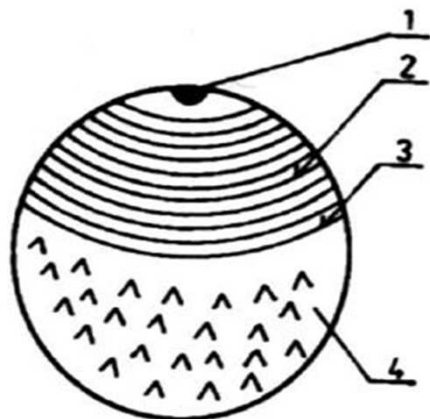
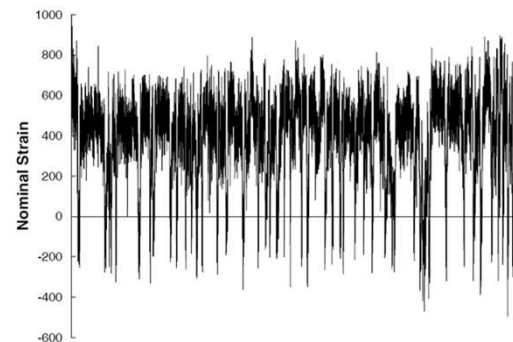
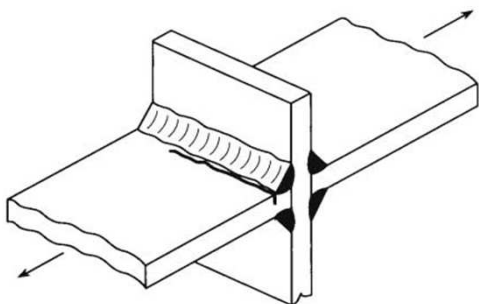


Konstrukcje metalowe 2: Zmęczenie



Opracowano z wykorzystaniem materiałów:

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

[2] Kozłowski A. (red.) *Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Wybrane elementy i połączenia. Rzeszów 2010*

[3] Kurzawa Z., *Stalowe konstrukcje prętowe obciążone statycznie i dynamicznie. Część I., Elementy konstrukcji hal przemysłowych i budynków użyteczności publicznej, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań*

[4] Strony www dostępne w dniu 14-12-2013

Leszek CHODOR , dr inż. bud, inż.arch.
leszek@chodor.co ; lch@chodor-projekt.net

Zmęczenie stali . Wprowadzenie [2]

Elementy i połączenia podlegające znacznej liczbie zmian naprężeń należy sprawdzić oprócz zwykłych warunków nośności i użytkowości również wstanie granicznym zniszczenia zmęczeniowego **ULS – FAT** . Możliwe są dwa podejścia [1]:

1. Metoda naprężeń nominalnych (MNN) (zwana inaczej klasyfikacyjną). Przy jej użyciu zakres zmienności $\Delta\sigma$ (lub $\Delta\tau$) od zmieniających się obciążeń wyznacza się dla naprężeń nominalnych, tzn przy obliczeniowym pominięciu występującego spiętrzenia naprężeń. Wartość tak wyznaczonego zakresu zmienności naprężeń porównuje się z wytrzymałością zmęczeniową, określoną dla danego typu karbu, występującego w miejscu wyznaczenia naprężeń. Taka wytrzymałość zmęczeniowa ujmuje w sobie wielkość spiętrzenia, rozrzut wyników badań zmęczeniowych, wpływ naprężeń własnych itp.
2. Metoda naprężeń geometrycznych (MNG). Wymaga wyznaczenia zakresu zmienności naprężeń geometrycznych, czyli największych naprężeń w materiale rodzimym, w sąsiedztwie początku spoiny, uwzględniających lokalny wpływ karbu konstrukcyjnego (całkowitej geometrii konstrukcji), lecz pomijających lokalny wpływ spiętrzenia spowodowany geometrią spoiny i jej nieciągłościami. Tak wyznaczony zakres zmienności naprężeń geometrycznych porównuje się z odpowiednią dla tej metody wytrzymałością zmęczeniową, inną niż w przypadku metody naprężeń nominalnych.

Metoda naprężeń nominalnych (MNN) jest konserwatywna, tradycyjna i może prowadzić do znacznych niedokładności , choć jest prosta i stosowana w EC3. W niniejszym wykładzie omówimy tylko MNN.

Metoda geometryczna jest dokładniejsza i nowoczesna, ale wymaga prowadzenia obliczeń MES.

Zmęczenie stali . Analiza naprężeń w karbie [2] {1}

W metodzie MNN olbrzymią różnorodność karbów występujących w konstrukcjach i różniących się od siebie wielkością spiętrzenia naprężeń mimo ich geometrycznego podobieństwa sprowadzono do tylko 14 typów dla zakresów zmienności naprężeń normalnych i do 2 typów dla zakresów zmienności naprężeń stycznych. Uproszczenie spowodowało, że w wielu przypadkach obliczeniowa wytrzymałość na zmęczenie określana jest raczej dla ostrzejszego karbu niż dla tego, który realnie występuje w konstrukcji.

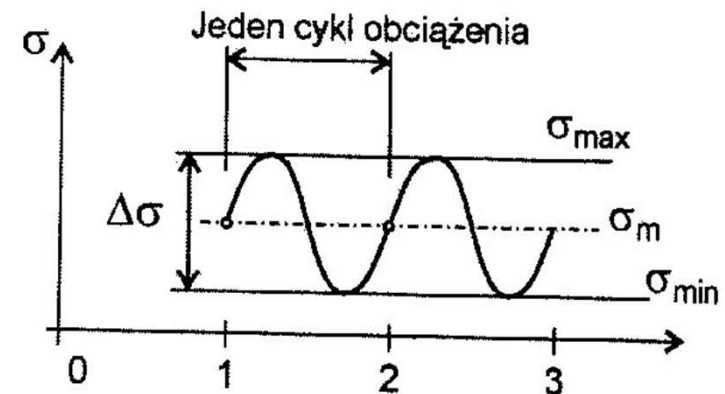
Analiza naprężeń w karbie

Zmęczenie wywoływane jest zmieniającymi się naprężeniami. Przebieg zmienności naprężeń w czasie nazywany jest widmem naprężeń. Najprostszym przykładem zmienności naprężeń jest widmo o stałej amplitudzie (tzw. widmo jednorodne) :

charakteryzowane wartościami naprężeń maksymalnych σ_{\max} i minimalnych σ_{\min} w poszczególnych cyklach oraz
Naprężeniami średnimi $\sigma_m = 0,5(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})$

Zakres zmienności naprężeń (normalnych lub stycznych) przyjmuje się jako algebraiczną różnicę maksymalnego i minimalnego naprężenia w rozpatrywanym punkcie konstrukcji

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (\Delta\tau = \tau_{\max} - \tau_{\min})$$



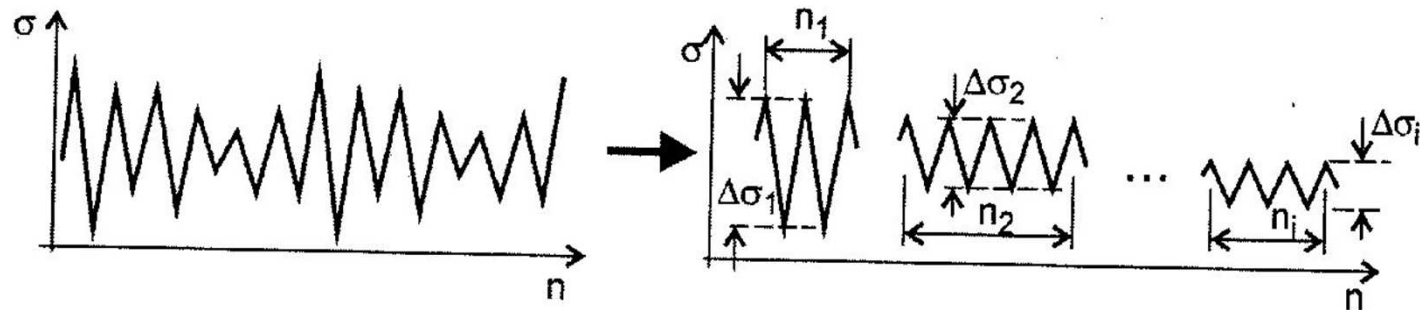
Zmęczenie stali . Analiza naprężeń w karbie {2}

W przypadku elementów niespawanych lub spawanych odprężonych oraz cykli naprężeń całkowicie lub częściowo ściskających norma [1] zezwala na wyznaczenie zredukowanego zakresu zmienności naprężeń normalnych, uwzględniających tylko 60% zakresu zmienności naprężeń ściskających σ_c i 100% naprężeń rozciągających σ_r

W przypadku widma o nieregularnej zmienności naprężeń (tzw widma niejednorodnego) norma [1] zaleca zastosowanie

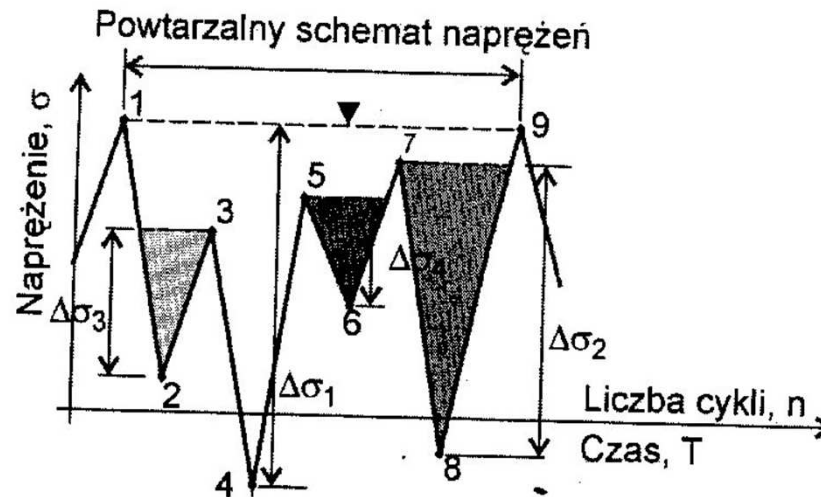
$$\Delta\sigma = |\sigma_t| + 0,6|\sigma_c|$$

jednej z technik zliczania cykli w celu zamiany takiego widma na równoważny mu zbiór widm jednorodnych



Najbardziej rozpowszechnioną metodą zliczania cyklu jest metoda „zbiornikowa”. W metodzie tej do zliczania cykli obciążeń bierze się reprezentatywny, powtarzalny przedział zmienności oszacowanej (lub pomierzonej) historii naprężenia. Przyjęty do analizy przedział musi powtarzać się w dłuższym okresie, a wyznacza się go między największymi wartościami naprężeń. Wykres zmienności naprężeń w takim przedziale traktuje się jak ściany zbiornika wypełnionego wodą. Procedura zliczania cykli polega na znajdowaniu najniżej położonego punktu wykresu i wyobrażeniu sobie, że otwiera się tam korek i spuszcza wodę → kolejny slajd

Zmęczenie stali . Analiza naprężeń w karbie {3}



Spuszczenie wody z najniższego punktu (pkt 4 na rys wyżej) odpowiada zliczeniu jednego pełnego cyklu obciążenia o zakresie $\Delta\sigma_i$. W podobny sposób w kolejnych krokach „opróżnia się” wodę z pozostałych fragmentów zbiornika, w których jeszcze pozostała, znajdując za każdym razem najniżej położony punkt wykresu. Pozwala to na zliczenie kolejnych zakresów zmienności obciążenia $\Delta\sigma_i$, liczonych jako różnica pomiędzy obecnym poziomem spuszczonej wody, a poziomem „otwieranego” korka. Liczba cykli obciążeń n , odpowiadająca danemu zakresowi zmienności $\Delta\sigma_i$ jest liczbą „wyciągnięć korka”. Procedurę tą powtarza się, aż do całkowitego „opróżnienia” zbiornika. Najważniejszą zasadą opisaną procedurą jest opróżnianie i zliczanie w pierwszej kolejności zbiorników, w których występuje największa wysokość słupa wody, czyli największy zakres naprężeń. Wyznaczając całkowitą liczbę cykli obciążeń odpowiadającą rozpatrywanemu zakresowi naprężeń $\Delta\sigma_i$, trzeba również uwzględnić ile razy analizowany schemat obciążenia powtarza się podczas eksploatacji konstrukcji.

Zmęczenie stali . Analiza naprężeń w karbie {4}

W metodzie MNN zakres zmienności naprężeń wyznacza się według klasycznej wytrzymałości materiałów, jak dla pręta pryzmatycznego

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M_y}{I_y} z + \frac{M_z}{I_z} y$$

$$\tau = \frac{VS}{It}$$

gdzie siły przekrojowe wyznacza się dla obciążeń częstych oddziaływania zmiennego o wartości charakterystycznej $(\psi_1 Q_k)$.

Naprężeniami miarodajnym do wyznaczenia zmienności naprężeń w spoinach są naprężenia normalne σ_{wf}

$$\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{1f}^2 + \tau_{1f}^2}$$

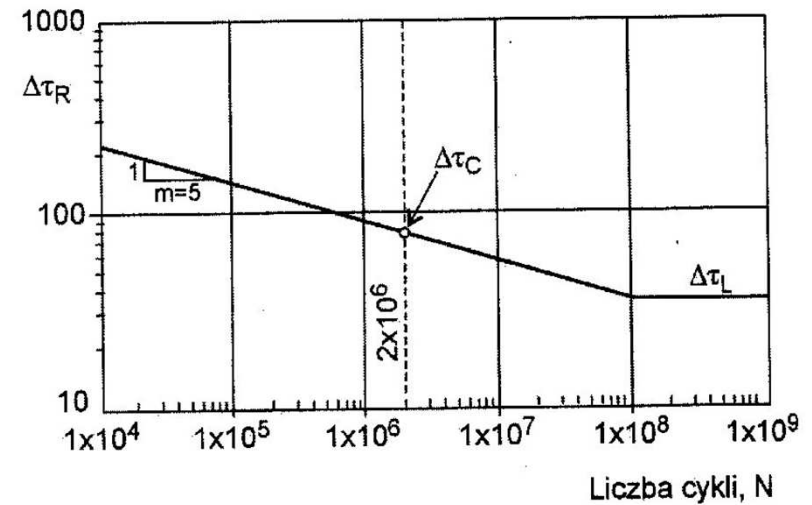
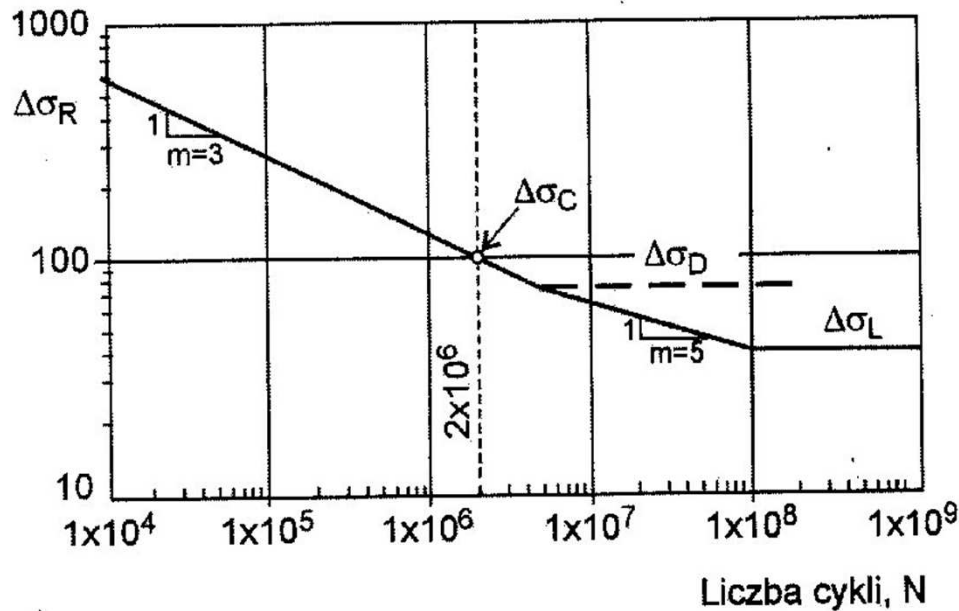
lub naprężenia ścinające τ_{wf} wzdłuż osi spoiny $\tau_{wf} = \tau_{1f}$

Zmęczenie stali . Wytrzymałość zmęczeniowa {1}

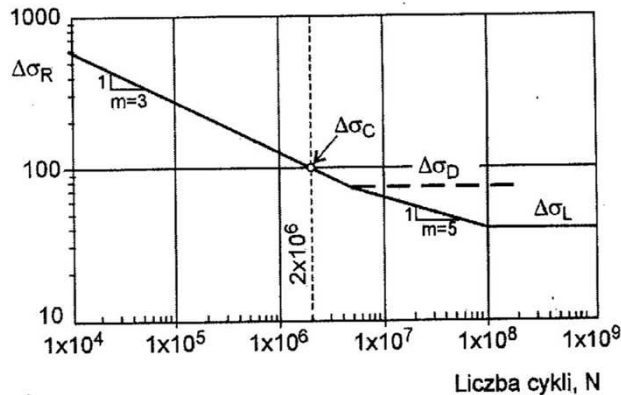
Wytrzymałość zmęczeniowa

Znaczną różnorodność karbów, występujących w konstrukcjach zredukowano do kilkunastu kategorii. Kategorię zmęczeniową określa wytrzymałość zmęczeniowa przy liczbie cykli $N=2 \cdot 10^6$ i jest wartości liczbową przypisaną danemu karbowi (i określone mu kierunkowi naprężeń).

Aby określić wytrzymałość zmęczeniowa przy innej liczbie cykli naprężeń, norma [1] podaje zależność między zmiennością naprężeń, a liczbą cykli do zniszczenia w postaci zbioru krzywych, osobnych dla naprężeń normalnych ($\log \Delta \sigma_R - \log N$) i dla naprężeń stycznych ($\log \Delta \tau_R - \log N$) . Takie krzywe często są określane mianem krzywych S-N. Przykładowy kształt jednej z krzywych dla naprężeń normalnych i stycznych pokazano niżej:



Zmęczenie stali . Wytrzymałość zmęczeniowa {2}



Charakterystyczne punkty krzywej zmęczeniowej:

→ wytrzymałość zmęczeniowa normatywna $\Delta\sigma_C$, $\Delta\tau_C$
zakres zmienności naprężeń o stałej amplitudzie,
odpowiadający zniszczeniu przy liczbie cykli $N=2 \cdot 10^6$
Ten zakres naprężeń wyrażony w N/mm^2 jest nazywany
również kategorią zmęczeniową i jest podstawowym
parametrem, opisującym karb w metodzie MNN.

→ wytrzymałość zmęczeniowa trwała przy stałej amplitudzie obciążenia $\Delta\sigma_D$

graniczna wartość zakresu naprężeń normalnych przy stałej amplitudzie, poniżej której nie występuje w badaniach uszkodzenie zmęczeniowe

→ wytrzymałość zmęczeniowa trwała $\Delta\sigma_L$

graniczna wartość zakresu naprężeń normalnych przy stałej amplitudzie, poniżej której nie występuje w badaniach

→ nachylenie krzywej zmęczeniowej

dla krzywej $\log \Delta\sigma - \log N$

Dla liczby cykli do $N \leq 5 \cdot 10^6$ wynosi 1:3 ; dla liczby cykli $5 \cdot 10^6 < N < 10^8$ wynosi 1:5.

dla krzywej $\log \Delta\tau - \log N$ jest stałe w zakresie $1 \cdot 10^4 < N < 10^8$ i wynosi 1:5

Zmęczenie stali . Wytrzymałość zmęczeniowa {3}

Wytrzymałość zmęczeniowa odnosząca się do naprężeń normalnych o stałej amplitudzie jest funkcją liczby cykli naprężeń, wyrażoną jako:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6, \quad \text{gdy } 1 \cdot 10^4 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$$

przy czym $m=3$, oraz

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \cdot \Delta\sigma_C = 0,737 \Delta\sigma_C, \quad \text{gdy } N > 5 \cdot 10^6$$

W wypadku widm naprężeń niejednorodnych (o zmiennej amplitudzie) krzywa trwałości zmęczeniowej, odnosząca się do naprężeń normalnych, opisywana jest następującymi zależnościami

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6, \quad \text{gdy } 1 \cdot 10^4 \leq N \leq 5 \cdot 10^6 \quad m=3$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D \cdot 5 \cdot 10^6, \quad \text{gdy } 5 \cdot 10^6 < N \leq 10^8 \quad m=5$$

$$\Delta\sigma_L = \Delta\sigma_D \left(\frac{5}{100}\right)^{1/5} = 0,549 \Delta\sigma_D = 0,549 \cdot 0,737 \Delta\sigma_C = 0,405 \Delta\sigma_C \quad N > 10^8$$

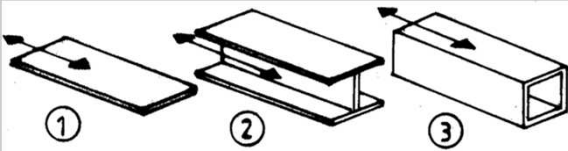
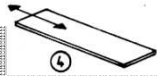

Krzywe wytrzymałości zmęczeniowej, odnoszące się do naprężeń stycznych opisywane są podobnymi zależnościami z drobnymi zmianami wg [1]

Zmęczenie stali Typy kategorii zmęczeniowych

Kategorie zmęczeniowe $\Delta\sigma_c$ i $\Delta\tau_c$, charakteryzujące poszczególne krzywe zmęczeniowe podzielone są na następujące typy:

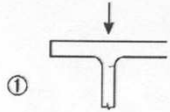
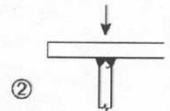
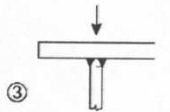
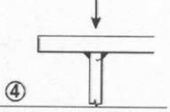
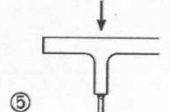
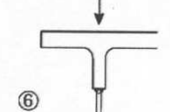
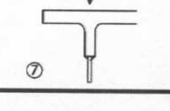
- elementy bez spoin i złącza na łączniki mechaniczne
- kształtowniki spawane
- spoiny czołowe poprzeczne
- dospawane blachy węzłowe i żebra
- złącza spawane i nośne
- kształtowniki zamknięte
- złącza w węzłach kratownic z kształtowników zamkniętych
- podłużnice o przekroju zamkniętym w pomostach ortotropowych
- styki górne pasów ze środnikiem w belkach podsuwnicowych

Przykładowy wykaz dla elementów bez spoin

Kategoria zmęczeniowa	Szczegół konstrukcyjny*	Opis karbu
160		Wyroby walcowane i ciągnięte 1) blachy i płaskowniki 2) kształtowniki walcowane 3) kształtowniki rurowe bez szwu – prostok. lub okr.
140		Blachy cięte mechanicznie lub gazowo
125		

Zmęczenie stali Kategorie zmęczeniowe – belki pods.

- Kategorie zmęczeniowe styków górnych pasów ze środnikiem w belkach podsuwnicowych

Kategoria zmęczeniowa	Szczegóły konstrukcyjne	Opis karbu	Wymagania
160		1) Dwuteowniki walcowane.	1) Zakres zmienności pionowych naprężeń ściskających $\Delta\sigma_{vert}$ oblicza się w środniku od nacisku koła.
71		2) Złącza teowe na pełną spoinę czołową.	2) Zakres zmienności pionowych naprężeń ściskających $\Delta\sigma_{vert}$ oblicza się w środniku od nacisku koła.
36*		3) Złącza teowe na niepełną spoinę czołową, zgodnie z EN 1993-1-8.	3) Zakres zmienności pionowych naprężeń ściskających $\Delta\sigma_{vert}$ oblicza się w środniku od nacisku koła.
36*		4) Spoiny pachwinowe.	4) Zakres zmienności pionowych naprężeń ściskających $\Delta\sigma_{vert}$ oblicza się w środniku od nacisku koła.
71		5) Pasy teowe połączone ze środnikiem pełną spoiną czołową.	5) Zakres zmienności pionowych naprężeń ściskających $\Delta\sigma_{vert}$ oblicza się w środniku od nacisku koła.
36*		6) Pasy teowe połączone ze środnikiem niepełną spoiną czołową lub na zasadzie złącza teowego z efektywnym pełnym przetopem zgodnie z EN 1993-1-8.	6) Zakres zmienności naprężeń $\Delta\sigma_{vert}$ w przekroju obliczeniowym spoiny oblicza się od ściskania spowodowanego naciskiem koła.
36*		7) Pasy teowe połączone ze środnikiem spoinami pachwinowymi.	7) Zakres zmienności naprężeń $\Delta\sigma_{vert}$ w przekroju obliczeniowym spoiny oblicza się od ściskania spowodowanego naciskiem koła.

Zmęczenie stali. Warunki nośności {1}

1. Sprawdzenie , czy zakres zmienności naprężeń od obciążeń częstych $\psi_1 Q_k$ nie przekracza wartości:

$$\Delta\sigma \leq 1,5f_y \quad \Delta\tau \leq 1,5\frac{f_y}{\sqrt{3}}$$

Spełnienie warunku zapewnia, że konstrukcja nie ulegnie zmęczeniu w zakresie niskocyklowym (przy liczbie cykli mniejszej niż 10^4)

W kombinacji obciążeń $\psi_1 Q_k$ występują charakterystyczne wartości obciążeń zmiennych Q_k , ψ_1 jest współczynnikiem wartości częstej oddziaływania zmiennego .

Dla oddziaływań suwnic przyjmuje się $\psi_1=0,9$

2. Sprawdzenie nośności na zmęczenie:

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad \frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

Współczynnik częściowy wytrzymałości zmęczeniowej γ_{Mf} przyjmuje się zgodnie z [1] zależnie od przyjętej metody oceny zmęczenia za pomocą metody tolerowanych uszkodzeń lub metody bezwarunkowej żywotności . Dla typowych przypadków przyjmuje się $\gamma_{Mf}=1,15$ jak dla metody bezwarunkowej żywotności

Współczynnik γ_{Ff} jest współczynnikiem równoważnego zakresu zmienności naprężeń o stałej amplitudzie. Dla typowych konstrukcji przyjmuje się $\gamma_{Ff}=1,0$,. Dla belek podsuwnicowych

Zmęczenie stali. Warunki nośności {2}

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E,2}}{\Delta \sigma_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \quad \frac{\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E,2}}{\Delta \tau_C / \gamma_{Mf}} \leq 1,0$$

$\Delta \sigma_{E2}$ oraz $\Delta \tau_{E2}$ są równoważnymi zakresami naprężeń o stałej amplitudzie odniesionymi do $2 \cdot 10^6$ cykli. Są to obliczeniowe zmienności naprężeń, które wyznacza się następująco:

$$\gamma_{Ff} \Delta \sigma_{E2} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_i \dots \lambda_n \Delta \sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$$

$$\gamma_{Ff} \Delta \tau_{E2} = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_i \dots \lambda_n \Delta \tau(\gamma_{Ff} Q_k)$$

gdzie $\Delta \sigma(\gamma_{Ff} Q_k)$ i $\Delta \tau(\gamma_{Ff} Q_k)$ są zakresami zmienności naprężeń od obciążeń wywołujących zmęczenie

λ są zastępczymi czynnikami uszkodzeń, zależnymi od widma obciążeń, zależnymi od wielu obciążeń, określanymi odpowiednimi normami przedmiotowymi dotyczącymi różnych konstrukcji (mosty, kominy, wieże, belki podsuwnicowe).

Dla wielu prostych konstrukcji, na które działa jednorodne widmo obciążenia, iloczyn $\lambda_1^* \lambda_2^* \dots$ można zastąpić współczynnikiem równoważności λ_1 , który pozwala „przenieść” zakres naprężenia o określonej liczbie cykli N na równoważny mu zakres naprężeń $\Delta \sigma_{E,2}$ o liczbie cykli zmienności $N=2 \cdot 10^6 \rightarrow$ (kolejny slajd)

Zmęczenie stali. Warunki nośności {3}

$$\lambda_1 = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}}$$

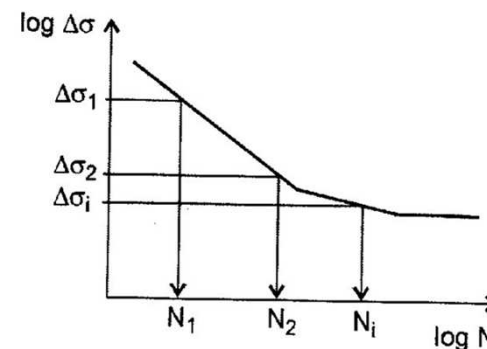
gdzie m jest współczynnikiem nachylenia krzywej zmęczeniowej.

Jeśli widmo naprężenia nie jest jednorodne i jedna z metod zliczania cykli charakteryzuje go w postaci zbioru kilku widm jednorodnych $\{n_{Ei}, \Delta\sigma_i\}$ to ocena zmęczenia polega na wyznaczeniu sumarycznego wskaźnika uszkodzenia D_d na podstawie reguły Palmgren-Minera sumowania uszkodzeń zmęczeniowych:

$$D_d = \sum_i^n \frac{n_{Ei}}{N_{Ri}}$$

gdzie: n_{Ei} – liczba cykli związana z zakresem zmienności w i -tym paśmie widma,

N_{Ri} – trwałość uzyskana na podstawie krzywej obliczeniowej $\frac{\Delta\sigma_C}{\gamma_{Mf}} - N_R$ dla zakresu zmienności widma, co pokazano schematycznie na rys:



Zmęczenie stali. Warunki nośności {4}

Warunkiem sprawdzenia nośności zmęczeniowej w przypadku stosowania formuły Palmgrena-Mirena jest

$$D_d \leq 1,0$$

Naprężeniami miarodajnymi do wyznaczenia zmienności naprężeń są naprężenia normalne i styczne. W niektórych przypadkach (karby typu: elementy bez spoin i złącza na łączniki mechaniczne oraz typu kształtowniki spawane) należy wyznaczać również naprężenia zastępcze lub główne. W przypadku naprężeń złożonych, jeśli nie podano inaczej, to należy sprawdzić warunek:

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0$$

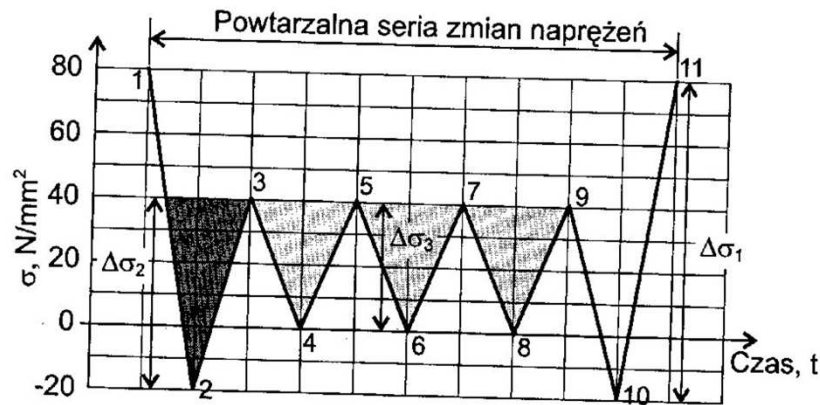
Uwaga: w specyfikacji technicznej wykonania i odbioru konstrukcji podatnych na zmęczeniu należy określić metodę oceny zapewnienia akceptowalnego poziomu niezawodności oraz klasę konsekwencji, co jest zależne od przeznaczenia obiektu oraz projektowanego okresu eksploatacji. W większości przypadków przyjmuje się metodę bezwarunkowej żywotności. W metodzie tej odpowiednia niezawodność konstrukcji musi być zapewniona bez regularnej kontroli w celu wykrycia pęknięć zmęczeniowych w okresie eksploatacji. Metodę tę stosuje się gdy lokalne pęknięcie w jakiejś części może doprowadzić do zniszczenia elementu lub konstrukcji.

Wówczas $\gamma_{Mf}=1,15$.

Zmęczenie stali. Przykład

Zliczanie cykli metodą zbiornikową.

Mamy zarejestrowaną (lub wyznaczoną analitycznie) następującą historię naprężenia w elemencie



Rys. 10.6. Historia naprężenia w elemencie

Pokazana sekwencja jest powtórzona $1,1 \cdot 10^5$ razy w całym okresie użytkowania obiektu.

Liczbami nieparzystymi ponumerowano lokalne ekstrema, natomiast parzystymi lokalne minima

Kolejne etapy otwierania „korków”:

- otwarcie korka w pkt 10 $\Delta\sigma_1 = 80 - (-20) = 100 \text{ N/mm}^2$
- otwarcie korka w pkt 2 $\Delta\sigma_2 = 40 - (-20) = 60 \text{ N/mm}^2$.

- otwarcie korka w pkt 4: $\Delta\sigma_3 = 40 - 0 = 40 \text{ N/mm}^2$
- otwarcie korka w pkt 6: $\Delta\sigma_3 = 40 - 0 = 40 \text{ N/mm}^2$
- otwarcie korka w pkt 8: $\Delta\sigma_3 = 40 - 0 = 40 \text{ N/mm}^2$

Zliczenie cykli: $\Delta\sigma_1 = 100 \text{ n/mm}^2 - 1 \text{ cykl}$; $\Delta\sigma_2 = 60 \text{ n/mm}^2 - 1 \text{ cykl}$; $\Delta\sigma_3 = 40 \text{ n/mm}^2 - 3 \text{ cykle}$

Liczba cykli W całej historii obciążenia:

$$\Delta\sigma_1 = 100 \text{ N/mm}^2; n_{E1} = 1,10 \cdot 10^5,$$

$$\Delta\sigma_2 = 60 \text{ N/mm}^2; n_{E2} = 1,10 \cdot 10^5,$$

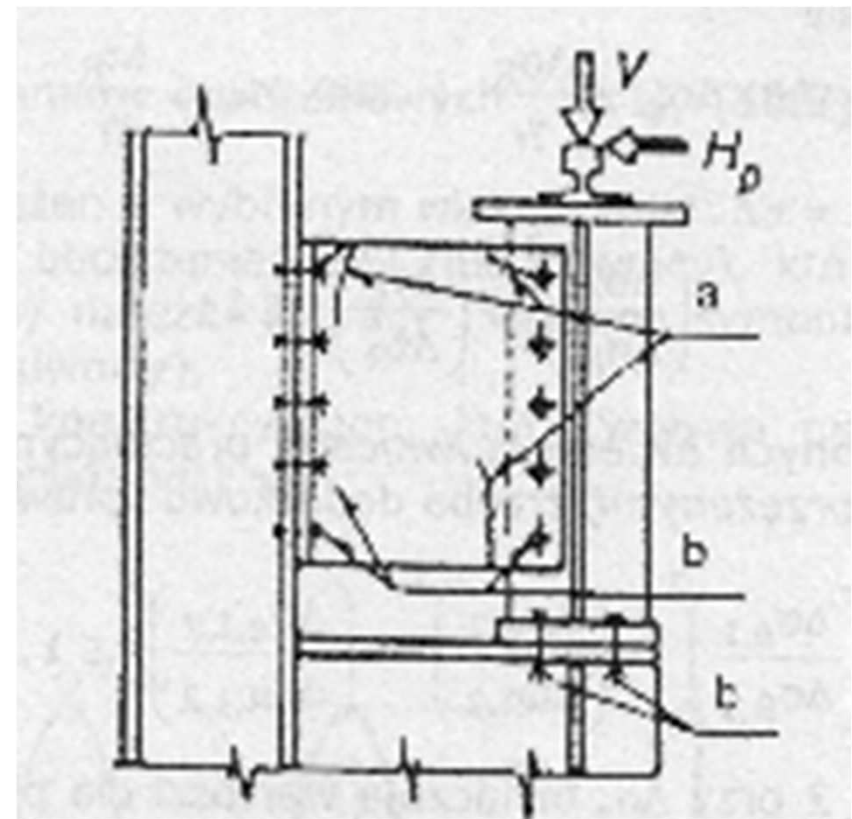
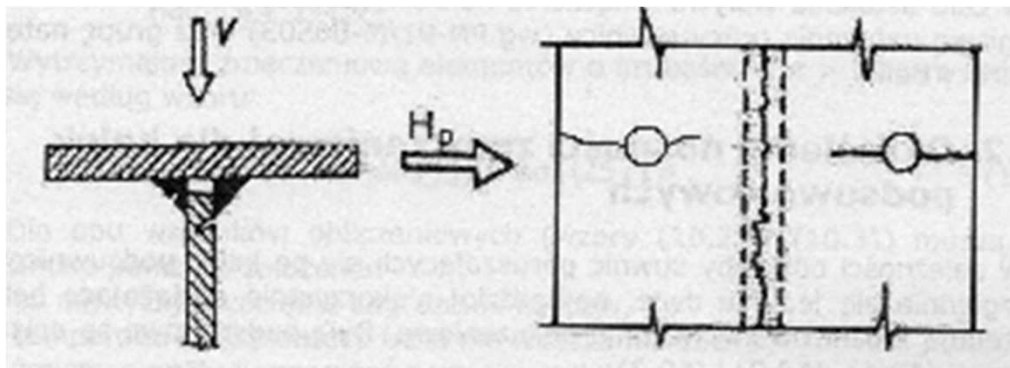
$$\Delta\sigma_3 = 40 \text{ N/mm}^2; n_{E3} = 3,30 \cdot 10^5,$$

Zmęczenie belek podsuwnicowych {1}

Uwagi ogólne.

Zmęczenie belki podsuwnicowej sprawdza się dla obciążeń charakterystycznych oraz tylko od obciążeń pionowych pomnożonych przez współczynnik dynamiczny i współczynnik konsekwencji zniszczenia ($\gamma_n > 1$).

Wybrane przykłady zmęczeniowych uszkodzeń belek podsuwnicowych:



Zmęczenie belek podsuwnicowych {2}

Podane wcześniej informacje z zakresu zmęczenia konstrukcji dotyczą głównie zmęczenia wysokocyklowego (duża liczba zmian naprężeń w czasie eksploatacji elementu konstrukcji). Z tego typu zmęczeniem mamy do czynienia wtedy, gdy przekrój elementu jest obciążony urządzeniem wywołującym drgania o dużej częstotliwości w krótkim przedziale czasowym. Suwnice należące do wyższych grup natężenia pracy (A5-A9) mogą spowodować obliczeniowe zmęczenie materiału belek podsuwnicowych. Nie ma na to jednak oczywistych dowodów wynikających z wykonanych konstrukcji rzeczywistych. Taki typ zmęczenia jest nazywany **niskocyklowym**. Opisano go dla belek podsuwnicowych w [1 zał. 5]. Zmiany naprężeń w czasie są powolne (w wybranym włóknie przekroju belki podsuwnicowej), ponieważ jazda suwnicy po belce jest stosunkowo wolna (do 80 m/min), a poza tym drgania ciężaru na haku suwnicy są tłumione masą samej suwnicy. W celu ustalenia wpływu zmęczenia na belkę podsuwnicową trzeba określić grupę natężenia pracy suwnicy (obserwacji prawidłowo wg PN-91/M-06503) oraz grupę natężenia pracy belki.

W zależności od liczby suwnic poruszających się po belce podsuwnicowej (uwzględnia się jedynie dwie, najbardziej niekorzystnie obciążające belkę) występują zróżnicowane warunki obliczeniowe. Dwa podstawowe są opisane wzorami:

Dla belek obciążonych jedną suwnicą lub dwiema sprzężonymi (zespolonymi w celu przeniesienia ciężaru większego niż udźwig jednej z nich)

$$\max \Delta \sigma_e \leq \left(\frac{\Delta \sigma_R}{\gamma_f} \right) \quad \text{i} \quad \max \Delta \tau_e \leq \left(\frac{\Delta \tau_R}{\gamma_f} \right) \quad \left(\frac{\Delta \sigma_e}{\Delta \sigma_R} \right)^3 + \left(\frac{\Delta \tau_e}{\Delta \tau_R} \right)^5 \leq 1$$

Zmęczenie belek podsuwnicowych {4}

Dla belek obciążonych dwiema suwnicami (niezależnymi) trzeba dodatkowo sprawdzić warunek

$$\left(\frac{\Delta\sigma_{e,1}}{\Delta\sigma_{R,1}}\right)^3 + \left(\frac{\Delta\sigma_{e,2}}{\Delta\sigma_{R,2}}\right)^3 + \left(\frac{\Delta\sigma_{e,1,2}}{\Delta\sigma_{R,1,2}}\right)^3 \leq 1$$

gdzie indeksy 1 i 2 dotyczą odpowiednio pierwszej i drugiej suwnicy.

W tym przypadku wytrzymałość zmęczeniowa wynosi

$$\Delta\sigma_R = 0,735\Delta\sigma_c \left(\frac{5 \cdot 10^6}{N}\right)^{\frac{1}{m}} \geq \Delta\sigma_L$$

$$\Delta\tau_R = \Delta\tau_c \left(\frac{2 \cdot 10^6}{N}\right)^{\frac{1}{m}} \geq \Delta\sigma_L$$

gdzie $m=3$, gdy $N \leq 5 \cdot 10^6$ i $m=5$ gdy $N > 5 \cdot 10^6$

$\Delta\sigma_c, \Delta\tau_c$ – kategorie zmęczeniowe ; $\Delta\sigma_L, \Delta\tau_L$ – wytrzymałość zmęczeniowa trwała

$\Delta\sigma_e, \Delta\tau_e$ – równoważny zakres zmienności naprężeń

γ_f – częściowy współczynnik bezpieczeństwa przy zmęczeniu materiału (1 do 1,2)

Zmęczenie belek podsuwnicowych {5}

Wytrzymałość zmęczeniową elementów o grubościach $t > 25$ mm redukuje się według wzoru

$$\Delta\sigma_{R,red} = \Delta\sigma_R (25/t)^{1/4}$$

Dla obu warunków obliczeniowych! (jedna lub wie suwnice) muszą być spełnione założenia:

- co najwyżej przeciętne zagrożenie korozją,
- temperatura eksploatacji belki nie wyższa niż 150°C ,
- zmiany amplitudy naprężeń normalnych i tnących spełniające nierówności:

$$\max\Delta\sigma \leq 1,5 f_d, \max\Delta\tau\sqrt{3} = \sim 0,9 f_d$$

Określenie warunków obliczeniowych wymaga znajomości:

- amplitudy naprężeń w wybranym włóknie belki: $\Delta\sigma = \Delta\sigma_{\max} - \Delta\sigma_{\min} = \Delta\sigma_e$,
- rodzaju widma obciążenia belki (lub suwnicy), które jest określane na podstawie grupy natężenia pracy i jest opisane symbolami B1 do B9 dla belki lub A 1 do A8 dla suwnicy,
- rodzaju karbu konstrukcyjnego, który wpływa na ustalenie kategorii zmęczeniowej belki: $\Delta\sigma_c$ i $\Delta\tau_c$

Zmęczenie belek podsuwnicowych {6}

Należy pamiętać, że amplituda napięć zależy od klasy wybranego przekroju belki, a nie od przekroju belki, najbardziej niekorzystnie wygarnięgo punktu belki. Wzrost obciążenia belki można określić, gdy znano są współczynniki obciążenia oraz klasa wykorzystania belki.

Charakterystyka widma docisku współczynnika K_p [1, zał. 3], którego wartość (klasa) zależy od współczynnika obciążenia belki K_b .

Wzrosty i spadki obciążenia belki K_b wyznacza się według [1] w zależności od współczynnika obciążenia belki K_p oraz klasy.

$$K_b = 0,5 K_p \left(1 + \frac{P_{min}}{P_{max}}\right)$$

gdzie: K_p – wartość współczynnika obciążenia belki, P_{min} – wartość docisku minimalnego

klasa wykorzystania belki L_0 do L_1 zależy od rodzaju pracy obciążenia i klasy cykli i określono ją w poprzedniej części wykładu

Zmęczenie belek podsuwnicowych {8}

Obliczoną wartość K_b przyporządkowuje się do jednej z klas K_1 do K_4 o wartościach (0,125; 0,25; 0,75; 1,0)

Na podstawie K_b wyznacza się klasę wykorzystania belki

gdzie dla $N < 5 \cdot 10^6$ wykładnik $m = 1/3$

$$\alpha_k = K_b^m$$

Klasę wykorzystania belki określa się (podobnie jak dla dźwignicy) na podstawie maksymalnej liczby cykli pracy belki i z uwzględnieniem rodzaju pracy dźwignicy (od nieregularnej do intensywnej). W większości przypadków klasę wykorzystania belki (H_0 - H_9 według [1, tab. Z3-1]) można ustalić na podstawie klasy wykorzystania dźwignicy (U_0 - U_9) [1] (podano w poprzedniej części wykładu) . Wartości N_j trzeba jednak zmodyfikować, ponieważ okres eksploatacji suwnicy określa się na 20 lat, a okres pracy belki na 35 lat.

Uwaga: Jeżeli znana jest jedynie grupa natężenia pracy suwnicy (A), to grupę natężenia pracy belki (B) można ustalić o jeden stopień wyższą (np. $A_5 \rightarrow B_6$) oraz przyporządkować jej najwyższą klasę obciążenia Q_4 . Dla tej klasy można wyznaczyć maksymalną liczbę cykli obciążeń (czyli klasę wykorzystania belki $H_4 \rightarrow N_T = 2,5 \cdot 10^5$

Przyporządkowanie typu suwnicy do określonej grupy natężenia pracy można ustalić z wykorzystaniem tablicy na kolejnej planszy.

Zmęczenie belek podsuwnicowych {9}

Przykłady klasyfikacji suwnic w zależności od ich przeznaczenia

Lp.	Przeznaczenie suwnicy	Określenie pracy	Grupa klasyfikacyjna suwnicy jako całości ⁽¹⁰⁾	Grupa klasyfikacyjna mechanizmów jako całość ⁽¹⁰⁾		
				podnoszenie	jazda wciągarki	jazda suwnicy
1	Suwnice z napędem ręcznym		A1	M1	M1	M1
2	Suwnice warsztatowe montażowe		A1	M2	M1	M2
3a	Suwnice montażowe w elektrowniach		A1	M2	M1	M3
	Suwnice remontowe		A1	M3	M1	M2
4a	Suwnice warsztatowe	regulame rzadkie	A2	M3	M2	M3
4b	Suwnice warsztatowe	regulame z przerwami	A3	M4	M3	M4
4c	Suwnice warsztatowe	intensywne	A4	M5	M3	M5
5a	Suwnice hakowe na składowiskach	regulame rzadkie	A3	M3	M2	M4
5b	Suwnice chwytakowe lub z chwytakiem elektromagnetycznym na składowiskach	intensywne	A6	M6	M6	M6
6a	Suwnice hakowe na składowiskach	regulame rzadkie	A3	M4	M3	M4
6b	Suwnice chwytakowe lub z chwytakiem elektromagnetycznym na składowiskach złomu	regulame z przerwami	A6	M6	M5	M6
7	Suwnice portowe przeładunkowe		A7	M8	M6	M7
8a	Suwnice kontenerowe		A5	M6	M6	M6
8b	Suwnice kontenerowe w portach		A5	M6	M6	M4
9	Suwnice hutnicze					
9a	Suwnice do wymiany walców		A2	M4	M3	M4
9b	Suwnice lejnicze		A7	M8	M8	M7
9c	Suwnice kleszczowe		A7	M8	M7	M7
9d	Suwnice wypychowe		A8	M8	M8	M8
9e	Suwnice wsadowe		A8	M8	M8	M8
10	Suwnice odlewnicze		A5	M5	M4	M5