

Wytrzymałość zmęczeniowa stalowych i aluminiowych konstrukcji budowlanych: ujęcia normowe



dr inż.
SŁAWOMIR ROWIŃSKI
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0001-5512-7381

W artykule zaprezentowano podejścia obliczeniowe wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji budowlanych, w tym konstrukcji stalowych oraz aluminiowych. Omówiono obowiązujące procedury obliczeniowe, które i tak często nie ujmują całościowo zagadnień związanych z wyłączeniem konstrukcji od obciążeń cyklicznych.

Normy europejskie dotyczące obliczeń zmęczeniowych konstrukcji budowlanych [1, 2] zakładają, że wytrzymałość zmęczeniowa elementów konstrukcji, w tym ich węzłów, zależy jedynie od zakresu zmienności naprężenia $\Delta\sigma$ w punkcie o największym śpiętrzeniu naprężeń, natomiast nie uwzględnia się wpływu naprężenia średniego $\Delta\sigma_m$ ani też gatunku stali, co opisano w [3, 4]. Naprężenie zmęczeniowe w rozpatrywanym miejscu konstrukcji pochodzi od każdego oddziaływania zmiennego. W przypadku obciążeń zmiennych o jednorodnym widmie naprężeń wybór obciążenia zmiennego jest dość prosty, gdyż każde obciążenie wywołuje identyczne naprężenie. Sytuacja komplikuje się w momencie widma niejednorodnego. Wówczas efekty kilku obciążeń należy sumować, zliczając cykle obciążeń jedną z metod: metodą deszczową albo metodą zbiornikową. Normy [1, 2] w swoich załącznikach opisują ten sam przykład zliczania cykli naprężenia, z tym że przykład w normie [2] jest bardziej uszczegółowiony.

Rozróżnia się dwa podejścia w ocenie zmęczenia (tj. metodę bezwarunkowej żywotności oraz metodę tolerowanych uszkodzeń), w których akceptowalny poziom niezawodności jest osiągany przez dobranie odpowiedniej wartości współczynnika wytrzymałości zmęczeniowej. W metodzie tolerowanych uszkodzeń zezwala się na pojawienie pęknięcia zmęczeniowego o niewielkim rozmiarze, które nie zagraża nośności elementu i może zostać wykryte podczas inspekcji. Warunkiem wykorzystywania metody jest wykonywanie regularnych kontroli konstrukcji (jej monitoring) w okresie jej eksploatacji oraz przyjęcie odpowiednich zabiegów mających na

celu wykrycie i usunięcie uszkodzenia zmęczeniowego. Historię naprężenia w miejscu możliwej inicjacji rysy opisuje się przez wartość niezależną od naprężeń, mianowicie przez współczynnik intensywności naprężenia pierwszej postaci deformowania szczeliny ΔK_I . Propagację pęknięcia aż do jej wartości krytycznej ocenia się za pomocą równania Parisa.

W metodzie bezwarunkowej żywotności odpowiednią niezawodność konstrukcji zapewnia się bez regularnych kontroli w celu wykrycia pęknięć zmęczeniowych. Metodę tę stosuje się wtedy, gdy lokalne pęknięcie zmęczeniowe mogłoby doprowadzić do zniszczenia pojedynczego elementu, fragmentu konstrukcji lub całej konstrukcji.

W metodzie bezwarunkowej żywotności nośność zmęczeniowa jest ustalona dwójakim sposobem wyznaczania naprężeń, w odróżnieniu do metody tolerowanych uszkodzeń, gdzie bierze się pod uwagę ΔK_I .

Pierwszy z nich to sposób naprężeń nominalnych, tzn. takich, które wyznacza się elementarnymi wzorami wytrzymałości materiałów, a więc przy pominięciu efektów sprężystej koncentracji naprężeń, czyli dodatkowej niż ta, która jest uwzględniona w normowej wytrzymałości zmęczeniowej danego węzła z karbem. Metoda naprężeń nominalnych jest najczęściej stosowana przez projektantów właśnie ze względu na swoją prostotę obliczeniową. Metodę można wykorzystywać pod warunkiem wg [5], że naprężenia nominalne są łatwe do określenia i nie wpływają na nie istotne czynniki geometryczne oraz gdy występujący karb w konstrukcji jest porównywalny do karbu przedstawionego w tablicach norm [1, 2]. Wadą metody

jest konserwatyzm, gdyż olbrzymią różnorodność karbów występujących w rzeczywistości i różniących się od siebie wielkością śpiętrzenia naprężeń sprowadzono wyłącznie do rozpoznanych typów o największych ostrościach karbów. Przyjmowanie normowej kategorii zmęczeniowej karbu, w obliczeniach realnych obiektów, wyłącznie na podstawie podobieństwa geometrycznego może powodować przewymiarowanie konstrukcji, gdyż o doborze wytrzymałości zmęczeniowej może decydować obliczeniowo ostrzejszy typ karbu niż ten realnie występujący w konstrukcji. Drugą wadą metody naprężeń nominalnych jest przyjęcie, że kryterium trwałości zmęczeniowej, czyli całkowite zniszczenie, obejmuje swym zakresem liczbę cykli zarówno do inicjacji, jak i propagacji rysy, podczas gdy te dwie fazy rządzą się zupełnie innymi prawami fizyki, nieuwzględnianymi w metodzie bezwarunkowej żywotności.

Drugi z nich to sposób naprężeń geometrycznych. Dotyczy on wyłącznie konstrukcji spawanych, dla których wyznacza się naprężenia wraz z uwzględnieniem koncentracji naprężeń, będącej wynikiem ukształtowania węzła, lecz pomija się koncentrację wywołaną samą spoiną, tj. jej kształtem i promieniem przejścia spoiny w materiał rodzimy. Metodę naprężeń geometrycznych należy stosować wtedy, gdy: trudno jest wyznaczyć naprężenia nominalne ze względu na skomplikowany układ geometryczny elementu lub połączenia, występujący karb nie jest porównywalny z żadnym z klasyfikowanych w normach karbów i przeprowadza się szczegółową analizę rozkładu naprężeń w złączu za pomocą metody MES, występują w połączeniu niedokładności wykonania przekraczające granicz-

ne wartości [5]. Metoda ta jest często wykorzystywana do wyznaczania trwałości zmęczeniowej połączeń z rur okrągłych, kwadratowych bądź prostokątnych [6, 7]. W zależności od typu połączenia, proporcji geometrycznych głównych wymiarów oraz wielkości występujących mimośrodków współczynnik spiętrzenia naprężeń może wynosić od 2,0 do 30,0 [8]. W takiej sytuacji trudno by było wykorzystać metodę naprężeń nominalnych.

Sposobem uproszczonym, łączącym obydwa wymienione, jest sposób zmodyfikowanych naprężeń nominalnych. Uwzględnia on wzrost wartości naprężeń nominalnych w miejscach inicjacji pęknięć wskutek koncentatorów innych niż te, które są ujęte w normowych kategoriach zmęczeniowych [1, 2], a więc wskutek np.: znacznych zmian sztywności w płaszczyznach ścianek i poza nimi w połączeniach elementów o przekrojach otwartych oraz zamkniętych. Metoda zmodyfikowanych naprężeń nominalnych przypomina metodę naprężeń geometrycznych, jednak nie ujmuje wpływu kształtu samej spoiny na wytrzymałość zmęczeniową elementów czy połączeń.

Sprawdzenie normowych warunków wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji stalowych wg [1] dotyczy wyłącznie obszaru

wysokocyklowej żywotności zmęczeniowej, dla którego kryterium ilościowe liczby cykli $N \geq 10^4$, oraz kryterium zakresu zmienności naprężeń normalnych i stycznych oblicza się wg wzorów (1) oraz (2):

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \Delta\sigma_a \leq 1,5 \cdot f_y, \quad (1)$$

$$\Delta\sigma = 2 \cdot \Delta\tau_a \leq 1,5 \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}. \quad (2)$$

W sytuacji wymiarowania konstrukcji niespawanych albo spawanych i odprężonych, które będą narażone na działanie cykli całkowicie lub częściowo ściskających, można przyjmować zredukowany zakres zmienności:

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} + 0,6 \cdot \sigma_{min}. \quad (3)$$

W odróżnieniu do konstrukcji stalowych w przypadku konstrukcji aluminiowych wg [7] wytrzymałość zmęczeniowa może być sprawdzana dla obszarów wysokocyklowego $N \geq 10^4$ i niskocyklowego, gdy $10^3 \leq N < 10^4$.

W celu sprawdzenia konstrukcji ze względu na zmęczenie należy wykazać, że przy obciążeniach zmęczeniowych dla obliczonych zakresów zmienności naprężeń normalnych $\Delta\sigma$ stycznych $\Delta\tau$ albo interakcji naprężeń normal-

nych $\Delta\sigma$ i stycznych $\Delta\tau$ oraz odpowiadającej im liczbie cykli n_i , spełnione są odpowiednio warunki wg normy [1]:

– sumarycznego uszkodzenia:

$$D_d = \sum_{i=1} \frac{n_{E_i}}{N_{R_i}} \leq 1,0 \quad (4)$$

– nośności:

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (5)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (6)$$

$$\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} + \frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad (7)$$

gdzie:

$\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c$ – wytrzymałości zmęczeniowe normatywne dla liczby cykli $N = 2 \cdot 10^6$,

$\Delta\sigma_{E,2}, \Delta\tau_{E,2}$ – równoważne zakresy zmienności naprężeń o stałej amplitudzie, odniesione do 2 milionów cykli (tzn. zakresy odpowiadające takiej samej żywotności zmęczeniowej, jak w przypadku widma obliczeniowego otrzymanego metodą zliczania cykli),

REKLAMA

Przedsiębiorstwo Budowlano Usługowe

REBUS

59-900 Zgorzelec, ul. Łużycka 87, NIP 615 100 35 02
tel/fax (075) 77 52 824, e-mail; rebus999@wp.pl

Zakres naszej działalności obejmuje:

- Wykonywanie robót ogólnobudowlanych związanych ze wznoszeniem budynków.
- Prace związane z wykonaniem fundamentów, reprofiliacji, iniekcje i naprawy betonów
- Wykonywanie konstrukcji dachowych – montaż więźby wraz z pokryciem. Pokrycia dachów papami termozgrzewalnymi.
- Termomodernizacje budynków – ocieplenia styropianem/ wełną mineralną.
- Usługi ocieplenia oraz hydroizolacji dachów metodą natryskową pianą PUR, oraz membraną poliuretanową
- Prace termomodernizacyjne przy obmurzach pieców przemysłowych, okładziny żaro i ognioodporne.
- Wyburzenia obiektów budowlanych.
- Wykonywanie robót budowlanych w zakresie wznoszenia konstrukcji stalowych
- Wynajem maszyn, i sprzętu budowlanego

Firma PBU REBUS posiada własne zaplecze sprzętu budowlanego do wszystkich prac. Szalunki, rusztowania, maszyny do aplikacji betonów ciężkich, podnośnik koszowy, dźwig, koparki oraz auta ciężarowe.

Rodzaje i wartości obciążeń cyklicznych oraz podstawowe wytyczne zmęczeniowe do projektowania konstrukcji budowlanych są przedmiotem norm i ogólnych prac, w których prezentuje się rezultaty z badań doświadczalnych.

γ_{Ff} , γ_{Mf} – współczynniki częściowe odpowiednio dla równoważnych zakresów zmienności naprężeń o stałej amplitudzie i dla wytrzymałości zmęczeniowej, można przyjęc współczynnik $\gamma_{Ff} = 1,0$, natomiast współczynnik γ_{Mf} jest zależny od sposobu zapewnienia akceptowalnego poziomu niezawodności za pomocą metody tolerowanych uszkodzeń albo metody bezwarunkowej żywotności. Należy przyjmować $\gamma_{Mf} = 1,15$, gdy występują małe szkody zniszczenia oraz $\gamma_{Mf} = 1,35$ w przypadku dużych konsekwencji zniszczenia,

N_{Ri} – trwałość uzyskana na podstawie krzywej Wöhlera dla właściwego zakresu zmienności naprężeń.

Obliczeniowe wartości zmienności naprężeń nominalnych $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}$ oraz $\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}$ wyznacza się wg:

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_i \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma \cdot (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (8)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2} = \lambda_1 \cdot \lambda_i \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma \cdot (\gamma_{Ff} Q_k) \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$ i $\Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k)$ zakres zmienności naprężeń od obciążeń wywołujących zmęczenie,

λ_i – zastępczy czynnik uszkodzeń, zależny od widma obciążeń określanych odpowiednimi normami przedmiotowymi, dotyczącymi różnych typów konstrukcji (maszyn, kominów, wież, belek podsuwnicowych).

Dla wielu prostych konstrukcji, na które działa jednorodne widmo obciążenia, iloczyn $\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \dots \cdot \lambda_n$ może być zastąpiony współczynnikiem równoważnym λ_i , który wyznacza się z zależności:

$$\lambda_i = \left(\frac{n_i}{2 \cdot 10^6} \right)^{1/m} \quad (10)$$

gdzie:

m – cotangens kąta nachylenia krzywej zmęczeniowej.

Jeśli widmo naprężeń nie jest jednorodne i jedna z metod zliczania cykli charakteryzuje go w postaci zbioru kilku widm jednorodnych, to ocena zmęczenia sprowadza się do obliczenia sumarycznego wskaźnika uszkodzenia D_d na podstawie hipotezy sumowania uszkodzeń Palmgrena-Minera i spełnienia warunku (4).

Kategorie zmęczeniowe, odpowiadające naprężeniom nominalnym oraz zmodyfikowanym naprężeniom nominalnym, są zestawione w tablicach Załącznika J normy [2] oraz w tablicach rozdziału 8 normy [1]. Ponadto dla określonych typów korbów normy [1] są podane również współczynniki redukcyjne k_s jako mnożnik do wytrzymałości normatywnej, uwzględniający efekt skali (np.: efekt grubości ścinki wyrobu hutniczego). Niektóre kategorie zmęczeniowe w tablicach oznaczono dodatkowo gwiazdką ($\Delta\sigma^*$), co oznacza, że w przypadku jednorodnego widma obciążeń można podwyższyć kategorię zmęczeniową karbu o jeden stopień.

Podsumowanie

Rodzaje i wartości obciążeń cyklicznych oraz podstawowe wytyczne zmęczeniowe do projektowania konstrukcji budowlanych są przedmiotem norm i ogólnych prac, w których prezentuje się rezultaty z badań doświadczalnych. Zmęczeniowe badania doświadczalne są jednym z najbardziej czasochłonnych, a zarazem najdroższych typów badań, jakie się przeprowadza w budownictwie. W zależności od obciążenia oraz uzyskanej częstotliwości badań, dostrójonej do ogólnej sztywności stanowiska, badania mogą trwać od kilku godzin do kilku tygodni. W Europie jest niewiele ośrodków naukowych, które mają tak rozbudowane zaplecza laboratoryjne, by móc realizować badania zmęczeniowe prób (np. dźwigarów mostowych) w skali naturalnej albo niewiele mniejszej od naturalnej. Wymiary badanych elementów są istotne pod kątem wpływu (tzw. efektu skali) na rezultaty. Dlatego też obowiązujące procedury obliczeniowe często nie ujmują całościowo zagadnień związanych z wytyżeniem konstrukcji od obciążeń cyklicznych.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-9: 2007. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.
- [2] PN-EN 1999-1-3: 2011. Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-3: Konstrukcje narażone na zmęczenie.
- [3] Rowiński S., 2020, Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji stalowych, „Builder”, R. 24, nr 4, s. 51–53.
- [4] Rykaluk K., Marcinczak K., Rowiński S., 2018. Fatigue hazards in welded plate crane runway girders – locations, causes and calculations, „Archives of Civil and Mechanical Engineering”, vol. 18, nr 1, s. 69–82.
- [5] Niemi E., 1994, Recommendation concerning stress determination for fatigue analysis of welded components, IIW Doc. XIII-1458-92.
- [6] Van Wingerde A.M., 1992, The fatigue behavior of T- and X-joint made of square hollow sections, Heron, vol. 37, 1992, No 2, Delft University of Technology.
- [7] Zhao X.-L., Herion S., Packer J.A. et al., 2000, Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading, TÜV-Verlag, Köln.
- [8] Van Wingerde A.M., Packer J.A., Wardenier J., 1995, Criteria for the fatigue assessment of hollow structural sections connections, Journal of Constructional Steel Research 35.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8041

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Rowiński Sławomir, 2022, Wytrzymałość zmęczeniowa stalowych i aluminiowych konstrukcji budowlanych: ujęcia normowe, „Builder” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8041

Streszczenie: Spełnienie warunków normowych wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji gwarantuje, z założonym poziomem prawdopodobieństwa, zadawalające zachowanie konstrukcji w całym projektowanym okresie eksploatacji konstrukcji (poziom 75% ufności z 95% prawdopodobieństwem jego nieprzekroczenia). Ich sprawdzenie polega na porównaniu zakresu zmienności naprężenia normalnego $\Delta\sigma$ lub stycznego $\Delta\tau$, lub ich interakcji z odpowiednią wytrzymałością zmęczeniową, ustaloną w miejscu wyznaczania naprężeń dla rozpatrywanego kształtu karbu. W artykule zaprezentowano podejścia obliczeniowe wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji budowlanych, w tym konstrukcji stalowych oraz aluminiowych. Omówiono obowiązujące procedury obliczeniowe, które i tak często nie ujmują całościowo zagadnień związanych z wytyżeniem konstrukcji od obciążeń cyklicznych.

Słowa kluczowe: konstrukcje budowlane, konstrukcje stalowe, konstrukcje aluminiowe, wytrzymałość zmęczeniowa

Abstract: FATIGUE STRENGTH OF STEEL AND ALUMINIUM BUILDING STRUCTURES: STANDARD-BASED APPROACHES. Should standard conditions of endurance limit of the structure be met, with the assumed level of probability, the condition of the structure throughout the entire period of its use will be good (the confidence level is 75% with a 95% probability that this level will not be exceeded). Checking these conditions involves comparing the range of variability of normal $\Delta\sigma$ or shear stress, $\Delta\tau$ or their interaction with adequate endurance limit as determined at the stress determination point for the notch shape in question.

The article presents computational approaches to fatigue limit of steel and aluminium building structures. The applicable calculation procedures, which often do not fully cover the issues related to the effort of the structure due to cyclic loads, have been discussed.

Keywords: building structures, steel structures, aluminium structures, fatigue strength