

**WYBRANE ZAGADNIENIA NOŚNOŚCI
KONSTRUKCJI STALOWYCH
POD OBCIĄŻENIEM ZMĘCZENIOWYM**

PLAN WYKŁADU

- 1. WSTĘPNE DEFINICJE I OKREŚLENIA**
- 2. TYPY KONSTRUKCJI NARAŻONYCH NA ZMĘCZENIE
I ŹRÓDŁA OBCIĄŻEŃ ZMĘCZENIOWYCH**
- 3. SPRAWDZENIE NOŚNOŚCI ZE WZGLĘDU NA
ZMĘCZENIE**
- 4. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA I KATEGORIE
ZMĘCZENIOWE (KARBÓW)**
- 5. OBCIĄŻENIE DYNAMICZNE WZBUDZENIEM WIROWYM
PRZEWODU KOMINOWEGO – PORÓWNANIE PN i EC**
- 6. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA TRZONÓW
KOMINOWYCH I STYKU ŚRUBOWEGO
KOŁNIERZOWEGO**
- 7. WNIOSKI I PODSUMOWANIE**

Zmęczenie materiału można zdefiniować następująco: jest to proces osłabiania sił kohezji pod działaniem zmiennych w czasie naprężeń, przy czym mogą to być tylko naprężenia normalne lub tylko naprężenia styczne, lub też równocześnie działające naprężenia normalne i styczne w określonym punkcie przekroju poprzecznego konstrukcji. Zmienne naprężenia są efektem zmiennych w czasie oddziaływań (obciążeń).

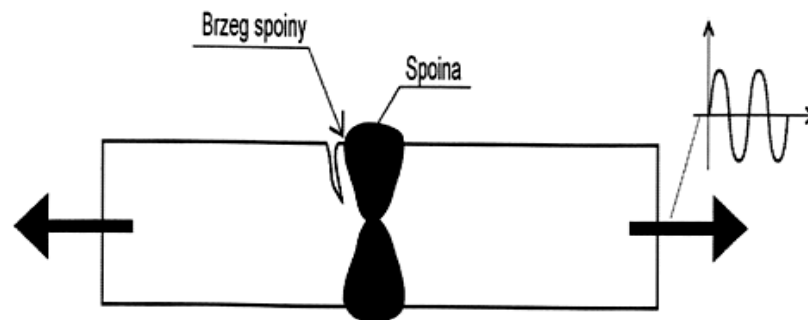
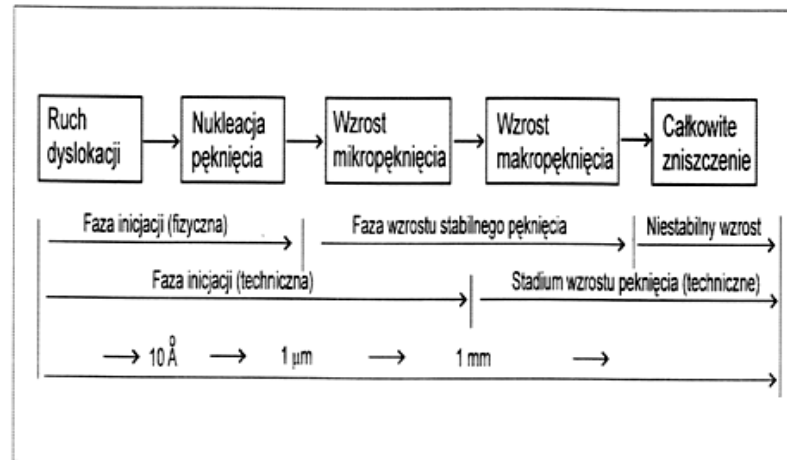
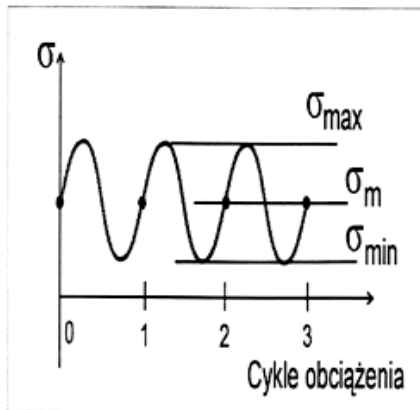
Najczęściej spotykanymi zmiennymi oddziaływaniami na konstrukcje budowlane są: **oddziaływanie wiatru** oraz **oddziaływania maszyn i dźwignic**.

Należy jednak zdawać sobie sprawę z tego, że i oddziaływanie stałe (niezmienne w czasie) może wywoływać naprężenia zmienne w czasie. Dotyczy to części ruchomych pojazdów, jakimi są osie kół, np. osie wagonów kolejowych lub lokomotyw.

Wstępne definicje i określenia

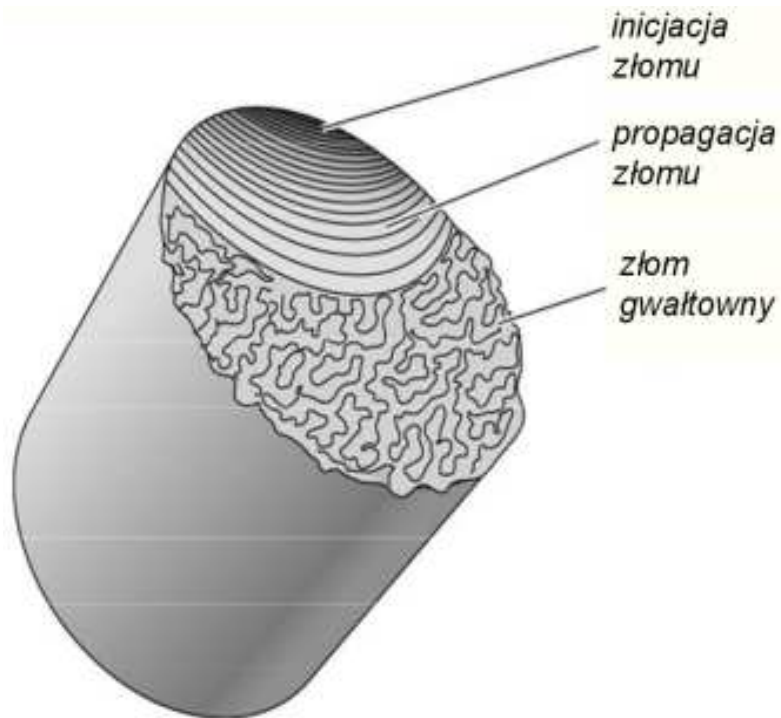


Zmęczenie – proces inicjacji i propagacji pęknięć w konstrukcji spowodowany oddziaływaniem naprężeń okresowo zmiennych. Całkowite zniszczenie następuje po pewnym czasie, w miejscu największego osłabienia przekroju



Wstępne definicje i określenia



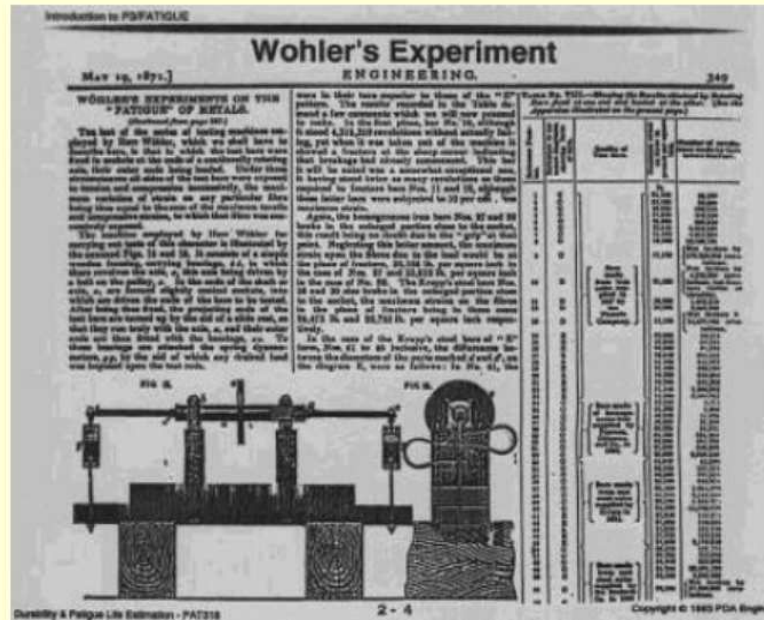


Przy pękaniu zmęczeniowym obserwuje się dwa obszary, jeden o gładkiej powierzchni w miejscu koncentracji naprężeń, w którym nastąpiło **przekroczenie plastyczności materiału** i zostało zapoczątkowane pierwotne pęknięcie oraz drugi o charakterze **pęknięcia kruchego** z gruboziarnistymi grzbietami. Stosunek powierzchni tych obszarów zmienia się ze wzrostem liczby cykli i wielkości średniego naprężenia w przekroju.

Wstępne definicje i określenia Pęknięcie zmęczeniowe



August Wöhler (1819 - 1914)



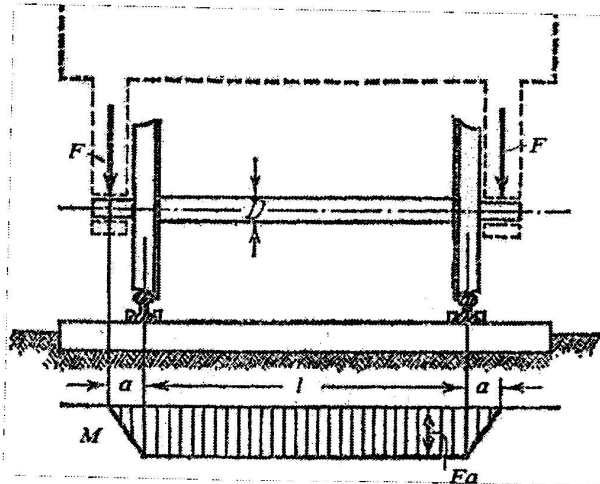
Wstępne definicje
 i określenia

Początek badań
 zmęczeniowych

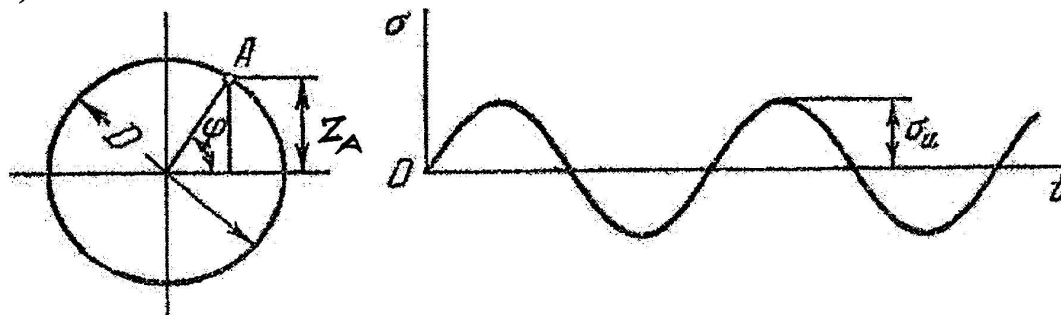


Dla ilustracji, na rys. 1a pokazano schemat obciążenia osi ciężarem własnym lokomotywy i wykres momentów zginających w płaszczyźnie pionowej, który to wykres jest niezmienny w określonym czasie.

a)

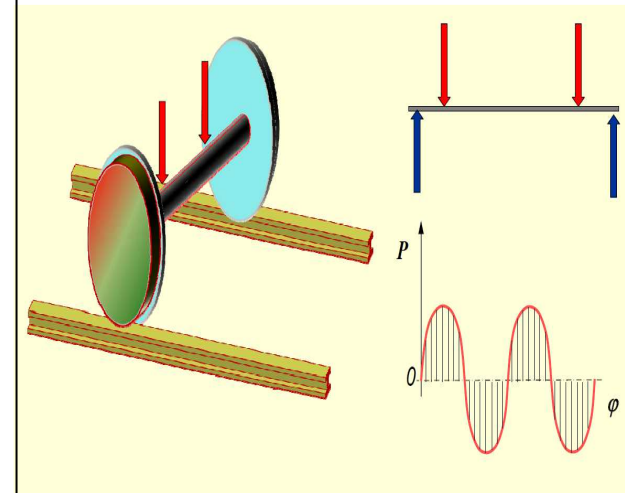


b)



Rys. 1. Oś lokomotywy kolejowej obciążona siłą pionową $2F$:
 a) schemat obciążenia i wykres momentów zginających,
 b) zmienność naprężenia normalnego w punkcie A przekroju poprzecznego

Wstępne definicje i określenia



Natomiast na rys. 1b pokazano sinusoidalnie zmienną wartość naprężenia normalnego w obranym punkcie A przekroju poprzecznego osi. Taka zmienność jest wynikiem jednostajnego ruchu obrotowego osi o prędkości kątowej ν_ϕ

Ponieważ odległość punktu A od osi obojętnej wynosi

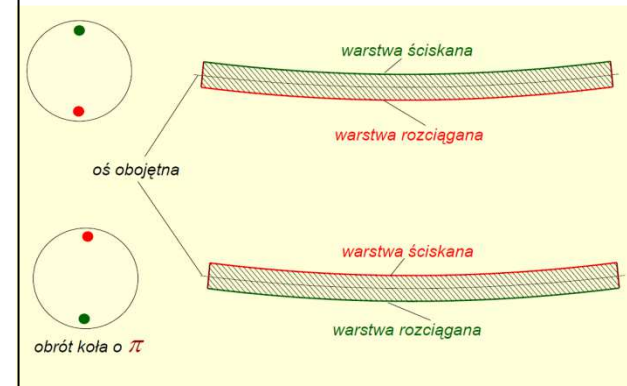
$$z_A = \frac{D}{2} \sin(\nu_\phi t),$$

to naprężenie jest wyrażone wzorem

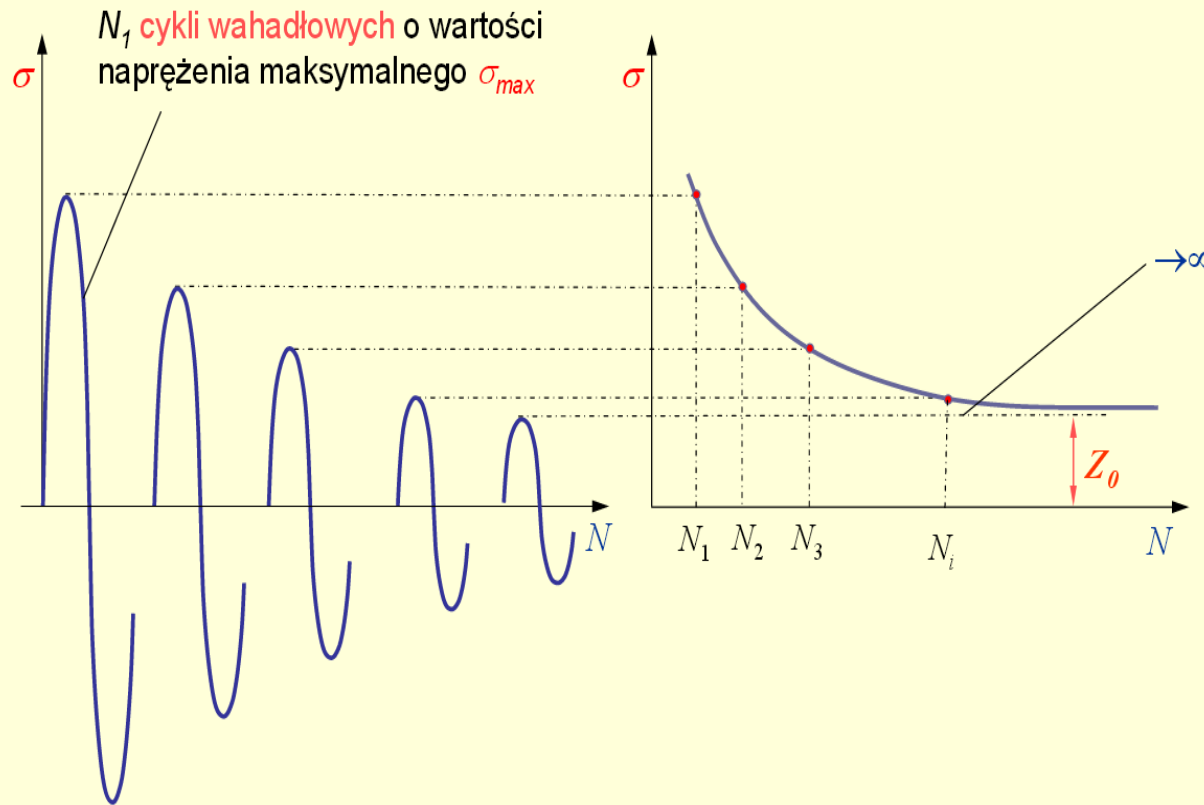
$$\sigma = \frac{M \cdot z_A}{J_y} = \frac{F \cdot D \cdot a}{2 \cdot J_y} \sin(\nu_A t).$$

Problem pęknięcia osi wagonów kolejowych zainspirował w pierwszej połowie XIX w. ówczesnego dyrektora kolei dolnośląskich we Frankfurcie nad Odrą – inż. A Wöhler’a do zorganizowania laboratorium i podjęcia badań modelowych w celu wyjaśnienia przyczyn tego zjawiska. Wyniki swoich badań opublikował on w 1852 r. w postaci tzw. krzywej Wöhler’a, która jest podstawą obliczeń zmęczeniowych do dnia dzisiejszego.

Wstępne definicje i określenia

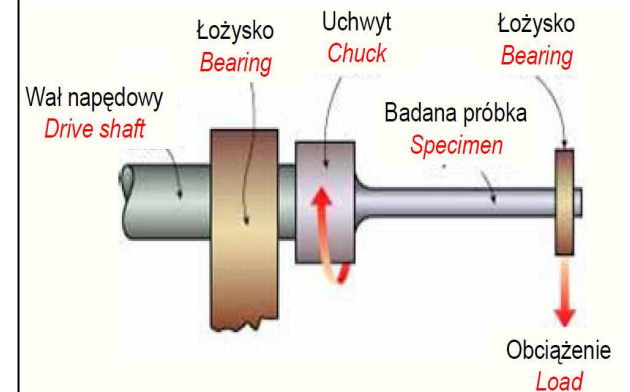


Wykres zmęczeniowy Wöhlera
 dla cyklu symetrycznego – wahadłowego

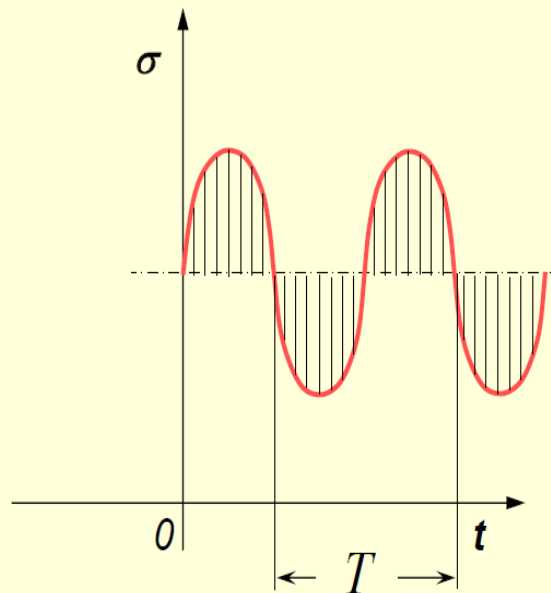


Wstępne definicje
 i określenia

Krzywa Wöhler'a



Cykl naprężeń zmiennych, to przebieg zmian naprężenia okresowo zmiennego, którego wartość zmienia się w sposób ciągły w czasie jednego okresu zmiany.

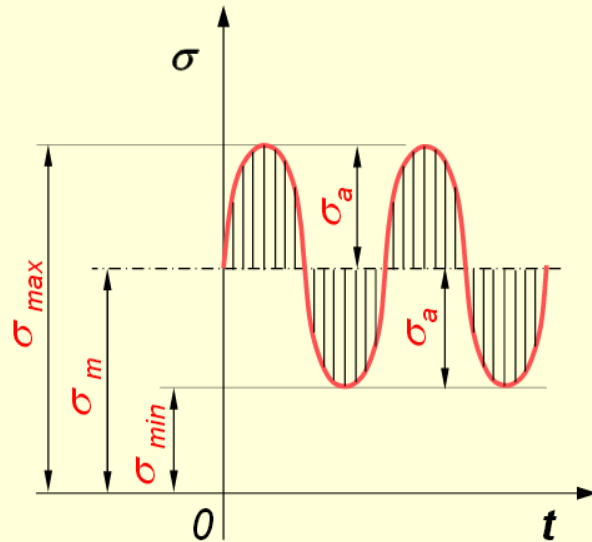


Wstępne definicje i określenia

CYKL NAPRĘŻEŃ
ZMIENNYCH

Wstępne definicje i określenia

WIELKOŚCI CHARAKTERYZUJĄCE CYKLE NAPRĘŻEŃ ZMIENNYCH



- maksymalne naprężenie σ_{max}

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$$

- minimalne naprężenie σ_{min}

$$\sigma_{min} = \sigma_m - \sigma_a$$

- naprężenie średnie σ_m

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

- naprężenie amplitudowe σ_a

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

- współczynnik asymetrii R

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

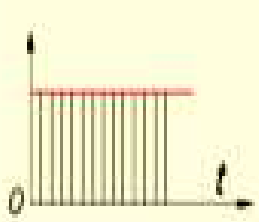
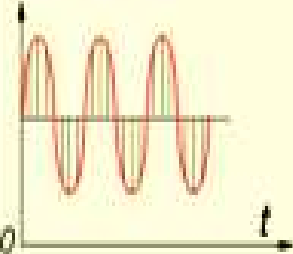
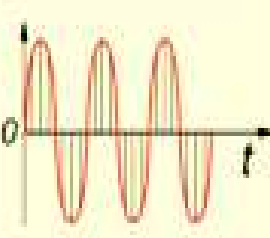
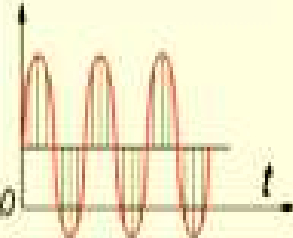
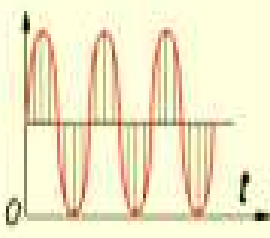
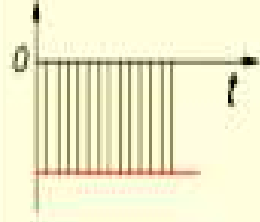
- Współczynnik kappa

$$K = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}$$

Wstępne definicje

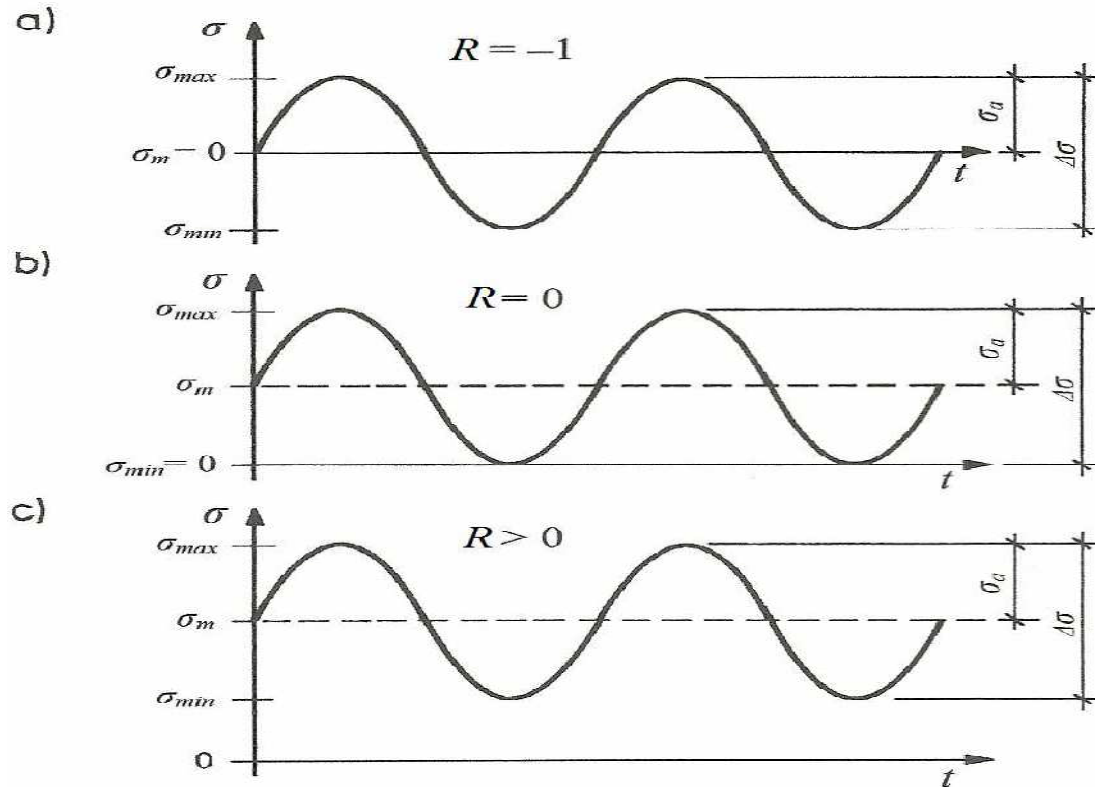
i określenia

RÓŻNE CYKLE
 NAPRĘŻEŃ ZMIENNYCH

$R = +1$ $\kappa = +\infty$ naprężenie stałe (+)		$0 < R < 1$ $1 < \kappa < +\infty$ cykl jednostronny (+)	
$R = 1$ $\kappa = 0$ cykl wahadłowy (symetryczny)		$0 < R < 1$ $0 < \kappa < 1$ cykl dwustronny niesymetryczny	
$R = 0$ $\kappa = 1$ cykl odzerowo tętniący (+)		$R = +1$ $\kappa = -\infty$ naprężenia stałe (-)	

Wykres naprężeń zmiennych w czasie t w rozpatrywanym punkcie konstrukcji, nazywamy też widmem naprężeń, składającym się z pojedynczych cykli.

Cykl naprężenia jest scharakteryzowany przez naprężenie największe σ_{max} i najmniejsze σ_{min} (rys. 2).



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

Wstępne definicje i określenia

PRZYKŁADY:

DRGAJĄCE KOMINY STALOWE

BELKI PODSUWNICOWE (SILNIE OBCIĄŻONE)

ZBIORNIKI I ZASOBNIKI

BELKI MOSTOWE I STROPOWE

R – WSPÓŁCZYNNIK ASYMETRII CYKLU

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

Alternatywnie cykl można scharakteryzować przez naprężenie średnie σ_m i naprężenie amplitudy σ_a , przy czym:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}; \quad \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$$

W obecnym ujęciu Eurokodów do obliczeń wytrzymałości zmęczeniowej elementów i ich połączeń w konstrukcji, podobnie jak w poprzedniej normie stalowej, wystarczającą wielkością jest **zakres zmienności naprężeń $\Delta\sigma$** , jako algebraiczna różnica między naprężeniem maksymalnym i minimalnym, będąca podwójną wartością naprężenia amplitudy, czyli:

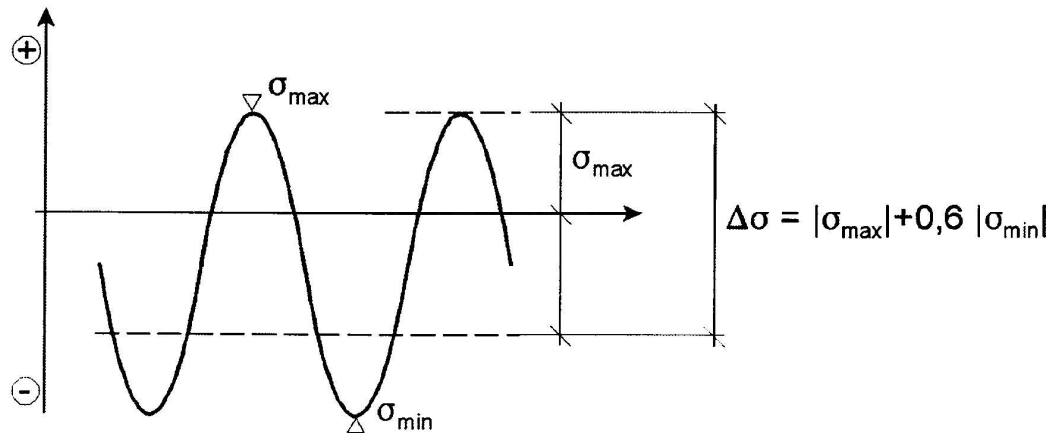
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_{max}(1 - R) = 2\sigma_a$$

Wstępne definicje i określenia

**zakres zmienności
naprężeń $\Delta\sigma$**

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

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



+ rozciąganie
 - ściskanie

Zmodyfikowany zakres zmienności naprężeń w przypadku elementów niespawanych lub spawanych odprężonych

Wstępne definicje i określenia

zmodyfikowany
 (zredukowany)
 zakres zmienności
 naprężeń $\Delta\sigma$

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**

**Typy konstrukcji
narażonych 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

Sprawdzanie wytrzymałości zmęczeniowej, zaliczane do grupy Stanów Granicznych Nośności, przeprowadza się wg norm PN-EN 1993-1-9 i PN-EN 1999-1-3, odpowiednio dla konstrukcji stalowych i konstrukcji aluminiowych. Stosowane metody sprawdzania tej wytrzymałości gwarantują (z założonym w nich poziomem prawdopodobieństwa) zadowalające zachowanie się konstrukcji w całym projektowym okresie użytkowania.

Sprawdzanie warunku normowego polega na **porównaniu zakresu zmienności naprężenia** normalnego $\Delta\sigma$ □ lub stycznego $\Delta\tau$, lub obydwu zakresów działających jednocześnie, z odpowiednią **wytrzymałością zmęczeniową**, ustaloną w miejscu wyznaczenia naprężeń dla rozpatrywanego kształtu karbu.

Ocenę zmęczenia można przeprowadzić jedną z dwu metod, a mianowicie:

- 1) metodą bezwarunkowej żywotności,**
- 2) metodą tolerowanych uszkodzeń.**

Jedna i druga metoda może być uzupełniona metodą obliczeniowo-doświadczalną wtedy, gdy w normie brak jest odpowiedniej wytrzymałości zmęczeniowej dla rozpatrywanego nietypowego węzła lub detalu konstrukcyjnego.

Metody oceny i sposoby ustalania naprężeń

Metoda bezwarunkowej żywotności zapewnia odpowiednią niezawodność konstrukcji w okresie eksploatacji bez konieczności przeprowadzania regularnych kontroli. Metodę tę stosuje się wtedy, gdy lokalne pęknięcie zmęczeniowe mogłoby doprowadzić do zniszczenia pojedynczego elementu, fragmentu konstrukcji lub całej konstrukcji.

Metoda tolerowanych uszkodzeń zapewnia odpowiednią niezawodność konstrukcji, wykonanej ze stali o wystarczającej ciągliwości, czyli stali dobranej wg normy *PN-EN 1993-1-10 Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-10: Dobór stali ze względu na odporność na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową*, jednak pod warunkiem, że w okresie eksploatacji konstrukcja jest poddawana regularnej kontroli (jest prowadzony monitoring) według obowiązkowego programu kontroli. Metoda ta wymaga wyznaczenia minimalnego wykrywalnego rozmiaru pęknięcia w miejscu potencjalnej jego inicjacji. Historię naprężenia w tym miejscu opisuje się nie przez samo naprężenie, lecz przez wielkość od niego zależną – współczynnik intensywności naprężenia pierwszej postaci ΔK_I .

Metody oceny i sposoby ustalania naprężeń

W metodzie bezwarunkowej żywotności nośność zmęczeniowa jest ustalana następującymi sposobami:

- a) nominalnych, tzn. takich, które wyznacza się elementarnymi wzorami wytrzymałości materiałów, a więc przy pominięciu efektów sprężystej koncentracji naprężeń, tzn. dodatkowej niż ta, która jest uwzględniona w normowej wytrzymałości zmęczeniowej danego węzła z karbem (tzn. wytrzymałości, która została ustalona w badaniach doświadczalnych całych węzłów),
- b) geometrycznych (tylko dla konstrukcji spawanych), tzn. takich, które wyznacza się z uwzględnieniem koncentracji naprężeń, będącej wynikiem ukształtowania węzła, lecz pomija się koncentrację wywołaną samą spoiną (a więc kształtem spoiny, szczególnie na przejściu spoiny w materiał rodzimy, gdzie często występują podtopienia, jak i nieciągłościami wewnątrz spoiny),
- c) zmodyfikowanych naprężeń nominalnych, tzn. takich, które uwzględniają wzrost wartości naprężeń nominalnych w miejscach inicjacji pęknięć wskutek koncentratorów innych niż te, które są ujęte w normowych kategoriach zmęczeniowych norm przedmiotowych

Metody oceny i sposoby ustalania naprężeń

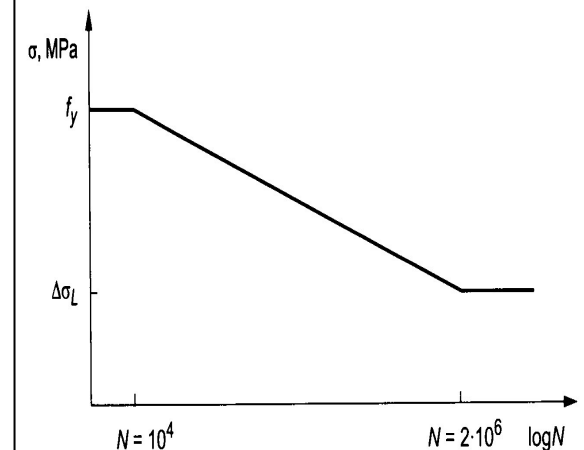
Stal konstrukcyjna może ulec pękaniu również przy niskim naprężeniu rozciągającym wówczas, gdy obciążenie jest wielokrotnie zmieniające się. Stal traci częściowo swoje właściwości plastyczne wskutek zjawiska, które jest nazwane zmęczeniem materiału.

Czynnikami wpływającymi na wytrzymałość zmęczeniową są:

- charakterystyka obciążeń, tzw. jego widmo,
- kształt i wymiary elementu i połączenia elementów,
- rodzaj spoiny, kształt, jej wykonanie,
- naprężenia rezydualne (własne), przede wszystkim spawalnicze,
- jakość powierzchni elementu, jej gładkość,
- liczba cykli N ,
- wartość zakresu naprężeń w cyklu,
- wartość średniego naprężenia.

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STALOWYCH

Wytrzymałość zmęczeniowa

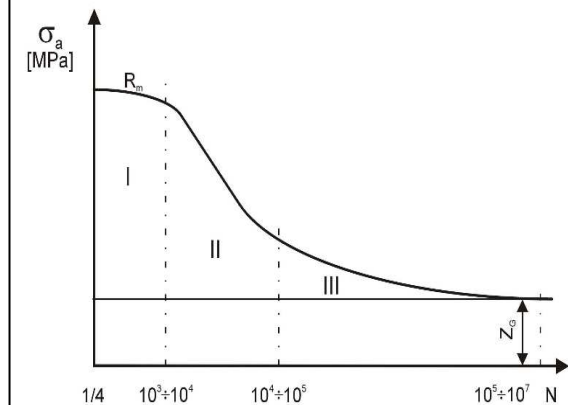


Wytrzymałość zmęczeniowa materiału wyrobu, połączeń i łączników jest ustalana na podstawie obszernych reprezentatywnych badań doświadczalnych w zależności od czynników związanych z kształtowaniem, operacjami technologicznymi wytwarzania i stanu naprężeń. Najczęściej eksperymentami były obejmowane takie wpływy, jak:

- miejscowa koncentracja naprężeń, wynikająca z ukształtowania połączeń spawanych – spoin,
- kształt i wymiary zaistniałych nieciągłości, dopuszczalnych podczas kształtowania połączeń,
- rodzaj naprężeń normalnych i stycznych,
- naprężenia rezydualne (własne), przede wszystkim spawalnicze,
- warunki metalurgiczne,
- metoda spawania oraz zabiegi ulepszające jakość połączenia po spawaniu.

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STALOWYCH

Wytrzymałość zmęczeniowa



Postanowienia ogólne

(1) Wytrzymałość zmęczeniowa, odnosząca się do zakresów zmienności naprężeń nominalnych, jest reprezentowana przez zbiory krzywych $(\log \Delta\sigma_R) - (\log N)$ i $(\log \Delta\tau_R) - (\log N)$ (krzywe S-N), które odpowiadają określonym kategoriom zmęczeniowym. Każda kategoria zmęczeniowa wyraża się wytrzymałością zmęczeniową normatywną, w N/mm^2 , dla 2 milionów cykli.

(2) Wytrzymałości zmęczeniowe odnoszące się do naprężeń nominalnych o stałej amplitudzie są określone wzorami:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6, \text{ przy czym } m = 3 \text{ dla } N \leq 5 \times 10^6, \text{ patrz Rysunek 7.1}$$

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m 2 \times 10^6, \text{ przy czym } m = 5 \text{ dla } N \leq 10^8, \text{ patrz Rysunek 7.2}$$

$$\Delta\sigma_D = \left(\frac{2}{5}\right)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0,737\Delta\sigma_C \text{ jest wytrzymałością zmęczeniową trwałą przy stałej amplitudzie, patrz Rysunek 7.1}$$

$$\Delta\tau_L = \left(\frac{2}{100}\right)^{1/5} \Delta\tau_C = 0,457\Delta\tau_C \text{ jest wytrzymałością zmęczeniową trwałą, patrz Rysunek 7.2.}$$

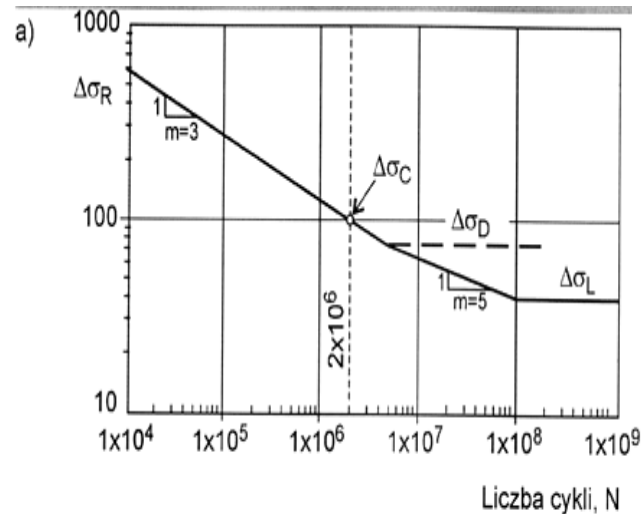
(3) W przypadku widm naprężeń nominalnych, w których występują zakresy zmienności naprężeń o wartościach większych i mniejszych niż $\Delta\sigma_D$, wytrzymałość zmęczeniowa jest określona wzorami:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m 2 \times 10^6 \text{ przy } m = 3 \text{ dla } N \leq 5 \times 10^6$$

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m 5 \times 10^6 \text{ przy } m = 5 \text{ dla } 5 \times 10^6 \leq N \leq 10^8$$

ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STALOWYCH

Wytrzymałość zmęczeniowa w ujęciu normowym

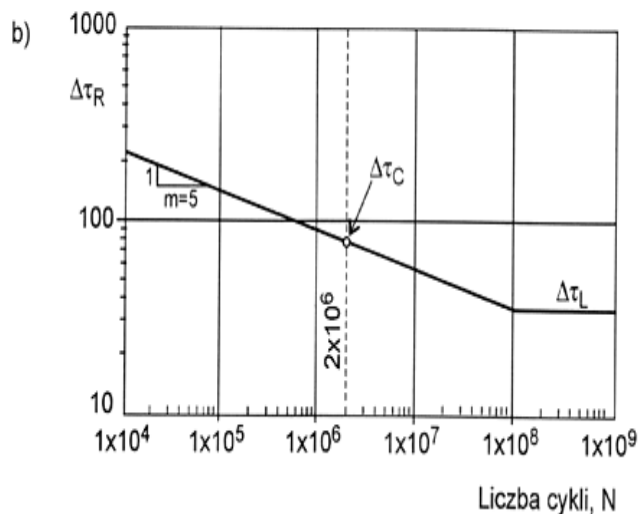


Kategoria zmęczeniowa $\Delta\sigma_C$ ($\Delta\tau_C$)
 – zakres naprężeń powodujący zniszczenie elementu przy liczbie cykli równej 2×10^6

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



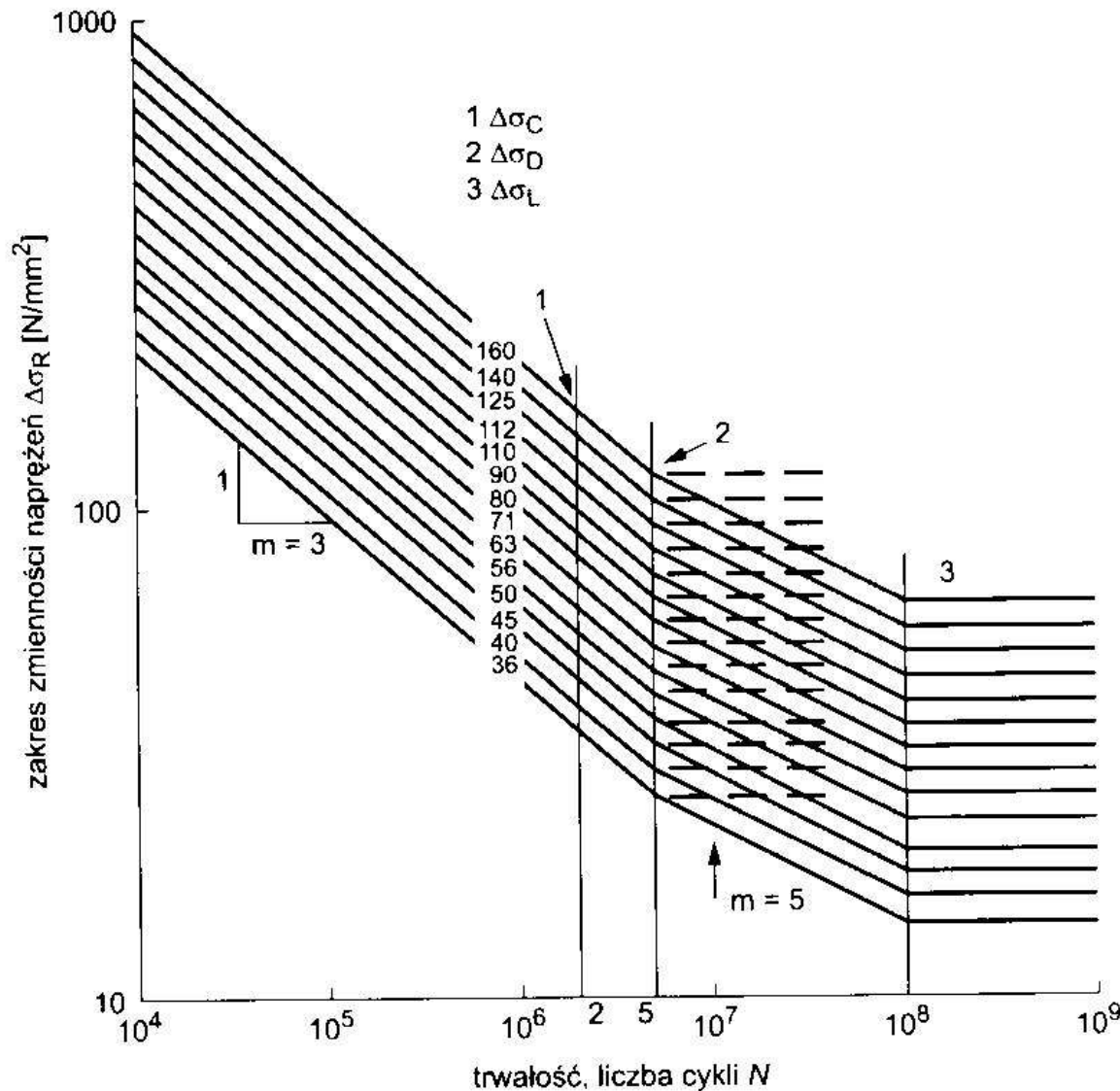
ZAGADNIENIA ZMĘCZENIOWE W PROJEKTOWANIU KONSTRUKCJI STAŁOWYCH

KRZYWE ZMĘCZENIOWE

ZALEŻNOŚĆ POMIĘDZY ZNISZCZENIEM ZMĘCZENIOWYM OD ZAKRESU ZMIENNOŚCI I LICZBY CYKLI

KAŻDA KATEGORIA ZMĘCZENIOWA $\Delta\sigma_C$ ($\Delta\tau_C$) REPREZENTUJE WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWĄ PRZY DWÓCH MILIONACH CYKLI ZMIAN NAPRĘŻEŃ

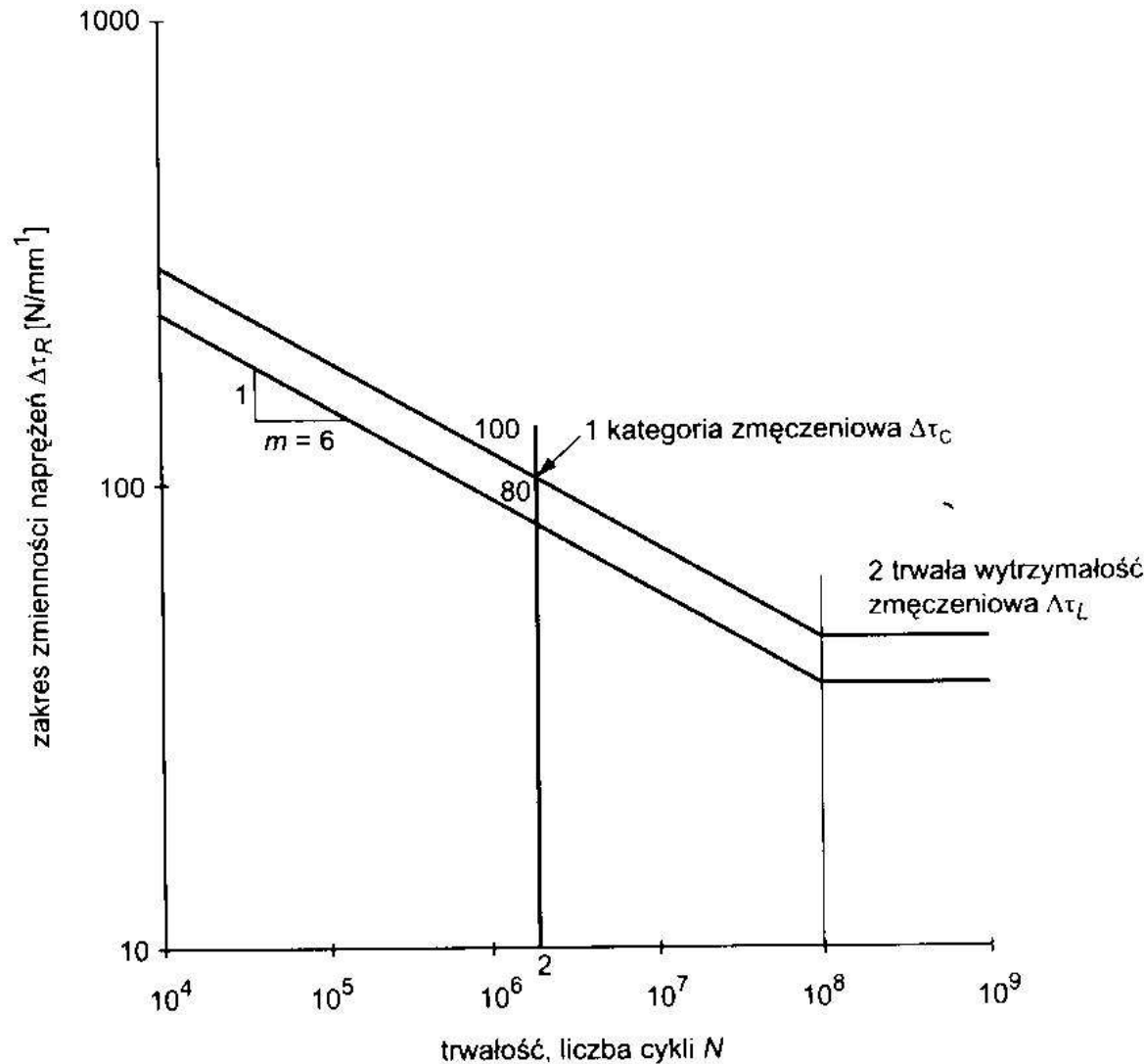
WYTRZYMAŁOŚĆ TRWAŁA $\Delta\sigma_D$ ($\Delta\tau_D$) GRANICZNY ZAKRES ZMIENNOŚCI NAPRĘŻEŃ, POWYŻEJ KTÓREGO OCENA ZMĘCZENIA JEST KONIECZNA



ZAGADNIENIA
 ZMĘCZENIOWE
 W PROJEKTOWANIU
 KONSTRUKCJI
 STALOWYCH

KRZYWE
 WYTRZYMAŁOŚCI
 ZMĘCZENIOWEJ DLA
 ZAKRESÓW NAPRĘŻEŃ
 NORMALNYCH

14 TYPÓW KARBÓW
 NAPRĘŻEŃ
 NORMALNYCH



ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KONSTRUKCJI
STALOWYCH

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
 STALOWYCH**

**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**

(1) Nominalne, zmodyfikowane lub geometryczne zakresy zmienności naprężeń od obciążeń częstych $\psi_1 Q_k$ (patrz EN 1990) nie powinny przekraczać poniższych wartości:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &\leq 1,5 f_y && \text{w przypadku naprężeń normalnych} \\ \Delta\tau &\leq 1,5 f_y / \sqrt{3} && \text{w przypadku naprężeń ścinających} \end{aligned} \quad (8.1)$$

(2) Należy wykazać, że przy obciążeniach zmęczeniowych spełnione są następujące warunki nośności:

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

oraz (8.2)

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

**Sprawdzenie
 wytrzymałości
 ze względu
 na zmęczenie**

c) jednocześnie naprężenia normalne i styczne (np. w środku belki)

$$\left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} \right)^3 + \left(\frac{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2}}{\Delta\tau_C / \gamma_{Mf}} \right)^5 \leq 1,0. \quad (64)$$

We wzorach (62) do (64) oznaczono przez:

$\Delta\sigma_{E,2}$ i $\Delta\tau_{E,2}$ – 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),

γ_{Ff} i γ_{Mf} – współczynniki częściowe odpowiednio dla równoważnych zakresów zmienności naprężeń o stałej amplitudzie i dla wytrzymałości zmęczeniowej normatywnej $\Delta\sigma_C$ i $\Delta\tau_C$.

**Sprawdzenie
wytrzymałości
ze względu
na zmęczenie**

Jeżeli widmo obciążenia jest jednorodne o stałej amplitudzie $\Delta\sigma$ lub $\Delta\tau$, to równoważne zakresy naprężeń wynoszą

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{E,2} = \lambda_1 \cdot \Delta\sigma = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot \Delta\sigma, \quad (65)$$

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\tau_{E,2} = \lambda_1 \cdot \Delta\tau = \left(\frac{N}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{5}} \cdot \Delta\tau. \quad (66)$$

Wytrzymałość zmęczeniowa

Współczynnik λ_1

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

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

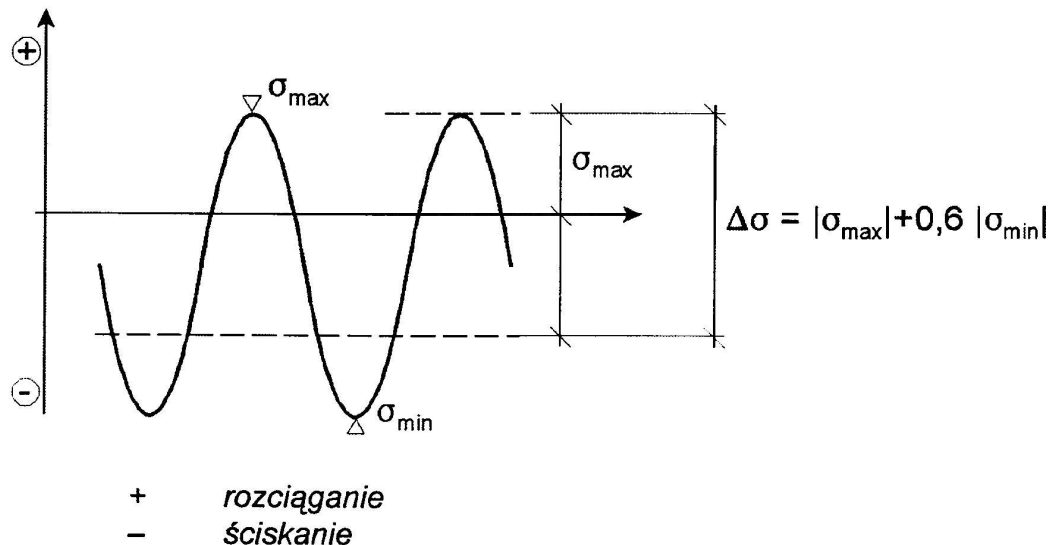
Metoda oceny	Konsekwencje zniszczenia	
	Małe konsekwencje	Duże konsekwencje
Metoda tolerowanych uszkodzeń	1,00	1,15
Metoda bezwarunkowej żywotności	1,15	1,35

**ZAGADNIENIA
 ZMĘCZENIOWE
 W PROJEKTOWANIU
 KOMINÓW STALOWYCH**

**WSPÓŁCZYNNIKI
 CZĘŚCIOWE**

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:

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



Zmodyfikowany zakres zmienności naprężeń w przypadku elementów niespawanych lub spawanych odprężonych

Modyfikacje wytrzymałości zmęczeniowej

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

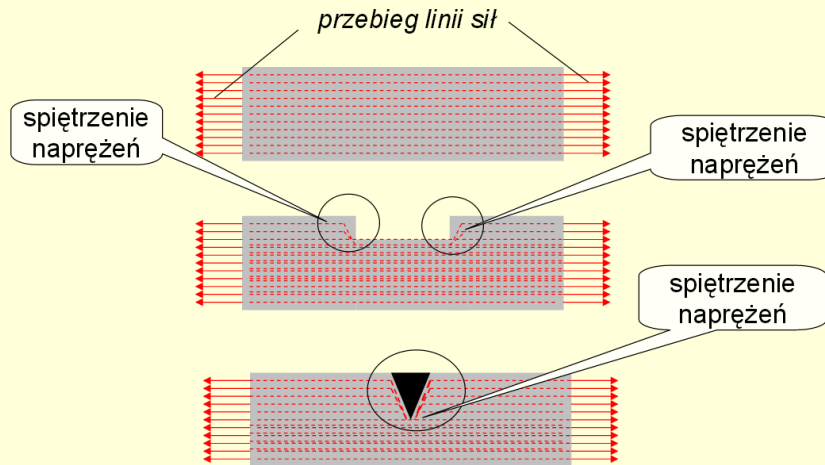
Liczba cykli obciążenia

Równoważny zakres
 zmienności naprężeń

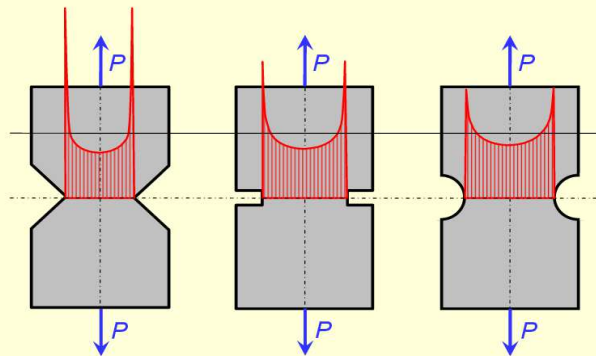
Współczynnik λ

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

W przekroju osłabionym **karbem** (*otwór, podcięcie, nagła zmiana przekroju*) występuje **spiętrzenie naprężeń**, zwane również *działaniem karbu*.



WPŁYW KSZTAŁTU PRZEDMIOTU W PRZYPADKU
 OBCIĄŻEŃ STAŁYCH



Rozkład naprężeń w próbkach rozciąganych o różnych rodzajach i różnej głębokości karbu

Definicje

i określenia (c.d.)

KARB = SPIĘTRZENIE NAPRĘŻEŃ

Tablica 10. Kategorie zmęczeniowe niektórych połączeń

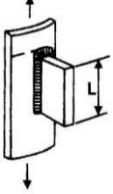
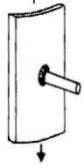
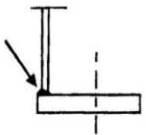
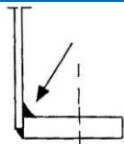
Kategoria zmęczeniowa	Szczegół połączenia	Opis karbu
1	2	3
112 Efekt skali przy $t > 25\text{mm}$ $k_s = (25/t)^{0,2}$		Styki poprzeczne powłoki Spoina czołowa dwustronna bez podkładki Badania nieniszczące spoin
50 przy $t > 25\text{ mm}$ $k_s = (25/t)^{0,2}$		Styki poprzeczne powłoki o różnej grubości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

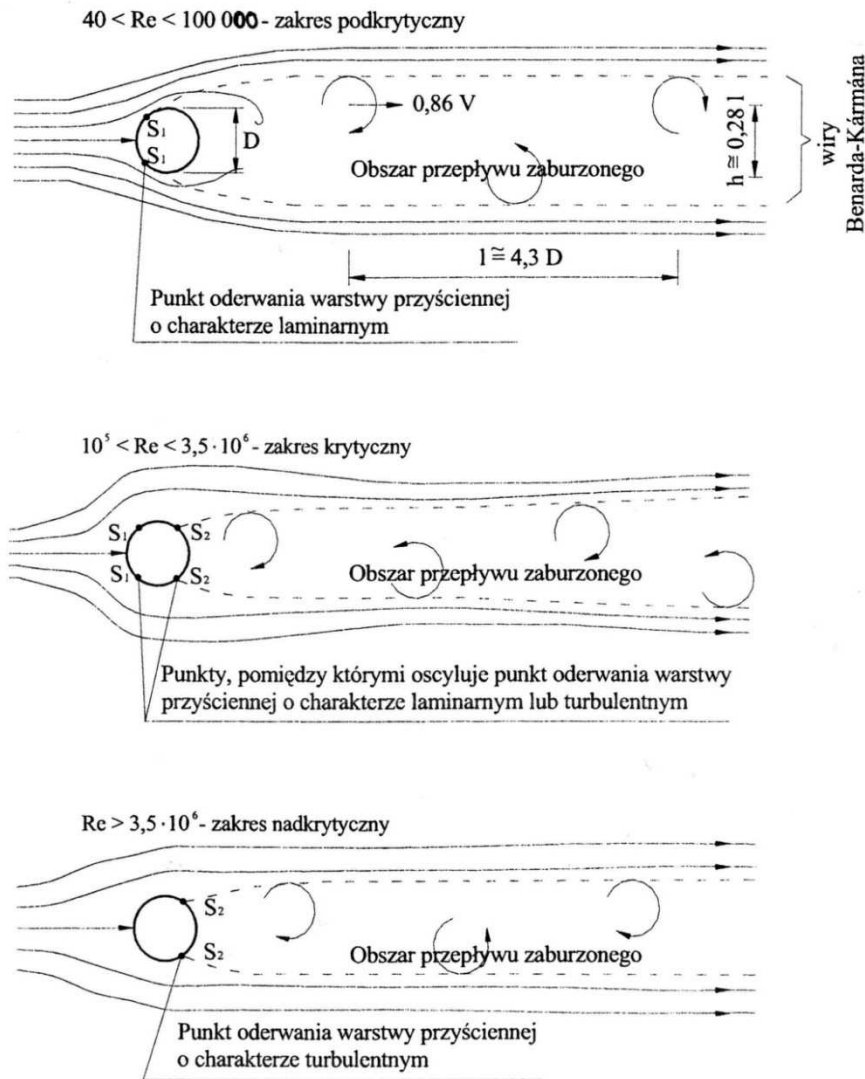
ZAGADNIENIA
 ZMĘCZENIOWE
 W PROJEKTOWANIU
 KOMINÓW STALOWYCH

KATEGORIE
 ZMĘCZENIOWE
 =KATEGORIE KARBU

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		Przyspawany kołek pracujący na ścinanie
	71		Połączenie kołnierzowe na spoinę czołową
	40		Połączenie kołnierzowe na spoinę pachwinową



OBCIĄŻENIE WZBUDZENIEM WIROWYM

według
 PN-EN 1991-1-4

Kryteria oceny

Należy uwzględnić:

$$h/b > 6$$

Nie ma konieczności rozpatrywania
 wzbudzenia wirowego:

$$V_{crit,i} = \frac{b \cdot n_{i,y}}{S_t} > 1,25 \cdot V_m$$

$S_t = 0,18$ – walec kołowy
 (przekrój kołowy)

Efekt drgań wskutek odrywających się regularnie wirów można otrzymać z sił bezwładności $F_w(s)$ na jednostkę wysokości, w miejscu s komina, w kierunku prostopadłym do kierunku wiatru. Norma PN-EN-1991-1-4 podaje następujący wzór na siły $F_w(s)$

$$F_w(s) = (2\pi n_{i,y})^2 m(s) \Phi_{i,y}(s) y_{F,max}, [N/m]$$

gdzie:

$m(s)$ – drgająca masa komina na jednostkę wysokości, kg/m,

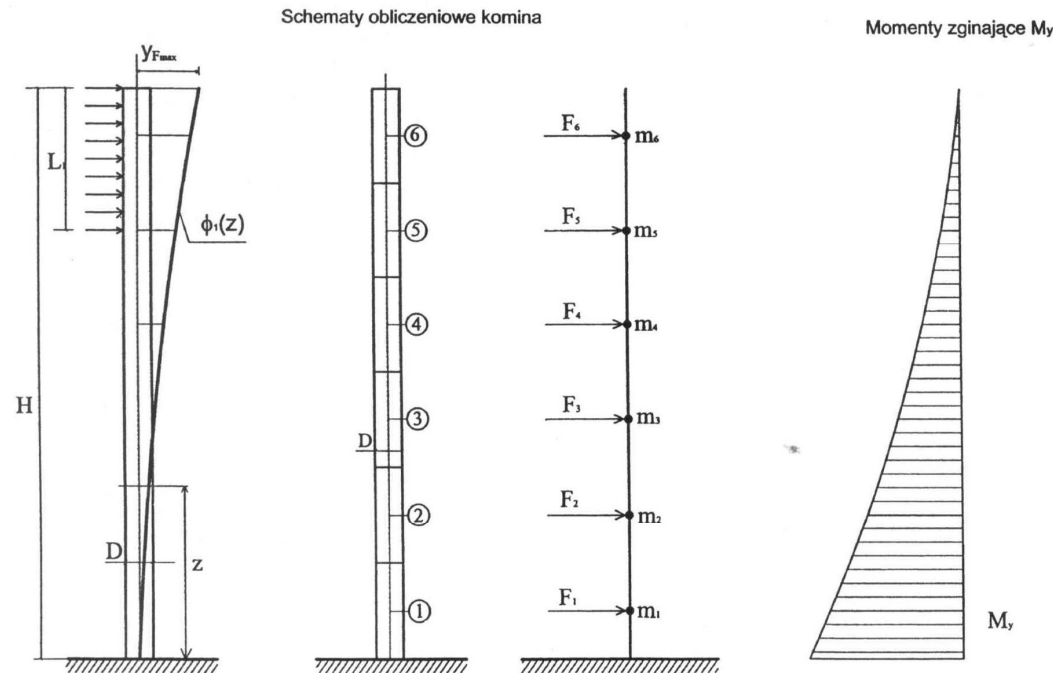
$y_{F,max}$ – maksymalne przemieszczenie w czasie na osi komina, w którym $\Phi_{i,y}(s) = 1$,

$\Phi_{i,y}(s)$ – postać drgań własnych komina, unormowana do 1 w punkcie maksymalnego przemieszczenia (w kominie wolnostojącym – w wierzchołku komina).

**WZBUDZENIE
WIROWE DRGAŃ
KOMINA**

według
PN-EN 1991-1-4

SIŁY BEZWŁADNOŚCI



Rys. 1. Schemat obliczania kominy obciążonego wzbudzeniem wirowym wg EN 1991-1-4 (E)

OBCIĄŻENIE WZBUDZENIEM WIROWYM

według
 PN-EN 1991-1-4

Dla kominy wolnostojącego pierwsza (podstawowa) postać drgań giętych jest wyrażona wzorem:

$$\Phi_{1,y}(s) = (s/h)^2$$

Funkcja $\Phi_{1,y}(s)$

Największe przemieszczenie wierzchołka komina $y_{F,max}$ można obliczyć z następującego wzoru

$$\frac{y_{F,max}}{b} = \frac{K \cdot K_w \cdot c_{lat}}{St^2 \cdot Sc},$$

gdzie:

$K = 0,13$ – dla pierwszej postaci drgań,

$$K_w = 3 \frac{L_1}{h} \left[1 - \frac{L_1}{h} + \frac{1}{3} \left(\frac{L_1}{H} \right)^2 \right] - \text{współczynnik efektywnej długości korelacyjnej},$$

Sc – liczba Scrutona, odzwierciedlająca podatność komina na drgania (zależy ona od tłumienia konstrukcyjnego δ_s i stosunku masy konstrukcji do masy powietrza) i może być obliczana ze wzoru

$$Sc = \frac{2 \cdot \delta_s \cdot m_{i,e}}{\rho \cdot b^2},$$

c_{lat} – współczynnik siły bocznej i -tej postaci drgań, zależny od liczby Reynoldsa Re i względnej prędkości krytycznej $v_{crit,i} / v_{m,Lj}$, wyznaczany według Załącznika E

OBCIĄŻENIE WZBUDZENIEM WIROWYM

$y_{F,max}$:

- ✓ wg PN-EN 1991-1-4 – sposób 1.
- ✓ wg PN (za DIN)

E.1.5.3 Sposób 2 obliczania amplitudy drgań w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku wiatru

(1) Wartość charakterystyczną przemieszczenia, w punkcie największego wychylenia podaje wyrażenie (E.13):

$$y_{\max} = \sigma_y \cdot k_p \quad (\text{E.13})$$

gdzie:

σ_y odchylenie standardowe przemieszczenia, patrz (2);

k_p współczynnik wartości szczytowej, patrz (6).

(2) Odchylenie standardowe σ_y przemieszczenia odniesione do szerokości b , w punkcie największego ugięcia ($\Phi = 1$) można obliczyć za pomocą wyrażenia (E.14):

$$\frac{\sigma_y}{b} = \frac{1}{St^2} \cdot \frac{C_c}{\sqrt{\frac{Sc}{4 \cdot \pi} - K_a} \cdot \left(1 - \left(\frac{\sigma_y}{b \cdot a_L}\right)^2\right)} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot b^2}{m_e}} \cdot \sqrt{\frac{b}{h}} \quad (\text{E.14})$$

gdzie:

C_c stała aerodynamiczna, zależna od kształtu przekroju poprzecznego, a w przypadku walca kołowego także od liczby Reynoldsa Re zdefiniowanej w E.1.3.4 (1); jej wartość podano w Tablicy E.6;

K_a parametr tłumienia aerodynamicznego podany w E.1.5.3 (4);

a_L unormowana graniczna amplituda ugięcia konstrukcji o bardzo małym tłumieniu, podana w Tablicy E.6;

St liczba Strouhala;

ρ gęstość powietrza w warunkach wzbudzenia wirowego, patrz Uwaga 1;

m_e masa efektywna (równoważna) na jednostkę długości; podana w F.4 (1);

h, b wysokość i szerokość konstrukcji. W przypadku konstrukcji o zmiennej szerokości stosuje się szerokość w punkcie największego przemieszczenia.

OBCIĄŻENIE WZBUDZENIEM WIROWYM

$y_{F,\max}$ – wg PN-EN 1991-1-4:
 sposób 2.

Podczas projektowania konstrukcji, które będą narażone na wpływy 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:

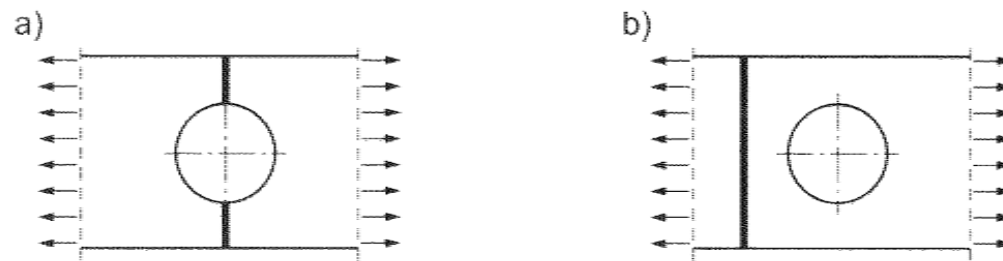
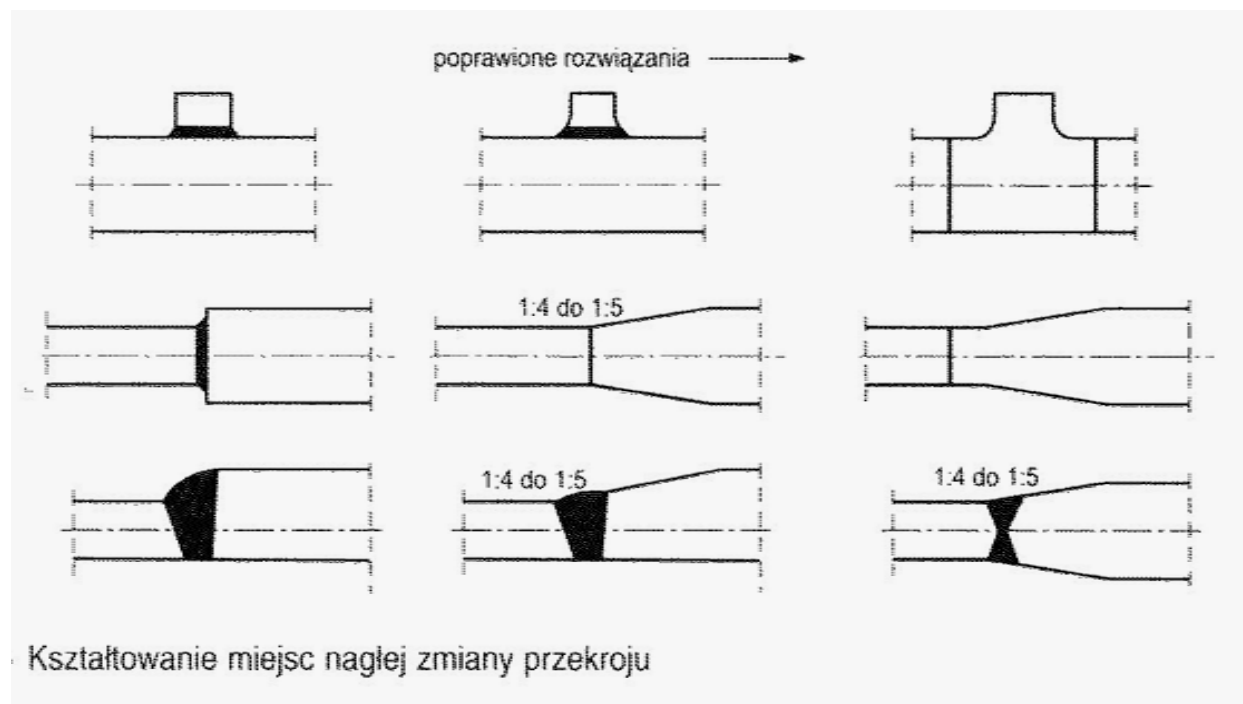
- podłużnych spoin pachwinowych przerywanych,
- poprzecznych spoin czołowych z kraterami (czyli należy stosować spawanie z płytkami wybiegowymi, a po ich odcięciu gazowym powierzchnie należy szlifować),
- naglej zmiany przekroju poprzecznego (a więc element grubszy lub szerszy powinien mieć skosy o nachyleniu 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

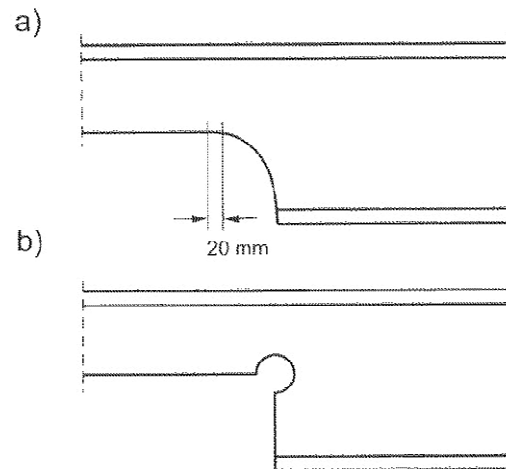
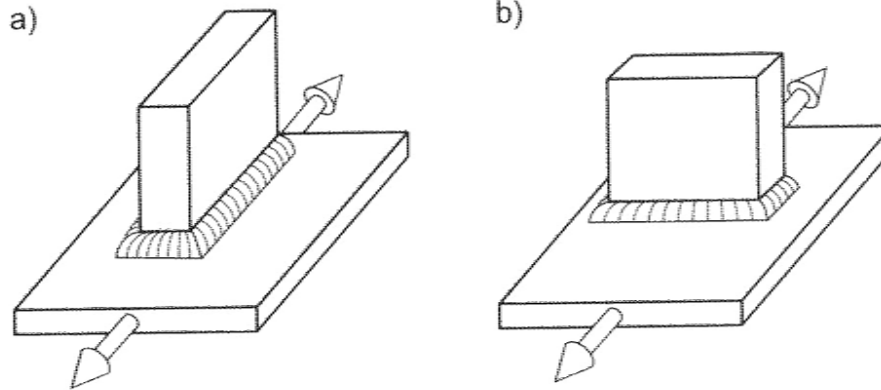
ZAGADNIENIA
ZMĘCZENIOWE
W PROJEKTOWANIU
KOMINÓW STALOWYCH

Wybrane sposoby
zwiększania żywotności
zmęczeniowej elementów
konstrukcji stalowych



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

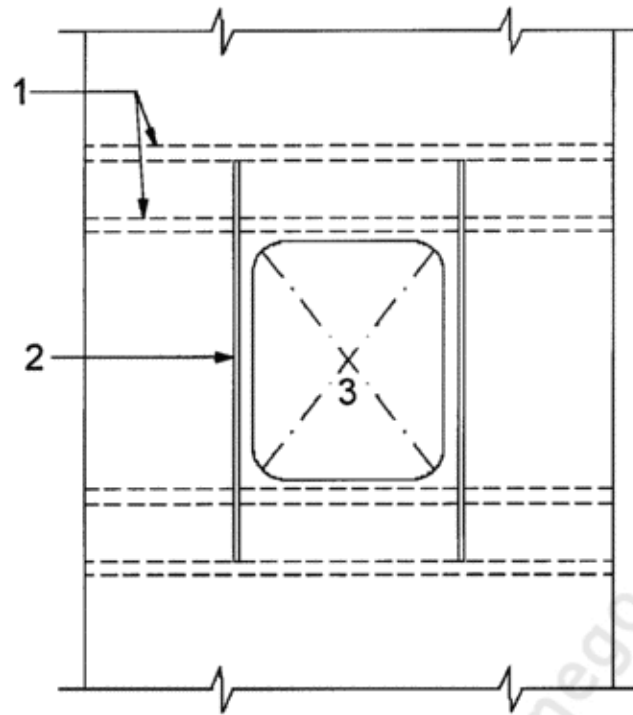
Umieszczenie elementów nieprzenoszących obciążeń:
a) rozwiązanie niewłaściwe, b) rozwiązanie właściwe



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



Rysunek 6.1 Usztywnienia wokół wycięć i otworów

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

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)**

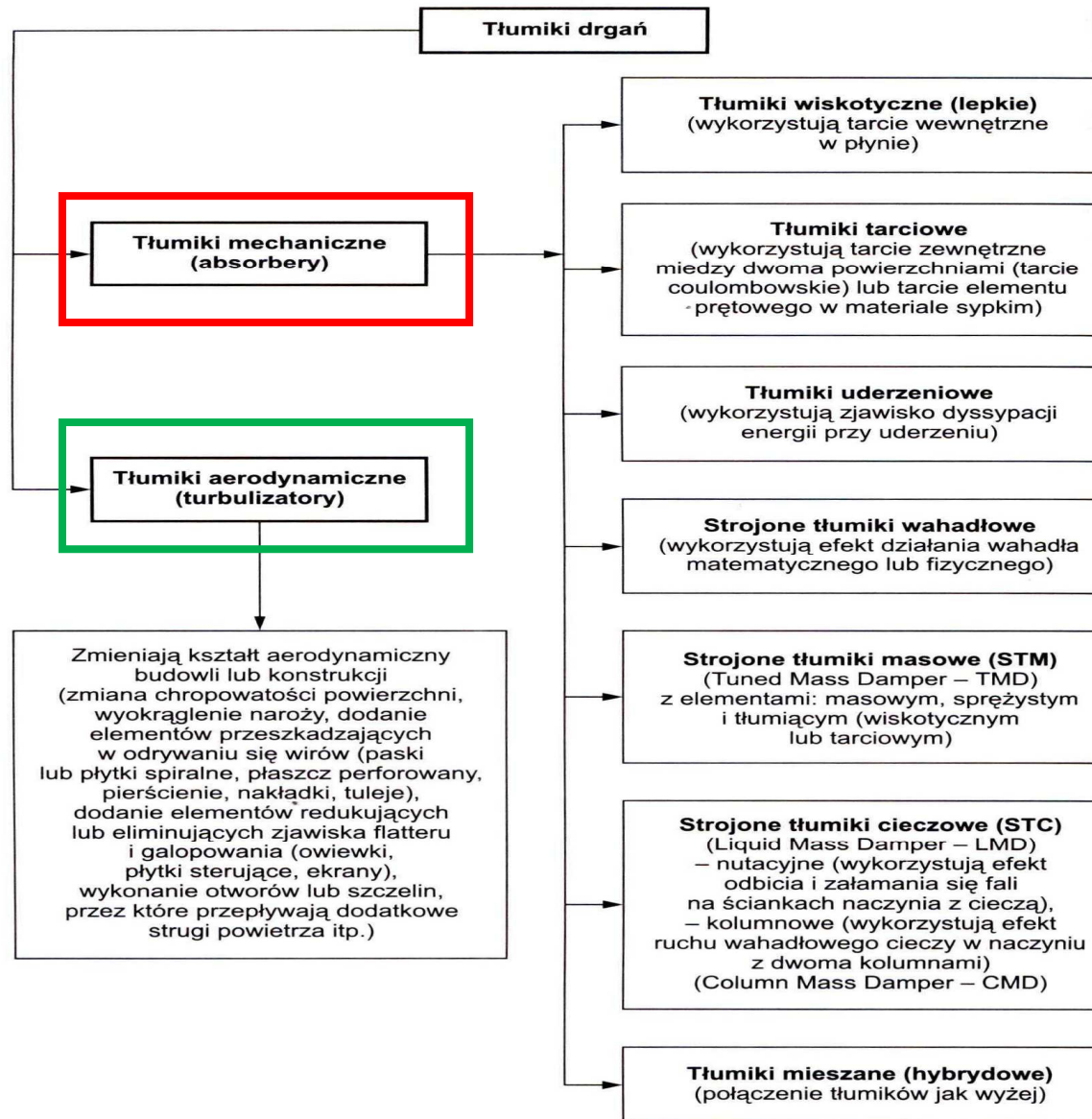
według PN-EN 1991-1-4

**Stan graniczny
 użyteczności**

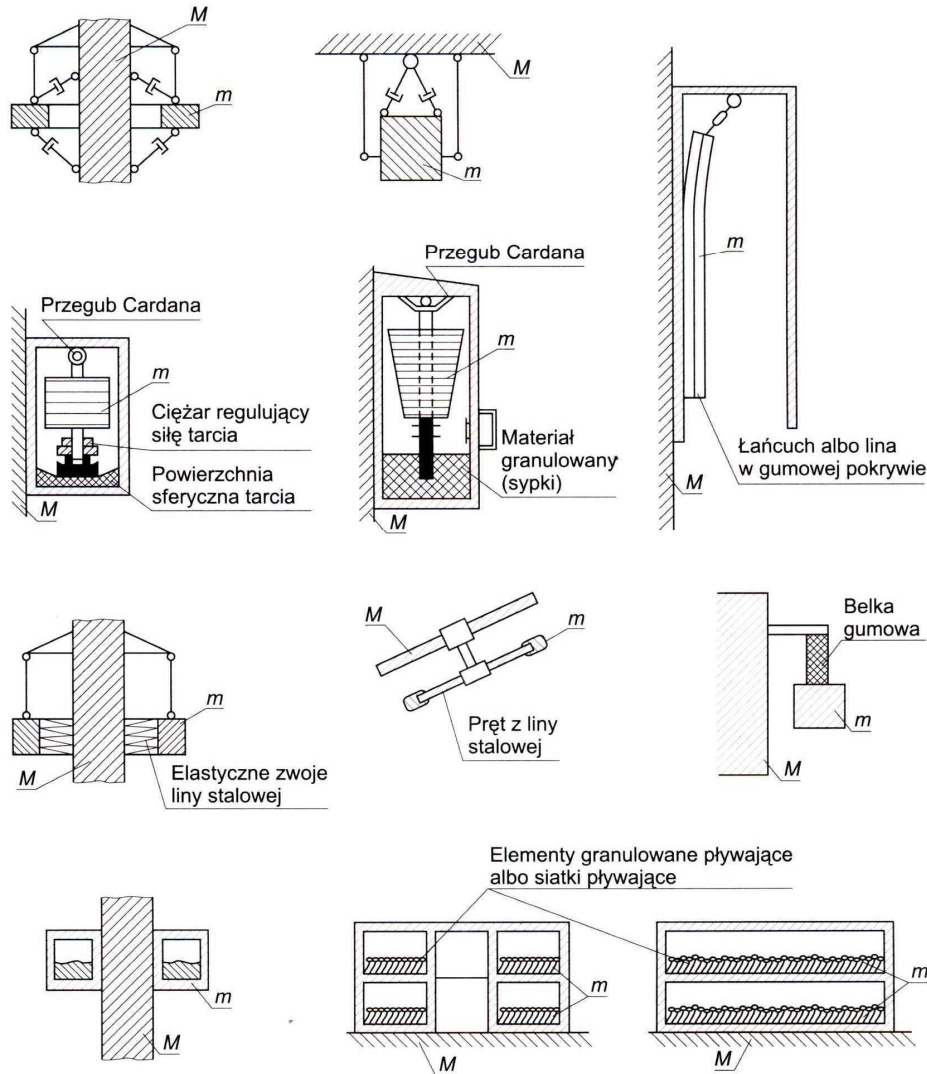
Jeżeli $y_{F, \max} > y_{gr}$ należy zastosować tłumik drgań

TŁUMIKI DRGAŃ

Urządzenia aerodynamiczne
 (tłumiki aerodynamiczne)
 zalecane przez normę PN-EN
 1991-1-4, jeżeli liczba Scrutona
 $S_c > 8$



**TŁUMIKI
 MECHANICZNE**



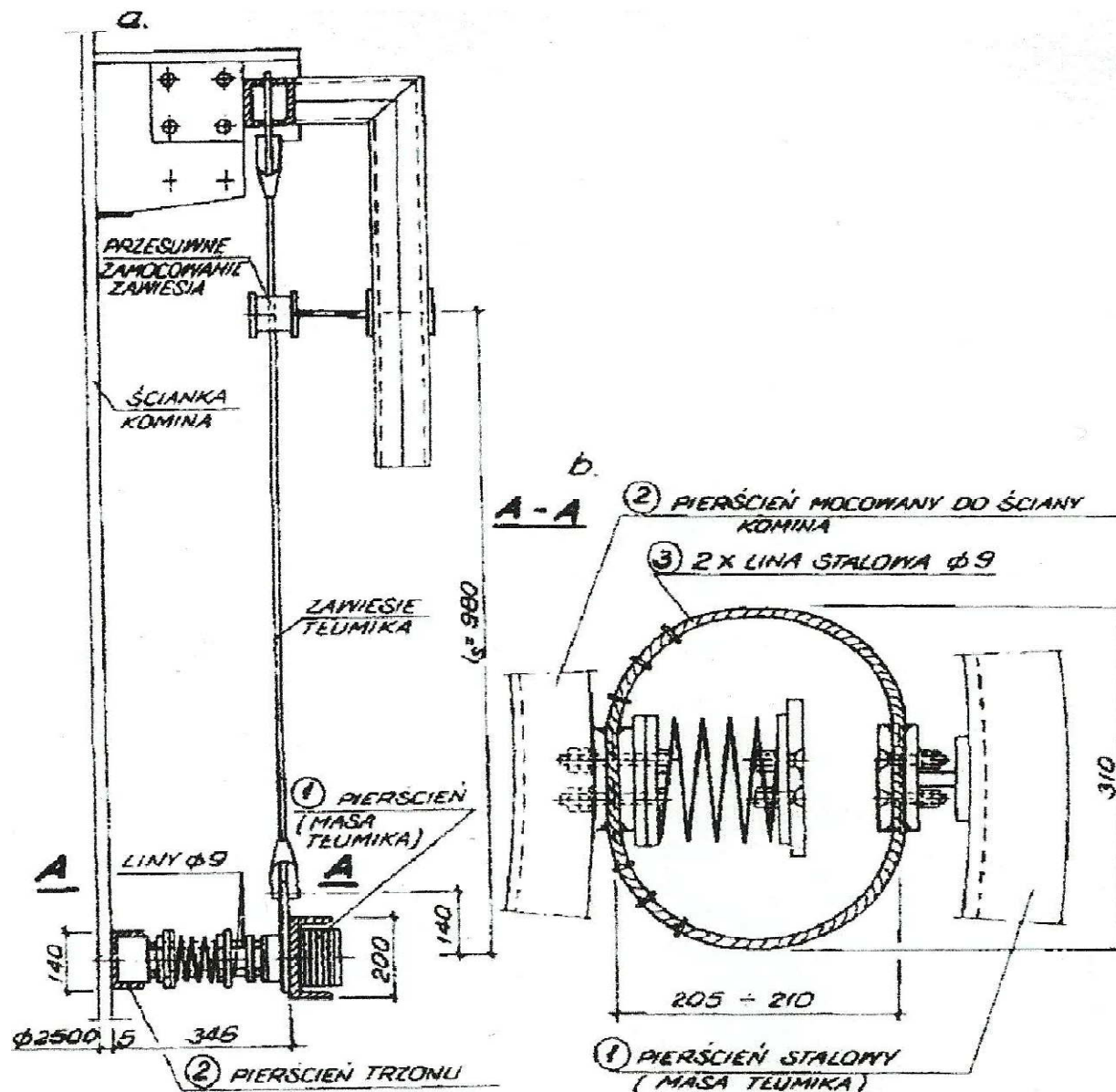


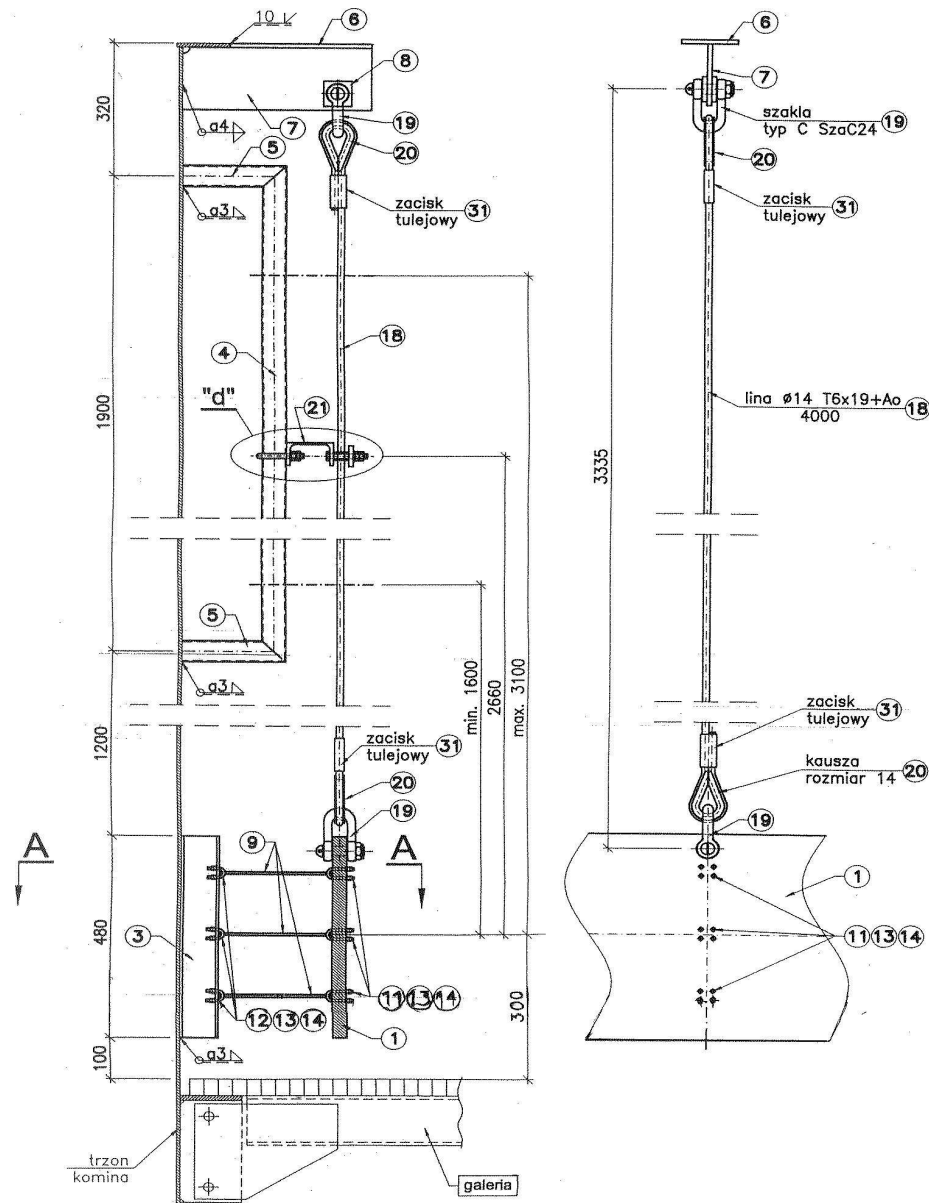
**TŁUMIKI
MECHANICZNE**

**Tłumik masowy
wahadłowy
(przykład)**

**TŁUMIKI
MECHANICZNE**

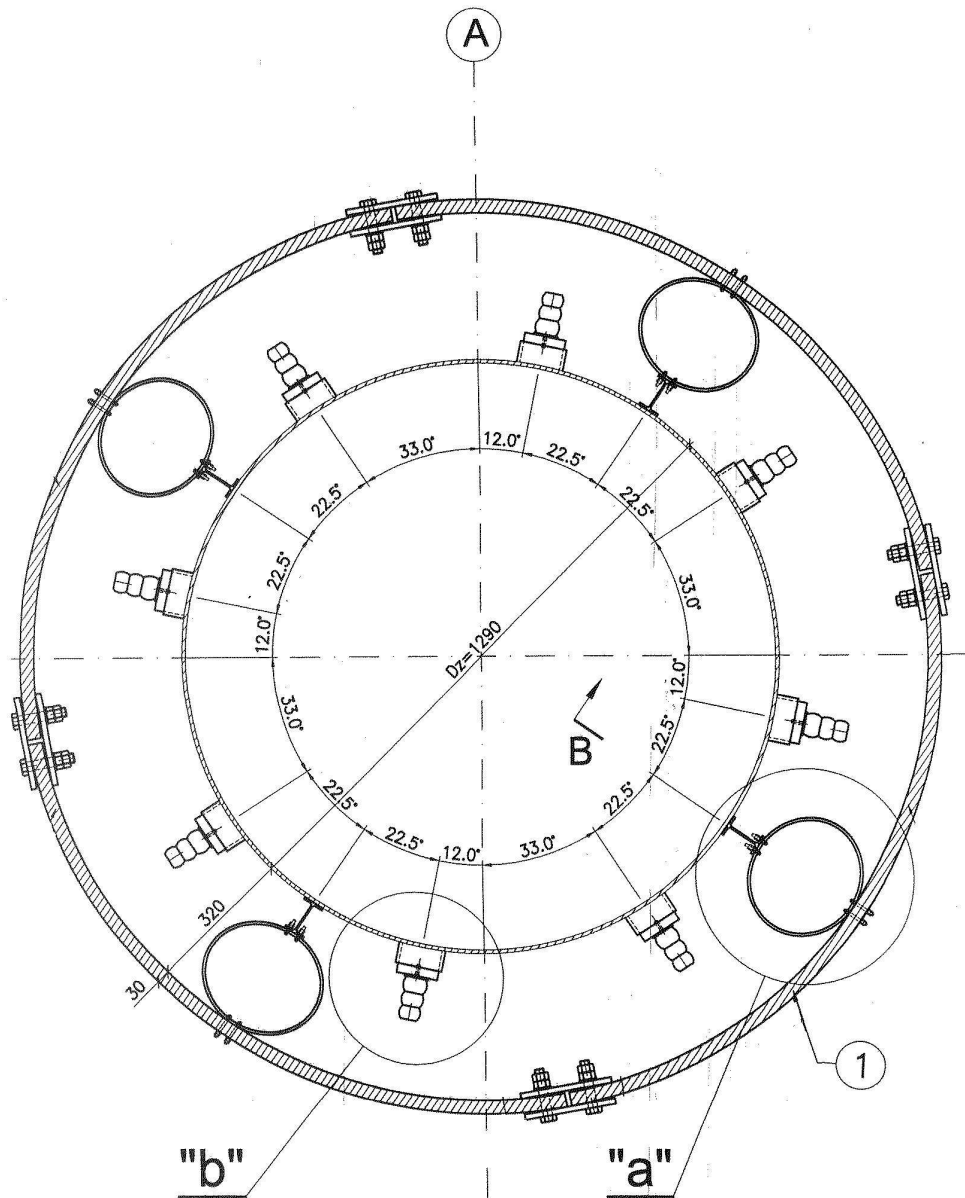
**Tłumik masy
wahadłowy
(rozwiązanie
konstrukcyjne nr 1)**





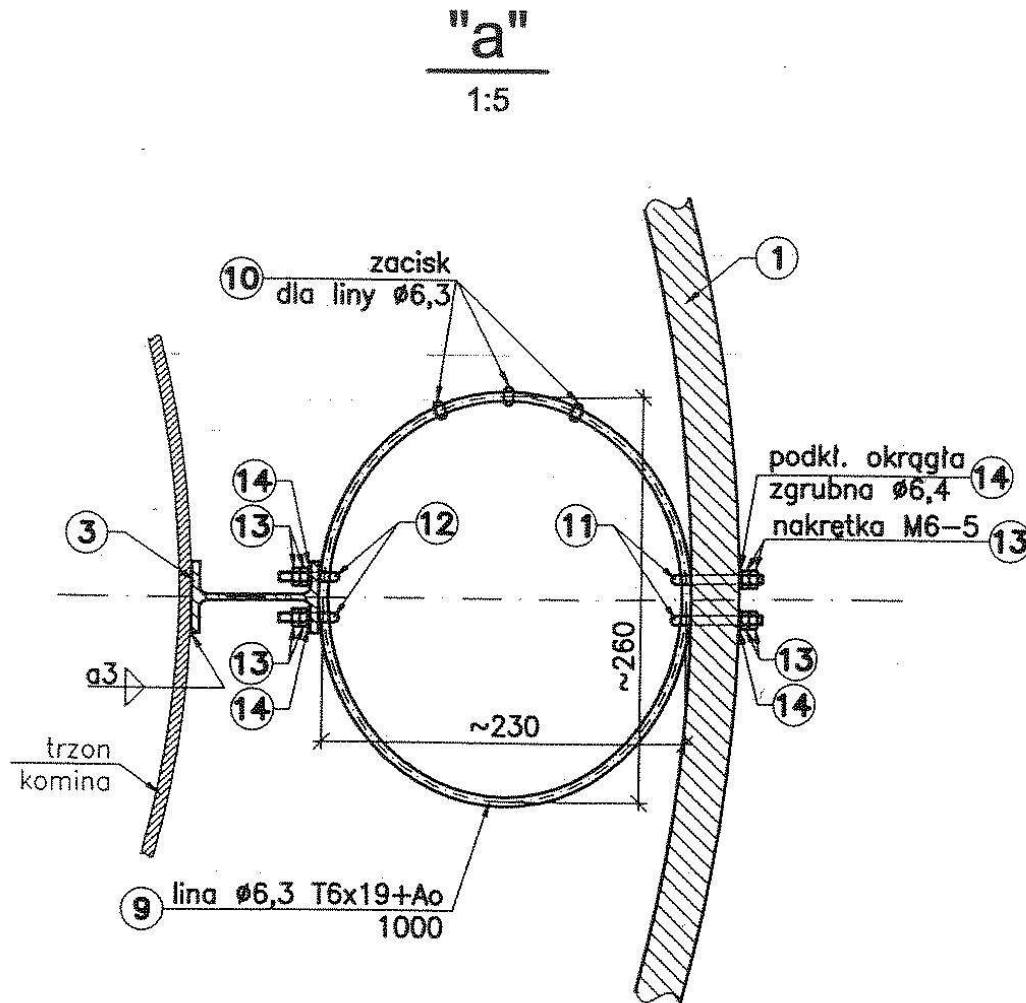
TŁUMIKI MECHANICZNE

Tłumik masowy
 wahadłowy
 (rozwiązanie
 konstrukcyjne nr 2)



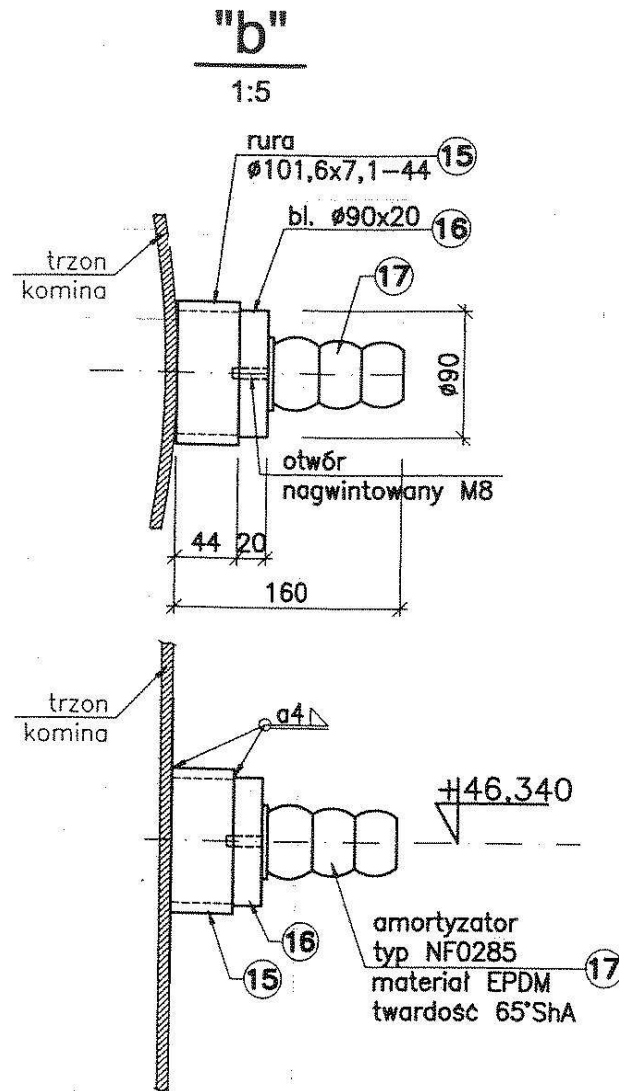
TŁUMIKI MECHANICZNE

Tłumik masowy
wahadłowy
(rozwiązanie
konstrukcyjne nr 2)



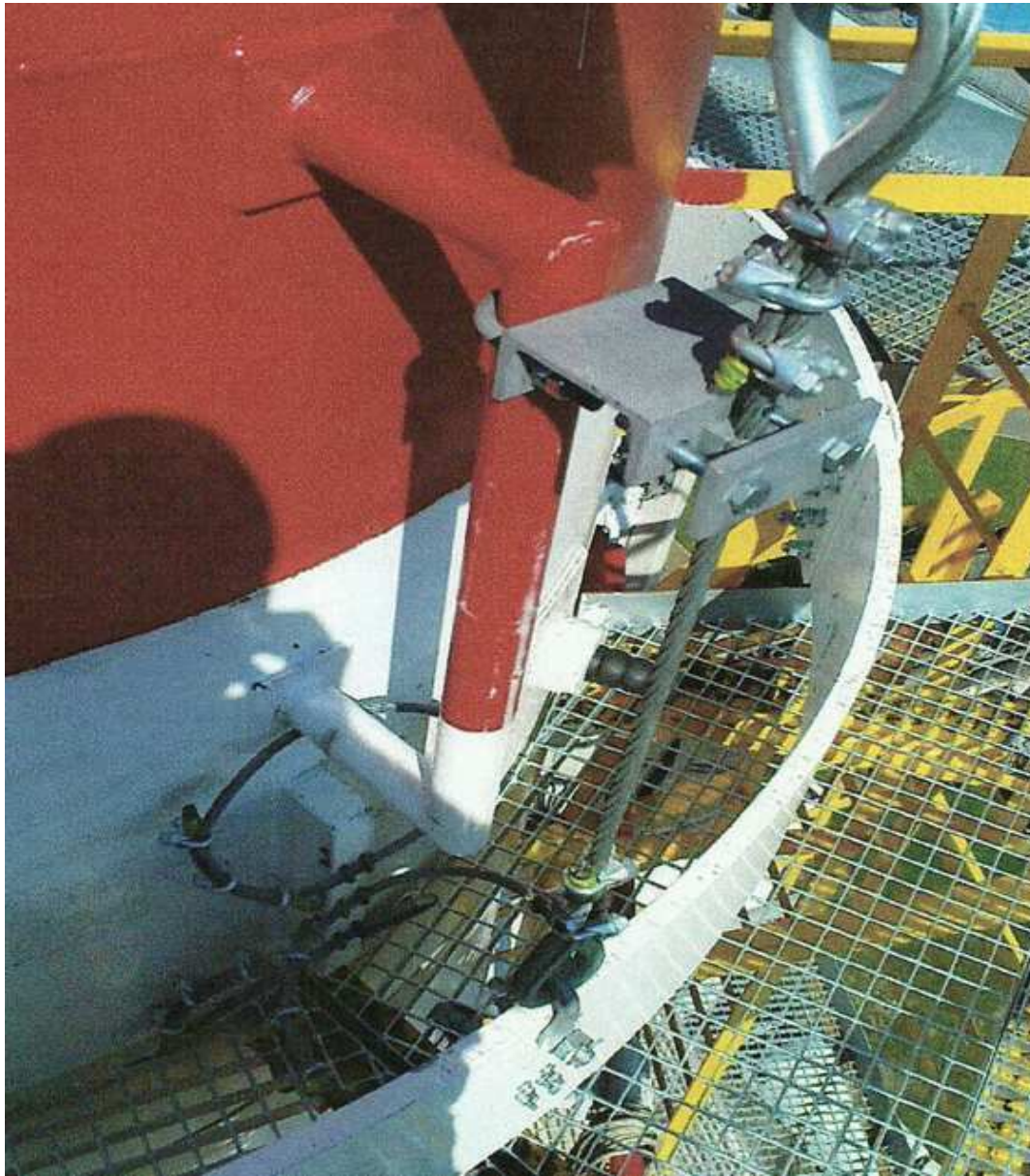
TŁUMIKI MECHANICZNE

Tłumik masy
wahadłowy
(rozwiązanie
konstrukcyjne nr 2)



TŁUMIKI MECHANICZNE

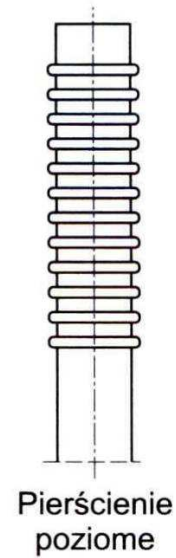
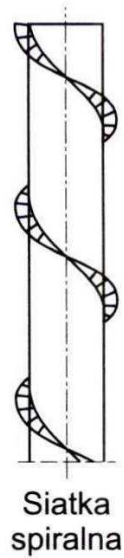
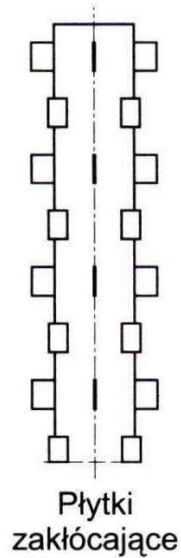
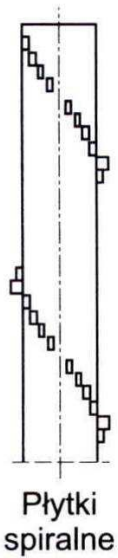
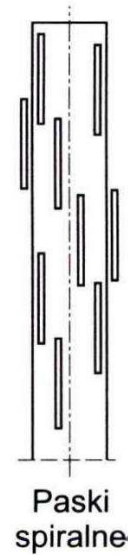
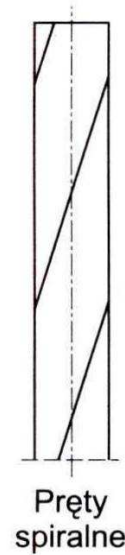
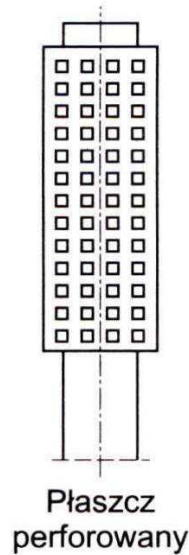
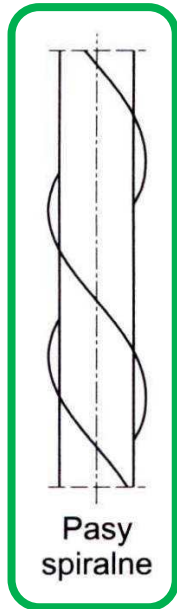
Tłumik masy
wahadłowy
(rozwiązanie
konstrukcyjne nr 2)



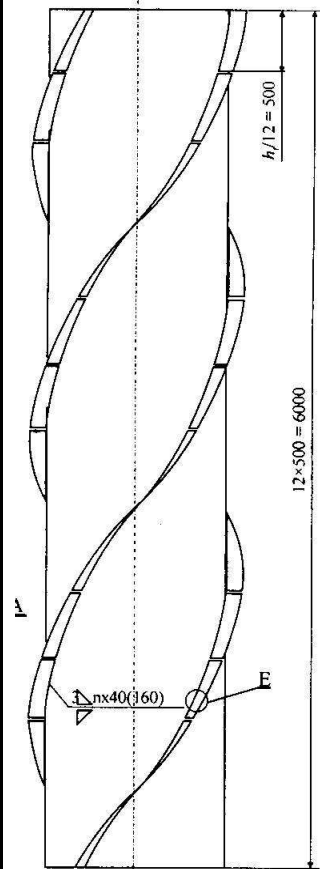
TŁUMIKI MECHANICZNE

**Tłumik masowy
wahadłowy
(rozwiązanie
konstrukcyjne nr 2 -
fotografia)**

**TŁUMIKI
AERODYNAMICZNE –
TURBULIZATORY**

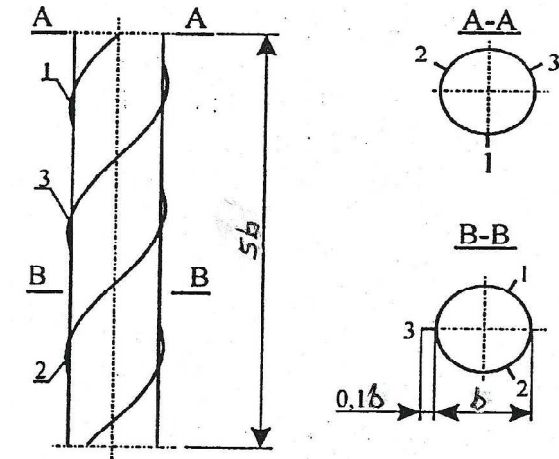
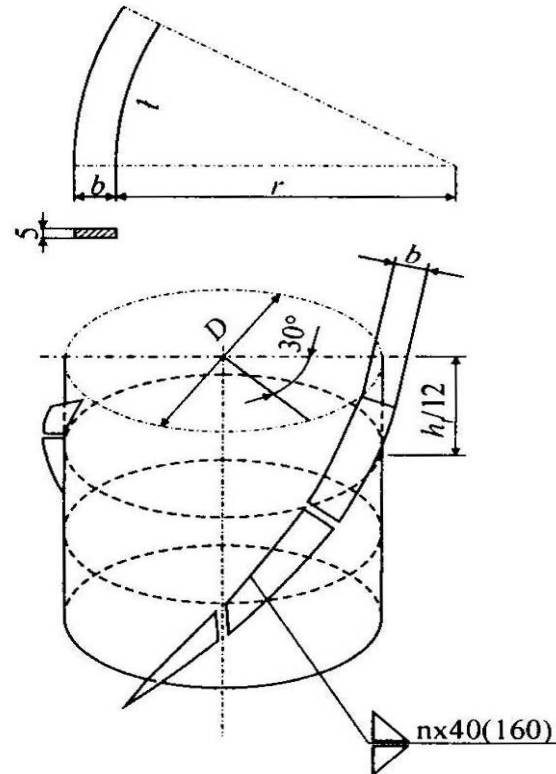


TURBULIZATOR SPIRALNY



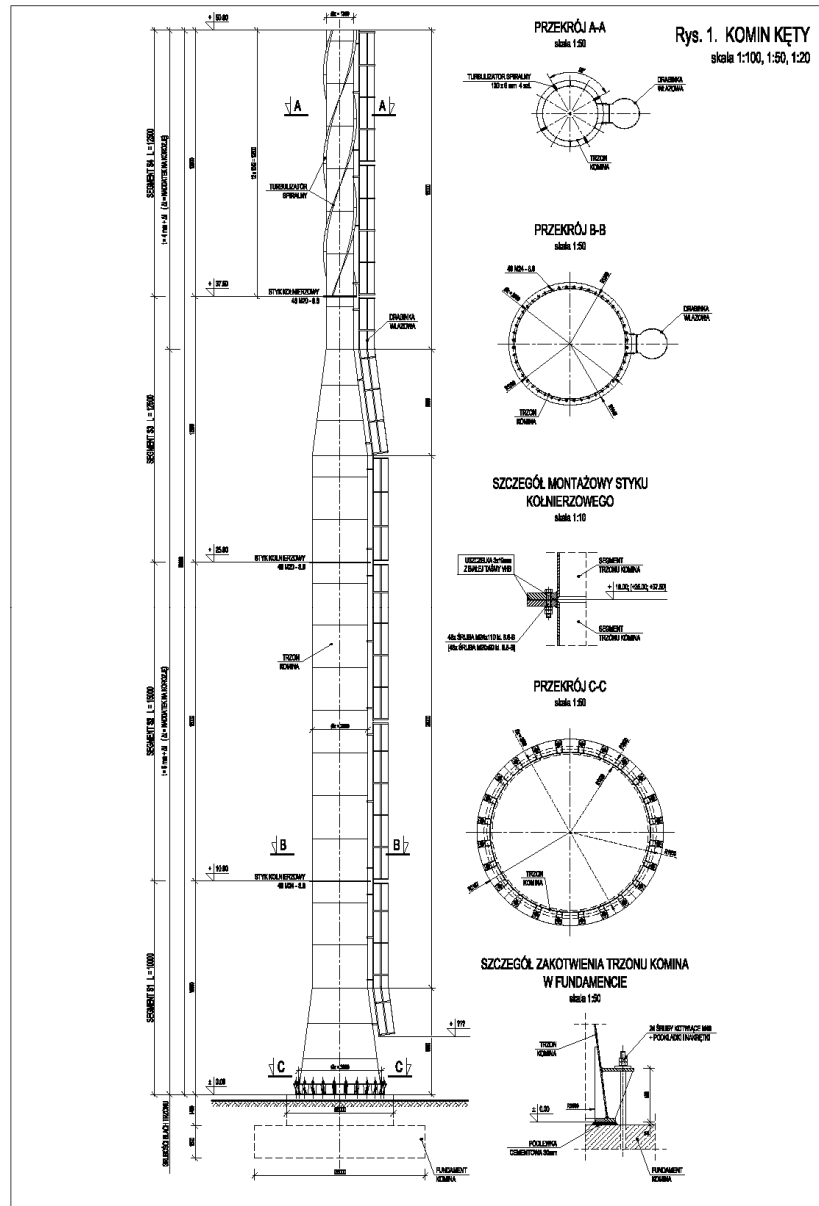
Lp.	Wymiary mm					Masa segmentu kg	Potrzebna ilość szt.
	D	r	b	t	h_t		
1	1000	1078	100	561	6000	2,21	36
2	1250	1141	125	597		2,93	
3	1400	1184	140	619		3,41	
4	1600	1504	160	787	8000	4,94	27
5	1800	1559	180	885	9000	6,26	24
6	2000	1890	200	914		7,18	

h_t – skok zwoju spirali



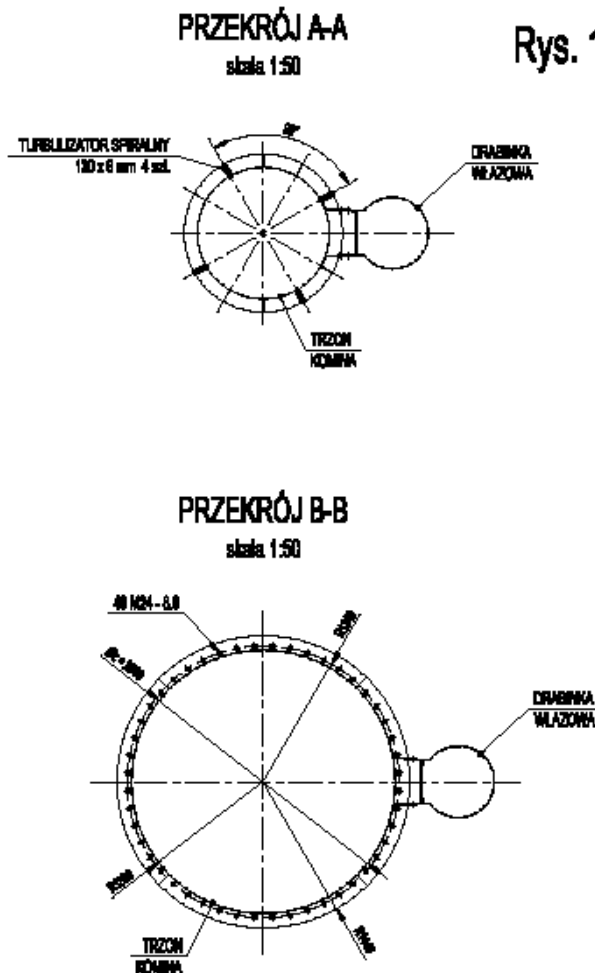
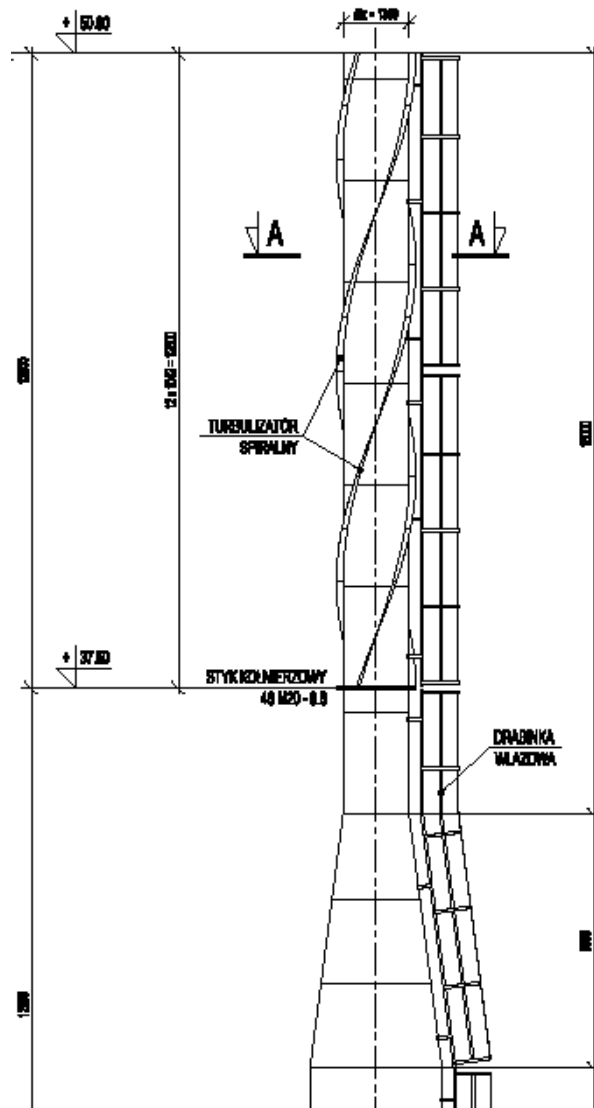
TURBULIZATOR SPIRALNY

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA



TURBULIZATOR SPIRALNY

PRZYKŁAD ZASTOSOWANIA





ANALIZOWANY KOMIN

H=36m; D=1.26m

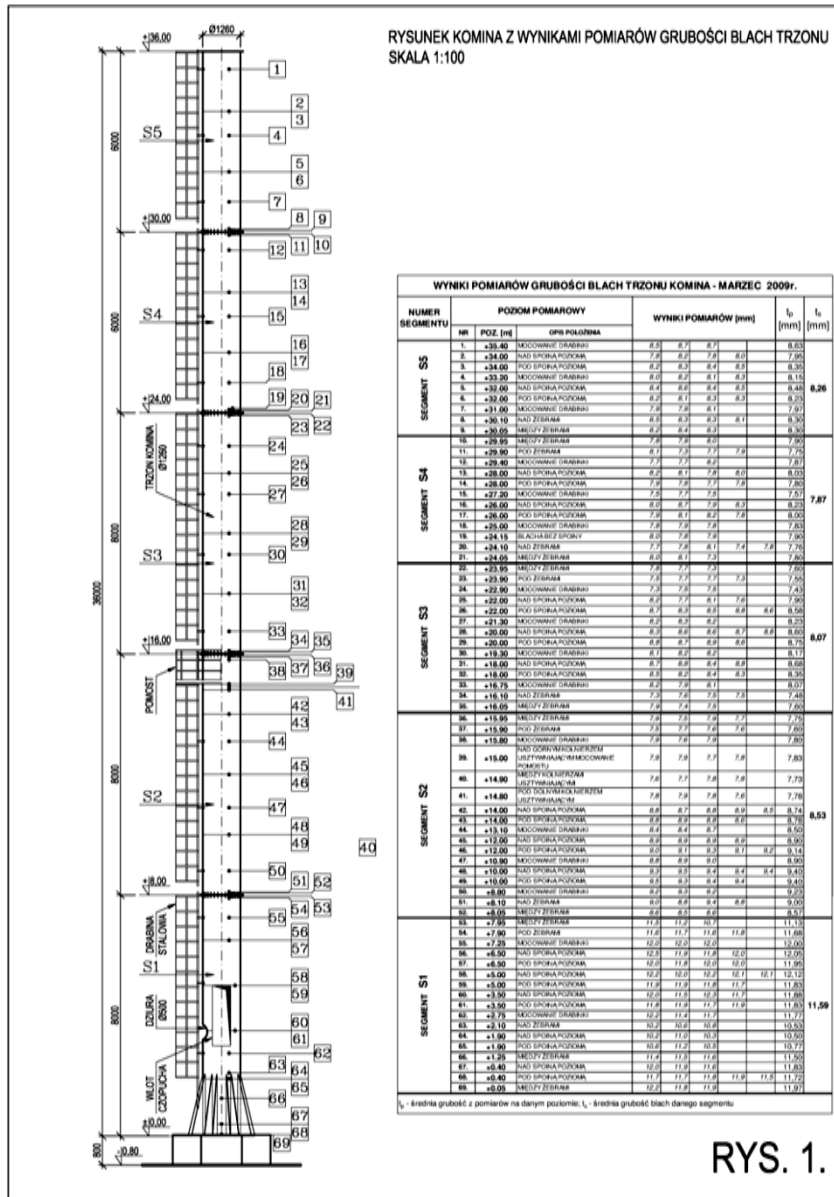
WIDOK

EKSPLOATACJA OD 1982 R.

PALIWO – DREWNO, TROCINY

ANALIZOWANY KOMIN

H=36m; D=1.26m
EKSPERTYZA 2009 r.



RYS. 1.

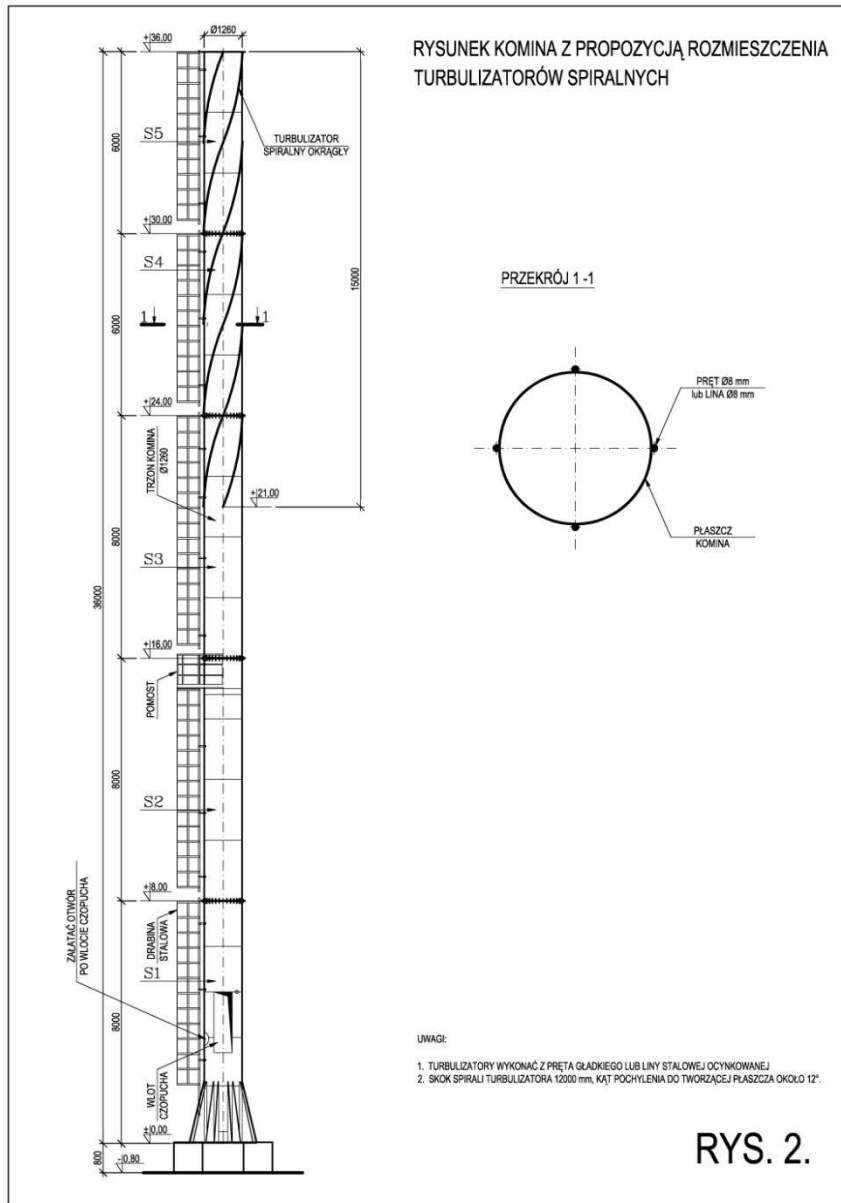
KOMIN

H=36m; D=1,26m

WYNIKI ANALIZ 2009r.

Tablica 1.

Lp.	Poziom	Wyniki pomiarów grubości		Wyniki obliczeń statyczno – wytrzymałościowych.	
		Grubość minimalna	Grubość średnia	Minimalna potrzebna grubość z warunku: stateczności miejscowej	zmęczenia w wybranych przekrojach
[-]	[m]	[mm]			
1.	+15.0	7.6	7.73	2.7	---
2.	+10.0	9.3	9.40	3.4	7.8¹
3.	+8.0	8.5	8.57	3.8	9.6^{2;4}/7.6³
4.	+2.0	10.2	10.50	6.0	10.8^{1;4}/9.6³
<p>)¹ $\Delta\sigma_c = 50$ MPa – kategoria zmęczeniowa karbu 4 wg PN-93/B-03201</p> <p>)² $\Delta\sigma_c = 45$ MPa – kategoria zmęczeniowa karbu 20 wg PN-93/B-03201</p> <p>)³ $\Delta\sigma_c = 56$ MPa – kategoria zmęczeniowa karbu 17 wg PN-93/B-03201</p> <p>)⁴ przekroczenie warunku nośności zmęczeniowej.</p>					



KOMIN

H=36m; D=1,26m

ZALECENIA EKSPERTYZY

MONTAŻ DO TRZONU
 (GÓRNY 15 m ODCINEK)
 TURBULIZATORÓW
 SPIRALNYCH Z PRĘTA
 ŚREDNICY $d = 8\text{mm}$



Pręty
 spiralne



KOMIN

H=36m; D=1,26m

ZALECENIA EKSPERTYZY

MONTAŻ DO TRZONU
(GÓRNY 15 m ODCINEK)
TURBULIZATORÓW
SPIRALNYCH Z PRĘTA
ŚREDNICY $d = 8\text{mm}$



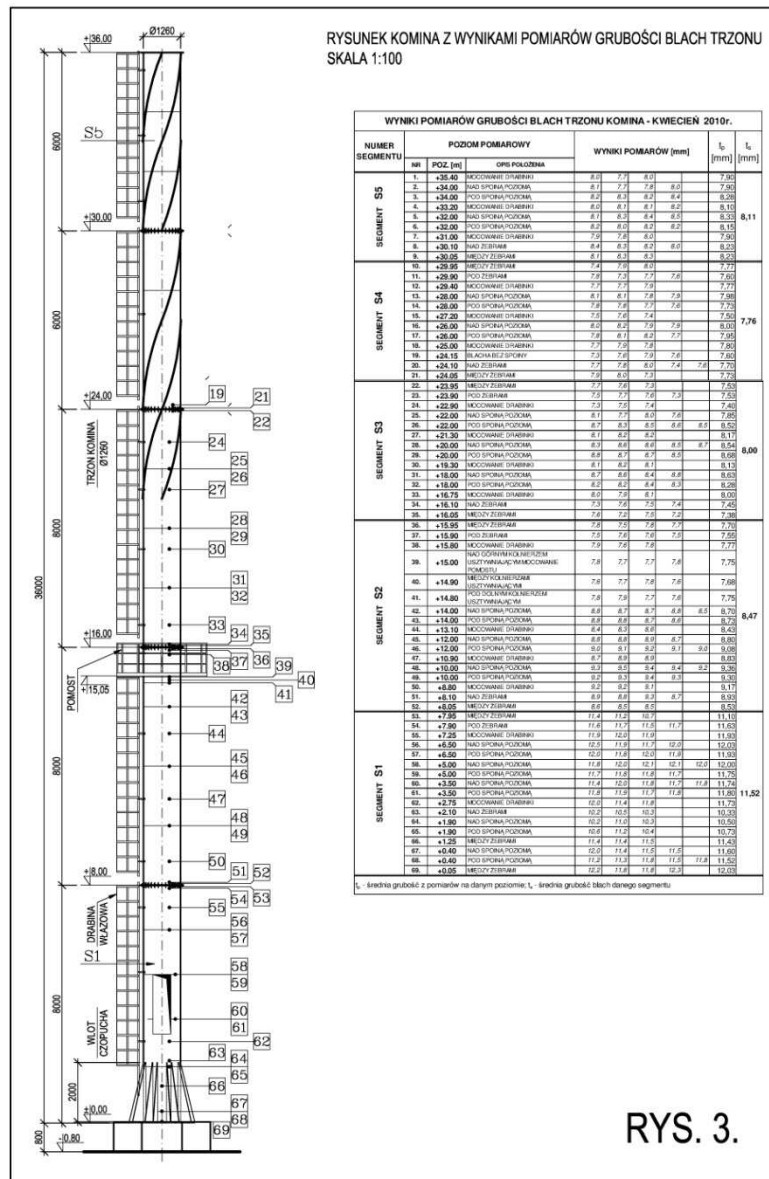
Pręty
spiralne

KOMIN

H=36m; D=1,26m

EKSPERTYZA 2010 r.

1. WYNIKI POMIARÓW GRUBOŚCI
2. MAŁA INTENSYWNOŚĆ KOROZJI
3. NAWROTY DRGAŃ KOMINA!



RYS. 3.

KOMIN

H=36m; D=1,26m

**WYNIKI POMIARÓW
 GRUBOŚCI**

Tablica 1.

Segment	Grubości średnie z III.2009 r.	Grubości średnie z IV.2010 r.	Ubytki korozyjne	Intensywność korozji
[-]	mm			[mm/rok]
S5	8,26	8,11	0,15	0,14
S4	7,87	7,76	0,11	0,10
S3	8,07	8,00	0,07	0,06
S2	8,53	8,47	0,06	0,06
S1	11,59	11,52	0,07	0,06

Tablica 2.

Lp.	Poziom	Wyniki pomiarów grubości		Wyniki obliczeń statyczno – wytrzymałościowych. Minimalna potrzebna grubość z warunku:	
		Grubość minimalna	Grubość średnia	stateczności miejscowej	zmęczenia w wybranych przekrojach
[-]	[m]	[mm]			
1.	+14.9	7.6	7.68	3.9	3,8 ($\Delta\sigma_c = 80 \text{ MPa}$) ¹
2.	+10.0	9.2	9.30	4.9	8.0 ($\Delta\sigma_c = 50 \text{ MPa}$) ¹
3.	+8.0	8.5	8.53	5.4	9.3 ($\Delta\sigma_c = 45 \text{ MPa}$) ^{1,2}
4.	+3.5	11,4	11.74	6.7	10.2 ($\Delta\sigma_c = 50 \text{ MPa}$) ¹
5.	+2.75	11.4	11.73	6.9	9.2 ($\Delta\sigma_c = 56 \text{ MPa}$) ¹
6.	+2.0	10.2	10.33	7.1	9.4 ($\Delta\sigma_c = 56 \text{ MPa}$) ¹ 10,6 ($\Delta\sigma_c = 50 \text{ MPa}$) ^{1,2}

)¹ w nawiasach podano kategorię zmęczeniową karbu według PN-93/B-03201

)² **przekroczenie warunku nośności zmęczeniowej, obciążenie procedura uproszczona**

KOMIN

H=36m; D=1,26m

WYNIKI ANALIZ



KOMIN

H=36m; D=1,26m

JAKIE WZMOCNIENIE?



KOMIN

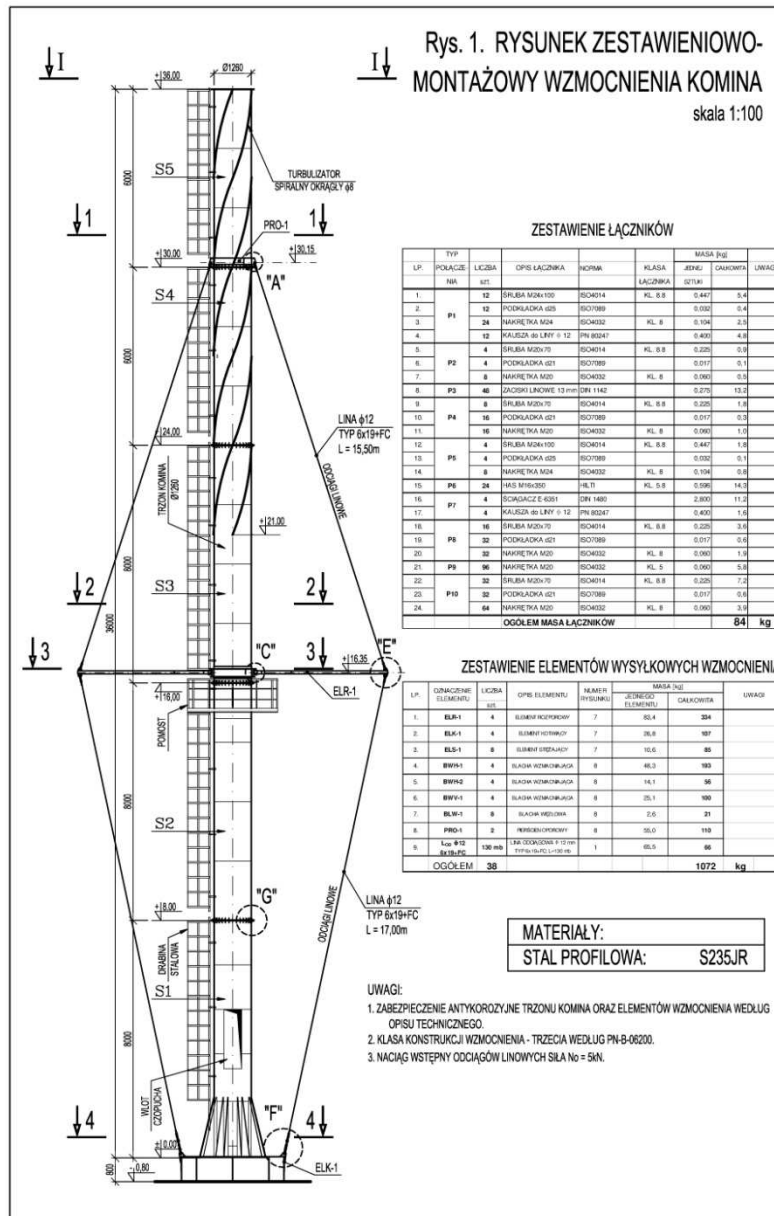
H=36m; D=1,26m

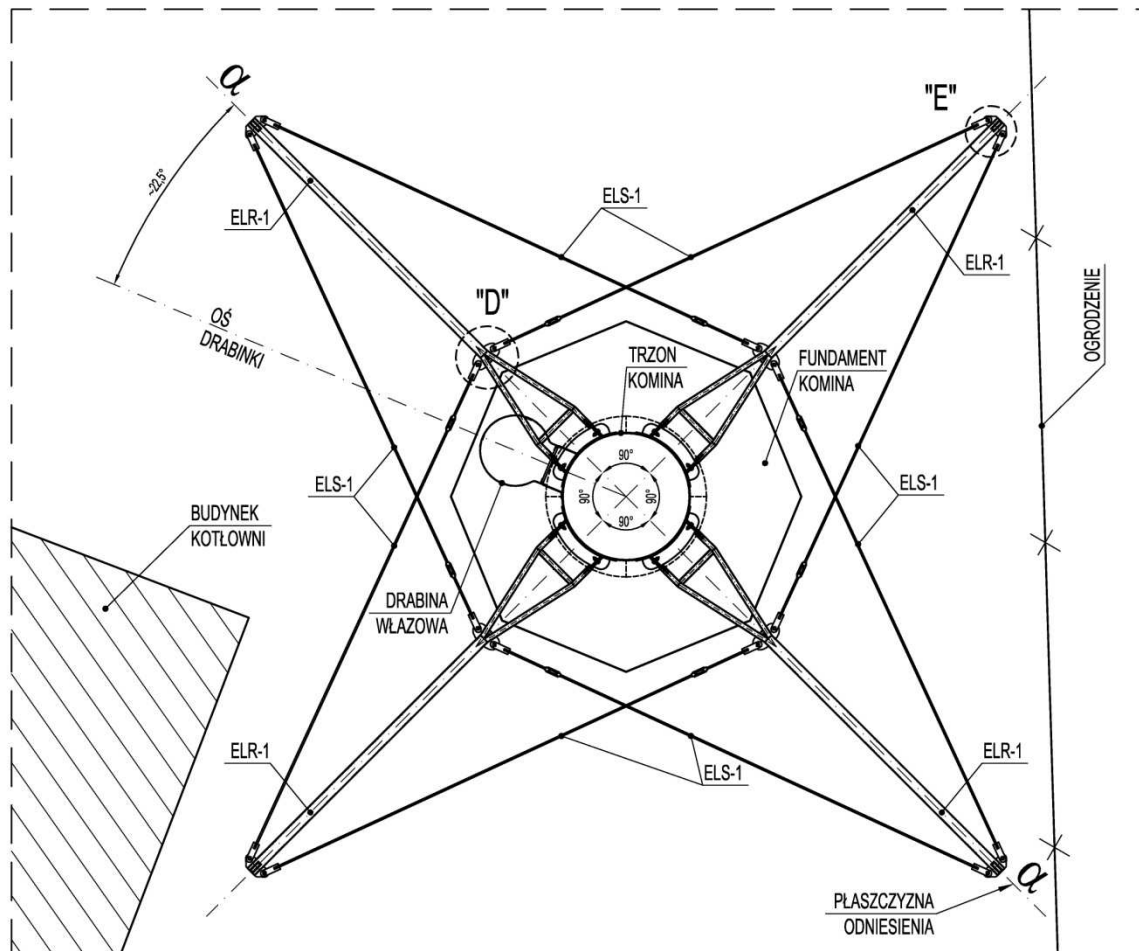
JAKIE WZMOCNIENIE?

KOMIN

H=36m; D=1,26m

PROJEKT REMONTU I WZMOCNIENIA





KOMIN

H=36m; D=1,26m

PROJEKT REMONTU I WZMOCNIENIA



KOMIN

H=36m; D=1,26m

**REMONT
I WZMOCNIENIE**



KOMIN

H=36m; D=1,26m

REMONT
I WZMOCNIENIE



KOMIN

H=36m; D=1,26m

REMONT
I WZMOCNIENIE



KOMIN

H=36m; D=1,26m

REMONT
I WZMOCNIENIE



KOMIN

H=36m; D=1,26m

REMONT
I WZMOCNIENIE

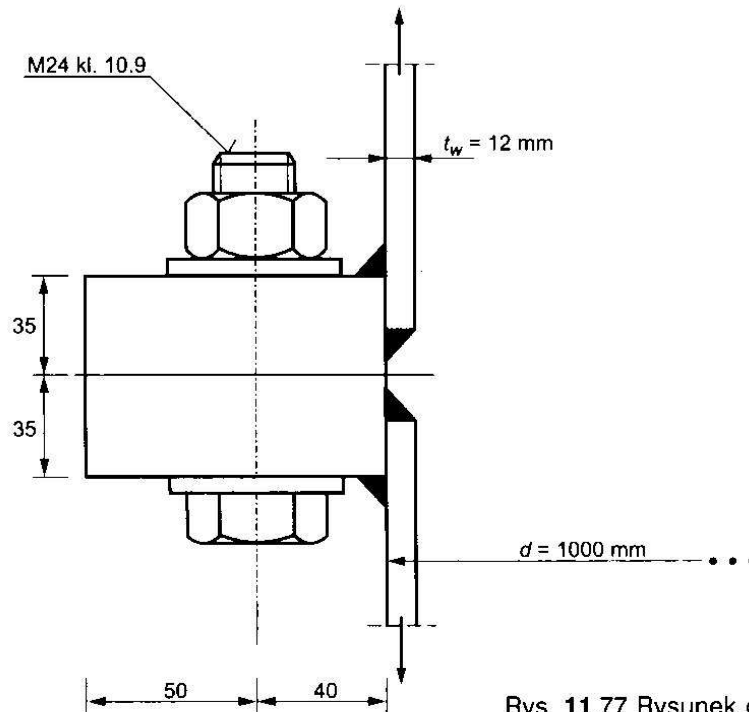
OBLICZANA WIELKOŚĆ	WG PN		EG EC SPOSÓB 1	WG EC SPOSÓB 2
	Met. przybliżona	Met. dokładna		
y_{MAX} [m]	0,077		0,131	0,736
$y_{max} < y_{gr} = 0.1b = 0,126m$	OK		NG!	NG!
OBCIĄŻENIE	$p_{\gamma} = 0,87$ kN/m $L = 0,25H = 9,0m$	$p_{\gamma} = 1,27$ kN/m $L = 0,25H = 9,0m$	$F_{max} = 1.32$ kN/1m	$F_{max} = 7,4$ kN/1m
MOMENT ZGINAJ.	$M = 230$ kNm	$M = 335$ kNm	$M = 425$ kNm	$M = 2385$ kNm!!!
t_{MIN} ($\Delta\sigma_C = 50$ MPa) T=15 lat	10,6	15,8	25,7	142???
	14,2*	20,4*		
t_{MIN} ($\Delta\sigma_C = 56$ MPa) T=15 lat	9,4	14,1	23,0	127???
	12,6*	18,2*		
t_{MIN} ($\Delta\sigma_C = 71$ MPa) T=15 lat	7,4	11,0	18,1	100???
	10,0*	14,4*		
t_{MIN} ($\Delta\sigma_C = 80$ MPa) T=15 lat	6,6	9,7	16,1	89???
	8,8*	12,8*		
)* - OBLICZENIA WYTRZYMAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ WG EUROKODÓW				

KOMIN
H=36m; D=1,26m
PORÓWNANIE
WYNIKÓW ANALIZ
WG PN I EC
WZBUDZENIE WIROWE
I ZMĘCZENIE

Przekrój na poz. +2,0 m
 Liczba cykli obciążenia:

Wg PN: $N = 12 \times 10^6$
 Wg EC: $N = 66 \times 10^6$???

Sprawdzić nośność ze względu na zmęczenie sprężonego połączenia kołnierzego komina wykonanego ze stali S235JR (rys. 11.77). Grubość ścianki trzonu komina 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 dr inż. Lucjana ŚLĘCZKĘ

Trzon komina.

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

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

- ✓ Przyjęcie małych wartości chropowatości k prowadzi do zaniżenia oporu aerodynamicznego w porównaniu do wymagań dotychczasowych norm. Wykazano, że dopiero przyjęcie $k = 1,0 \text{ mm}$ (beton surowy) prowadzi do wartości C_f porównywalnej z wartością C_x z normy PN-B-03201.
- ✓ W normie PN-EN 1991-1-4 nie podano sposobu określania współczynnika oporu aerodynamicznego drabiny włazowej, natomiast wyjaśniono, że siły wywierane przez wiatr na poszczególne elementy konstrukcyjne należy dodawać wektorowo.
- ✓ Obciążenie wzbudzeniem wirowym (dynamiczne) obliczone drugim sposobem jest od 3,5 do 5,5 razy większe od obciążenie obliczonego pierwszym sposobem.
- ✓ Eurokod nie uwzględnia tłumienia konstrukcyjnego np. od połączeń kolnierzowych. Wątpliwości budzi liczba cykli obciążenia obliczona wg EC w relacji do wartości otrzymanych wg PN oraz uzależnienie wartości amplitudy granicznej y_{gr} , tylko od średnicy przewodu kominowego.
- ✓ Grubość powłoki przewodu kominowego określona według normy PN-EN 1993-1-6 jest nieco większa, niż otrzymana z obliczeń według PN-B-03201 (przy tym samych wartościach sił wewnętrznych).

Podsumowanie Uwagi szczegółowe

- ✓ Projektowanie konstrukcji stalowych z uwzględnieniem wymagań Eurokodów jest procesem trudniejszym i bardziej złożonym niż projektowanie według dotychczasowych norm polskich, o czym mogą świadczyć także zagadnienia przedstawione na dzisiejszym seminarium.
- ✓ Generalnie wartość statycznego obciążenia wiatrem kominów stalowych określana wg EC jest mniejsza od obciążenia wg PN.
- ✓ Wymiarowanie powłoki trzonu komina stalowego z uwzględnieniem stateczności miejscowej według PN i EC daje porównywalne rezultaty.
- ✓ **Obciążenie wynikające ze wzbudzenia wirowego według PN jest znacząco mniejsze od obciążenia wyznaczonego wg EC.**
- ✓ Brak spójnych i realnych procedur normowych w Załącznikach Krajowych utrudnia proces projektowania, ale też prowadzi do konieczności przyjmowania rozwiązań nieuzasadnionych konstrukcyjnie i często ekonomicznie.

Podsumowanie

Uwagi ogólne

- ✓ Przykładem może być, np. problem uwzględnienia efektów wzbudzania wirowego według PN-EN 1991-1-4 i PN-EN 1993-3-2 w odniesieniu do kominów stalowych, zwłaszcza o liczbie Scrutona $S_c < 8$. Zachowanie warunku normowego $y_{F,max} \leq y_{gr}$ w projektowaniu jednopowłokowych kominów stalowych, najczęściej stosowanych w Polsce, jest bardzo trudne, zwłaszcza uwzględniając postanowienie Załącznika Krajowego NA.17 normy PN-EN 1991-1-4 narzucające drugi sposób obliczania wartości $y_{F,max}$. Gdyby taką procedurę zastosować do sprawdzenia istniejących stalowych kominów wolno stojących, to większość z nich (o liczbie Scrutona $S_c < 8$) nie spełniałaby ww. warunku.
- ✓ W przypadku podtrzymania ww. zaleceń konieczne będzie projektowanie kominów stalowych wolnostojących tylko z turbulizatorami aerodynamicznymi lub mechanicznymi tłumikami drgań.

Podsumowanie

Uwagi ogólne

Zwiększanie żywotności zmęczeniowej konstrukcji może się odbywać już podczas jej projektowania i wytwarzania, jak też w trakcie eksploatacji po zaistnieniu pęknięcia, przy czym ilościowe ujęcie przedłużonej żywotności nie jest możliwe w sposób obligatoryjny.

Podczas projektowania konstrukcji, które będą narażone na wpływy zmęczeniowe, należy zwrócić szczególną uwagę na kształtowanie węzłów i połączeń, szczególnie spawanych. Chodzi o to, aby jak najbardziej łagodzić ostrości korbów 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),
- nagłej zmiany przekroju poprzecznego (a więc element grubszy lub szerszy powinien mieć skosy o nachyleniu nie większym niż 1:4, jak to zalecają odpowiednie normy),
- 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.

Podsumowanie

**Wybrane sposoby
zwiększania żywotności
zmęczeniowej elementów
konstrukcji stalowych**

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**