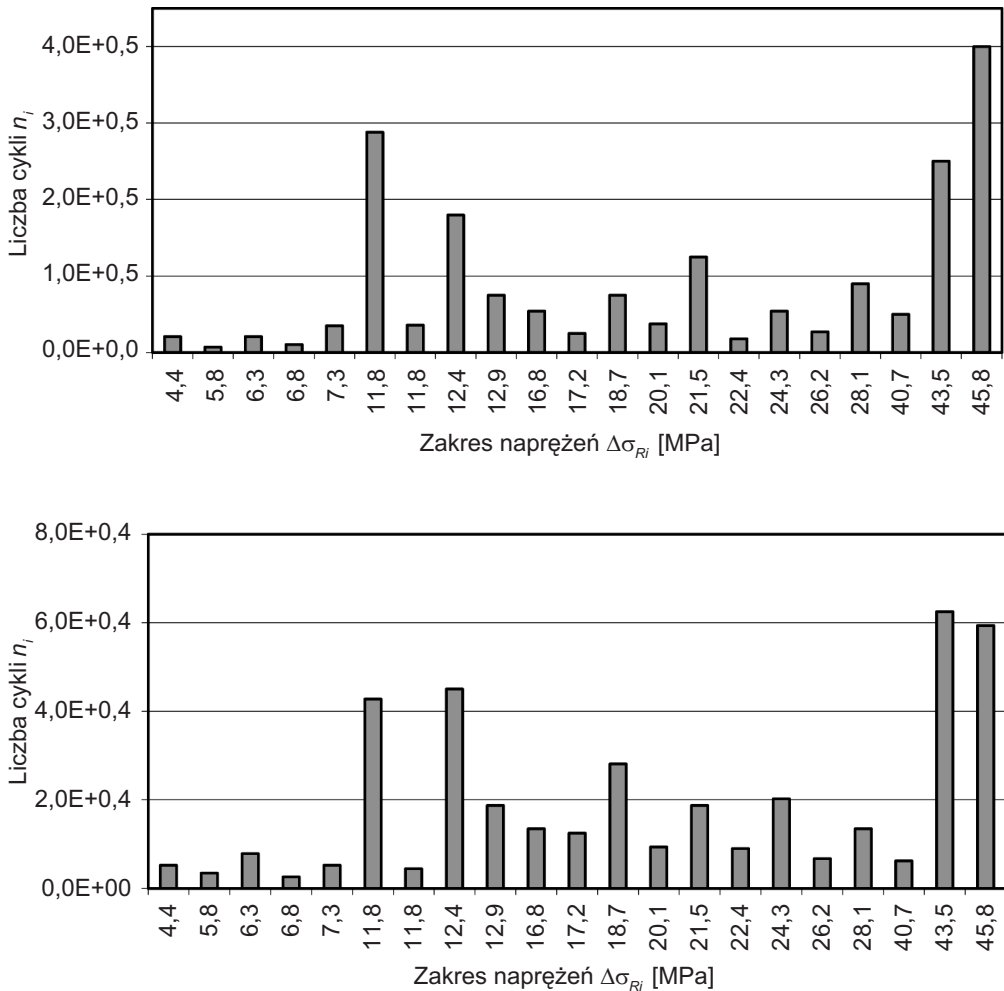


Rys. 5. Wykres zmienności naprężeń w osi pomostu (element 1) od pojedynczego przejazdu zestawu pięciu standardowych pojazdów modelu zmęczeniowego nr 4 wg Eurokodu 1-2 [12]
 Fig. 5. Stress history at detail 1 (in deck axis) induced by single pass of five standard lorries according to Eurocode's Fatigue Load Model number 4 [12]

Do wyznaczenia widma zakresów zmienności naprężeń w pomoście należy uwzględnić także rozkład częstości położenia poprzecznego osi pojazdu (rys. 1). Ze względu na fakt, że osiowy rozstaw poprzeczny analizowanych spoin w pomoście (130 mm) jest zbliżony do szerokości zakresów zmienności rozkładu częstości położenia poprzecznego osi pojazdu (100 mm) przyjęto w obliczeniach, że procentowy udział poszczególnych zakresów naprężeń $\Delta\sigma$ dla każdego z nacisków N w widmie obliczeniowym będzie równy normowemu rozkładowi częstości (tabl. 1). Końcowe widma obliczeniowe naprężeń otrzymane w rezultacie przyjętej procedury pokazano na rys. 6 oraz podano w tabelicy 7.

Ocenę nośności zmęczeniowej pomostu aluminiowego przeprowadzono wykorzystując projektową krzywą zmęczeniową wg Eurokodu 9-1-3 [6]. Jest to kategoria zmęczeniowa 32-3,4 dla spoin jednostronnych MIG, łączących kształtowniki wyciskane, z których wytworzono pomost (tabl. 4). Korzystając z projektowej krzywej zmęczeniowej wyznaczono żywotności obliczeniowe N_i dla poszczególnych zakresów zmienności naprężeń $\Delta\sigma_{Ri}$ z widma obliczeniowego wg wzorów podanych w tabelicy 8.

Obliczenie liniowej kumulacji uszkodzeń D_L za pomocą reguły Palmgren - Minera oraz obliczenie bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej pomostu T_S przeprowadzono w tabelicy 9. Ponieważ nośność zmęczeniową pomostu sprawdzono zgodnie z zaleceniami Eurokodów, zarówno częściowy współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający niepewności wyznaczenia obciążenia γ_{Ef} , jak również częściowy współczynnik bezpieczeństwa uwzględniający niepewności wyznaczenia właściwości materiałowych γ_{Mf} przyjęto równe 1,0.



Rys. 6. Obliczeniowe widma naprężeń dla pomostu aluminiowego w obiekcie mostowym położonym w ciągu dróg krajowych (górze) i w ciągu dróg wojewódzkich (dół) [12]

Fig. 6. Design stress range spectra for aluminium deck in a bridge located on national road (upper) and local road (lower) [12]

Wyznaczona za pomocą opisanej procedury bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa dla pomostu aluminiowego jest bardzo niska, wynosi bowiem niecały 1 rok na mostach w ciągu dróg krajowych oraz zaledwie ponad 4,5 roku na mostach w ciągu dróg wojewódzkich. Są to okresy znacząco krótsze od projektowanego okresu eksploatacji pomostu metalowego, który zgodnie z polskimi wymaganiami powinien wynosić minimum 30 lat.

Tablica 7. Obliczeniowe widma naprężeń dla pomostu w obiekcie mostowym położonym w ciągu dróg krajowych (DK) i wojewódzkich (DW) [12]
 Table 7. Design stress range spectra for the deck in a bridge located on national road (DK) and local road (DW) [12]

| Zakres naprężeń $\Delta\sigma_{Ri}$ [MPa] | Liczba cykli N_i | |
|---|--------------------|--------|
| | DK | DW |
| 4,4 | 21000 | 5250 |
| 5,8 | 7000 | 3500 |
| 6,3 | 21000 | 7875 |
| 6,8 | 10500 | 2625 |
| 7,3 | 35000 | 5250 |
| 11,8 | 288000 | 42750 |
| 11,8 | 36000 | 4500 |
| 12,4 | 180000 | 45000 |
| 12,9 | 75000 | 18750 |
| 16,8 | 54000 | 13500 |
| 17,2 | 25000 | 12500 |
| 18,7 | 75000 | 28125 |
| 20,1 | 37500 | 9375 |
| 21,5 | 125000 | 18750 |
| 22,4 | 18000 | 9000 |
| 24,3 | 54000 | 20250 |
| 26,2 | 27000 | 6750 |
| 28,1 | 90000 | 13500 |
| 40,7 | 50000 | 6250 |
| 43,5 | 250000 | 62500 |
| 45,8 | 400000 | 59375 |
| Razem N_i | 1879000 | 395375 |

Tablica 8. Żywotności obliczeniowe N_i dla zakresów zmienności naprężeń $\Delta\sigma_{Ri}$
 Table 8. The endurance value N_i for each band $\Delta\sigma_{Ri}$ in the spectrum

| $\Delta\sigma_{Ri} \geq \Delta\sigma_D$ | $\Delta\sigma_D > \Delta\sigma_{Ri} \geq \Delta\sigma_L$ | $\Delta\sigma_{Ri} < \Delta\sigma_L$ |
|--|---|--------------------------------------|
| $N \leq 5 \times 10^6$ $N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_C}{\Delta\sigma_{Ri}} \right)^{m_1} \times 2 \times 10^6$ | $5 \times 10^6 < N \leq 10^8$ $N_i = \left(\frac{\Delta\sigma_D}{\Delta\sigma_{Ri}} \right)^{m_2} \times 5 \times 10^6$ | $N_i > 10^8$ |

Tablica 9. Obliczenie liniowej kumulacji uszkodzeń D_L oraz bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej ($T_s = 1/D_L$) dla pomostu aluminiowego
 Table 9. The calculation of cumulative damage D_L and design fatigue life ($T_s = 1/D_L$) for aluminium deck

| Zakres naprężeń $\Delta\sigma_{Ri}$ [MPa] | Liczba cykli n_i | | Parametry zmęczeniowe dla spoiny jednostronnej MIG | | |
|--|--------------------|---------------------|--|----------------|----------------|
| | droga krajowa DK | droga wojewódzka DW | N_i (krzywa 32-3,4) | n_i/N_i (DK) | n_i/N_i (DW) |
| 4,4 | 21000 | 5250 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 5,8 | 7000 | 3500 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 6,3 | 21000 | 7875 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 6,8 | 10500 | 2625 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 7,3 | 35000 | 5250 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 11,8 | 75000 | 18750 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 11,8 | 36000 | 4500 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 12,4 | 180000 | 45000 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 12,9 | 288000 | 42750 | >1E+08 | 0 | 0 |
| 16,8 | 25000 | 12500 | 37515000 | 0,000666 | 0,000333 |
| 17,2 | 54000 | 13500 | 33038586 | 0,001634 | 0,000409 |
| 18,7 | 75000 | 28125 | 21034413 | 0,003566 | 0,001337 |
| 20,1 | 37500 | 9375 | 14243488 | 0,002633 | 0,000658 |
| 21,5 | 125000 | 18750 | 9901646 | 0,012624 | 0,001894 |
| 22,4 | 18000 | 9000 | 7934796 | 0,002268 | 0,001134 |
| 24,3 | 54000 | 20250 | 5112122 | 0,010563 | 0,003961 |
| 26,2 | 27000 | 6750 | 3947440 | 0,00684 | 0,00171 |
| 28,1 | 90000 | 13500 | 3111275 | 0,028927 | 0,004339 |
| 40,7 | 50000 | 6250 | 882915 | 0,056631 | 0,007079 |
| 43,5 | 250000 | 62500 | 704168 | 0,355029 | 0,088757 |
| 45,8 | 400000 | 59375 | 591013 | 0,676804 | 0,100463 |
| Liniowa kumulacja uszkodzeń D_i (na 1 rok) | | | | 1,158185 | 0,212074 |
| Bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa $1/D_i$ (lat) | | | | 0,86342 | 4,71533 |

4. CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA NOŚNOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ POMOSTU METALOWEGO

Przyczyn tak niskiej obliczeniowej nośności zmęczeniowej przykładowego pomostu aluminiowego jest kilka, poniżej przedstawiono najważniejsze [12]. Pierwszą z nich

jest dość wysoki w porównaniu do innych pomostów aluminiowych poziom naprężeń nominalnych dla karbu – połączenia spawanego MIG w płycie górnej – pod obciążeniem kołami pojazdów normowych. Najbardziej znaczący udział w widmie naprężeń mają dwie maksymalne wartości $\Delta\sigma$: 43,5 MPa i 45,8 MPa (rys. 6), które pomimo że są całkowicie bezpieczne z punktu widzenia innych stanów granicznych nośności, w zasadniczy sposób wpływają na kumulację uszkodzeń zmęczeniowych D_L . Wielkość tych naprężeń wynika z faktu, że europejskie obciążenie mostów drogowych przyjęte zgodnie z Eurokodem 1-2 [4] jest znacznie większe od obciążenia klasy B mostów drogowych według polskiej normy [22], na które zgodnie z polskim prawem zaprojektowano pomost aluminiowy. Także geometria przekroju poprzecznego kształtownika wyciskanego, a zwłaszcza mała grubość jego płyty górnej (6 mm) ma wpływ na stosunkowo duże jej wyężenie od bezpośredniego obciążenia kołem pojazdu. Przekrój zaprojektowanego pomostu, aczkolwiek zoptymalizowany na podstawie badań i analiz numerycznych w zakresie pozostałych stanów granicznych, okazał się zbyt mało trwały z uwagi na zmęczenie. Kierunki poszukiwań i sposoby rozwiązania problemu niskiej nośności zmęczeniowej przedmiotowego pomostu aluminiowego opisano w pracy [12].

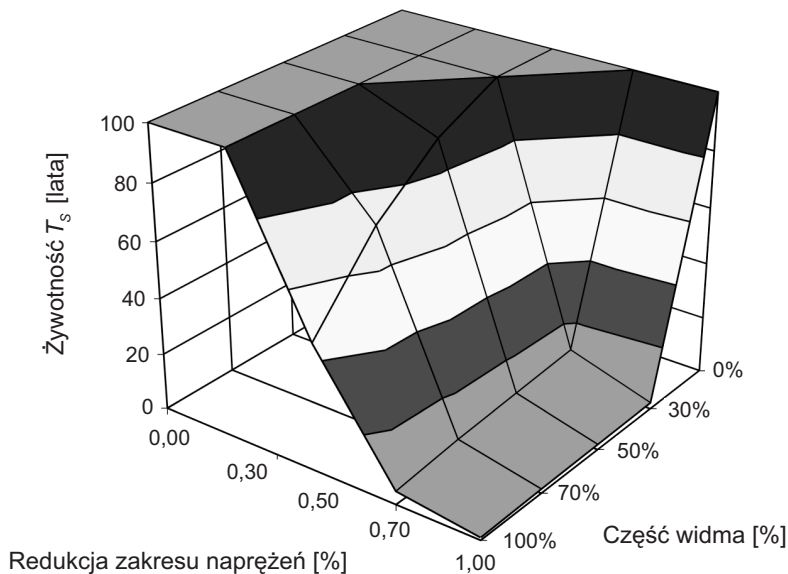
Na bazie uzyskanych wyników analizy zmęczeniowej pomostu aluminiowego można sformułować jednak wiele wniosków natury ogólnej, dotyczących czynników wpływających na nośność zmęczeniową pomostów metalowych. W pierwszej kolejności należy zwrócić uwagę na fakt, że wyznaczone numerycznie naprężenia w elementach pomostu zawierają pewien zapas bezpieczeństwa w stosunku do jego rzeczywistego wyężenia. Rezerwa bezpieczeństwa wynika głównie z dwóch następujących faktów:

- a) nawierzchnia ułożona na pomoście metalowym redukuje wyężenie płyty górnej pomostu od 10 do 20% [23],
- b) w obliczeniach MES przyjmuje się obciążenie stałym naciskiem, działającym na normowej powierzchni koła o wartości wynikającej z podzielenia wartości nacisku nominalnego przez powierzchnię normową; w rzeczywistości rozkład i wartości obciążeń kołem są dużo korzystniejsze dla wyężenia elementów pomostu [24].

Uwzględniając te czynniki, redukcja wielkości obliczonych numerycznie zakresów naprężeń o 30% jest odzwierciedleniem rzeczywistego wyężenia płyty górnej pomostu, co zostało także potwierdzone doświadczalnie w przypadku pomostów ortotropowych [10] i aluminiowych [16]. Wpływ takiej redukcji na trwałość zmęczeniową zaprojektowanego pomostu aluminiowego jest dość znaczący (wzrost do ponad 4,5 roku dla mostów DK oraz ponad 25 lat dla mostów DW), lecz nie prowadzi jeszcze do osiągnięcia wymaganej bezwarunkowej żywotności zmęczeniowej pomostu, tj. min. 30 lat.

Drugą istotną przyczyną niskiej obliczeniowej nośności zmęczeniowej pomostu jest przyjęcie za danymi według Eurokodu 1-2 [4] nieadekwatnych do polskich warunków drogowych liczb N_{obs} samochodów ciężarowych, przewidywanych w roku i na pas ruchu powolnego. Załącznik krajowy do Eurokodu 1-2 [4], w którym powinny być podane krajowe wartości N_{obs} , w Polsce jeszcze nie istnieje. Bazując na generalnym

pomiarze ruchu można przyjąć średnią liczbę pojazdów na dobę na drogach krajowych i międzynarodowych $SDR = 8244$ poj./dobę, z czego 19,3% stanowią pojazdy ciężkie (samochody ciężarowe, samochody ciężarowe z przyczepą oraz autobusy) [25]. Obliczając roczny SDR otrzymujemy średnio 505 tys. pojazdów na rok, co wprawdzie pokrywa się z przyjętą w obliczeniach liczbą N_{obs} według Eurokodu 1-2 [4], lecz obciążenie według Eurokodu dotyczy pojazdów ciężarowych o masie większej od 10 ton oraz jest podane na 1 pas ruchu powolnego, natomiast dane na podstawie generalnego pomiaru ruchu obejmują pojazdy o masie większej od 3,5 tony i dotyczą wszystkich pasów ruchu na obiekcie. Trudno jest zatem bezpośrednio porównać te objętości obciążenia, lecz wydaje się, że przyjęcie 50% N_{obs} według Eurokodu 1-2 [4] jest adekwatne do warunków polskich. Zasadność takiego założenia potwierdzają np.: analiza zmęczeniowa holenderskiego pomostu aluminiowego, w której przyjęto na drogach najwyższej kategorii w Holandii $N_{obs} = 350$ tys. pojazdów ciężkich na rok [26] oraz analiza charakterystyki obciążeń mostów podana w pracy [27]. Redukcja o 50% liczby N_{obs} zwiększa bezwarunkową żywotność zmęczeniową zaprojektowanego pomostu aluminiowego do 9 lat dla mostów na drogach krajowych (DK) oraz ponad 50 lat dla mostów na drogach wojewódzkich (DW).



Rys. 7. Wpływ redukcji zakresu naprężeń $\Delta\sigma$ oraz wielkości widma obliczeniowego N_{obs} na bezwarunkową żywotność zmęczeniową pomostu T_s [12]

Fig. 7. The influence of stress range $\Delta\sigma$ reduction and the total number of vehicles per year to be considered for the whole carriageway N_{obs} on design fatigue life T_s of the deck [12]

Wpływ redukcji zakresu naprężeń oraz wielkości widma obliczeniowego na bezwarunkową żywotność zmęczeniową pomostu pokazano na rys. 7. Na wykresie przyjęto maksymalną żywotność zmęczeniową równą 100 lat. Jak wynika z wykresu, znacznie

większy wpływ na zwiększenie żywotności pomostu ma redukcja zakresu naprężeń $\Delta\sigma$ w decydującym o zmęczeniu detalu pomostu. Każde zmniejszenie naprężeń ponad 30% powoduje bardzo szybki wzrost żywotności pomostu. Np. przy redukcji wartości naprężeń w widmie o 50% bezwarunkowa żywotność zmęczeniowa pomostu wzrasta do 50 lat przy niezmienionej wielkości widma. Redukcja dotyczy w zasadzie tylko trzech największych wartości $\Delta\sigma$ (tj. 40,4 MPa, 43,5 MPa oraz 45,8 MPa w tabelicy 9), gdyż one powodują uszkodzenie zmęczeniowe. Wielkość widma (tj. liczba poszczególnych zakresów naprężeń) ma znacznie mniejszy wpływ na żywotność zmęczeniową pomostu. W zasadzie dopiero redukcja widma o 70% daje znaczące zwiększenie żywotności zmęczeniowej pomostu. Jednakże wielkość widma (liczba cykli) jest czynnikiem niezależnym od projektanta i raczej w najbliższych latach będzie miała tendencję wzrostową.

Decydujący wpływ na nośność zmęczeniową pomostów metalowych mają kategorie zmęczeniowe i wartości wytrzymałości zmęczeniowych detali konstrukcyjnych pomostów. W tym zakresie nie można jednak już oczekiwać znaczących zmian. Krzywe zmęczeniowe przyjęte w Eurokodach są wynikiem kilkudziesięcioletnich badań europejskich, a ich ostateczna wersja jest niejednokrotnie bardziej konserwatywna od pierwotnych krzywych, proponowanych kilka lat temu w prenormach ENV oraz od krzywych amerykańskich, przyjętych w normach AASHTO. Jednakże w przypadku konstrukcji aluminiowych duże nadzieje na zwiększenie wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji (w tym pomostów) wiąże się z wprowadzeniem i upowszechnieniem nowej technologii łączenia kształtowników, tj. zgrzewania tarcowego FSW (ang. *friction stir welding*), które już wkrótce może zastąpić tradycyjne spawanie łukowe MIG. Zalety tej nowej technologii, w tym charakterystykę wytrzymałości zmęczeniowej połączeń, przedstawiono w pracy [12]. Wykorzystując opublikowaną tam krzywą zmęczeniową oraz opisaną w niniejszej pracy procedurę obliczeń zmęczeniowych można wykazać bezterminową bezwarunkową żywotność zmęczeniową przedmiotowego pomostu aluminiowego w przypadku zastosowania technologii FSW. Nawet najwyższy zakres projektowych naprężeń nominalnych w zgrzeinie, tj. $\Delta\sigma = 45,8$ MPa, jest bowiem niższy od trwałej wytrzymałości zmęczeniowej przy zmiennej amplitudzie, którą dla zgrzein FSW w pomostach aluminiowych wyznaczono na poziomie $\Delta\sigma_L = 46,9$ MPa [12]. Żaden z elementów obliczeniowego widma naprężeń nie powoduje zatem uszkodzeń zmęczeniowych pomostu aluminiowego, wytworzonego technologią zgrzewania tarcowego FSW [28].

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Dokładna i wiarygodna ocena zmęczenia pomostów metalowych ma bardzo duże znaczenie dla trwałości obiektów mostowych, w których taki pomost zastosowano. Procedura oceny zmęczenia pomostów metalowych na podstawie Eurokodów bazuje na metodzie bezwarunkowej żywotności (ang. *safe life design*), a w przypadku negatywnego wyniku jej zastosowania – na metodzie tolerowanych uszkodzeń (ang. *damage tolerant design*). Zastosowanie metody bezwarunkowej żywotności w połączeniu z metodą naprężeń nominalnych wymaga stworzenia dokładnego modelu numerycznego MES

pomostu, ze szczególnym uwzględnieniem połączeń spawanych. Analiza numeryczna wraz z obliczeniami zmęczeniowymi według zaleceń Eurokodów 1, 3 i 9 tworzą procedurę oceny zmęczenia, której zastosowanie jest konieczne w projektowaniu pomostów metalowych. Przedstawiony w niniejszej pracy przykład zastosowania tej procedury może być wykorzystany analogicznie w ocenie zmęczenia dowolnego pomostu metalowego.

W wyniku analizy numerycznej i zmęczeniowej przykładowego pomostu metalowego ustalono następujące czynniki, mające wpływ na zmęczenie tego typu pomostów:

- a) kategoria zmęczeniowa i wartość wytrzymałości zmęczeniowych dla przyjętych detali konstrukcyjnych (połączeń),
- b) poziom naprężeń nominalnych od obciążenia pojedynczym kołem, zależny od geometrii detalu konstrukcyjnego (karbu) oraz dokładności modelowania konstrukcji i obciążenia w MES,
- c) kategoria ruchu na moście, zależna od liczby N_{obs} samochodów ciężarowych (o maksymalnym ciężarze całkowitym większym od 100 kN), przewidywanej w roku na jeden pas ruchu powolnego.

Wpływ czynników pierwszej grupy jest oczywisty, a wartości wytrzymałości zmęczeniowych dla typowych detali konstrukcyjnych pomostów metalowych są powszechnie znane i ostatecznie przyjęte w Eurokodach 3 i 9 (tabl. 3 i 4). Jednakże nawet w tym, wydawałoby się zamkniętym katalogu detali, pojawiają się kolejne rozwiązania, wymagające uzupełniania danych normowych. Takim przykładem są połączenia FSW w konstrukcjach aluminiowych, dla których nie istnieją jeszcze normowe krzywe zmęczeniowe, a dotychczasowe prace badawcze wyraźnie wskazują na ich bardzo wysoką wytrzymałość zmęczeniową. Pierwszą propozycję kodyfikacji zagadnienia wytrzymałości zmęczeniowej połączeń FSW można znaleźć w innej pracy autora [28].

Wymiary detalu konstrukcyjnego, w tym głównie grubość łączonych blach, mają zasadniczy wpływ na poziom naprężeń nominalnych, powodujący zniszczenia zmęczeniowe. Ma to miejsce nawet w przypadku, gdy przyjęta geometria połączenia spełnia inne wymagania normowe (stany graniczne) przy obciążeniach doraźnych, co pokazano powyżej na przykładzie pomostu aluminiowego. Zwiększenie grubości płyty górnej kształtownika obniżyło poziom jej wyteżenia i zapewniło właściwą żywotność zmęczeniową [12]. Dokładność modelowania konstrukcji i obciążenia w MES może także wpłynąć na zmniejszenie poziomu naprężeń nominalnych w połączeniu. W przypadku pomostów metalowych zamodelowanie nawierzchni i/lub adekwatnego obciążenia kołem (tj. ciśnieniem opony, a nie jako to się zwyczajowo robi – sztywnym stemplem) może wpłynąć na obniżenie poziomu naprężeń nawet powyżej 30% [23], [24].

Prawidłowa i dokładna ocena zmęczenia obiektów mostowych według Eurokodów wymaga przyjęcia tzw. kategorii ruchu na moście, zależnej głównie od liczby N_{obs} samochodów ciężarowych. W przedstawionym przykładzie wartości N_{obs} przyjęto według Eurokodu 1-2 [4], aczkolwiek znacznie odbiegają one (w górę) od typowych

warunków spotykanych na większości polskich dróg krajowych i wojewódzkich [25]. Istnieje zatem konieczność sprecyzowania w Załączniku Krajowym statystycznie uzasadnionych wartości N_{obs} dla polskich dróg. Można to wykonać odpowiednio wykorzystując lub rozszerzając dane, uzyskane na podstawie kolejnego generalnego pomiaru ruchu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Siwowski T.*: Pomosty drogowe. Część I. Magazyn Autostrady nr 10/2006, wydanie specjalne - jesień 2006, pn.: Mosty - konstrukcja, wyposażenie, utrzymanie, 30 - 38, Część II. Magazyn Autostrady nr 11/2006, 67 - 72
- [2] *Wolchuk R.*: Lessons from weld cracks in orthotropic decks on three European bridges. *Journal of Structural Engineering*, **116**, 1, 1990, 75 - 84
- [3] *Maljaars J., Soetens F., van Straalen I.J.*: Fatigue of aluminium bridge decks. *Structural Engineering International*, **16**, 4, 2006, 305 - 311
- [4] PN-EN 1991-2:2007. Eurokod 1: Oddziaływanie na konstrukcje. Część 2: Obciążenia ruchome mostów
- [5] PN-EN 1993-1-9:2007. Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie
- [6] PN-EN 1999-1-3:2007. Eurokod 9. Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-3: Konstrukcje narażone na zmęczenie
- [7] *Maddox S.J.*: The fatigue behavior of trapezoidal stiffener to deck plate welds in orthotropic bridge decks. TRRL Report No. SR96UC, Transport Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1974
- [8] *Fisher J.W.*: Fatigue and fracture in steel bridges. John Wiley&Sons, 1984
- [9] *Dexter R.J., Fischer J.W.*: Fatigue cracking of orthotropic steel decks. The proceedings of IABSE Workshop, Lausanne, 1997, IABSE Report No. 76, 45 - 62
- [10] *Kolstein H.*: The role of site measurements to improve the knowledge about the fatigue behavior of steel orthotropic bridges. The proceedings of the 2004 Orthotropic Bridge Conference, Sacramento, 2004, 626 - 646
- [11] *Siwowski T.*: Drogowe mosty aluminiowe – wczoraj, dziś i jutro. *Drogi i Mosty*, 1/2005, 39 - 74
- [12] *Siwowski T.*: Pomosty aluminiowe obiektów mostowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2008
- [13] *Haagensen P.J., Raines M., Kluken A.O., Kvale I.*: Fatigue performance of welded aluminium deck structures. The proceedings of the 15th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, ASME, New York, 1996. Vol. III: Materials Engineering, 505 - 512
- [14] *Kosteas D.*: Zum Betriebsfestigkeitsverhalten von Aluminium. *Stahlbau*, **67**, 1998, Sonderheft Aluminium, 111 - 130

- [15] *Mazzolani F., Grillo M.*: Fatigue strength of longitudinally welded aluminium alloy structures. The proceedings of the 6th International Conference on Aluminium Weldments, INALCO'95, Cleveland, 1995. American Welding Society, 182 - 194
- [16] *Okura I., Hagsiwa N., Naruo M., Toda H.*: Fatigue behavior of aluminum deck fabricated by friction stir welding. *Structural Engineering/Earthquake Engineering*, **20**, 1, 2003, 55 - 67
- [17] *Hobbacher A.*: Fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding, Abington Publishing, Cambridge, UK, 1996
- [18] *Radaj D., Sonsino C.M.*: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. International Institute of Welding, Abington Publishing, Cambridge, UK, 1998
- [19] *Fricke W.*: Fatigue analysis of welded joints: state of development. *Marine Structures*, **16**, 3, 2003, 185 - 200
- [20] *Maddox S.J.*: Review of fatigue assessment procedures for welded aluminium structures. *International Journal of Fatigue*, **25**, 12, 2003, 1359 - 1378
- [21] *Gurney T.R., Maddox S.J.*: An alternative to Miners rule for cumulative damage calculations? The proceedings of the IABSE Workshop: Remaining fatigue life of steel structures, IABSE, Zurich, **59**, 1990, 189 - 198
- [22] PN-S-10030:1985. Obiekty mostowe. Obciążenia
- [23] *Wolchuk R.*: Structural behavior of surfacing on steel orthotropic decks and considerations for practical design. *Structural Engineering International*, **12**, 2, 2002, 124 - 129
- [24] *Sharma A.K., Pandez K.P.*: A review of contact area measurement of pneumatic tyre on rigid and deformable surfaces. *Journal of Terramechanics*, **33**, 5, 1996, 253 - 264
- [25] *Opoczyński K.*: Generalny Pomiar Ruchu 2005. Synteza wyników. BPBDiM Transprojekt, Warszawa, 2006
- [26] *Soetens F., van Straalen I.J.*: Aluminium bridges, aluminium bridge decks. The proceedings of European Bridge Engineering Conference: Lightweight Bridge Decks, Brisk Events, No. 18, Leusden, the Netherlands, 2003
- [27] *Wysokowski A.*: Trwałość mostów stalowych w funkcji zjawisk zmęczeniowych i korozyjnych. Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Studia i Materiały nr 53, Warszawa 2001
- [28] *Siwowski T.*: Wytrzymałość zmęczeniowa połączeń zgrzewanych tarciovo FSW w mostach aluminiowych. *Przegląd Spawalnictwa*, Vol. LXXXIII, nr 3/2011, 15 - 24

FATIGUE ASSESSMENT PROCEDURE FOR METAL BRIDGE DECKS

Abstract

Deck slabs are the most vulnerable elements of bridges. In case of metal decks (steel, aluminium) the frequently observed damage is due to fatigue cracks. Therefore a fatigue assessment procedure is important in design of new bridges and also in evaluation of existing ones. In both cases the reliable fatigue assessment can be decisive for estimated service life of a bridge. The main steps of the fatigue assessment procedure according to Eurocodes have been described in the paper. This procedure is based on safe life design method coupled with nominal stress convention. The procedure application for fatigue assessment of an aluminium bridge deck has been also presented. On the basis of FEM calculation and fatigue assessment according to Eurocodes the factors determining the fatigue life of a metal deck have been established and evaluated. This example can be easily used for such kind of assessment for an arbitrary metal deck.

Keywords

Aluminium, bridge, Eurocodes, fatigue assessment, metal deck

