

Kominy należy sprawdzać z uwzględnieniem następujących stanów granicznych:

❖ **nośności**

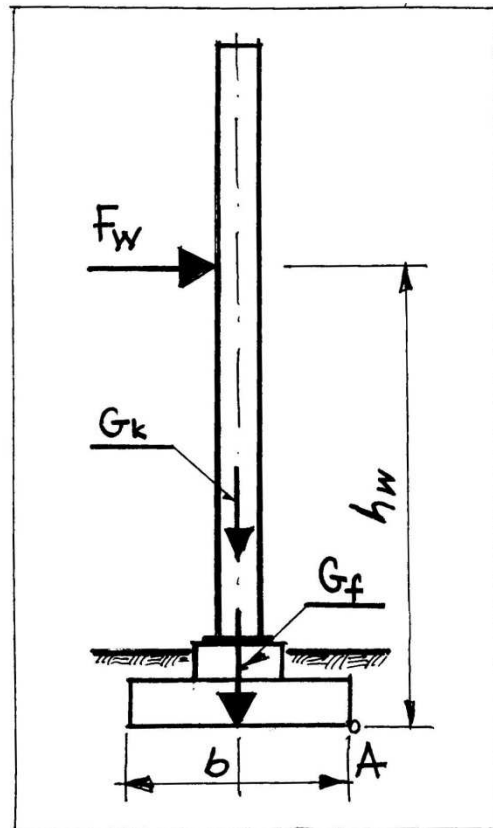
- ❑ Stateczności położenia
- ❑ Nośności elementów konstrukcji
- ❑ Stateczności ogólnej
- ❑ Stateczności miejscowej elementów konstrukcji
- ❑ Zmęczenia wysoko i niskocyklowego elementów konstrukcji
- ❑ Zniszczenia połączeń

❖ **użytkowości – deformacje, ugięcia, drgania, wahania lub przechyły**

- ❑ przemieszczenia wierzchołka komina w linii działania wiatru (obciążenie statyczne)
- ❑ amplitudy drgań od wzbudzenia wirowego (obciążenie dynamiczne)

**STANY GRANICZNE
KOMINÓW
STALOWYCH
RODZAJE SG**

Stateczność położenia sprawdza się traktując komin stalowy wraz z fundamentem jako bryłę sztywną, opartą na nieodkształcalnym podłożu. Kombinacje obciążeń przyjmuje się według normy PN-EN 1990. (Eurokod 0) w stanie EQU.



Rysunek układu sił do sprawdzania stateczności położenia komina

STANY GRANICZNE KOMINÓW STALOWYCH

STATECZNOŚĆ POŁOŻENIA

Sprawdza się dwa warunki stateczności położenia:

- warunek na obrót:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

- warunek na przesunięcie:

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} \leq 1$$

gdzie:

M_{Ed} – moment sił czynnych (wywracający) obliczony od sił poziomych (obliczeniowego działania wiatru) względem krawędzi fundamentu komina.

$$M_{E,d} = \gamma_{Q,w} F_{w,k} h_w$$

M_{Rd} – moment sił biernych (utrzymujący) od ciężaru własnego konstrukcji oraz ciężaru fundamentu, obliczony względem krawędzi fundamentu komina (punkt A).

$$M_{R,d} = \gamma_{G,\text{inf}} (G_{k,k} + G_{f,k}) \frac{b}{2}$$

STANY GRANICZNE KOMINÓW STAŁOWYCH

STATECZNOŚĆ POŁOŻENIA

F_{Ed} – czynna siła przesuwająca

$$F_{Ed} = \gamma_{Q,w} F_{w,k},$$

F_{Rd} – siła oporu tarcia fundamentu po podłożu

$$F_{Ed} = \mu \gamma_{G,inf} (G_{k,k} + G_{f,k}),$$

$\gamma_{Q,w} = 1,5$ – współczynnik częściowy obciążenia wiatrem,

h_w – odległość wypadkowej działania wiatru od punktu obrotu (punkt A, rysunek),

$\gamma_{G,inf} = 0,9$ – częściowy współczynnik obciążenia stałego w stanie EQU,

$G_{k,k}$ – ciężar charakterystyczny konstrukcji komina,

$G_{f,k}$ – ciężar charakterystyczny fundamentu,

b – szerokość podstawy fundamentu,

μ – współczynnik tarcia (beton po gruncie $\mu = 0,25 \div 0,65$)

**STANY GRANICZNE
KOMINÓW
STALOWYCH**

**STATECZNOŚĆ
POŁOŻENIA**

Trzon komina stanowi na ogół cienkościenna walcowa lub stożkowa powłoka nośna nieusztywniona, ewentualnie z pierścieniami usztywniającymi. Norma PN-EN 1993-1-6 określa miarodajne stany graniczne powłok stalowych jako:

- **LS1** – zniszczenia na skutek uplastycznienia materiału przy ściskaniu lub rozerwania przy rozciąganiu ścianki powłoki,
- **LS2** – zmęczenia niskocyklowego (nieprzystosowania plastycznego)
- **LS3** – niestateczności (wyboczenia),
- **LS4** – zmęczenia wysokocyklowego;

Sprawdzenie stanów granicznych nośności **LS1** i **LS3** w projektowaniu powłok stalowych może być prowadzone za pośrednictwem globalnej analizy numerycznej z wykorzystaniem programów komputerowych i metody elementów skończonych, bądź na podstawie obliczeń w uproszczonym, często stosowanym podejściu naprężeniowym.

STANY GRANICZNE KONSTRUKCJI POWŁOKOWYCH

RODZAJE SG

Wartości naprężeń od działania obciążeń zewnętrznych w nieusztynionych pionowych powłokach walcowych można wyznaczać według teorii błonowej, traktując **powłokę walcową** jako **uogólnioną belkę**. Norma kominowa PN-EN 1993-3-2 w p.5.2.1 i 6.2.1 wskazuje na możliwość sprawdzania nośności trzonu jako uogólnionej belki poddanej obciążeniom zewnętrznym według PN-EN 1993-1-1, ale z uwzględnieniem klasy przekroju. Może to więc dotyczyć tylko kominów o przekroju poprzecznym klasy 1 do 3, o wartościach $d/t \leq 90 \varepsilon^2$. Przekroje rurowe nie spełniające ww. warunku należą do klasy 4 i wymagają obliczeń według **PN-EN 1993-1-6 – konstrukcje powłokowe**. Dotyczy to większości stosowanych przekrojów trzonów nośnych kominów.

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI KOMINA

MODEL PRĘTOWY

W obliczeniach nieusztynionej powłoki trzonu, traktowanego jako uogólniona belka o nieodkształcalnych przekrojach, można pomijać efekty zgięciowe, czyli siły wewnętrzne równoleżnikowe, jeśli są spełnione warunki normowe według [PN-EN 1993-3-2]:

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-3-2} \\ (5.1) \end{array} \quad l/r_m \geq 0,14 r_m/t + 10 \quad (3)$$

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-3-2} \\ (5.3) \end{array} \quad r_m/t \leq 160 \quad (4)$$

w których:

l – wysokość (długość) powłoki trzonu,

r_m – średni promień przekroju powłoki,

t – grubość powłoki skorodowanej.

Jeśli te warunki nie są spełnione, to trzeba uwzględnić obwodowy moment zginający w powłoce od nierównomiernego rozkładu ciśnienia wiatru na obwodzie powłoki

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-3-2} \\ (5.2) \end{array} \quad m_y = 0,5r_m^2 \cdot w_e \quad (5)$$

gdzie:

m_y – moment zginający na jednostkę długości,

w_e – ciśnienie wiatru na zewnętrzną powierzchnię konstrukcji według wzoru 5.1 w normie [PN-EN 1991-1-4].

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI KOMINA MODEL PRĘTOWY

Sprawdzenie **stanu granicznego nośności powłoki** trzonu komina w podejściu naprężeniowym wymaga sprawdzenia warunków normowych w każdym punkcie powłoki. W ujęciu ogólnym można to przedstawić:

a) bez uwzględniania niestateczności (LS1):

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-1-6} \\ (6.6) \end{array} \quad \sigma_{Ed} \leq \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

b) z uwzględnieniem niestateczności (LS3):

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-1-6} \\ (8.12) \end{array} \quad \sigma_{Ed} \leq \frac{\chi \cdot f_{yk}}{\gamma_{M1}} \quad (17)$$

gdzie:

σ_{Ed} – wartość obliczeniowa składowej naprężenia lub naprężenia zastępczego;

np. $\sigma_{Ed} = \sigma_{xEd}$

$f_{yk} = f_y$ – charakterystyczna granica plastyczności stali,

χ – współczynnik niestateczności,

γ_{M0} , γ_{M1} – współczynniki częściowe ($\gamma_{M0} = 1,0$, $\gamma_{M1} = 1,1$).

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI POWŁOKI TRZONU KOMINA

PODEJŚCIE NAPRĘŻENIOWE

Przy sprawdzaniu **stanu LS1** należy wykazać, że największe naprężenia obliczone dla miarodajnej kombinacji obciążeń, nie przekraczają wartości granicy plastyczności czyli:

$$\sigma_{x,d} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

gdzie:

$$\sigma_{x,d} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W}$$

N_{Ed} – obliczeniowa siła osiowa w sprawdzanym przekroju,

M_{Ed} – moment zginający w sprawdzanym przekroju.

$\gamma_{M0} = 1,0$ – współczynnik częściowy,

f_y – granica plastyczności stali trzonu komina,

A – pole powierzchni przekroju poprzecznego trzonu,

W – wskaźnik wytrzymałości zginanego przekroju poprzecznego trzonu komina,

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI POWŁOKI TRZONU KOMINA

PODEJŚCIE NAPRĘŻENIOWE

Sprawdzenie **stanu LS3** jest konieczne, gdy powłoka nie spełnia warunku granicznego:

$$\frac{r}{t} \leq 0,03 \frac{E}{f_y}$$

co ma najczęściej miejsce w typowych trzonach kominów stalowych.

Stosując formułę naprężeniową, sprawdzenie **stanu LS3** polega na wykazaniu, że spełniony jest warunek:

$$\frac{\sigma_{x,d}}{\sigma_{x,Rd}} \leq 1$$

gdzie:

$\sigma_{x,d}$ – obliczeniowa wartość naprężeń południkowych w trzonie komina,

$\sigma_{x,Rd}$ – obliczeniowe południkowe naprężenie wyboczeniowe powłoki (nośność z uwzględnieniem jedynie niestateczności miejscowej powłoki).

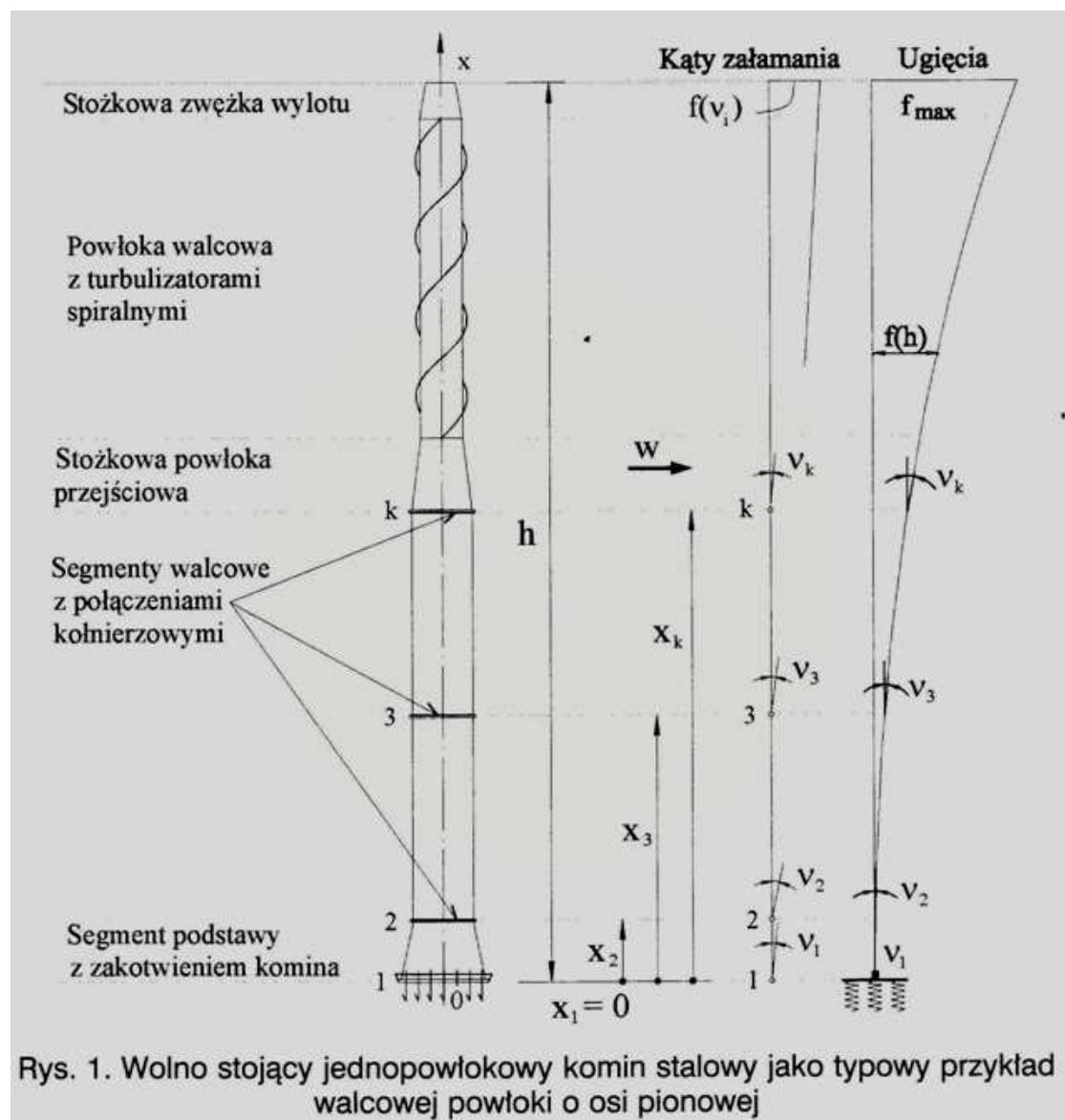
STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI POWŁOKI TRZONU KOMINA

PODEJŚCIE NAPRĘŻENIOWE

W powyższym, zaczerpniętym z normy PN-EN 1993-1-6, sposobie sprawdzania trzonu komina, sprawdza się nośność przekroju trzonu, z pominięciem stateczności ogólnej, czyli wyboczenia komina jako całości. Taki sposób obliczania może być stosowany, gdy zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 1993-1-1. „Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1. Reguły ogólne i reguły dla budynków” w obliczeniach statycznych uwzględnia się zarówno efekty drugiego rzędu (globalne $P-\Delta$ i lokalne $P-\delta$) jak i globalne i lokalne imperfekcje (p. niżej).

**STAN GRANICZNY
NOŚNOŚCI POWŁOKI
TRZONU KOMINA**

**PODEJŚCIE
NAPRĘŻENIOWE**



Rys. 1. Wolno stojący jednowałkowy komin stalowy jako typowy przykład walcowej powłoki o osi pionowej

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI IMPERFEKCJA GLOBALNA

Imperfekcja globalna wolno stojącego komina uwzględniana jest jako poziome odchylenie wierzchołka od pionu

$$\Delta = \frac{h}{500} \sqrt{1 + \frac{50}{h}}$$

h – całkowita wysokość komina [m]

np. $h = 25 \text{ m}$ $\Delta = 87 \text{ mm}$;

$h = 40 \text{ m}$ $\Delta = 120 \text{ mm}$;

$h = 60 \text{ m}$ $\Delta = 162 \text{ mm}$.

Imperfekcje **lokalne** powłoki komina są uwzględniane w formułach nośności wyboczeniowej powłoki zgodnie z PN-EN 1993-3-2 oraz PN-EN1993-1-6 i nie wymagają uwzględniania w analizie globalnej, jeżeli te imperfekcje nie przekraczają wartości granicznych, tam określonych. Dopuszczalna tolerancja odchyłek wykonawczych osi komina od pionu na dowolnej jego wysokości nie może przekroczyć

$$\Delta_{gr} = \frac{h}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{h}},$$

h – wysokość do sprawdzanego poziomu komina [m]

np. h = 10 m $\Delta_{gr} = 25$ mm

h = 30 m $\Delta_{gr} = 49$ mm

h = 60 m $\Delta_{gr} = 81$ mm

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI – IMPERFEKCJE LOKALNE

W przypadku gdy obliczenia statyczne są wykonywane bez uwzględnienia imperfekcji i efektów drugiego rzędu, należy sprawdzić (uwzględnić) stateczność ogólną.

Proponuje się następujący sposób sprawdzania nośności i stateczności trzonów kominów:

- **podejście naprężeniowe:**

Naprężenia $\sigma_{x,d}$ do wykorzystania w powyższym wzorze należy obliczać z uwzględnieniem wyboczenia trzonu, ze wzoru:

$$\sigma_{x,d} = \frac{N_{E,d}}{\chi_i A} + \frac{M_{E,d}}{W}$$

χ_i – współczynnik wyboczeniowy, obliczony w odniesieniu do całego trzonu komina

**STAN GRANICZNY
NOŚNOŚCI POWŁOKI
TRZONU KOMINA**

**PODEJŚCIE
NAPRĘŻENIOWE**

- **podejście ogólne według normy PN-EN 1993-1-1:**

Warunek stateczności trzonu, nawiązujący do wycofanej polskiej normy [PN-93/B-03201]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_i N_{Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1$$

gdzie:

N_{Ed} , M_{Ed} – siła osiowa, moment zginający w sprawdzanym przekroju,

χ_i – współczynnik wyboczeniowy, obliczony w odniesieniu do całego komina. W przypadku obliczeń statycznych z uwzględnieniem efektów II rzędu, długość wyboczeniową można przyjmować równą długości systemowej (teoretycznej)

Nośności graniczne powłoki określa się według wzorów:

$$N_{Rd} = \sigma_{x,Rd} A$$

$$M_{Rd} = \sigma_{x,Rd} W$$

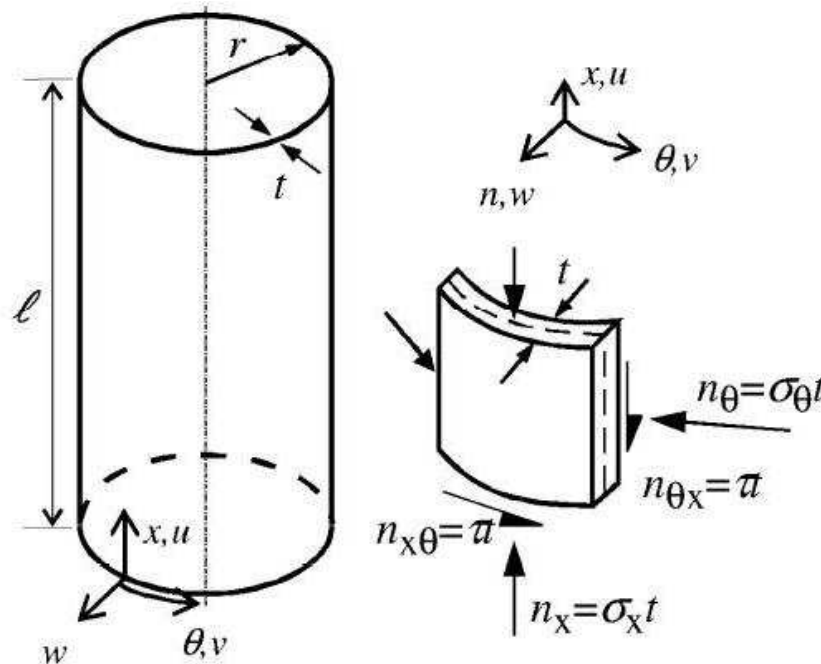
Oznaczenia w powyższych wzorach jak wyżej.

**STAN GRANICZNY
NOŚNOŚCI POWŁOKI
TRZONU KOMINA**

PODEJŚCIE OGÓLNE

**(z uwzględnieniem
stateczności ogólnej
i miejscowej)**

W przypadku wymiarowania powłoki trzonu kominu stalowego należy uwzględnić przede wszystkim ścisnienie południkowe (bądź rozciąganie) ze zginaniem od porywów wiatru, czyli składową naprężenia σ_x (patrz rysunek)



Rysunek D.1: Geometria powłoki walcowej, naprężenia błonowe i ich wypadkowe

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI POWŁOKI TRZONU KOMINA

PODEJŚCIE NAPRĘŻENIOWE

W celu określenia wartości naprężeń wyboczeniowych i zweryfikowania stateczności powłoki należy:

1. Określić na podstawie analizy liniowej (LA) wartości naprężeń błonowych: $\sigma_{x,Ed}$, $\sigma_{\theta,Ed}$ i $\tau_{x\theta,Ed}$ od oddziaływań zewnętrznych;
2. Obliczyć wartości naprężeń krytycznych przy wyboczeniu sprężystym powłoki idealnej: $\sigma_{x,Rcr}$, $\sigma_{\theta,Rcr}$ i $\tau_{x\theta,Rcr}$ (według odpowiednich wyrażeń z załącznika D normy [EC3-1-6]);
3. wyznaczyć smukłości względne powiązane z poszczególnymi naprężeniami składowymi: λ_x , λ_θ , λ_τ ;
4. Określić na podstawie załącznika D normy [EC3-1-6] pozostałe parametry mające wpływ na wartość redukcyjnych współczynników wyboczenia, takie jak.: graniczna smukłość względna λ_0 , parametr imperfekcji α , mnożnik w formule interakcji przy wyboczeniu sprężysto-plastycznym β , wykładnik w formule interakcji przy wyboczeniu sprężystoplastycznym η ;
5. Wyznaczyć redukcyjne współczynniki wyboczenia χ_x , χ_θ , χ_τ i określić charakterystyczne wartości naprężeń wyboczeniowych $\sigma_{x,Rk}$, $\sigma_{\theta,Rk}$ i $\tau_{x\theta,Rk}$;

**STAN GRANICZNY
NOŚNOŚCI POWŁOKI
TRZONU KOMINA**

**PODEJŚCIE
NAPRĘŻENIOWE –
PROCEDURA
OBLICZENIOWA**

6. Określić obliczeniowe wartości naprężeń wyboczeniowych: $\sigma_{x,Rd}$, $\sigma_{\theta,Rd}$ i $\tau_{x\theta,Rd}$, przy zastosowaniu częściowego współczynnika bezpieczeństwa $\gamma_{MI}=1,1$;
7. Przeprowadzić weryfikację stateczności poprzez porównanie wartości naprężeń błonowych od oddziaływań zewnętrznych z odpowiednimi wartościami obliczeniowymi naprężeń wyboczeniowych PN-EN 1993-1-6 (wzór 8.18):

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd} \quad \sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd} \quad \tau_{x\theta,Ed} \leq \tau_{x\theta,Rd}$$

8. w przypadku złożonego stanu naprężeń należy dodatkowo sprawdzić interakcyjny warunek stateczności: (wzór 8.19)

$$(8.19) \quad \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right)^{k_x} - k_i \left(\frac{\sigma_{x,Ed}}{\sigma_{x,Rd}} \right) \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right) + \left(\frac{\sigma_{\theta,Ed}}{\sigma_{\theta,Rd}} \right)^{k_\theta}$$

w którym wykładniki określone są zależnościami:

$$(D.46) \quad k_x = 1,25 + 0,75 \chi_x$$

$$(D.47) \quad k_\theta = 1,25 + 0,75 \chi_\theta$$

$$(D.48) \quad k_\tau = 1,75 + 0,25 \chi_\tau$$

$$(D.49) \quad k_i = (\chi_x \chi_\theta)^2$$

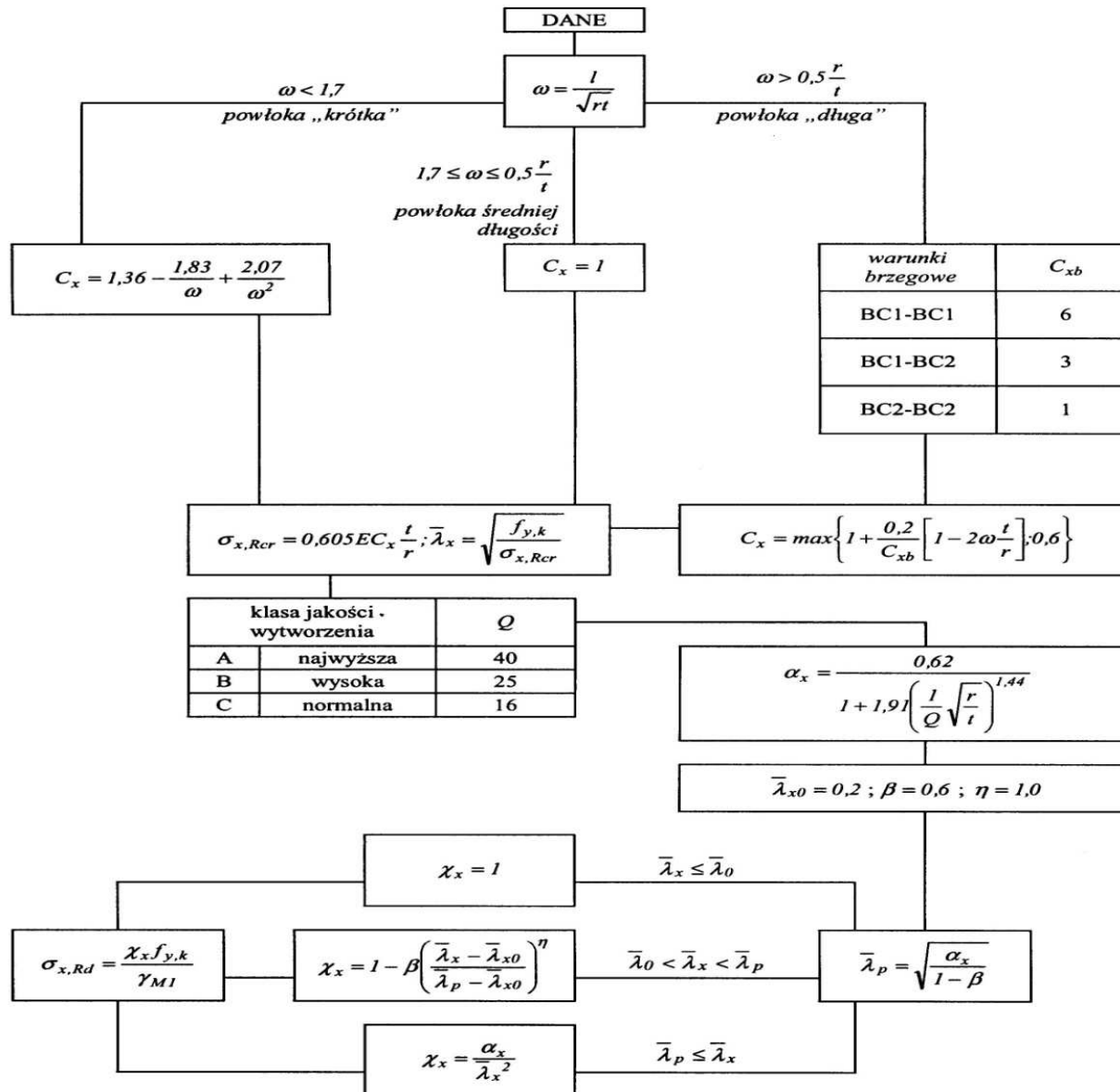
**STAN GRANICZNY
NOŚNOŚCI POWŁOKI
TRZONU KOMINA**

**PODEJŚCIE
NAPRĘŻENIOWE –
PROCEDURA
OBLICZENIOWA**

Należy przy tym pamiętać, że w przypadku występowania naprężeń rozciągających przyjmuje się, że ich wartości we wzorze (8.19) są równe zero.

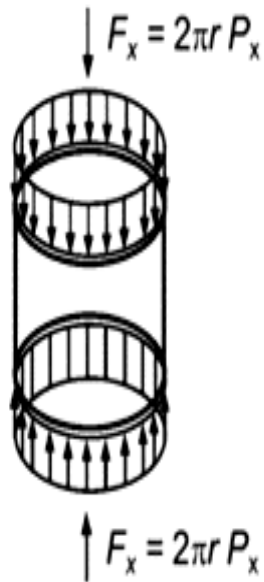
STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI POWŁOKI TRZONU KOMINA

PODEJŚCIE NAPRĘŻENIOWE –
SCHEMAT BLOKOWY DO
WYZNACZANIA NAPRĘŻEŃ
WYBOCZENIOWYCH POWŁOKI
WALCOWEJ ŚCISKANEJ
POŁUDNIKOWO



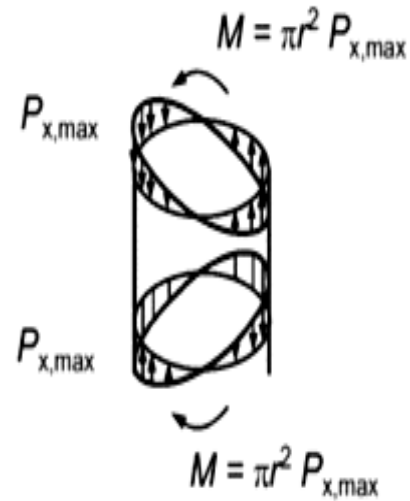
A.2 Nieuźebrowane powłoki walcowe

A.2.1 Równomierne obciążenie podłużne



$$\sigma_x = -\frac{F_x}{2\pi r t}$$

A.2.2 Obciążenie podłużne od zginania



$$\sigma_x = \pm \frac{M}{\pi r^2 t}$$

A.2.3 Obciążenie tarciove



$$\sigma_x = -\frac{1}{t} \int_0^l p_x \cdot dx$$

STAN GRANICZNY
NOŚNOŚCI POWŁOKI
TRZONU KOMINA

PODEJŚCIE NAPRĘŻENIOWE –
NAPRĘŻENIA W POWŁOKACH
WEDŁUG TEORII BŁONOWEJ

Stan graniczny użyteczności kominów stalowych dotyczy deformacji, ugięć, drgań lub przechyłów trzonu komina wpływających negatywnie na wygląd i sposób użytkowania konstrukcji, powodujących niepokój obserwatorów, a także możliwe uszkodzenia elementów niekonstrukcyjnych. Współczynniki częściowe w stanach granicznych użyteczności przyjmuje się równe 1,0 – charakterystyczne wartości obciążeń i wartości cech mechanicznych stali

Maksymalne przemieszczenie (ugięcie) δ_{max} wierzchołka trzonu komina wolno stojącego przy charakterystycznej wartości obciążenia wiatrem w linii jego działania, według PN-EN 1993-3-2 wynosi:

$$\delta_{max} = \frac{h}{50}$$

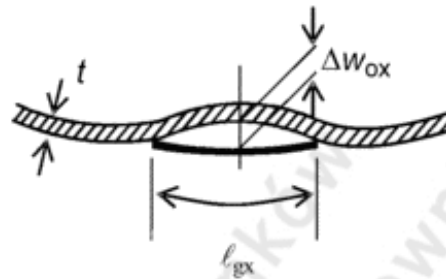
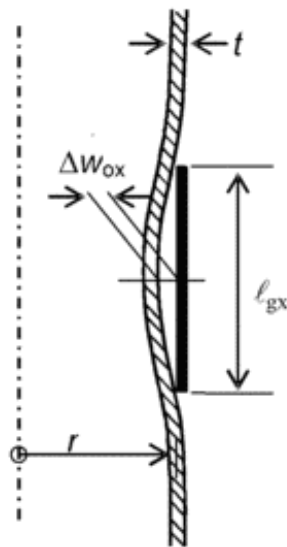
STAN GRANICZNY UŻYTKOWALNOŚCI

OBCIĄŻENIE STATYCZNE – UGIĘCIE W LINII DZIAŁANIA OBCIĄŻENIA

h – całkowita wysokość komina

Konstrukcje powłokowe charakteryzuje duża wrażliwość na imperfekcje, dlatego w każdej metodzie obliczeniowej powinno się jednoznacznie określać maksymalną wartość dopuszczalnej amplitudy imperfekcji powiązanej z nośnością obliczeniową. Tolerancje dotyczące odchyłek geometrii powłoki od wartości nominalnych są określone w normie PN-EN 1090-2 zawierającej wytyczne wykonywania konstrukcji stalowych i aluminiowych. W normie tej określone zostały trzy klasy jakości wytworzenia konstrukcji:

- klasa A – opisywana jako najwyższa,
- klasa B – opisywana jako wysoka,
- klasa C – opisywana jako normalna.



TOLERANCJE WYKONANIA

KLASY JAKOŚCI WYKONANIA KONSTRUKCJI

Imperfekcje lokalne powłoki komina są uwzględniane w formułach nośności wyboczeniowej powłoki zgodnie z PN-EN 1993-3-2 oraz PN-EN1993-1-6 i nie wymagają uwzględniania w analizie globalnej, jeżeli te imperfekcje nie przekraczają wartości granicznych, tam określonych. Dopuszczalna tolerancja odchyłek wykonawczych osi komina od pionu na dowolnej jego wysokości nie może przekroczyć

$$\Delta_{gr} = \frac{h}{1000} \sqrt{1 + \frac{50}{h}},$$

h – wysokość do sprawdzanego poziomu komina [m]

np. h = 10 m $\Delta_{gr} = 25$ mm

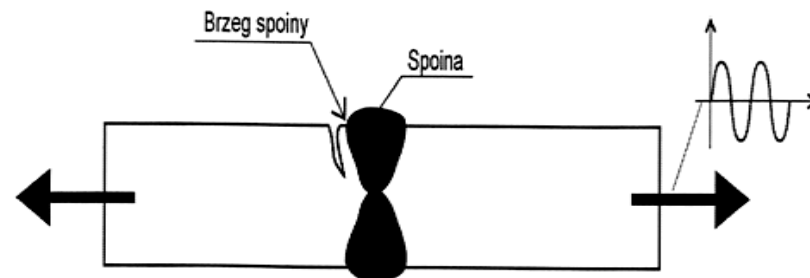
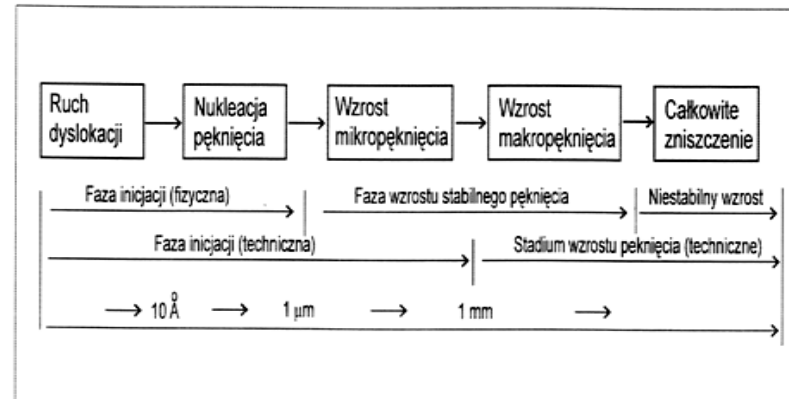
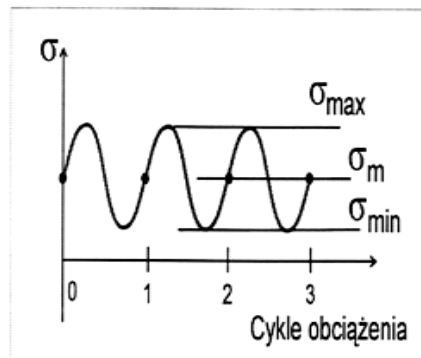
h = 30 m $\Delta_{gr} = 49$ mm

h = 60 m $\Delta_{gr} = 81$ mm

STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI

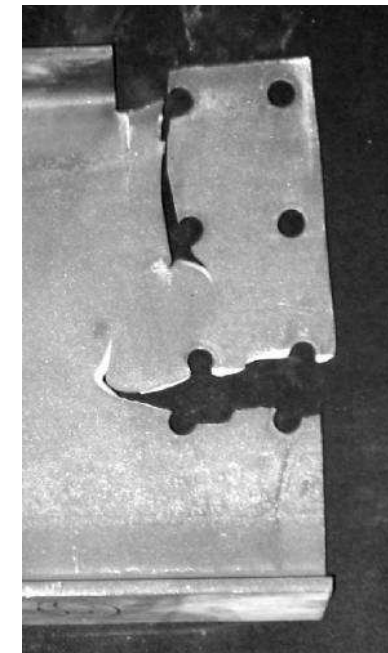
IMPERFEKCJE LOKALNE

Zmęczenie – proces inicjacji i propagacji pęknięć w konstrukcji spowodowany oddziaływaniem naprężeń okresowo zmiennych. Całkowite zniszczenie następuje po pewnym czasie, w miejscu największego osłabienia przekroju



ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STALOWYCH

Zjawisko zmęczenia



Rodzaje konstrukcji obliczanych na zmęczenie:

Wszystkie konstrukcje, gdzie obciążenie przekracza
 $10^4 - 2 \times 10^4$ cykli obciążenia.

Praktycznie, z reguły zmęczenie należy sprawdzać w:

- Konstrukcjach wsporczych maszyn wirujących
- Konstrukcjach wsporczych dźwignic
- Konstrukcje w budownictwie wodnym i morskim (ruch wody)
- Smukłych konstrukcjach wieżowych (wysokich) – m.in. [kominy stalowe](#)
- Szkieletach budynków wysokich
- Mostach i wiaduktach drogowych i kolejowych
- Zbiornikach i rurociągach ciśnieniowych o dużej liczbie cykli zmian obciążeń
- W belkach stropowych budynków budownictwa powszechnego oraz bud. przemysłowego z zainstalowanymi na nich źródłami drgań

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STALOWYCH

Rodzaje konstrukcji obliczanych na zmęczenie

Najczęściej spotykane źródła obciążeń zmęczeniowych konstrukcji budowlanych (z wyłączeniem mostów), to:

- **obciążenie środowiskowe** w warunkach ekspozycji, czyli obciążenie wiatrem konstrukcji smukłych (kominy, wieże, maszty), zarówno w jego części pulsacyjnej (w płaszczyźnie jego działania – obciążenie statyczne), jak i sił wzbudzenia wirowego (w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku działania – obciążenie dynamiczne),
- **obciążenie ruchowe** od maszyn dźwigowych, głównie od suwnic i wózków transportu wewnętrznego,
- **siły odśrodkowe** od mimośrodów osi mas wirujących (np. w silnikach elektrycznych, wentylatorach).

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STALOWYCH**

**Źródła obciążeń
zmęczeniowych**

Kryteria wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej

	Obciążenie statyczne		Obciążenie zmienne
	Wyboczenie	Zniszczenie plastyczne	Zmęczenie
Krytyczne wydarzenie	Jedno przeciążenie		Wiele obciążeń
Wpływ czasu	Pomijalny		Powoduje osłabienie
Główny czynnik geometryczny	Przekrój brutto i smukłość	Przekrój netto	Karb konstrukcyjny
Wpływ wzmocnienia (dodanie np. blachy)	Ogólnie zwiększa nośność		Najczęściej osłabia
Wpływ drugorzędnych naprężeń	Zwykle pomijalny	Pomijalny	Bardzo istotny

ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STALOWYCH

Zmęczenie
a nośność statyczna

- zakres zmienności naprężenia $\Delta\sigma$, który jest algebraiczną różnicą pomiędzy największymi σ_{\max} , a najmniejszymi σ_{\min} wartościami naprężeń cyklu:

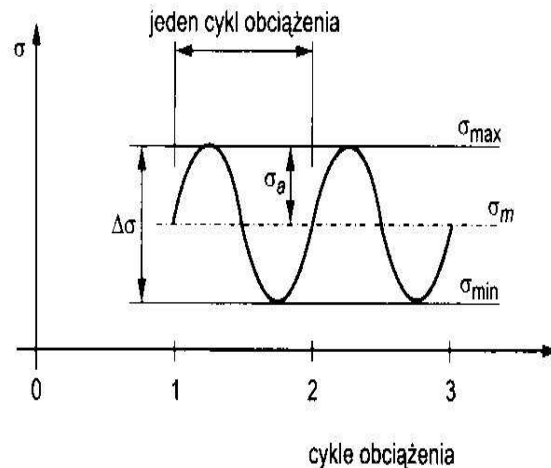
$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}, \quad (11.2)$$

- naprężenie średnie cyklu σ_m , które jest średnią arytmetyczną naprężeń ekstremalnych cyklu:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}, \quad (11.3)$$

- amplituda cyklu σ_a , definiowana jako:

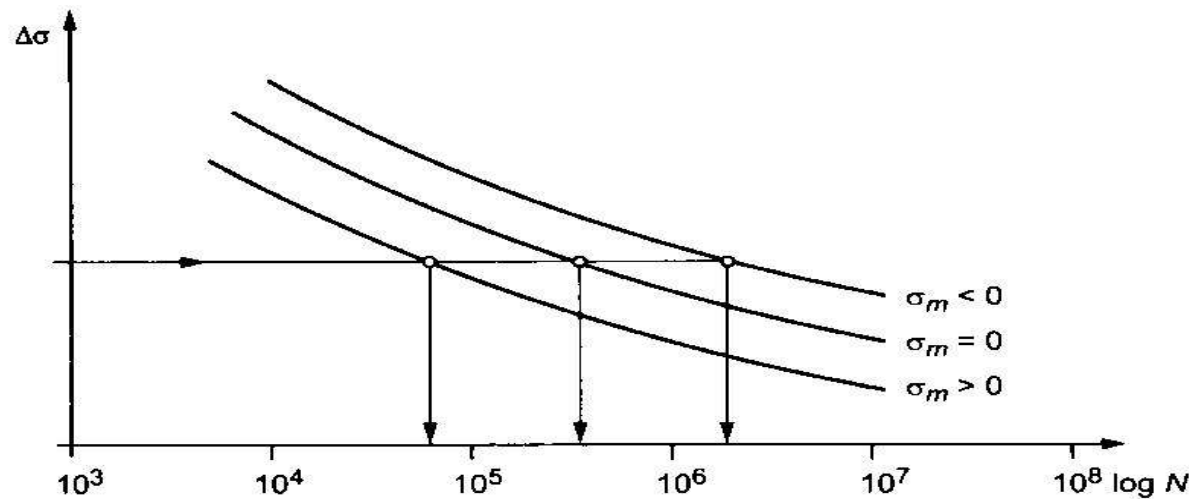
$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}, \quad (11.4)$$



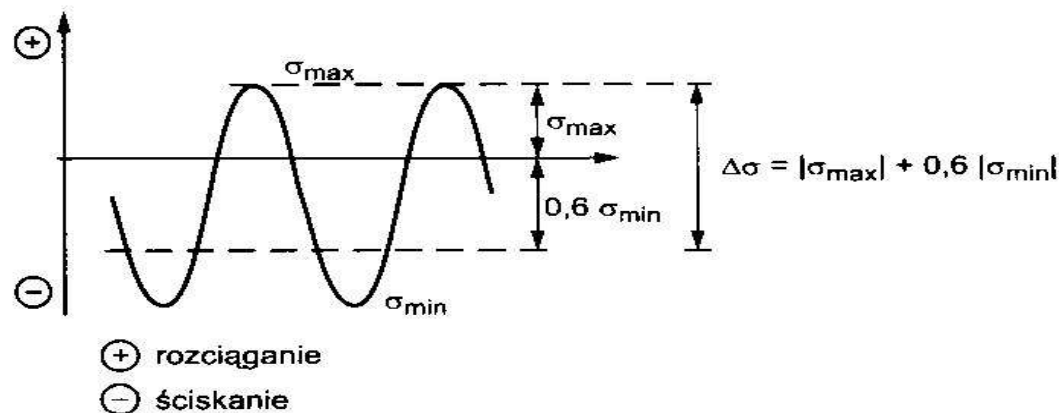
Rys. 11.3 Przebieg naprężeń zmiennych o stałej amplitudzie cyklu

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STALOWYCH

Parametry cyklu naprężeń



Rys. 11.13 Wpływ naprężeń średnich σ_m na trwałość zmęczeniową



Rys. 11.14 Modyfikacja zakresu zmienności naprężeń w przypadku elementów niespawanych lub spawanych odprężonych

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STALOWYCH

Wpływ naprężeń
średnich

Modyfikacja zakresu
zmienności
naprężeń

Kominy stalowe wolno stojące, jako konstrukcje lekkie i smukłe narażone na drgania od dynamicznego działania wiatru, wymagają w projektowaniu uwzględnienia **zmęczenia**. Szczególnie ważne i istotne jest uwzględnienie zmęczenia wysoko cyklowego od drgań wywołanych wzbudzeniem wirowym.

W przypadku **elementów niespawanych lub spawanych odprężonych** oraz cykli naprężeń całkowicie lub częściowo ściskających norma [PN-EN 1993-1-9] pozwala wyznaczać zredukowany zastępczy zakres zmienności naprężeń normalnych, przyjmując tylko 60% zakresu naprężeń ściskających i 100% naprężeń rozciągających:

$$\Delta\sigma_E = |\sigma_{\max}| + 0,6 |\sigma_{\min}|$$

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

ZREDUKOWANY ZAKRES ZMIENNOŚCI NAPRĘŻEŃ

Sprawdzenie nośności ze względu na zmęczenie wysokocyklowe wymaga zachowania warunków:

$$\begin{aligned}
 &\Delta\sigma \leq 1,5f_y \text{ - w przypadku naprężeń normalnych} \\
 \text{PN-EN} & \\
 \text{1993-1-9} & \\
 (8.2) \quad \Delta\tau &\leq 1,5 \frac{f_y}{\sqrt{3}} \text{ - w przypadku naprężeń ścinających}
 \end{aligned} \tag{24}$$

Normowe warunki nośności przy obciążeniach zmęczeniowych według normy [14]:

$$\begin{aligned}
 &\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0 \\
 \text{PN-EN} & \\
 \text{1993-1-9} & \\
 (8.2) & \\
 &\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_c / \gamma_{Mf}} \leq 1,0
 \end{aligned} \tag{25}$$

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KOMINÓW STALOWYCH**
WARUNKI NOŚNOŚCI

Współczynniki częściowe przy zmęczeniu określa się według PN-EN 1993-1-9 pkt. 3(6), (7) lub 6.2(1). Zaleca się przyjmować $\gamma_{Ff} = 1,00$; zaś wartość γ_{Mf} według tablicy 3.1.

Tablica 3.1. Zalecane wartości współczynnika częściowego γ_{Mf} dla wytrzymałości zmęczeniowej

Metoda oceny	Konsekwencje zniszczenia	
	Małe konsekwencje	Duże konsekwencje
Metoda tolerowanych uszkodzeń	1,00	1,15
Metoda bezwarunkowej żywotności	1,15	1,35

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KOMINÓW STALOWYCH**

**WSPÓŁCZYNNIKI
CZĘŚCIOWE**

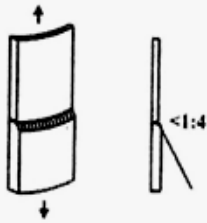
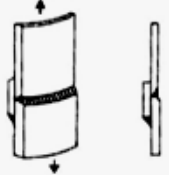

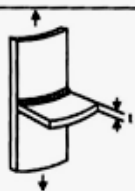
Zmęczenie a metoda stanów granicznych

- Przy wyznaczaniu naprężeń do analizy zmęczenia bierze się pod uwagę oddziaływania charakterystyczne
- Analiza liniowo sprężysta elementów i połączeń
- **Metoda tolerowanych uszkodzeń**
 - możliwe pojawienie się pęknięcia o niewielkim rozmiarze, które nie zagraża nośności elementu - konieczne wykonywanie regularnych kontroli elementów
- **Metoda bezwarunkowej żywotności**
 - gdy lokalne pęknięcie może doprowadzić do zniszczenia, lub
 - brak regularnych kontroli elementów

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KOMINÓW STALOWYCH**

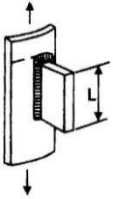
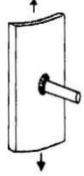
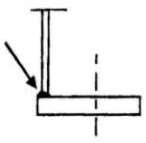
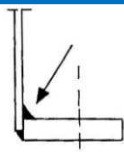
**METODY OCENY
NOŚNOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ**

Tablica 10. Kategorie zmęczeniowe niektórych połączeń

Kategoria zmęczeniowa	Szczegół połączenia	Opis karbu	
1	2	3	
<p>112</p> <p>Efekt skali przy $t > 25\text{mm}$ $k_s = (25/t)^{0,2}$</p>		<p>Styki poprzeczne powłoki Spoina czołowa dwustronna bez podkładki Badania nieniszczące spoin</p>	
<p>50</p> <p>przy $t > 25\text{ mm}$ $k_s = (25/t)^{0,2}$</p>		<p>Styki poprzeczne powłoki o różnej grubości Spoina czołowa jednostronna na ciągłej podkładce</p>	
125		<p>Styk wzdłużny powłoki Spoina czołowa ciągła</p>	
112			Spoina obrobiona dwustronnie, 100% badań nieniszczących
90			Spoina nieoszlifowana bez kraterów
80		<p>Poprzeczne przyłącze ciągłe</p>	
71			Spoina z kraterami
	$t < 50\text{ mm}$		
	$50 < t \leq 80\text{ mm}$		

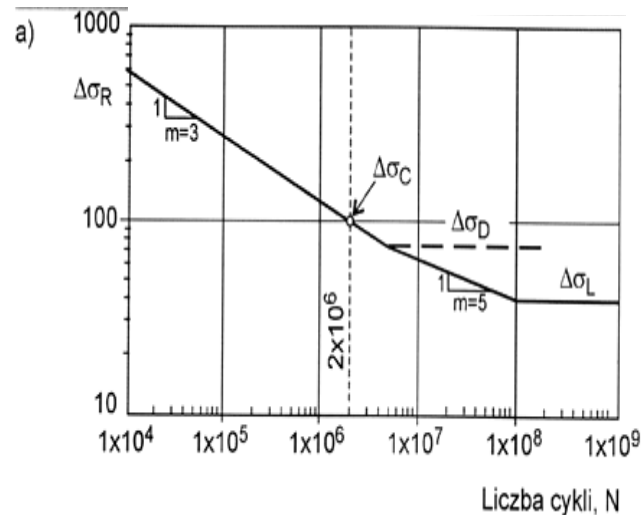
ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

KATEGORIE ZMĘCZENIOWE

80	$L \leq 50 \text{ mm}$		Wzdłużne przyłącze krótkie
71	$50 < L \leq 80$		
63	$80 < L \leq 100$		
56	$L > 100 \text{ mm}$		
	80		Przypawany kołek pracujący na ścinanie
	71		Połączenie kołnierzone na spoinę czołową
	40		Połączenie kołnierzone na spoinę pachwinową

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KOMINÓW STALOWYCH**

**KATEGORIE
ZMĘCZENIOWE**

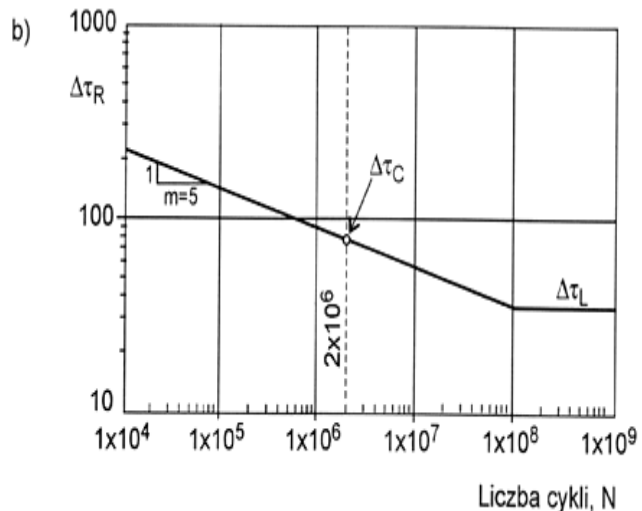


Kategoria zmęczeniowa $\Delta\sigma_C$ ($\Delta\tau_C$)
– zakres naprężeń powodujący zniszczenie elementu przy liczbie cykli równej 2×10^6

Wytrzymałość zmęczeniowa trwała przy stałej amplitudzie naprężeń $\Delta\sigma_D$ ($\Delta\tau_D$)

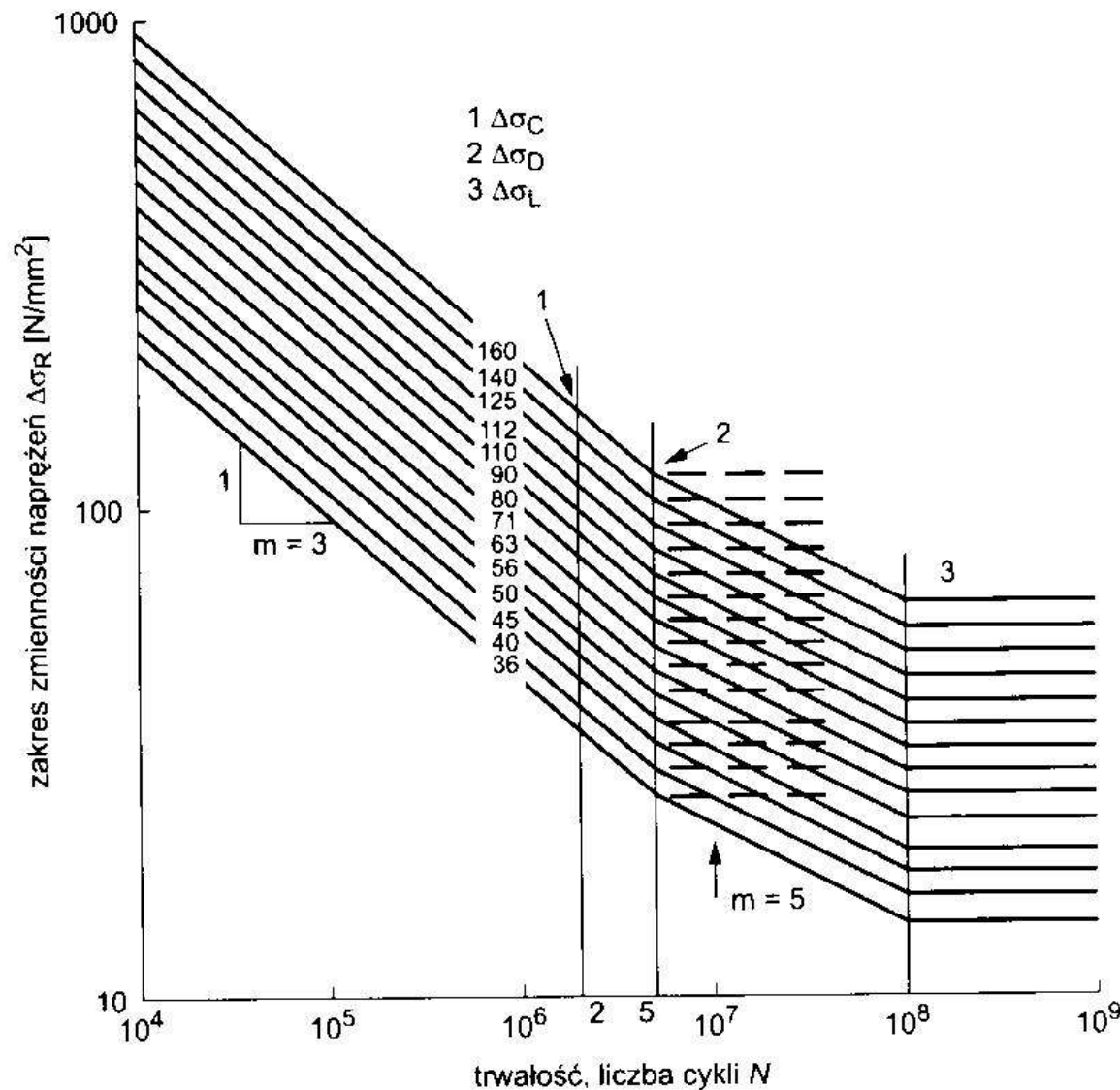
Wytrzymałość zmęczeniowa trwała $\Delta\sigma_L$ ($\Delta\tau_L$)

14 krzywych dla naprężeń normalnych, 2 dla stycznych



ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STAŁOWYCH

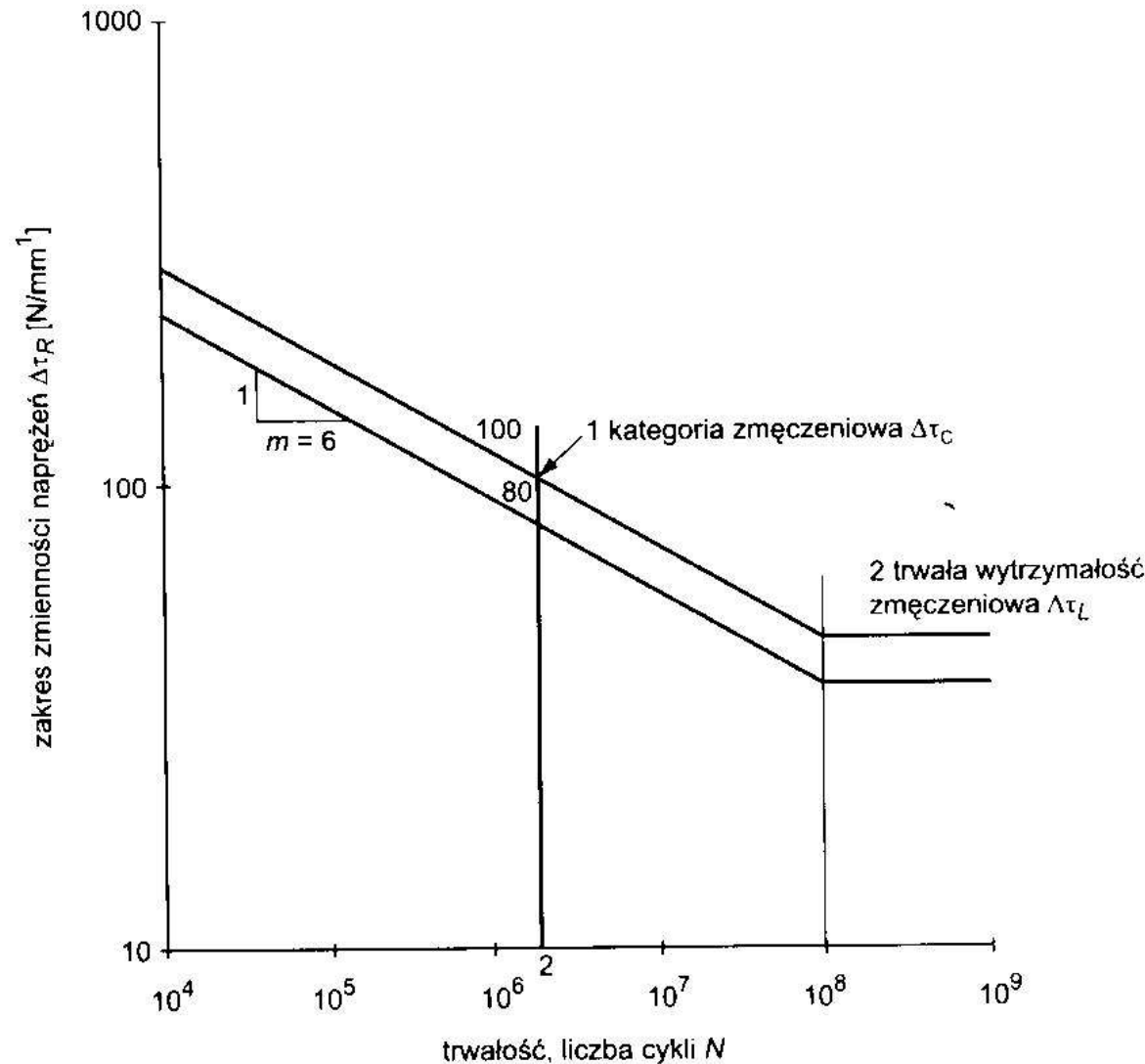
KRZYWE ZMĘCZENIOWE



ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STALOWYCH

KRZYWE
WYTRZYMAŁOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ DLA
ZAKRESÓW NAPRĘŻEŃ
NORMALNYCH

14 TYPÓW KARBÓW
NAPRĘŻEŃ
NORMALNYCH



**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STAŁOWYCH**

**KRZYWE
WYTRZYMAŁOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ DLA
ZAKRESÓW NAPRĘŻEŃ
STYCZNYCH**

**2 TYPY KARBÓW
NAPRĘŻEŃ STYCZNYCH**

Tablica 11.2 Parametry liczbowe krzywych wytrzymałości zmęczeniowej naprężeń normalnych

Kategoria karbu	Wytrzymałość zmęczeniowa [N/mm ²], przy liczbie cykli:			
	$N = 10^4$	$N = 2 \cdot 10^6$ $\Delta\sigma_C$	$N = 5 \cdot 10^6$ $\Delta\sigma_D$	$N = 10^8$ $\Delta\sigma_L$
160	936	160	118	65
140	819	140	103	57
125	731	125	92	51
112	655	112	83	45
100	585	100	74	40
90	526	90	66	36
80	468	80	59	32
71	415	71	52	29
63	368	63	46	25
56	327	56	41	23
50	292	50	37	20
45	263	45	33	18
40	234	40	29	16
36	211	36	27	15

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STAŁOWYCH**

**KRZYWE WYTRZYMAŁOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ DLA
ZAKRESÓW NAPRĘŻEŃ
NORMALNYCH –
PARAMETRY LICZBOWE
PUNKTÓW
CHARAKTERYSTYCZNYCH**

Tablica 11.3 Parametry liczbowe krzywych wytrzymałości zmęczeniowej naprężeń stycznych

Kategoria karbu	Wytrzymałość zmęczeniowa [N/mm ²], przy liczbie cykli:		
	$N = 10^4$	$N = 2 \cdot 10^6$ $\Delta\tau_C$	$N = 10^8$ $\Delta\tau_L$
100	289	100	46
80	231	80	37

**ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STALOWYCH**

**KRZYWE WYTRZYMAŁOŚCI
ZMĘCZENIOWEJ DLA
ZAKRESÓW NAPRĘŻEŃ
STYCZNYCH – PARAMETRY
LICZBOWE PUNKTÓW
CHARAKTERYSTYCZNYCH**

W normie [N11] w załączniku E podano wzór na obliczeniową liczbę cykli N :

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1991-14} \\ \text{(E10)} \end{array} \quad N = 2Tn_v \varepsilon_0 \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \exp \left[- \left(\frac{v_{crit}}{v_0} \right)^2 \right] \quad (21)$$

w którym:

T – przewidywany czas użytkowania komina w sekundach,

n_v – częstotliwość drgań własnych w Hz,

ε_0 – współczynnik szerokości pasma; $\varepsilon_0 = 0,3$,

v_{crit} – krytyczna prędkość wiatru w m/s,

v_0 – 20% średniej prędkości wiatru na wysokości wzbudzenia wirowego; tj. $v_0 = 0,20 v_m(z)$ w m/s.

Ocenę bezpieczeństwa ze względu na zmęczenie przeprowadza się według [N18], przyjmując równoważny zakres zmienności naprężeń $\Delta\sigma_{E,2}$, odpowiadający liczbie cykli $N_c = 2 \cdot 10^6$. W normie [N21] podano prosty sposób przeliczenia zakresu zmienności naprężeń $\Delta\sigma_E$, odpowiadający liczbie cykli N , na równoważny zakres zmienności $\Delta\sigma_{E,2}$:

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-3-1} \\ \text{(9.1)} \end{array} \quad \Delta\sigma_{E,2} = \lambda \Delta\sigma_E \quad (22)$$

Współczynnik równoważności λ oblicza się ze wzoru:

$$\begin{array}{l} \text{PN-EN} \\ \text{1993-3-1} \\ \text{(9.2)} \end{array} \quad \lambda = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{1/m} \quad (23)$$

gdzie:

m – nachylenie krzywej wytrzymałości zmęczeniowej:

$m = 3$, jeśli $N \leq 5 \cdot 10^6$, $m = 5$, jeśli $N > 5 \cdot 10^6$.

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

Liczba cykli obciążenia

Równoważny zakres
zmienności naprężeń

Współczynnik λ

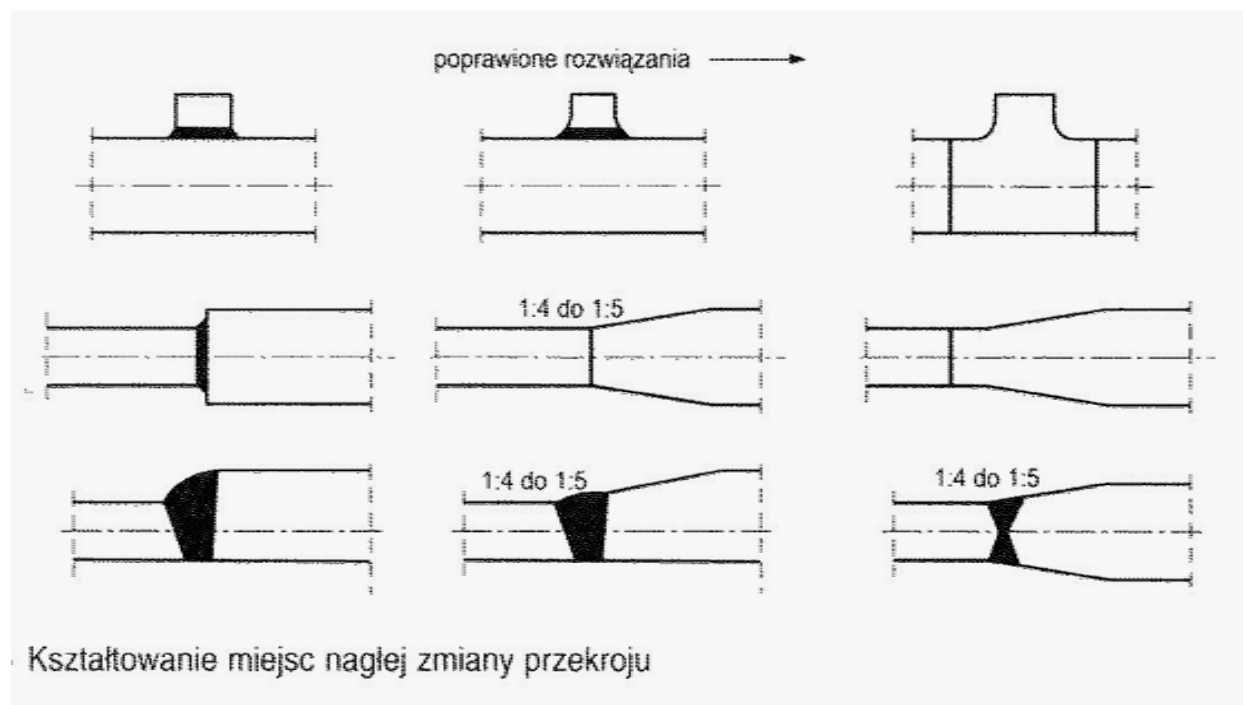
pozwała „przenieść” zakres naprężenia o określonej liczbie cykli zmienności „ N ” na równoważny mu zakres naprężeń o liczbie cykli zmienności 2×10^6

Podczas projektowania konstrukcji, które będą narażone na wpływ zmęczeniowe, należy zwrócić szczególną uwagę na kształtowanie węzłów i połączeń, szczególnie spawanych. Chodzi o to, aby jak najbardziej łagodzić ostrości karbów geometrycznych, a w szczególności nie powinno się stosować:

- podłużnych spoin pachwinowych przerywanych,
- poprzecznych spoin czołowych z kraterami (czyli należy stosować spawanie z płytkami wybiegowymi, a po ich odcięciu gazowym powierzchnie należy szlifować),
- naglej zmiany przekroju poprzecznego (a więc element grubszy lub szerszy powinien mieć skosy o nachyleniu nie większym niż 1:4, jak to zalecają odpowiednie normy),
- otworów lub wycięć w elementach konstrukcyjnych bez odpowiedniego wyokrąglenia naroży,
- blach węzłowych, nawet nienośnych, o kształcie prostokątnym (powinno się projektować kształt trapezowy lub przejście wyokrąglone)
- śrubowanych złączy zakładkowych z otworami w układzie przestawionym, gdyż wtedy linie sił mają większe krzywizny, odpowiadające większej koncentracji naprężeń.

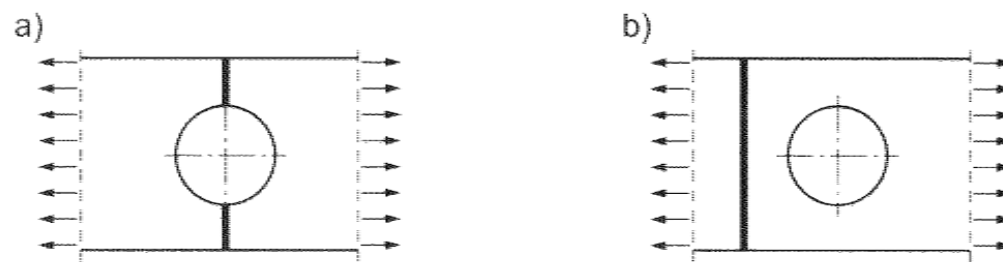
ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

Wybrane sposoby
zwiększania żywotności
zmęczeniowej elementów
konstrukcji stalowych



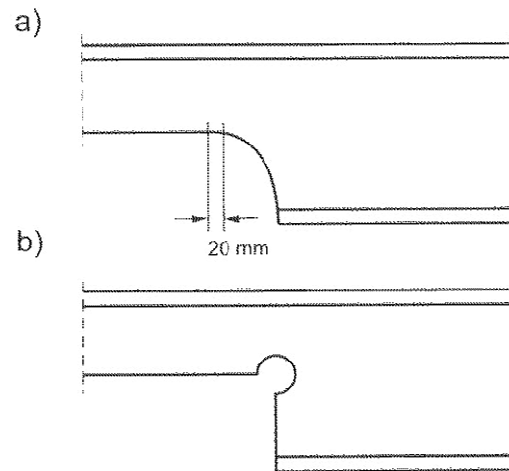
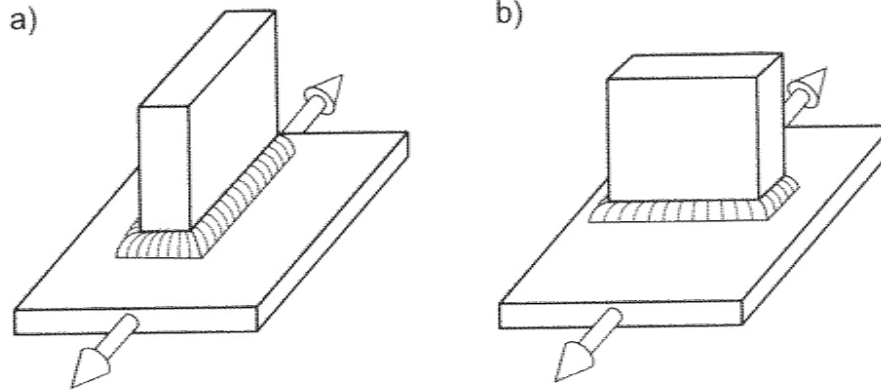
ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

Wybrane sposoby
zwiększania żywotności
zmęczeniowej elementów
konstrukcji stalowych



Rozmieszczenie spoin w sąsiedztwie otworu: a) rozwiązanie niewłaściwe, b) rozwiązanie właściwe

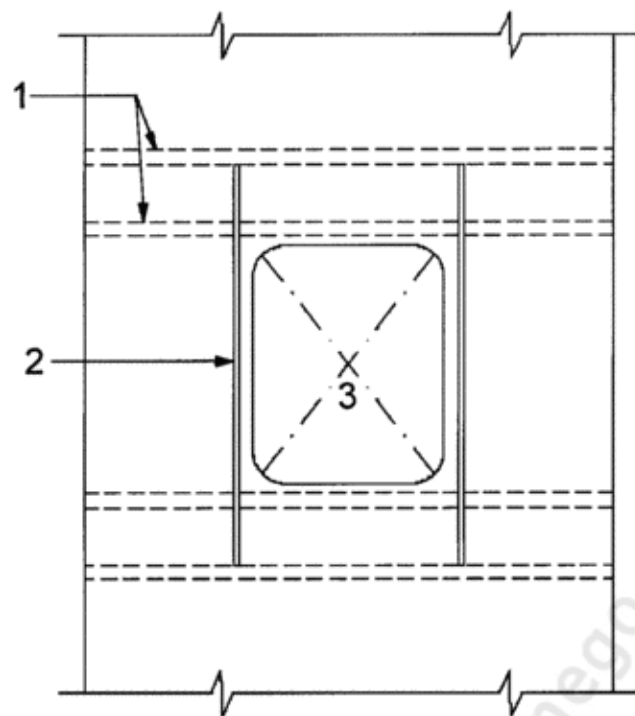
Umieszczenie elementów nieprzenośzących obciążeń:
a) rozwiązanie niewłaściwe, b) rozwiązanie właściwe



Rys. 10.14 Kształtowanie wycięć w elementach dwuteowych: a) rozwiązanie preferowane, b) rozwiązanie dopuszczalne

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

Wybrane sposoby
zwiększania żywotności
zmęczeniowej elementów
konstrukcji stalowych



- 1 Ewentualne pierścienie usztywniające
- 2 Usztywnienie wzdłużne
- 3 Wycięcie

Rysunek 6.1 Usztywnienia wokół wycięć i otworów

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

WYCIĘCIA I USZTYWNIENIA WOKÓŁ OTWORU

Amplitudy drgań wierzchołka komina stalowego od wzbudzania wirowego powinny być ograniczone, dlatego norma kominowa PN-EN 1993-3-2 określiła graniczne wartości tych amplitud dla poszczególnych klas niezawodności. Załącznik Krajowy nie wprowadził zmian. Największe amplitudy drgań poprzecznych według normy przedstawiono w poniższej tabelicy

Największe amplitudy drgań w poprzek kierunku wiatru

Lp.	Klasa niezawodności	Amplituda drgań poprzecznych	
1.	3.	0,05b	b – średnica zewnętrzna
2.	2.	0,10b	b – średnica zewnętrzna
3.	1.	0,15b	b – średnica zewnętrzna

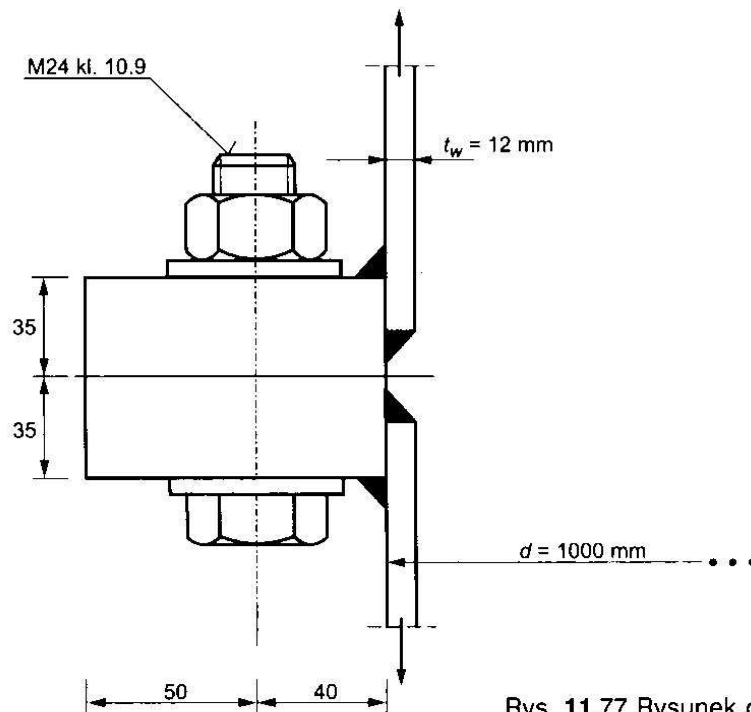
**OBCIĄŻENIE
WZBUDZENIEM
WIROWYM
(DYNAMICZNYM)**

według PN-EN 1991-1-4

**Stan graniczny
użytkowości**

Jeżeli $y_{F, \max} > y_{gr}$ należy zastosować tłumik drgań

Sprawdzić nośność ze względu na zmęczenie sprężonego połączenia kołnierzego kominu wykonanego ze stali S235JR (rys. 11.77). Grubość ścianki trzonu kominu wynosi $t_w = 12$ mm, średnica zewnętrzna trzonu $d = 1000$ mm, grubość blachy kołnierza $t_f = 35$ mm, rozstaw śrub $p = 120$ mm. Liczba cykli obciążenia od wzbudzenia wirowego w okresie 5 letniej eksploatacji wynosi $N = 3,85 \cdot 10^6$, moment zginający działający w połączeniu od wzbudzenia wirowego ustalono o wartości $M_k = \pm 120$ kNm, siłę podłużną od ciężaru trzonu i drabinki oceniono na $G_k = 60$ kN.



Rys. 11.77 Rysunek do przykładu 11.6

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

PRZYKŁAD* OBLICZENIOWY – STYK KOŁNIERZOWY

)* PRZYKŁAD OPRACOWANY PRZEZ
DRA INŻ. LUCJANA ŚLĘCZKĘ

Trzon kominu.

Kategoria karbu: styk kołnierzowy rur, złącze na spoiny pachwinowe, tablica 8.5 z [11.9], karb nr 12 $\rightarrow \Delta\sigma_C = 40 \text{ N/mm}^2$.

Zakres zmienności naprężeń w karbie:

Charakterystyki geometryczne trzonu:

$$A = \frac{\pi}{4} (100^2 - 97,6^2) = 372 \text{ cm}^2,$$

$$I = \frac{\pi}{64} (100^4 - 97,6^4) = 454544 \text{ cm}^4,$$

$$W = \frac{454544}{50} = 9091 \text{ cm}^3,$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W} = \frac{120 \cdot 10^6}{9091 \cdot 10^3} = 13 \text{ N/mm}^2,$$

$$\sigma_{\min} = -\sigma_{\max} = -13 \text{ N/mm}^2,$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 13 - (-13) = 26 \text{ N/mm}^2 < 1,5f_y = 1,5 \cdot 235 = 353 \text{ N/mm}^2.$$

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – STYK KOŁNIERZOWY

Przyjęto współczynniki bezpieczeństwa $\gamma_{FF} = 1,0$ oraz $\gamma_{MF} = 1,15$ (metoda bezwarunkowej żywotności, małe konsekwencje zniszczenia).

Równoważny zakres naprężeń o stałej amplitudzie, odniesiony do $2 \cdot 10^6$ cykli (11.22):

$$\lambda_1 = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} = \left(\frac{3,85 \cdot 10^6}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{3}} = 1,244,$$

$$\gamma_{FF} \Delta \sigma_{E2} - \lambda_1 \cdot \Delta \sigma = 1,244 \cdot 26 = 32 \text{ N/mm}^2.$$

Warunek nośności (11.20):

$$\frac{\gamma_{FF} \Delta \sigma_{E2}}{\Delta \sigma_C / \gamma_{MF}} = \frac{32}{40 / 1,15} = 0,92 < 1,0.$$

Warunek jest spełniony.

Spoiny pachwinowe łączące trzon z kołnierzem.

Odrębne sprawdzenie w tym wypadku nie jest wymagane.

Śruby.

Śruba M24, kl. 10.9, $A_s = 353 \text{ mm}^2 \rightarrow$

– nośność śruby na rozciąganie $F_{t,Rd} = 254 \text{ kN}$ (tablica 3.21, tom I),

– siła wstępnego sprężenia śruby $F_{p,C} = 225 \text{ kN}$ (tablica j.w.).

Największe naprężenia charakterystyczne rozciągające blachę trzonu:

$$\sigma_{wt,max} = \frac{M_k}{W} - \frac{G_k}{A} = 13 - \frac{60 \cdot 10^3}{372 \cdot 10^2} = 13 - 2 = 11 \text{ N/mm}^2.$$

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – STYK KOŁNIERZOWY

Siła rozciągająca wycinek trzonu o szerokości równej rozstawowi śrub (por. wzory 3.64):

$$l_{\text{eff}} = p = 120 \text{ mm},$$

$$N_{\text{wt}} = l_{\text{eff}} t_w \sigma_{\text{wt.max}} = 120 \cdot 12 \cdot 11 = 15840 \text{ N} = 15,84 \text{ kN}.$$

Siła działająca na śrubę z uwzględnieniem efektu dźwigni:

$$e = 50 \text{ mm}, m_w = 40 + 0,5 \cdot 12 = 46 \text{ mm},$$

$$e_{\text{eff}} = 0,7e = 0,7 \cdot 50 = 35 \text{ mm (por. wzór (3.66), tom I),}$$

$$F_t = N_{\text{wt}} \frac{m_w + e_{\text{eff}}}{e_{\text{eff}}} = 15,84 \frac{46 + 35}{35} = 15,84 \cdot 2,31 = 36,6 \text{ kN}.$$

Ponieważ siła obciążająca śrubę jest mniejsza od siły jej wstępnego sprężenia $F_t = 36,6 \text{ kN} < F_{p,C} = 225 \text{ kN}$, więc obciążenie zmęczeniowe przekazywane jest przez zmniejszenie docisku blach kołnierzowych, nie wywołując zmiany obciążenia w śrubie. Zakres zmienności naprężeń w śrubie $\Delta\sigma = 0$, więc śruby nie podlegają zmęczeniu.

Blacha kołnierzowa.

Odrębne sprawdzenie nie jest wymagane przy karbie tego typu.

Warunek nośności połączenia ze względu na zmęczenie jest zachowany.

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KOMINÓW STALOWYCH

PRZYKŁAD OBLICZENIOWY – STYK KOŁNIERZOWY

UWAGA!

Prezentowane materiały są utworami w rozumieniu prawa autorskiego i podlegają jego ochronie. Zabronione jest ich kopiowanie – w całości lub we fragmencie - i dalsze rozpowszechnianie bez pisemnej zgody autora.

Materiały te są udostępniane studentom nieodpłatnie i nie mogą być przedmiotem jakiegokolwiek działalności komercyjnej.

**MATERIAŁY
POMOCNICZE DO
WYKŁADÓW – NA
PRAWACH RĘKOPISU,
WYŁĄCZNIE DO UŻYTKU
WEWNĘTRZNEGO**