

Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji stalowych



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

Normy europejskie zakładają, że wytrzymałość zmęczeniowa elementów konstrukcji zależy jedynie od zakresu zmienności naprężenia w punkcie o największym spiętrzeniu naprężeń. Nie uwzględnia się wpływu innych czynników, m.in. asymetrii cyklu i naprężeń średnich, koncentracji naprężeń, rodzaju obróbki i stanu warstwy wierzchniej.

Wytrzymałość zmęczeniowa

Zmęczenie jest zjawiskiem stopniowej degradacji wytrzymałości materiału, czyli osłabiania sił kohezji, pod działaniem zmiennych w czasie naprężeń normalnych lub stycznych albo ich interakcji w określonym punkcie przekroju poprzecznego.

Liczba obciążeń 10^4 dla stali konstrukcyjnych jest granicą pomiędzy zmęczeniem niskocyklowym i wysokocyklowym, które różnią się wielkością efektów oddziaływań zewnętrznych [1, 2]. W przypadku zmęczenia niskocyklowego mamy do czynienia ze znacznymi odkształceniami plastycznymi materiału, zaś w zmęczeniu wysokocyklowym z odkształceniami sprężystymi. Najczęściej spotykane źródła obciążeń zmęczeniowych konstrukcji budowlanych to obciążenia: ruchome od pojazdów, ruchome od maszyn dźwigowych (głównie od suwnic, wózków transportu wewnętrznego), środowiskowe (np. obciążenie wiatrem), a także siły odśrodkowe od mimośrodków osi mas wirujących (np. w silnikach elektrycznych) [3].

Charakterystyczną właściwością procesu kumulacji uszkodzeń materiałów konstrukcyjnych jest jego wieloetapowość. Na początkowym etapie inicjacji (nukleacji) materiał pracuje w zakresie sprężystym z lokalnymi obszarami plastycznymi w otoczeniu koncentracji naprężeń. Prowadzi to do wzrostu, łączenia się mikrodefektów, aż do utworzenia po pewnej liczbie cykli N_i makropęknięcia, określanego mianem szczeliny zmęczeniowej. Drugim okresem jest czas powstawania, powiększania i łączenia się małych pęknięć oraz wad struktury, prowadzący do utworzenia pęknięcia dominującego. Trzeci okres to rozprzestrzenienie się ukształtowanego na drugim etapie pęknięcia po całym przekroju elementu. Niestety wciąż umowną kwestią pozostaje długość pęknięcia, po której nastę-

puje proces propagacji. Ostatni etap procesu uszkodzenia materiału to zniszczenie końcowe, często w postaci kruchego pęknięcia. Na rysunku 1. przedstawiono schemat procesu uszkodzenia materiału z podziałem na etapy [4]. W przypadku złączy spawanych z wadami wewnętrznymi (pęcherze, wtrącenia niemetaliczne, niewykrute pęknięcia wstępne) pozostają dwa etapy, gdyż każda z takich wad może być traktowana jako zainicjowane pęknięcie zmęczeniowe.

Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową

a) wpływ asymetrii cyklu i naprężeń średnich

Wykres naprężeń zmiennych w czasie t w analizowanym punkcie konstrukcji (widmo naprężeń) złożony jest z pojedynczych cykli obciążeń tworzących sinusoidalną krzywą. Pojedynczy cykl charakteryzuje naprężenie największe σ_{\max} , naprężenie najmniejsze σ_{\min} oraz naprężenie średnie σ_m i naprężenie amplitudy σ_a (rysunek 2.). Stosunek naprężeń minimalnego i maksymalnego określana się jako współczynnik asymetrii cyklu R.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \quad (1)$$

Wytrzymałość zmęczeniowa elementów w kategorii naprężeń σ_{\max} maleje wraz ze zwiększającą się różnicą pomiędzy wartościami działających naprężeń, tym samym

najmniejszą wytrzymałość zmęczeniową mają próbki przy cyklach wahadłowych, dla których współczynnik asymetrii cyklu $R = -1$ [5]. Na rysunku 3. przedstawiono zależność współczynnika R od logarytmu liczby cykli N, przy których następuje zniszczenie próbki.

Wpływ asymetrii cyklu na wytrzymałość zmęczeniową elementu uwzględnia się, wprowadzając współczynnik wrażliwości materiału na symetrię cyklu ψ_σ :

$$\psi_\sigma = \frac{2 \cdot Z_{rc} - Z_{rj}}{Z_{rj}}, \quad (2)$$

$$\sigma_a = Z_{rc} - \psi_\sigma \cdot \sigma_m, \quad (3)$$

gdzie:

Z_{rc} – wytrzymałość zmęczeniowa próby przy wahadłowym rozciąganiu – ściskaniu,

Z_{rj} – wytrzymałość zmęczeniowa próby przy odzerowo tętniącym rozciąganiu.

Istotny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową ma wartość naprężeń średnich σ_m [6]. Im większa jest wartość naprężeń średnich, tym wytrzymałość zmęczeniowa jest mniejsza i na odwrót (rysunek 4.).

Uwzględnienie wpływu naprężenia średniego σ_m na wytrzymałość zmęczeniową σ_{\max} lub σ_a próbek standardowych niespawanych jest możliwe za pomocą tzw. wykresów zmęczeniowych.



Rys. 1. Schemat procesu uszkodzenia materiału

b) wpływ koncentracji naprężeń

W miejscach zmiany przekroju poprzecznego i w obszarach naruszenia ciągłości materiału elementów konstrukcji występuje zmiana rozkładu naprężeń, powodująca ich lokalny wzrost ponad wartość nominalnie obliczoną. Mówi się wtedy o działaniu karbu. W konstrukcjach stalowych korbami są otwory na łączniki trzpieniowe, złącza spawane, a także połączenia o zróżnicowanych przekrojach poprzecznych. W obszarach karbów powstaje zawsze trójosiowy stan naprężeń, hamujący zdolność materiału do odkształceń w kierunku obciążenia.

Parametrem charakteryzującym karb jest jego ostrość, mierzona stosunkiem naprężenia maksymalnego σ_{\max} w przekroju netto do naprężenia nominalnego σ . W literaturze spotyka się najczęściej oznaczenie ostrości α_k [7, 8], w normie [9] k_r , zaś w [10] K_{gt} .

$$\alpha_k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma} \quad (4)$$

Ostrość karbu w elemencie ma wpływ na jego wytrzymałość zmęczeniową. Im karb jest ostrzejszy, tym szybciej dochodzi do inicjowania się pęknięcia, a tym samym wytrzymałość zmęczeniowa elementu maleje.

W elementach obciążanych cyklicznie, oprócz występującej w nich geometrii karbu, istotna jest zdolność materiału do relaksacji naprężeń spiętrzonych w jego dnie, mierzona klasą jakości (udarnością). Te dwie cechy elementu wiąże współczynnik działania karbu β_k , który określa wielkość zmniejszenia się wytrzymałości zmęczeniowej na skutek działania karbu i jest równy stosunkowi wytrzymałości zmęczeniowej próbki gładkiej $Z_{L, \alpha_k=1}$ do wytrzymałości zmęczeniowej próbki z karbem $Z_{L, \alpha_k \geq 1}$:

$$\beta_k = \frac{Z_{L, \alpha_k=1}}{Z_{L, \alpha_k \geq 1}} \quad (5)$$

Wartość współczynnika β_k jest wyznaczana doświadczalnie. W normie [11] współczynnik β_k jest bezpośrednio wykorzystywany do obliczeń zmęczeniowych konstrukcji, a jego wartość w zależności od kształtu karbu i gatunku stali wynosi od 1,0 do 4,2. W normie [2] zamiast współczynnika β_k wytrzymałość zmęczeniową wyznacza się za pomocą tzw. stopnia nasilenia karbu (w skali od 1 ÷ 8), będącego wielkością pochodną od β_k .

Parametrem uzależniającym współczynnik koncentracji naprężeń α_k i współczynnik działania karbu β_k jest współczynnik wrażliwości materiału na działanie karbu η_k który jest stosunkiem naprężenia spiętrzonego ponad wartość nominalną na dnie karbu w chwili pęknięcia zmęczeniowego do naprężenia spiętrzonego w stanie idealnej sprężystości, przy takim samym efekcie oddziaływania obciążenia. Im mniejszy jest współczynnik η_k tym materiał ma lepszą plastyczność oraz większą wytrzymałość zmęczeniową.

$$\eta_k = \frac{\beta_k \cdot \sigma - \sigma}{\alpha_k \cdot \sigma - \sigma} = \frac{\beta_k - 1}{\alpha_k - 1} \quad (6)$$

Na podstawie wyników z badań doświadczalnych wyznaczono wartości współczynnika η_k , które wyniosły: dla stali w stanie ulepszonym cieplnie $\eta_k = 0,7 \div 1,0$; dla stali w stanie surowym $\eta_k = 0,5 \div 0,9$; dla stali w stanie wyżarzonym $\eta_k = 0,4 \div 0,8$; dla żeliwa szarego $\eta_k \approx 0$ [12]. Należy jednak zaznaczyć, że te wartości zostały wyznaczone na próbkach standardowych niespawanych.

c) wpływ rodzaju obróbki i stanu warstwy wierzchniej

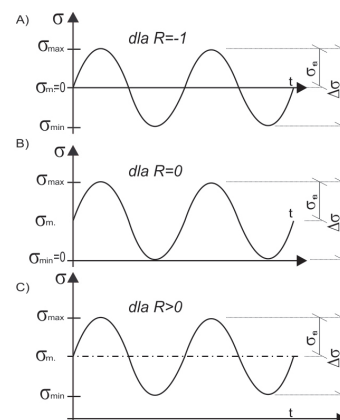
Każdy rodzaj obróbki stanu warstwy wierzchniej stali ma wpływ na wytrzymałość zmęczeniową materiału. Nierówności powierzchni powstałe na skutek obróbki skrawaniem lub w toku procesów walcowania (naskórek walcowniczy) albo odlewania (naskórek odlewniczy) są mikrokorbami, które w znacznym stopniu obniżają własności zmęczeniowe materiału. Wpływ obróbki i stanu powierzchni opisuje się współczynnikiem β_p – jako stosunek wytrzymałości zmęczeniowej próbki gładkiej (polerowanej) Z_{gt} do jej wytrzymałości po obróbce Z_p :

$$\beta_p = \frac{Z_{gt}}{Z_p} \quad (7)$$

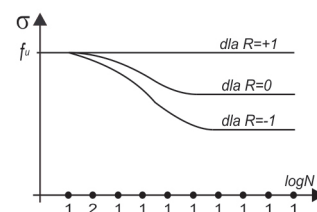
Wytrzymałość zmęczeniową materiału można zwiększyć poprzez stosowanie różnych zabiegów mechanicznych, cieplnych, rzadziej w konstrukcjach budowlanych cieplno-chemicznych. Zabiegi mechaniczne doprowadzające do zgniotu warstwy wierzchniej to między innymi: kulowanie, wałeczowanie i krążkowanie, młotkowanie czy rozwałcowanie otworów oraz wciskanie stempli. Obróbka cieplna to przede wszystkim płytkie hartowanie, hartowanie płomieniowe oraz indukcyjne, na ogół odprężanie i wyżarzanie odprężające. Korzystnego wpływu odprężania elementów, w celu zniwelowania naprężeń własnych, nie można uogólniać. Wpływ tego zabiegu na wytrzymałość zmęczeniową zależy od współczynnika asymetrii cyklu R, co zostało opisane w [13]. Podobnie sprawa wygląda w przypadku wyżarzania odprężającego, które jest wskazane w obiektach, dla których współczynnik asymetrii cyklu R jest ujemny, np. w kominach stalowych wrażliwych na wzbudzenie wirowe. W przypadku większości konstrukcji budowlanych, dla których R jest dodatnie, wyżarzanie może być zabiegiem szkodliwym.

d) wpływ gatunku stali

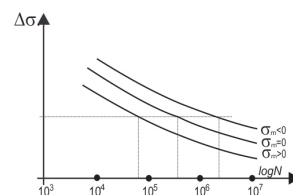
Ponieważ wytrzymałość zmęczeniowa jest częścią wytrzymałości statycznej f_u , która to część zależy od liczby cykli obciążenia N_i , istnieje zależność wytrzymałości zmęczeniowej od gatunku stali. Potwierdzają to wszystkie hipotezy zmęczeniowe (np.: Smitha, Heibacha, Goodmana). Zostały one ustalone na



Rys. 2. Przykładowe widma regularne: a) wahadłowe, b) pulsujące odzerowo, c) pulsujące dodatnio



Rys. 3. Zależność wytrzymałości zmęczeniowej materiału w próbce standardowej, odniesionej do naprężenia maksymalnego cyklu, od współczynnika asymetrii cyklu R [5]



Rys. 4. Wpływ naprężeń średnich σ_m na wytrzymałość zmęczeniową próbek niespawanych [6]

wynikach małych próbek szlifowanych, które nie odwzorowują warunków pracy elementów konstrukcji rzeczywistych, a więc elementów, w których istnieją duże naprężenia własne, nierówna powierzchnia, zmiany strukturalne w złączach spawanych oraz makro- i mikrokoncentratory. Stopniowa degradacja właściwości mechanicznych, pod wpływem obciążeń cyklicznych, w elementach z korbami ogranicza się wyłącznie do fazy propagacji pęknięcia, gdyż faza inicjacji rysy jest bardzo krótka. Natomiast wzrost pęknięć zmęczeniowych nie zależy od wytrzymałości stali, a od geometrii karbu i obciążenia.

Obecnie większość konstrukcji budowlanych jest spawana. Proces ten wprowadza do elementów zarówno naprężenia własne, jak i znaczne nieciągłości geometryczne, które powodują, że radykalnie zmniejsza się wpływ gatunku stali na wytrzymałość zmęczeniową. Badania doświadczalne pokazują, że pa-

smo rozrzutu statycznego jest jednakowe dla różnych gatunków stali [5]. Na każdym poziomie $\Delta\sigma$ dla którego były prowadzone badania, znajdują się symbole próbek reprezentujących trzy różne gatunki stali o granicach plastyczności $f_y (R_{eH}) = 240, 360$ i 700 MPa.

e) wpływ spawania

Proces spawania negatywnie wpływa na wytrzymałość zmęczeniową elementów oraz połączeń. Wiąże się to bezpośrednio z samym procesem łączenia materiałów i zjawiskami, jakie zachodzą w rodzimym materiale (strefa wpływu ciepła) oraz w spoinie. Obserwuje się między innymi różnicowanie struktury i właściwości mechanicznych pomiędzy materiałem rodzimym w strefie wpływów cieplnych oraz w spoinie. W samej spoinie i strefie przejściowej pojawiają się pory, wtrącenia oraz pęknięcia nazywane niezgodnościami. Złącza spawane bez odpowiedniej obróbki mechanicznej spoin są wyraźnymi karbami strukturalnymi. Spiętrzenie naprężeń w miejscu karbu zależy od wielkości nadlewu, od promienia przejścia spoiny w materiał rodzimy oraz od geometrii złącza spawanego. Im mniejszy promień przejścia spoiny w materiał rodzimy, tym wartość spiętrzenia naprężeń większa. Zależność spiętrzenia naprężeń od wielkości promienia przejścia spoiny w materiał rodzimy omówiono w [6].

Podsumowanie

Normy europejskie dotyczące obliczeń zmęczeniowych konstrukcji budowlanych [9, 10] zakładają, że wytrzymałość zmęczeniowa elementów konstrukcji, w tym również ich węzłów spawanych, zależy jedynie od zakresu zmienności naprężenia $\Delta\sigma$ w punkcie o największym spiętrzeniu naprężeń, nie uwzględnia się natomiast oddziaływania pozostałych czynników opisanych w artykule. Ich wpływ jest uzależniony od wielu parametrów konstrukcji, m.in. geometrii, schematu obciążeń. Wciąż są realizowane badania doświadczalne w kierunku doprecyzowania wytycznych do projektowania konstrukcji stalowych, jednak mając na uwadze skalę i złożoność konstrukcji budowlanych, trudno jest wypracować jednoznaczne wytyczne.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1, 2006, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] PN-90/B-03200, 1990, Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [3] Kazimierz Rykaluk, Krzysztof Marcinczak, Sławomir Rowiński, 2017, Fatigue hazards in welded plate crane runways girders – Locations, causes and calculation, "Archives of Civil and Mechanical Engineering", vol. 18, nr 1, s. 69–82.
- [4] Sławomir Rowiński, Nośność zmęczeniowa stalowych łączników otwartych w innowacyjnym zespoleniu typu composite dowels. "Raporty Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej", 2015, Ser. SPR nr 37, s. 39.
- [5] Rykaluk K., Pęknięcia w konstrukcjach stalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2000.
- [6] Bródka J., Kozłowski A., Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych, tom 2, Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2009.
- [7] Dietrich M., Podstawy konstrukcji maszyn, t. 1, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1999.

[8] Kocańda S., Szala J., Podstawy obliczeń zmęczeniowych. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1997.

[9] PN-EN 1993-1-9, 2007, Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.

[10] PN-EN 1999-1-3, 2012, Eurokod 9: Projektowanie konstrukcji aluminiowych. Część 1-3: Konstrukcje narażone na zmęczenie.

[11] PN-82/S-10052, 1982, Obiekty mostowe. Konstrukcje stalowe. Projektowanie.

[12] Niezgodziński M.E., Niezgodziński T., Obliczenia zmęczeniowe elementów maszyn, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1973.

[13] Truffjakov V.I., Ustatost' svrnnykh sojedinenij (Zmęczenie połączeń spawanych), „Naukowa Dumka”, Kiev 1973.

DOI: 10.5604/01.3001.0013.8805

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA

Sławomir Rowiński, 2020, Czynniki wpływające na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji stalowych, „Builder” 04 (273). DOI: 10.5604/01.3001.0013.8805

Streszczenie: Do konstrukcji, które z reguły podlegają sprawdzeniu wytrzymałości na zmęczenie, należą: mosty (szczególnie kolejowe), belki podsuwnicowe, kominy wrażliwe na wzbudzenie wirowe oraz wieże i maszty. W tych konstrukcjach każdy cykl obciążenia zmęczeniowego może wywoływać zmniejszenie wytrzymałości materiału w miejscach szczególnie wrażliwych, w których występują nieregularności, np.: brzozy i granie spoin wykonanych łukowo, zakończenia żeber i blach węzłowych czy miejsca zmiany geometrii przekroju poprzecznego. Na wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji ma wpływ wiele czynników. Do najbardziej istotnych należą wpływy: asymetrii cyklu i naprężeń średnich, koncentracji naprężeń, rodzaju obróbki i stanu warstwy wierzchniej, gatunku stali, spawania. Wpływy poszczególnych czynników odniesiono do rezultatów z badań doświadczalnych, jakie w ciągu ostatnich lat były wykonywane dla konstrukcji stalowych.

Słowa kluczowe: konstrukcje budowlane, konstrukcje stalowe, wytrzymałość zmęczeniowa

Abstract: Structures, such as bridges (especially railways), crane beams, chimneys susceptible to vibrations induced by vortex shedding, towers and masts are usually checked for fatigue strength. In these constructions, any fatigue load cycle can reduce the strength of the material in particularly sensitive areas with irregularity, such as: edges of welds, ribs and gusset endings, or places where the geometry of the cross-section is changed. The fatigue strength of a structure is affected by many factors. The most important are: cycle asymmetry and mean stress, stress concentration, type of machining and condition of the surface layer, steel grade, welding. The influence of particular factors were related to the results of experimental tests that were carried out for steel structures over the years.

Keywords: building structures, steel structures, fatigue strength