

EUROKODY

praktyczne komentarze

Niniejszy skrypt to kolejne opracowanie w cyklu publikacji na temat podstaw projektowania konstrukcji budowlanych według aktualnie obowiązujących norm opartych na EUROKODACH. Każdy skrypt to teoria przedstawiona w przystępny sposób oraz przykłady, które prowadzą krok po kroku przez proces wymiarowania.

Skrypt 3

Projektowanie konstrukcji stalowych	E02
Wstęp	E02
Zasady ogólne	E02
Stal konstrukcyjna	E02
Wymiarowanie przekrojów	E03
Efektywne cechy przekrojów klasy 4	E04
Wymiarowanie elementów	E07
Stan graniczny używalności	E12
Projektowanie połączeń	E12
Przykład obliczeniowy	E14
Podsumowanie	E18

Część 3. Eurokod 3

Projektowanie konstrukcji stalowych

Wstęp

Poniższy artykuł jest kontynuacją serii Eurokody – praktyczne komentarze, zamieszczanej na błękitnych stronach ArCADii-PRESS. Tekst ten ma przybliżyć Państwu zagadnienia omawiane w dwóch podstawowych częściach całego pakietu norm europejskich PN-EN 1993 Eurokod 3 (część 1-1: Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków, część 1-5: Blachownice) dotyczącego projektowania konstrukcji stalowych. Zastosowana metodologia oraz nowe oznaczenia powodują, że wskazane normy są znacznie bardziej rozbudowane objętościowo i merytorycznie w stosunku do normy PN-90/B-03200. Procedury obliczeniowe wymiarowania konstrukcji stalowych stają się coraz bardziej szczegółowe, przez co wszelkie programy komputerowe ułatwiające pracę projektanta stają się bardziej przydatne. Podobnie jak w poprzednich numerach, tak i tu należy podkreślić konieczność korzystania z nowych norm w sposób kompleksowy, zaczynając od obciążeń, poprzez projektowanie i kształtowanie konstrukcji stalowych.

Zasady ogólne

W postanowieniach ogólnych normy przedstawiono podstawowe symbole i terminy stosowane przy wyznaczaniu nośności i stateczności elementów stalowych. Należy tu zwrócić uwagę, że zmianie uległo oznaczenie osi przekroju poprzecznego i tak oś y-y jest osią największej bezwładności, oś z-z osią najmniejszej bezwładności, natomiast oś x-x osią podłużną elementu. Podstawowe zasady kształtowania konstrukcji w sposób znaczący nie odbiegają od zasad przyjętych w starej normie, jednak w chwili obecnej projektant zobligowany jest do sprawdzenia warunków nośności zarówno na poziomie nośności przekroju, jak i później stateczności elementu.

Stal konstrukcyjna

Norma PN-EN 1993-1-1 daje projektantowi większy wybór gatunków stali konstrukcyjnych niż w dotychczasowej normie PN-90/B-03200. Jednak

postęp w dziedzinie wytwarzania stali według europejskich norm hutniczych powoduje, że nie ma bezpośredniego przejścia z dawnych oznaczeń gatunków stali na nowe. Pod względem wytrzymałościowym odpowiednikami dla dwóch najbardziej rozpowszechnionych gatunków stali St3S oraz 18G2 są odpowiednio S235 oraz S355, jednak pod względem jakości tych stali różnice mogą być znaczące. W Tablicy 1 zestawiono zalecane wartości podstawowych cech wytrzymałościowych najbardziej popularnych gatunków stali. Widać zatem, że główny znak stali (np. S235) składa się z symbolu wskazującego na rodzaj stali (S – stal konstrukcyjna) oraz liczby będącej minimalną granicą plastyczności w MPa.

W celu określenia nośności przekroju bądź elementu korzysta się z wartości granicy plastyczności stali f_y lub wytrzymałości stali na rozciąganie f_u , którą, w zależności od analizowanego stanu wyężenia elementu, dzieli się przez odpowiedni współczynnik materiałowy γ_{M1} . Jest to kolejna znacząca różnica w procedurze określania nośności konstrukcji, gdzie dotychczasowa norma PN-90/B-03200 wykorzystywała wytrzymałość obliczeniową stali f_d , wyznaczoną ze wzoru:

$$f_d = \frac{f_y}{\gamma_s} \quad (1)$$

gdzie:

f_y – granica plastyczności stali,

γ_s – materiałowy współczynnik bezpieczeństwa.

W Tablicy 1. podano omówione powyżej wartości dla najczęściej wykorzystywanych gatunków stali (norma hutnicza EN 10025-2 – oznacza stal konstrukcyjną niestopową, EN 10025-5 – stal konstrukcyjną trudnordzewiejącą, EN 10210-1 – kształtowniki zamknięte wykonane na gorąco ze stali konstrukcyjnej).

Zmianie uległy również wartości modułu sprężystości podłużnej stali $E = 210\,000\text{ N/mm}^2$ oraz modułu sprężystości poprzecznej $G = 81\,000\text{ N/mm}^2$ (odpowiednio $E = 205\,000\text{ N/mm}^2$ i $G = 80\,000\text{ N/mm}^2$ wg PN-90/B-03200).

Tablica 1. Nominalne wartości granicy plastyczności f_y i wytrzymałości na rozciąganie f_u dla stali konstrukcyjnej walcowanej na gorąco (fragment tablicy 3.1 normy PN-EN 1993-1-1)				
Norma i gatunek stali	Normalna grubość elementu t [mm]			
	$t \leq 40$ mm		40 mm < $t \leq 80$ mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH\NLH	275	390	255	370
S 355 NH\NLH	355	490	335	470
S 420 NH\NLH	420	540	390	520
S 460 NH\NLH	460	560	430	550

Wymiarowanie przekrojów

Klasyfikacja przekrojów

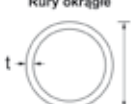
Podstawowymi kryteriami klasyfikacji stalowych przekrojów poprzecznych są: smukłość poszczególnych części, warunki podparcia ścianek (pólek, środników) oraz gatunek stali (Tablica 2). Podobnie jak to miało miejsce w starej normie, tak i w PN-EN 1993-1-1 przekroje zostały podzielone na cztery klasy. Jeżeli przekrój zaliczony zostanie do klasy 1., 2. bądź 3. oznacza to, że ściskane ścianki nie ulegają lokalnej utracie stateczności. Natomiast w przypadku przekrojów klasy 4 lokalna utrata stateczności ściskanych części redukuje całkowitą nośność sprężystą przekroju.

Klasa przekroju decyduje w dalszej kolejności o przyjętym modelu obliczeniowym oraz kryterium nośności przekroju. W przypadku przekrojów klasy 1. i 2. analizę ich wytrzymałości prowadzi się w stanie plastycznym, klasy 3. w stanie sprężystym, natomiast klasy 4. w stanie nadkrytycznym.

Klasyfikacja przekrojów wg PN-EN 1993-1-1 zawiera również złożony stan obciążenia ścianek (część zginana i ściskana – ostatnia kolumna Tablicy 2.), co jest nowością w stosunku do zapisów normy PN-90/B-03200, gdzie, mimo interakcyjnego działania sił wewnętrznych, ścianki klasyfikowane były oddzielnie jako ściskane, a następnie jako zginane.

Tablica 2. Maksymalne stosunki szerokości do grubości części ściskanych przekroju (tablica 5.2 normy PN-EN 1993-1-1)						
Wewnętrzne części ściskane						
Klasa	Część zginana	Część ściskana	Część zginana i ściskana			
1						
			gdy $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha-1}$ gdy $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2			gdy $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha-1}$ gdy $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
3						
			gdy $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67+0,33\psi}$ gdy $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\epsilon(1-\psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
Wspornikowe części pasów						
Kształtowniki walcowane		Kształtowniki spawane				
Klasa	Część ściskana	Część zginana i ściskana				
		Brzeg ściskany		Brzeg rozciągany		
1						
		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
2						
	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$		$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$		
3						
		$c/t \leq 14\epsilon$		$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{90}}$ k_{90} - patrz EN 1993-1-5		
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

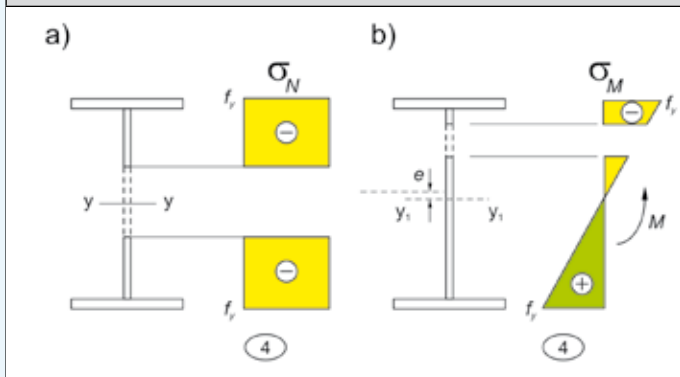
Tablica 2. cd.

Kątowniki  (patrz także arkusz 2) z wyjątkiem sytuacji, gdy ramiona kątownika mają zapewniony ciągły kontakt z innym elementem						
Klasa	Przekrój ściskany					
Rozkład naprężeń w przekroju (ściskanie- dodatnie)						
3	$h/t \leq 15$; $\frac{b+h}{2t} \leq 11,5$					
Rury okrągłe 						
Klasa	Przekrój zginany i/lub ściskany					
1	$d/t \leq 50$					
2	$d/t \leq 70$					
3	$d/t \leq 90$					
UWAGA Gdy $d/t < 90$ patrz EN 1993-1-6.						
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71
	ϵ^2	1,00	0,85	0,66	0,58	0,51

Efektywne cechy przekrojów klasy 4

W przypadku przekrojów klasy 4 redukcję nośności wskutek miejscowej utraty stateczności ściskanych ścianek przekroju można uwzględniać przyjmując do obliczeń cechy geometryczne przekroju współpracującego. Efektywne szerokości współpracujące płaskich części ściskanych wyznacza się na podstawie normy PN-EN 1993-1-5. Dla zredukowanego przekroju oblicza się odpowiednie cechy geometryczne – efektywne pole przekroju A_{eff} oraz efektywny wskaźnik wytrzymałości W_{eff} .

Rys. 1. Przekroje współpracujące: a) ściskanie osiowe, b) zginanie



Bez względu na stan obciążenia (prosty czy złożony) pole A_{eff} ustala się jak przy równomiernym ściskaniu, a wskaźnik W_{eff} – jak przy czystym zginaniu (rys. 1). Zatem efektywne pole przekroju pojedynczej ściskanej ścianki jest określone wzorem:

$$A_{c,eff} = b_{eff}t = \bar{\rho}bt \quad (2)$$

gdzie:

ρ – współczynnik redukcyjny uwzględniający niesta-
teczność ścianki,
 $\bar{b}$ – szerokość ściskanej ścianki,
 t – grubość ściskanej ścianki.

Wartość współczynnika ρ określa się w zależności od schematu statycznego rozpatrywanej ścianki (ścianka przęsłowa lub wspornikowa), kształtu rozkładu naprężeń, względnej smukłości płytowej $\bar{\lambda}_p$ oraz granicy plastyczności f_y . Niezbędne wzory i dane potrzebne do ustalenia powyższych wielkości podane zostały w tablicach 4.1 i 4.2 normy PN-EN 1993-1-5.

Należy również pamiętać, że jeśli środek ciężkości przekroju współpracującego (ustalonego przy założeniu równomiernego ściskania) jest przesunięty względem położenia pierwotnego o wielkość e_N , to w obliczeniach uwzględnia się dodatkowy moment od tego mimośrodru o wartości $\Delta M_{Ed} = N_{Ed}e_N$.

Nośność przekroju przy rozciąganiu

Warunek nośności przekroju rozciąganego przy obciążeniu siłą podłużną ma postać:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (3)$$

Obliczeniowa nośność przekroju przy rozciąganiu jest zdefiniowana następująco:

– w przypadku przekrojów brutto A – jako obliczeniowa nośność plastyczna:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (4)$$

– w przypadku przekrojów osłabionych otworami na łączniki A_{net} – jako obliczeniowa nośność graniczna:

$$N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

- w przypadku kształtowników łączonych jednym ramieniem, podobnie jak w przypadku innych kształtowników łączonych niesymetrycznie przy pomocy łączników mechanicznych (jedna śruba - wzór (6), więcej śrub - wzór (7)) - jako obliczeniowa nośność graniczna:

$$N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = \frac{2,0(e_2 - 0,5d_0) t f_y}{\gamma_{M2}} \quad (6)$$

$$N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = \frac{\beta_i A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

gdzie:

- f_y, f_u - granica plastyczności i wytrzymałość na rozciąganie stali,
- e_2 - odległość osi otworu od krawędzi bocznej,
- d_0 - średnica otworu,
- β_i - współczynnik redukcyjny zależny od rozstawu śrub wg PN-EN 1993-1-8, $\gamma_{Mi} = 1,00$; $\gamma_{Mi} = 1,25$

Przepisy pozwalające na określenie obliczeniowej nośności granicznej kątowników łączonych jednym ramieniem przy pomocy spoin zawarte są w pkt. 4.13 normy PN-EN 1993-1-8.

- w przypadku kątowników nierównomiernych łączonych szerszym ramieniem w obliczeniach przyjmuje się pole powierzchni przekroju brutto:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (8)$$

- w przypadku kątowników nierównoramiennych łączonych węższym ramieniem w obliczeniach przyjmuje się pole powierzchni przekroju brutto zastępczego kątownika równoramiennego o szerokości obu ramion równej szerokości ramienia węższego:

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (9)$$

gdzie

$$A_{eff} = A \frac{2b}{h+b} \quad (10)$$

Nośność przekroju przy ściskaniu

Warunek nośności przekroju osiowo ściskanego przy obciążeniu siłą podłużną ma postać:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (11)$$

Obliczeniową nośność przekroju ściskanego oblicza się następująco:

- w przypadku przekrojów klasy 1., 2., 3. - jako nośność plastyczna:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (12)$$

- w przypadku przekrojów klasy 4. - jako nośność nadkrytyczna:

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (13)$$

Nośność przekrojów klasy 4 z przesuniętym środkiem ciężkości przekroju współpracującego sprawdza się z uwzględnieniem dodatkowego zginania. Sytuacja taka będzie miała miejsce w przypadku ściskania przekroju niesymetrycznego.

Nośność przekroju przy zginaniu

Warunek nośności przekroju przy obciążeniu momentem zginającym ma postać:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (14)$$

Obliczeniową nośność przekroju zginanego $M_{c,Rd}$ oblicza się następująco:

- w przypadku przekrojów klasy 1., 2. - jako nośność plastyczna:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (15)$$

- w przypadku przekrojów klasy 3. - jako nośność sprężysta:

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (16)$$

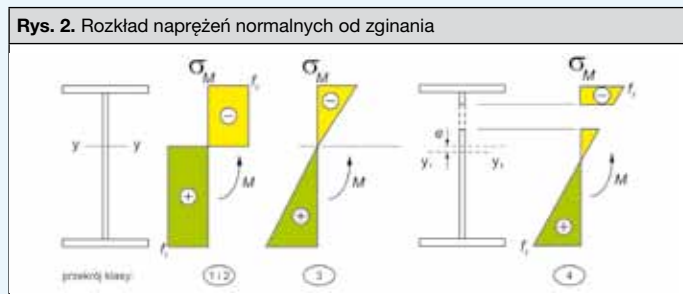
- w przypadku przekrojów klasy 4. - jako nośność nadkrytyczną:

$$M_{c,Rd} = M_{eff,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (17)$$

gdzie:

- W_{pl} - plastyczny wskaźnik zginania przekroju,
- $W_{el,min}$ - najmniejszy sprężysty wskaźnik zginania przekroju,
- $W_{eff,min}$ - najmniejszy wskaźnik zginania przekroju współpracującego.

Przyjęte rozkłady naprężeń normalnych od zginania w przypadku poszczególnych klas przekroju pokazano na rysunku 2.



Należy zwrócić uwagę, że nośność przekroju klasy 1. na zginanie otrzymana według PN-EN 1993-1-1 jest większa niż analogiczna nośność wyznaczona zgodnie z normą PN-90/B-03200. Wynika to z faktu przyjęcia ich pełnego uplastycznienia w stanie granicznym (W_{pl}), podczas gdy dawne przepisy przyjmowały sprężysto-plastyczny rozkład naprężeń (częściowe uplastycznienie przekroju - α_{pl}).

Przy braku odpowiednich danych katalogowych do wyznaczania wskaźnika plastycznego można w uproszczeniu stosować poniższe współczynniki rezerwy plastycznej:

- w przypadku dwuteowników równoległościennych i normalnych:

$$\frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = 1,14, \quad \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = 1,50, \quad (18)$$

- w przypadku dwuteowników szerokostopowych:

$$\frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = 1,10, \quad \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = 1,50. \quad (19)$$

Nośność przekroju przy ścinaniu

Warunek nośności przekroju obciążonego siłą poprzeczną V_{Ed} ma postać:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (20)$$

Obliczeniową nośność przekroju przy ścinaniu $V_{c,Rd}$ oblicza się następująco:

- w przypadku przekrojów o średnicach niewrażliwych na miejscową utratę stateczności przy ścinaniu, tj.

$$\frac{h_w}{t} \leq 72 \frac{\epsilon}{\eta} :$$

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} \quad (21)$$

- w przypadku przekrojów o średnicach wrażliwych na miejscową utratę stateczności przy ścinaniu, tj.

$$\frac{h_w}{t} \leq 72 \frac{\epsilon}{\eta} :$$

$$V_{c,Rd} = V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w h_w t f_{yw}}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} \quad (22)$$

gdzie:

A_v - pole przekroju czynnego przy ścinaniu wg 6.2.6.(3) PN-EN 1993-1-1,

χ_w - współczynnik niestateczności przy ścinaniu średniczków wg 5.2 PN-EN 1993-1-5.

W przypadku zastosowania żeber poprzecznych w przekrojach podporowych współczynnik niestateczności przy ścinaniu określany jest na podstawie wartości względnej smukłości płytowej przy ścinaniu. Jej wartość wyznacza się w zależności, czy zastosowano poprzeczne żebra pośrednie, czy nie:

- w przypadku gdy żebra poprzeczne występują tylko na podporach:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{86,4 t \epsilon} \quad (23)$$

- w przypadku gdy oprócz żeber podporowych występują również żebra pośrednie:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4t\epsilon\sqrt{k_\tau}} \quad (24)$$

Procedurę wyznaczania minimalnego parametru niestateczności panelu środknika przy ścinaniu k_τ podano w załączniku A.3 normy PN-EN 1993-1-5.

Podane powyżej nośności obliczeniowe zachowują miarodajność przy braku znaczących naprężeń ścinających od skręcania.

Interakcyjna nośność przekroju

W przypadku wystąpienia złożonych stanów obciążenia przekroju (jednocześnie występują siły wewnętrzne N_{Ed} , M_{Ed} , V_{Ed}) należy sprawdzić nośność interakcyjną przekroju.

Podobnie jak w starej normie, tak i w Eurokoderze 3 należy brać pod uwagę wpływ ścinania V_{Ed} na nośność przekroju przy zginaniu. Interakcję tę można pominąć, jeśli element nie jest narażony na miejscową utratę stateczności przy ścinaniu, a obliczeniowa siła poprzeczna nie przekracza 50% nośności plastycznej przekroju przy ścinaniu. W przeciwnym razie, gdy $V_{Ed} > 0,5 V_{c,Rd}$, przyjmuje się odpowiednio zredukowaną nośność obliczeniową $M_{V,Rd} > M_{c,Rd}$, wyznaczoną przy założeniu, że w części przekroju czynnej przy ścinaniu A_v występuje zredukowana granica plastyczności określona wzorem:

$$(1-\rho)f_y \quad (25)$$

gdzie:

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad (26)$$

W przypadku dwuteowników zginanych w płaszczyźnie środknika można wyprowadzić następującą zależność:

$$M_{V,y,Rd} = M_{c,y,Rd} - \rho M_{w,y,Rd} \quad (27)$$

gdzie:

$M_{w,y,Rd}$ – nośność przekroju środknika na zginanie.

Należy również brać pod uwagę wpływ siły podłużnej N_{Ed} na nośność przekroju przy zginaniu. Odpo-

wiednie warunki nośności przyjmuje się stosownie do klasy przekroju w złożonym stanie obciążenia (ostatnia kolumna Tablicy 2.).

W przypadku przekrojów klasy 1. i 2. jednokierunkowo zginanych interakcyjny warunek nośności przekroju ma postać:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{N,Rd}} \leq 1,0 \quad (28)$$

Zredukowaną wartość nośności przekroju przy zginaniu z siłą podłużną w przypadku bisymetrycznych dwuteowników walcowanych i spawanych kształtowników rurowych prostokątnych oraz bisymetrycznych elementów skrzynkowych określa się wg 6.2.9.1.(5) PN-EN 1993-1-1. Redukcję tę w przypadku przekrojów dwuteowych można pominąć, jeśli przy zginaniu względem osi z-z obliczeniowa siła podłużna N_{Ed} nie przekracza 25% plastycznej nośności przekroju przy ściskaniu $N_{pl,Rd}$ lub 50% analogicznej nośności samego środknika.

Przy zginaniu dwukierunkowym wpływ siły podłużnej na nośność plastyczną uwzględnia się za pomocą nieliniowej (wypukłej) formuły interakcyjnej:

$$\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right)^\alpha + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right)^\beta \leq 1,0 \quad (29)$$

Wymiarowanie elementów

Analizując warunki stanu granicznego nośności elementów ściskanych lub zginanych należy uwzględnić ich stateczność. W przypadku prętów ściskanych poprzez wyznaczenie współczynnika wyboczeniowego χ , zależnego od możliwej postaci wyboczenia (giętnego, skrętnego lub giętno-skrętnego). Na wyboczenie skrętne narażone są pręty o przekroju bisymetrycznym oraz punktowo symetrycznym (np. krzyżowe), zaś na wyboczenie giętno-skrętne – kształtowniki o przekrojach monosymetrycznych lub niesymetrycznych. Podobnie jak w PN-90/B-03200, można nie sprawdzać stateczności giętno-skrętnej i skrętnej w przypadku elementów z kształtowników walcowanych.

W elementach zginanych globalną utratę stateczności uwzględnia się poprzez zastosowanie współczynnika zwiczenia χ_{LT} . W obu przypadkach (ściskania i zginania) odpowiednie współczynniki określone są na podstawie obciążenia krytycznego konstrukcji, przy którym następuje utrata sta-

teczności ogólnej (siły krytycznej N_{cr} bądź momentu krytycznego M_{cr}).

Stateczność elementów ściskanych

Warunek nośności ze względu na wyboczenie elementu o stałym przekroju, ściskanego osiowo siłą podłużną N_{Ed} ma postać:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (30)$$

Obliczeniową nośność na wyboczenie elementu ściskanego oblicza się następująco:

- w przypadku przekrojów klasy 1., 2., 3.:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (31)$$

- w przypadku przekrojów klasy 4.:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (32)$$

gdzie:

χ - współczynnik wyboczenia odpowiadający miarodajnej postaci wyboczenia.

Stateczność elementów ściskanych o przekroju klasy 4 z przesunięciem środka ciężkości przekroju współpracującego należy sprawdzić według odpowiedniego kryterium interakcyjnego, z uwzględnieniem dodatkowego zginania ΔM_{Ed} .

Współczynnik wyboczenia χ ustala się zależnie od smukłości względnej $\bar{\lambda}$ oraz parametru imperfekcji α według odpowiedniej krzywej niestateczności (a_0 , a , b , c i d), którą dobiera się stosownie do typu przekroju, metody produkcji kształtownika, kierunku wyboczenia, grubości ścianek elementu i gatunku stali (Tablica 3.).

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad \text{lecz } \chi \leq 1,0 \quad (33)$$

gdzie:

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (34)$$

Smukłość względna przy wyboczeniu giętnym wyznacza się z zależności:

- w przypadku przekrojów klasy 1., 2., 3.:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad (35)$$

- w przypadku przekrojów klasy 4.:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\lambda_1} \quad (36)$$

gdzie:

N_{cr} - siła krytyczna odpowiadająca miarodajnej postaci wyboczenia sprężystego, wyznaczona na podstawie cech przekroju brutto,

L_{cr} - długość wyboczeniowa w rozpatrywanej płaszczyźnie wyboczenia,

i - promień bezwładności przekroju brutto,

λ_1 - smukłość graniczna.

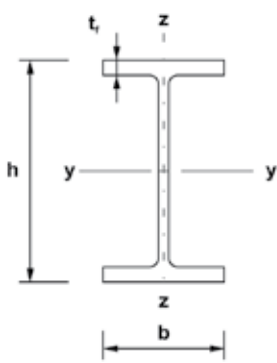
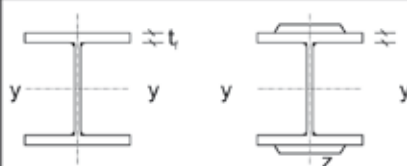
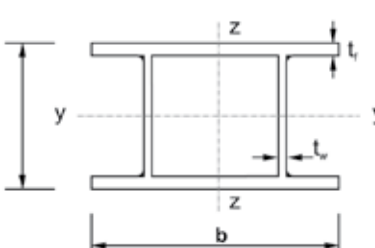
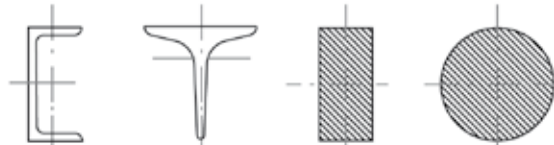
$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\epsilon \quad (37)$$

Długość wyboczeniowa pręta ściskanego jest równa długości elementu podpartego przegubowo na końcach, o takim samym przekroju i o takiej samej, jak rozważany element siły krytycznej N_{cr} . Zatem można ją wyrazić poprzez iloczyn $L_{cr} = KL$, w którym długość teoretyczna odpowiada odległości między węzłami konstrukcji lub rozstawowi stężeń.

Ogólne zalecenia praktyczne dotyczące ustalania długości wyboczeniowych elementów konstrukcji kratowych o przekrojach otwartych i rurowych podano w załączniku BB.1 normy PN-EN 1993-1-1.

Dla pasów kratownic oraz elementów skratowania - przy wyboczeniu z płaszczyzny układu przyjmuje się długość wyboczeniową $L_{cr} = L$, chyba że mniejsza wartość jest uzasadniona analitycznie. W przypadku pasów kratownic z przekrojów dwuteowych (I i H) przyjmuje się długość wyboczeniową: w płaszczyźnie $L_{cr} = 0,9L$, z płaszczyzny $L_{cr} = L$. Można przyjmować długość wyboczeniową w płaszczyźnie i z płaszczyzny $L_{cr} = 0,9L$ jedynie w przypadku pasów z kształtowników rurowych.

W PN-EN 1993-1-1 nie podano natomiast zasad dotyczących wyznaczania długości wyboczeniowych L_{cr} elementów prętowych konstrukcji ramowych.

Tablica 3. Przyporządkowanie krzywych wyboczeniowych (tablica 6.2 normy PN-EN 1993-1-1)						
Rodzaj elementu i typ przekroju		Ograniczenia	Wyboczenie względem osi	Krzywa wyboczenia		
				S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
Dwuteowniki walcowane		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y - y z - z	a b	a_o a_o
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y - y z - z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y - y z - z	b c	a a
			$t_f > 100 \text{ mm}$	y - y z - z	d d	c c
Dwuteowniki spawane		$t_f \leq 40 \text{ mm}$		y - y z - z	b c	b c
		$t_f > 40 \text{ mm}$		y - y z - z	c d	c d
Kształtowniki rurowe		wykończone na gorąco		dowolna	a	a_o
		wykończone na zimno		dowolna	c	c
Elementy skrzynkowe spawane		dowolne z wyjątkiem jak niżej		dowolna	b	b
		grube spoiny: $a > 0,5 t_f$ $b / t_w < 30$ $h / t_w < 30$		dowolna	c	c
Ceowniki, teowniki i pręty pełne				dowolna	c	c
Kątowniki				dowolna	b	b

Nomogramy niezbędne do wyznaczenia długości wyboczeniowych nieprzechyłowych i przechyłowych konstrukcji ramowych podane zostały w projekcie normy ENV lub w dawnej normie PN-90/B-03200.

Stateczność elementów zginanych

Warunek stateczności elementu zginanego względem osi największej bezwładności przekroju ma postać:

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9\varepsilon \quad (38)$$

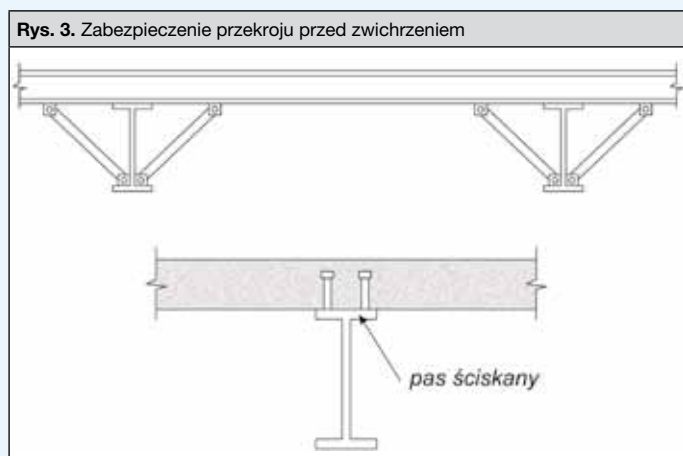
Nośność na zwichrzenie elementów belkowych nieściężonych w kierunku bocznym oblicza się następująco:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi_{LT} W_y f_y}{\gamma_{M1}} \quad (39)$$

gdzie:

- χ_{LT} – współczynnik zwichrzenia,
- $W_y = W_{pl}$ – w przypadku przekroju klasy 1. i 2.,
- $W_y = W_{el}$ – w przypadku przekroju klasy 3.,
- $W_y = W_{eff}$ – w przypadku przekroju klasy 4.

Na zwichrzenie nie są narażone elementy o przekroju zamkniętym (okrągłym, kwadratowym lub prostokątnym), a także inne elementy, w których pas ściskany jest konstrukcyjnie zabezpieczony przed przemieszczeniem z płaszczyzny zginania za pomocą odpowiednich stężeń ciągłych (tarczowych), bocznych lub przeciwskrętnych (rys. 3).



Zapisy normy PN-EN 1993-1-1 podają dwie możliwości wyznaczania wartości współczynnika

zwichrzenia: w przypadku dowolnego przekroju poprzecznego oraz w przypadku przekroju dwuteownika walcowanego oraz jego spawanego odpowiednika. Zastosowanie przepisów zmodyfikowanych dla dwuteowników prowadzi do wyższej niż w przypadku ogólnym nośności na zwichrzenie z uwagi na mniej restrykcyjne przypisanie krzywych zwichrzenia.

W przypadku ogólnym wartość współczynnika χ_{LT} ustala się zależnie od smukłości względnej $\bar{\lambda}_{LT}$ (dla $\bar{\lambda}_{LT} > \bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$) według odpowiedniej krzywej niestateczności, dobranej stosownie do typu i proporcji przekroju (tablica 4).

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{lecz } \chi_{LT} \leq 1,0 \quad (40)$$

gdzie:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] \quad (41)$$

Tablica 4. Przyporządkowanie krzywych zwichrzenia w przypadku ogólnym (tablica 6.4 normy PN-EN 1993-1-1)

Elementy	Ograniczenia	Krzywa zwichrzenia
Dwuteowniki walcowane	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	a b
Dwuteowniki spawane	$h/b \leq 2$ $h/b > 2$	c d
Inne kształtowniki	–	d

Smukłość względną przy zwichrzeniu wyznacza się z zależności:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (42)$$

gdzie:

- M_{cr} – moment krytyczny przy zwichrzeniu sprężystym,
- $W_y = W_{pl}$ – w przypadku przekroju klasy 1. i 2.,
- $W_y = W_{el}$ – w przypadku przekroju klasy 3.,
- $W_y = W_{eff}$ – w przypadku przekroju klasy 4.

Ponadto, norma PN-EN 1993-1-1 podaje uproszczoną metodę oceny zwichrzenia elementów zginanych, których pas ściskany jest stabilizowany bocznie punktowo w rozstawie L_c . Sprowadza się ona do zagadnienia wyboczenia z płaszczyzny zginania za-

stępczego pręta teowego, złożonego z pasa ściskanego oraz 1/3 ściskanej części środka.

Smukłość względna zastępczego pręta teowego jest określona wzorem:

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_f \lambda_1} \quad (43)$$

gdzie:

k_c – współczynnik poprawkowy zależny od rozkładu momentów na odcinku L_c ,

i_f – promień bezwładności przekroju pasa zastępczego względem osi z - z ,

λ_1 – smukłość porównawcza jak we wzorze (33).

Można uznać, że takie elementy nie są narażone na zwichrzenie, gdy spełniony jest warunek:

$$\bar{\lambda}_f \leq \bar{\lambda}_{c,0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \quad (44)$$

gdzie:

$M_{y,Ed}$ – maksymalny obliczeniowy moment zginający między stężeniami,

$M_{c,Rd}$ – nośność obliczeniowa przekroju na zginanie,

$\bar{\lambda}_{c,0} = 0,4$ – smukłość graniczna pasa zastępczego (wartość zgodnie z załącznikiem krajowym NA).

Stateczność elementów ściskanych i zginanych

Interakcyjne warunki nośności elementów o przekroju bisymetrycznym obciążonych jednocześnie siłą ściskaną i momentem zginającym przyjmują następującą postać:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} \frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (45)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{\gamma_{M1} \frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (46)$$

gdzie:

N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ – obliczeniowe wartości sił wewnętrznych,

N_{Rk} , $M_{y,Rk}$, $M_{z,Rk}$ – charakterystyczne wartości nośności przekroju,

$\Delta M_{y,Ed}$, $\Delta M_{z,Ed}$ – ewentualne momenty zginające spowodowane przesunięciem środka ciężkości przekroju klasy 4.,

χ_y , χ_z , χ_{LT} – odpowiednio współczynnik wyboczenia względem osi y - y i z - z oraz współczynnik zwichrzenia,

k_{yy} , k_{yz} , k_{zy} , k_{zz} – współczynniki interakcji.

Współczynniki interakcji k_{ij} pozwalają uwzględnić przyrosty momentów, jakie powstają w elemencie w warunkach lokalnej interakcji siły podłużnej ze zginaniem. Spośród dwóch alternatywnych sposobów wyznaczania wartości współczynników k_{ij} , załącznik krajowy NA normy PN-EN 1993-1-1 zaleca stosować metodę 2 – bardziej czytelną i obarczoną mniejszym ryzykiem popełnienia błędu rachunkowego.

Procedura ta dzieli elementy stalowe na wrażliwe (tablica B.2 załącznika B normy PN-EN 1993-1-1) i niewrażliwe (odpowiednio tablica B.1) na deformacje skrętne. Warunek wrażliwości na deformacje skrętne można zapisać w postaci:

$$\bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_{0,lim} = \sqrt{C_1} \sqrt[4]{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,TF}}\right)} \quad (47)$$

gdzie:

C_1 – współczynnik zależny od warunków podparcia i obciążenia elementu,

$N_{cr,TF}$ – siła krytyczna przy wyboczeniu giętno-skrętnym.

Natomiast wartość $\bar{\lambda}_0$ jest to smukłość względna przy zwichrzeniu przy stałym momencie na długości elementu.

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr,0}}} \quad (48)$$

Dodatkowo do wyznaczenia wartości współczynników interakcji konieczne jest określenie wartości współczynników równoważnego stałego momentu podanych w tablicy B.3 załącznika B. Ustala się je na podstawie rozkładu momentów pomiędzy punktami podparcia (stężeniami). W przypadku wyznaczania współczynnika C_{my} rozpatruje się wykres momentów zginających względem osi y - y , ale uwzględnia się jedynie fragment pomiędzy stężeniami w płaszczyźnie z - z . Odwrotnie w przypadku współczynnika C_{mz} – wykres momentu zginającego rozpatrujemy względem osi słabszej, ale podparcia względem osi y - y . W przypadku współczynnika C_{mLT} rozważa się zarówno moment zginający, jak i kierunek podparcia względem osi y - y .

Tablica 5. Zalecane graniczne wartości ugięć poziomych elementów

Wykres momentów	Zakres	C_{my} , C_{mz} i C_{mLT}	
		Obciążenie równomierne	Obciążenie skupione
	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$0 \leq \alpha_b \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_b$
	$-1 \leq \alpha_b < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_b$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_b(1+2\psi)$
			$0,90 - 0,10\alpha_b(1+2\psi)^{0,8}$

W przypadku przechyłowej postaci wyoboczenia można przyjmować odpowiednio $C_{my} = 0,9$ lub $C_{mz} = 0,9$.
 C_{my} , C_{mz} i C_{mLT} ustala się odpowiednio do rozkładu momentów między punktami podparcia (stężeńami), jak następuje:

Współczynnik momentu	Oś zginania	Kierunek podparcia
C_{my}	y-y	z-z
C_{mz}	z-z	y-y
C_{mLT}	y-y	y-y

Tablica 6. Zalecane graniczne wartości ugięć poziomych elementów

Element konstrukcji	w_{max} $w_3 \leq$
- Dźwigary dachowe (kratowe i pełnościenne)	L/250
- Płatwie	L/200
- Blacha profilowana	L/150
- Elementy stropów i stropodachów	
- belki główne (podciągi)	L/350
- belki drugorzędne	L/250
- Nadproża okien i bram	L/500

Gdy zastosowano strzałkę odwrotną.
 Oznaczenia: w_{max} – ugięcie całkowite netto (po odcięciu ewentualnej strzałki odwrotnej);
 w_3 – strzałka ugięcia od obciążeń zmiennych;
 L – rozpiętość elementu (lub podwójny wysięg wspornika)

Stan graniczny użytkowalności

Sprawdzenie stanu granicznego użytkowalności ma na celu przede wszystkim niedopuszczenie do wystąpienia nadmiernych przemieszczeń i drgań konstrukcji, utrudniających bądź uniemożliwiających prawidłowe użytkowanie obiektu. Przy projektowaniu konstrukcji stalowych wielkości takie, jak ugięcia pionowe belek, przemieszczenia poziome słupów lub częstości drgań własnych elementów powinny mieścić się w granicach zamieszczonych w specyfikacjach projektowych, wcześniej ustalonych z inwestorem lub użytkownikiem obiektu. W załączniku krajowym do normy PN-EN 1993-1-1 podano zalecane wartości ugięć w przypadku różnych typów elementów (tablica 6).

W tym samym załączniku zaleca się, aby przemieszczenia poziome nie przekraczały następujących wartości granicznych:

- w układach jednokondygnacyjnych (bez suwnic) $H/150$,
- w układach wielokondygnacyjnych $H/500$,
gdzie H oznacza poziom rozpatrywanego rygla względem wierzchu fundamentu.

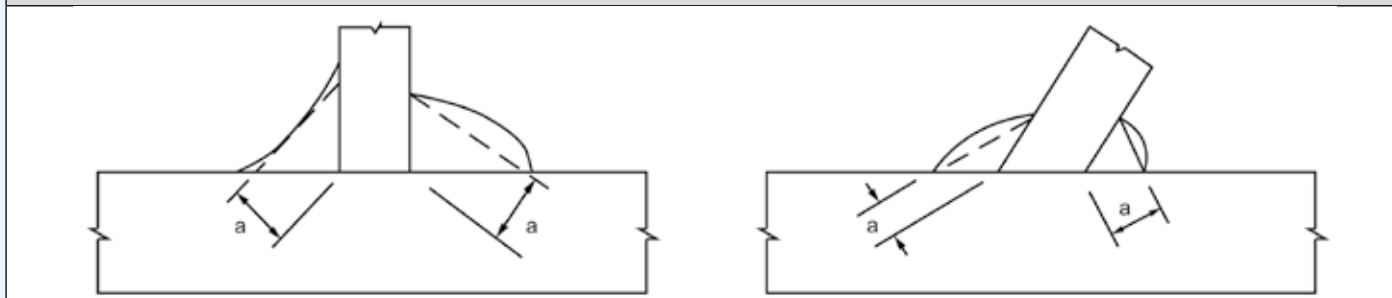
Projektowanie połączeń

Połączenia spawane

Podstawowe zasady projektowania połączeń spawanych według normy PN-EN 1993-1-8 nie różnią się znacząco od zapisów zawartych w normie PN-90/B-03200. Założenia projektowe i wymagania geometryczne dotyczące spoin czołowych, czołowych z niepełnym przetopem, pachwinowych, pachwinowych obwodowych, otworowych i szerokobruzdowych (spoiny wzdłuż prętów okrągłych lub w narożach kształtowników zamkniętych) opisane są w rozdziale 4 normy.

Spoiny pachwinowe można stosować do łączenia elementów, które tworzą między sobą kąt w granicach 60° – 120° . Przy kącie mniejszym od 60° spoinę należy traktować jako czołową z niepełnym przetopem. Efektywną grubość spoiny pachwinowej i szerokobruzdowej przyjmuje się równą wysokości największego trójkąta wpisanego w obrys spoiny i mierzonej prostopadle do zewnętrznego boku tego trójkąta. Za efektywną długość spoiny pachwinowej l_{eff} przyjmuje się odcinek, na którym spoina ma pełny przekrój. Do przenoszenia obciążeń nie powinno się stosować spoin pachwinowych

Rys. 4. Grubość spoin pachwinowych



krótszych niż 30 mm ani też krótszych niż sześciokrotna ich grubość.

W środowisku korozyjnym należy unikać spoin pachwinowych przerywanych. W każdym ściegu takiej spoiny skrajny odcinek rozpoczyna się zawsze od końców łączonych części, na długości nie mniejszej niż trzy czwarte szerokości węższej z łączonych blach. Długość przerw między spoinami przerywanymi nie powinna być większa niż 16-krotność grubości cieńszej z łączonych elementów rozciąganych bądź 12-krotność grubości elementów ściskanych lub ścinanych, lecz nie większa niż 200 mm. Spoiny czołowe przerywane nie powinny być stosowane.

Przy projektowaniu połączeń spawanych należy również unikać lokalnych mimośrodków. W złączach teowych z jednostronnymi spoinami pachwinowymi lub spoinami czołowymi z niepełnym przetopem należy uwzględniać w obliczeniach takie mimośrodki, gdy działające siła rozciągająca lub moment zginający wywołują rozciąganie w grani spoiny.

Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych może być określana dwiema metodami. Pierwsza z nich, metoda kierunkowa, jest bardziej dokładną i restrykcyjną w stosunku do metody uproszczonej. Nośność obliczeniowa spoin pachwinowych sprawdzana jest zgodnie z zależnością:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (49)$$

oraz

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \quad (50)$$

gdzie:

$\sigma_{\perp}$ – naprężenia normalne prostopadłe do przekroju spoiny,

$\sigma_{\parallel}$ – naprężenia normalne równoległe do osi spoiny,

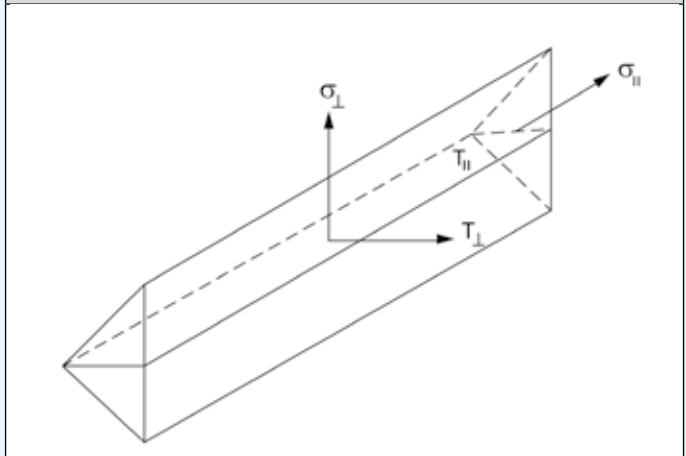
$\tau_{\perp}$ – naprężenia styczne (w płaszczyźnie przekroju) prostopadłe do osi spoiny,

$\tau_{\parallel}$ – naprężenia styczne (w płaszczyźnie przekroju) równoległe do osi spoiny,

f_u – nominalna wytrzymałość na rozciąganie słabszej z łączonych części,

β_w – współczynnik korelacji zależny od gatunku stali.

Rys. 5. Oznaczenie naprężeń w przekroju spoiny pachwinowej



W przypadku spoin czołowych z pełnym przetopem ich nośność przyjmuje się równą nośności słabszej z łączonych części, pod warunkiem że spoina jest wykonana z materiału o wytrzymałości i granicy plastyczności nie mniejszej od cech materiału rodzimego. W przypadku spoin czołowych z niepełnym przetopem ich nośność można obliczać korzystając z procedur podanych dla spoin pachwinowych, przyjmując ich grubość nie większą niż głębokość przetopu, jaka może być regularnie uzyskana.

Połączenia śrubowe

Nowe zasady projektowania węzłów konstrukcji stalowych, dotyczące połączeń śrubowych zakładkowych jak i doczołowych, różnią się znacząco od przepisów zawartych w normie PN-90/B-03200. Mocno rozbudowany algorytm wyznaczania końcowej nośności węzła uwzględnia podatności poszczególnych jego części podstawowych, co jest wynikiem tendencji do coraz bliższego rzeczywistości modelowania konstrukcji. Konsekwencją tego jest możliwość uwzględniania podatności poszczególnych węzłów już na etapie obliczeń statycznych.

W połączeniach zakładkowych (obciążenie jest skierowane prostopadłe do osi łącznika) wyróżnia się trzy kategorie połączeń:

- kategoria A – połączenie typu dociskowego, sprawdzane w stanie granicznym nośności na ścięcie śrub oraz na docisk trzpienia do ścianki łączonych elementów:

$$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd} \quad F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$$

- kategoria B - połączenie cierne, sprawdzane w stanie granicznym nośności na ścięcie śrub, na docisk trzpienia do ścianki łączonych elementów oraz w stanie granicznym użytkowalności na poślizg:

$$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$$

- kategoria C - połączenie cierne, sprawdzane w stanie granicznym nośności na poślizg:

$$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$$

W połączeniach ciernych (kategorii B i C) należy stosować jedynie śruby do sprężania klasy 8.8 i 10.9.

Połączenia doczołowe (obciążenie jest skierowane wzdłuż osi łącznika) dzieli się na dwie podstawowe kategorie połączeń:

- kategoria D - połączenie niesprężane, sprawdzane ze względu na zerwanie śrub oraz ze względu na przeciągnięcie łba śruby przez blachę:

$$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd} \quad F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$$

- kategoria E - połączenie sprężane, sprawdzane na te same warunki co połączenia kategorii D.

W połączeniach sprężanych (kategorii E) zaleca się stosować śruby do sprężania klasy 8.8 i 10.9. Połączeń kategorii D nie powinno się stosować przy wielokrotnie zmiennym obciążeniu rozciągającym, jednak mogą być one projektowane do przenoszenia zwykłych oddziaływań wiatru.

Nośności obliczeniowe pojedynczych łączników w różnych warunkach obciążenia zebrane zostały w normie PN-EN 1993-1-8 w tablicy 3.4. W przypadku gdy obciążenie przypadające na śrubę nie jest równoległe do brzegu blachy, należy je rozłożyć na składową równoległą i prostopadłą, a nośność na docisk sprawdzić oddzielnie w obu kierunkach.

Należy również pamiętać o wymogach normowych dotyczących rozmieszczenia otworów na śruby lub nitki. Minimalne i maksymalne wartości rozstawu śrub podano w tablicy 3.3 normy PN-EN 1993-1-8. Odległość śruby od brzegu blach nie powinna być mniejsza niż $1,2d_0$ (d_0 - średnica otworu), rozstaw śrub w kierunku obciążenia nie mniejszy niż $2,2d_0$, natomiast rozstaw śrub w kierunku prostopadłym do obciążenia nie mniejszy niż $2,4d_0$. Natomiast

maksymalne rozstawy śrub nie powinny przekraczać wartości 14t lub 200 mm.

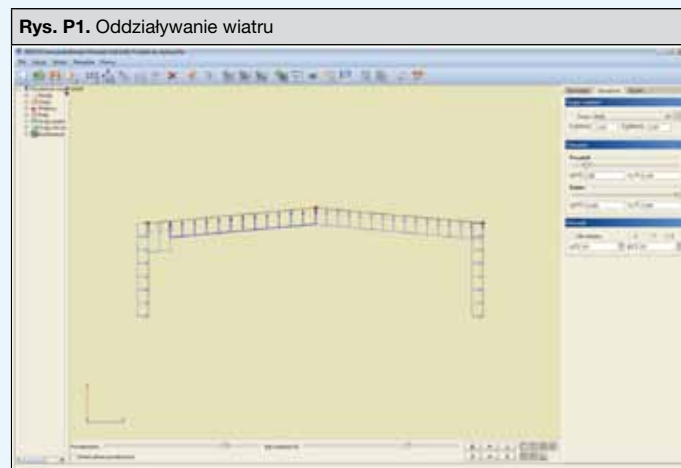
Rozdział 6 części 1-8 Eurokodu 3 przedstawia obliczeniowe procedury dotyczące typowych połączeń w konstrukcjach ramowych, takich jak połączenie rygla ze słupem, styków montażowych rygli i słupów, a także połączeń słupów z fundamentem. Zapisy te opierają się na metodzie składnikowej, gdzie całość węzła zostaje podzielona na poszczególne części podstawowe. Nośność najsłabszej z nich decyduje o nośności całego węzła, a jej odkształcalność wpływa na sztywność połączenia.

Zupełną nowością są zapisy normowe dotyczące połączeń konstrukcji wykonanych z elementów o przekrojach zamkniętych, czyli rur o przekrojach kołowych bądź prostokątnych. Norma precyzuje zasady obliczania i konstruowania takich połączeń, a w szczególności skupia się na dźwigarach kratowych wykonanych z takich elementów. W zależności od konfiguracji węzła podane są konieczne do rozpatrzenia modele zniszczenia oraz wzory umożliwiające wyznaczenie ich nośności.

Przykład obliczeniowy

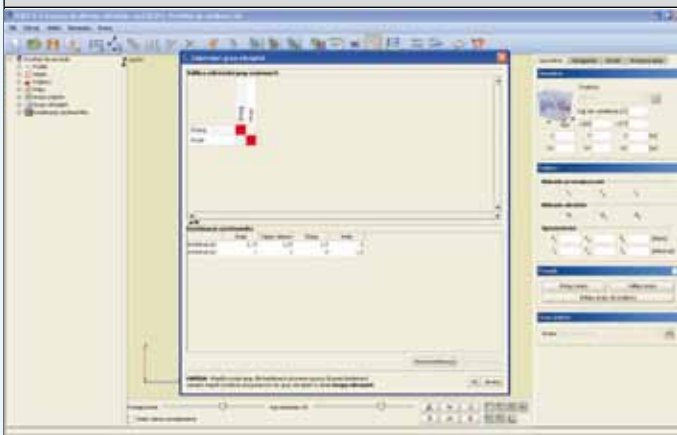
Jako przykład rozpatrzona została płaska rama jednonawowa wykonana z kształtowników gorącowalcowanych IPE 550. Rozpiętość ramy przyjęto równą 23 m, wysokość słupa przy okapie 6,0 m oraz pochylenie połaci dachowej 5°. W obliczeniach statycznych uwzględniono trzy następujące przypadki:

- ciężar własny ramy + ciężar obudowy
 $q = 2,16 \text{ kN/m}$
- oddziaływanie śniegu
 $q = 5,18 \text{ kN/m}$
- oddziaływanie wiatru (rys. P1)



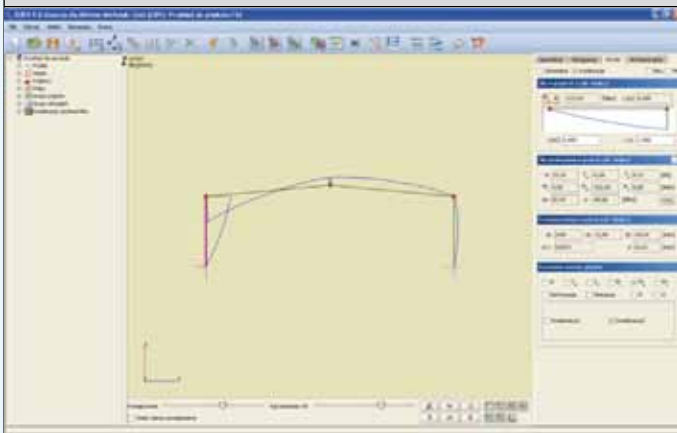
Po zadaniu wszystkich obciążeń oraz ustaleniu kombinacji (rys. P2) wykonano obliczenia statyczne, w wyniku których otrzymano obwiednie sił wewnętrznych. Przykładowo na rys. P3 pokazano obwiednie momentów zginających M_y od kombinacji drugiej (z obciążeniem wiatrem), natomiast na rysunku P4 obwiednie momentów od kombinacji grawitacyjnej – w tym przypadku decydującej o przekrojach poprzecznych prętów. Program Rama R3D3-Rama 3D daje możliwość wymiarowania konstrukcji stalowych według nowych norm europejskich PN-EN 1993, jeżeli do zadanego przekroju poprzecznego przypisany zostanie materiał z bazy „Stal EN” – w przykładzie wybrano stal S235 (rys. P5).

Rys. P2. Kombinacje obciążeń



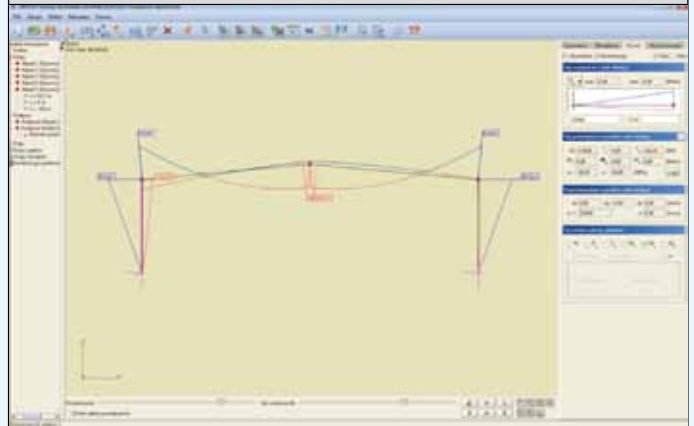
Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

Rys. P3. Obwiednia momentu zginającego od kombinacji wiatrowej



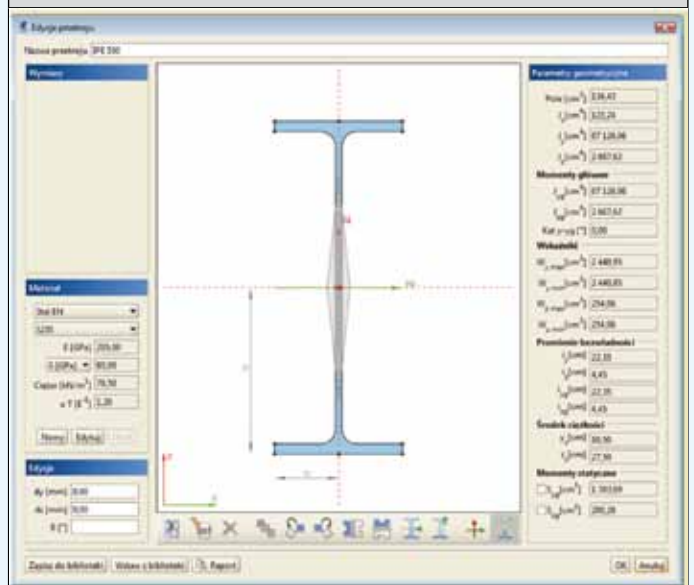
Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

Rys. P4. Obwiednia momentu zginającego od kombinacji grawitacyjnej



Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

Rys. P5. Wybór europejskiej bazy gatunków stali

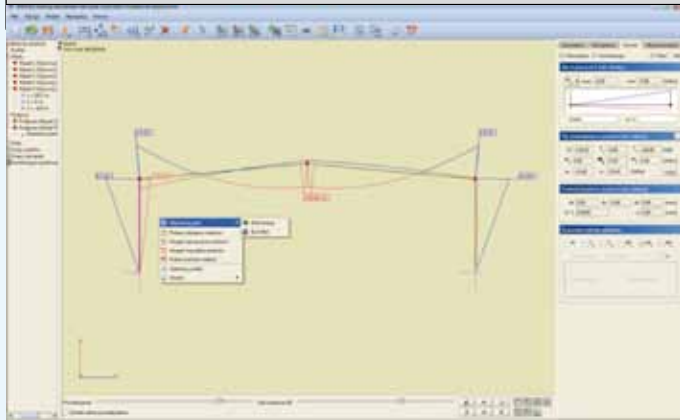


Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

Wymiarowanie elementów

W programie Rama R3D3-Rama 3D można zwymiarować zbiorczo wszystkie pręty rozpatrywanego układu, jednak w celu prześledzenia ścieżki nadawania poszczególnych parametrów poniżej pokazane zostaną kolejne kroki niezbędne do zwymiarowania słupa oraz rygla ramy. Zatem aby zwymiarować pojedynczy pręt, należy, będąc w trybie przeglądania wyników statyki, uruchomić prawym przyciskiem myszy menu z którego wybieramy „Wymiaruj pręt – EuroStal” (rys. P6).

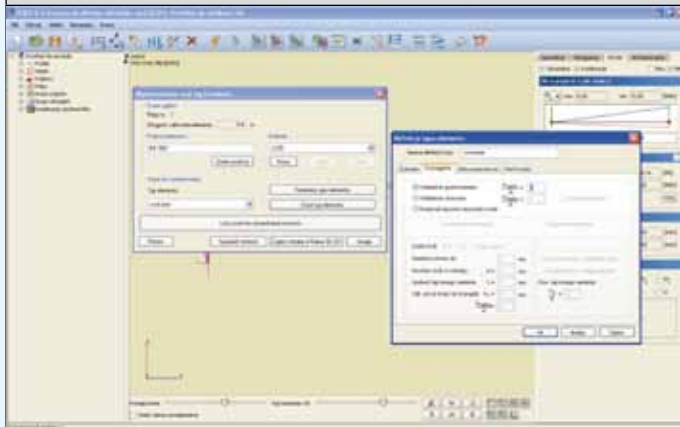
Rys. P6. Wymiarowanie pojedynczego pręta



Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

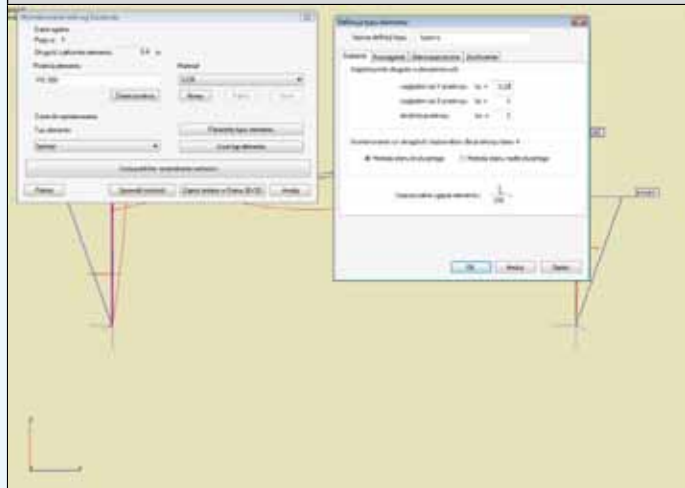
W następnym oknie należy określić, dla których wyników obliczeń statycznych program ma wykonać wymiarowanie pręta. W przykładzie wybrano, jako najbardziej niekorzystną, obwiednię sił wewnętrznych od kombinacji obciążeń. Następnie w oknie nakładki wymiarującej elementy stalowe możemy dokonać edycji przekroju poprzecznego, gatunku stali oraz określić podstawowe parametry typu elementu. Po wybraniu przycisku „Parametry typu elementu”, w kolejnym oknie program pozwala nam zdefiniować w czterech zakładkach wszystkie najważniejsze parametry konieczne do prawidłowego zweryfikowania przyjętych profili (rys. P7 do P9). W rozpatrywanym przykładzie słup rama jest elementem ściskającym i zginającym, dlatego jedynych zmian dokonano w zakładce „Ściskanie” i „Zwicherung”. Rozpatrywana rama jest układem o węzłach wzajemnie przesuwnych w płaszczyźnie rama, dlatego podano wyliczony wcześniej współczynnik długości wybocheniowej względem osi Y. W drugim kierunku założono, że słup jest stężony

Rys. P7. Parametry dotyczące elementów rozciąganych



Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

Rys. P8. Parametry dotyczące elementów ściskanych – słup rama

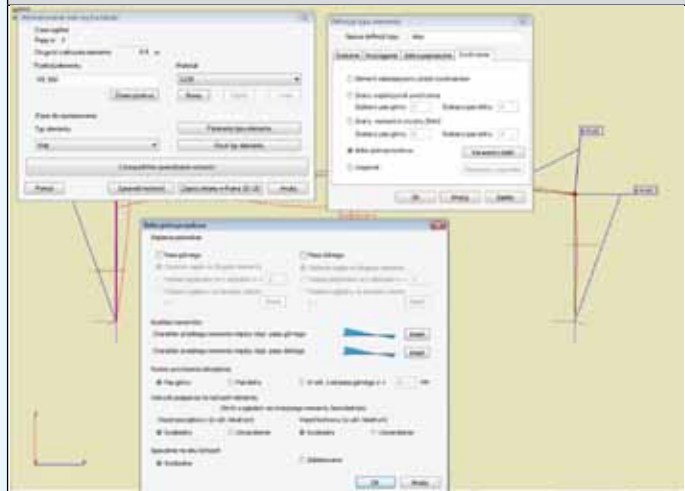


Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

poprzez stężenia pionowe znajdujące się w ścianie bocznej budynku (rys. P8).

W zakładce „Zwicherung” program Rama R3D3-Rama 3D pozwala użytkownikowi na pięć sposobów określenia parametrów niezbędnych do wyznaczenia nośności elementów zginanych. Pierwsza opcja dotyczy elementów zabezpieczonych przed zwichrzeniem bądź takich, dla których zwichrzenia się nie liczy (profile zamknięte). Jeżeli znamy współczynnik zwichrzenia, można go zdefiniować wykorzystując drugą opcję programu bądź, znając wartość momentu krytycznego, wykorzystać kolejny wariant. Najbardziej zaawansowaną opcją jest wybór „belki jednoprzęsłowej” bądź „wspornika”, w zależności od schematu statycznego, i zdefiniowanie dodatkowych parametrów umożliwiających wyznaczenie współczynnika zwichrzenia. W przypadku rozpatry-

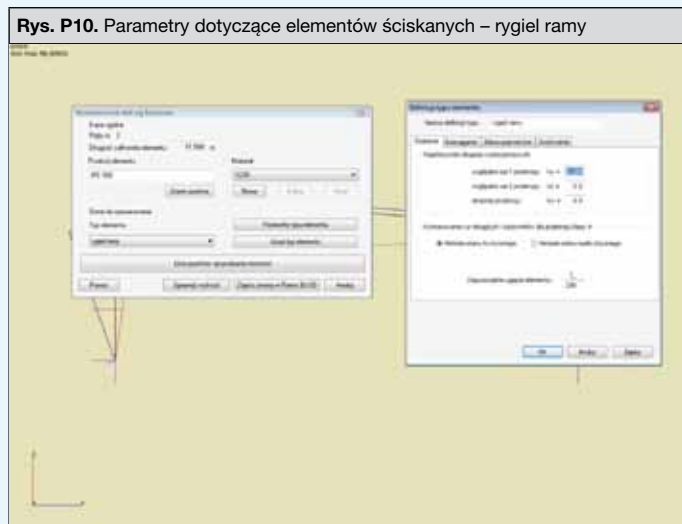
Rys. P9. Parametry dotyczące elementów zginanych – słup rama



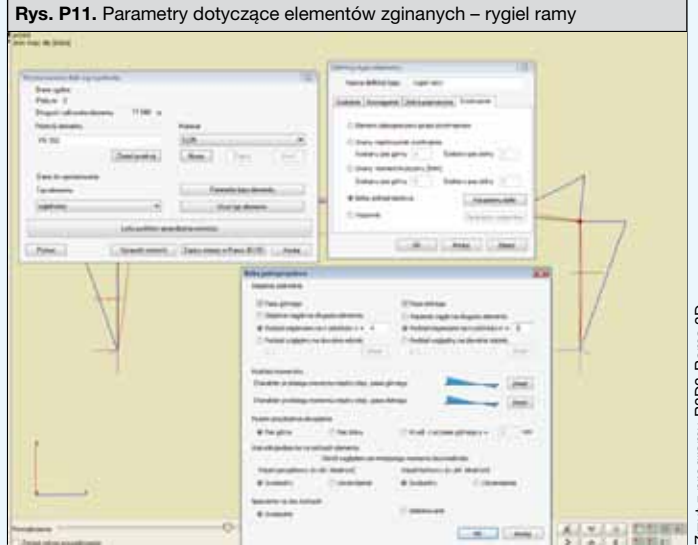
Zrzut z programu R3D3-Rama 3D

wanego słupa ramy przyjęto brak stężeń pośrednich elementu oraz liniowy rozkład momentu zginającego na całej długości słupa. Jako najbardziej niekorzystne przyjęto swobodę obrotu względem osi najmniejszego momentu bezwładności zarówno dla węzła początkowego (podpora przegubowa), jak i dla węzła końcowego. Przyjęto również swobodę spaczenia na obu końcach (rys. P9).

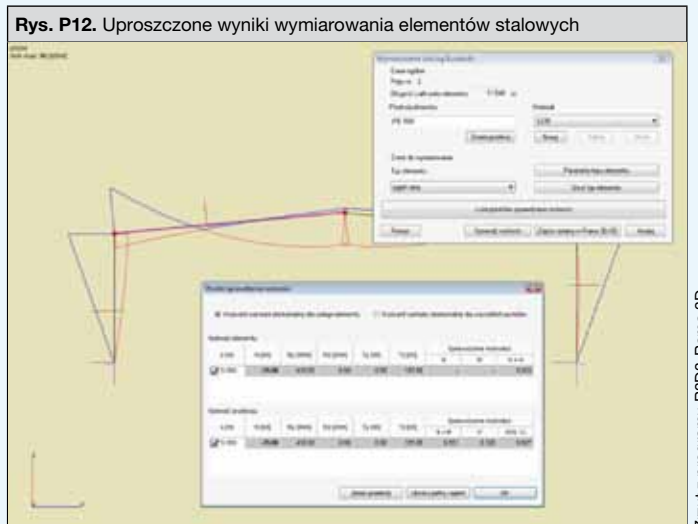
Podobną procedurę należy wykonać w przypadku zadawania parametrów dotyczących rygla ramy. W zakładce „Ściskanie” zdefiniowano wartość współczynnika długości wyboczeniowej w płaszczyźnie ramy (względem osi Y) wyliczonego na podstawie podatności węzłów końcowych, jak dla układu o węzłach wzajemnie nieprzesuwnych. Ponieważ obliczenia takie wykonano dla rygla o rozpiętości 23 m, a w programie parametr ten nadawany jest na pojedynczy pręt równy połowie długości całego rygla, współczynnik długości wyboczeniowej należało przemnożyć przez 2. Przyjęto również, że rygiel ramy jest stężony poprzez stężenia połaciowe w połowie swojej długości. W tym samym punkcie założono stężenia przeciwskrętne (rys. P10).



W parametrach zwichrzeniowych rygla ramy przyjęto, że pas górny stężony jest w miejscu oparcia na nim płatwi dachowych, natomiast pas dolny jedynie w miejscach występowania stężeń przeciwskrętnych (co druga płatew) – typowe takie rozwiązanie pokazano na rys. 3. Na odcinku pomiędzy stężeniami pośrednimi wykres momentu zginającego przyjęto w przybliżeniu jako zmienny liniowo. Podobnie jak w przypadku słupa, jako bardziej niekorzystne założono swobodę obrotu oraz spaczenia węzłów końcowych elementu (rys. P11).



Po prawidłowym zdefiniowaniu poszczególnych parametrów możemy wybrać przycisk „Sprawdź nośność”. Otrzymamy uproszczony podgląd wyników wymiarowania (rys. P12). W przypadku niemożności spełnienia któregoś z warunków przy wymiarowaniu, na ekranie pojawi się stosowny komunikat.



Widać zatem, że w rozpatrywanej ramie, przy tak założonych obciążeniach, przekrój rygla został zwymiarowany na 95% za względu na nośność elementu (z uwzględnieniem stateczności elementu), natomiast interakcyjne warunki nośności przekroju spełnione zostały na 63%. Taki stan wyężenia ma miejsce w węzle początkowym rygla ($x = 0,00 \text{ m}$), gdzie, zgodnie z obwiednią momentów, mamy największy moment zginający.

Szczegółowe wyniki wymiarowania otrzymamy wybierając opcję „Utwórz pełny raport”. Z uwagi na obszerność otrzymywanego raportu obliczenia zostaną przedstawione jedynie dla rygla ramy. Raport wymiarowania stali wg normy PN-EN 1993-1-1 składa się z czterech części: charakterystyki geometrycznej przekroju poprzecznego, sprawdzenie warunków nośności przekroju, sprawdzenie warunków nośności elementu oraz sprawdzenia stanu granicznego użytkowności. Ponieważ rozpatrywany przekrój jest klasy 1., program Rama R3D3-Rama 3D wyznaczył nośności przekrojów w stanie plastycznym, i tak:

- nośność przekroju przy ściskaniu:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{131,77 \cdot 10^{-4} \cdot 235}{1,0} = 3096,61 \text{ kN},$$

- nośność przekroju przy czystym zginaniu względem osi y-y:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2787,01 \cdot 10^{-6} \cdot 235}{1,0} = 654,95 \text{ kNm},$$

- nośność przekroju na ścinanie wzdłuż osi z-z:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v f_y}{\gamma_{M0} \sqrt{3}} = 981,71 \text{ kN}.$$

Następnie sprawdzona została konieczność redukcji nośności przekroju przy zginaniu ze względu na jednoczesne występowanie siły poprzecznej oraz siły podłużnej, ściskającej. Ponieważ takie redukcje w rozpatrywanym ryglu nie występują, program podstawiał wyznaczone wcześniej wartości do interakcyjnego warunku nośności przekroju.

Kolejnym etapem wymiarowania rygla ramy jest określenie współczynników wybocheniowych i zwichrzeniowych. Korzystając ze zdefiniowanych wcześniej przez użytkownika parametrów, program wyznacza wartości sił krytycznych wybochenia giętnego:

$$\begin{aligned} N_{cr,y} &= 7442,06 \text{ kN} \\ N_{cr,z} &= 1658,40 \text{ kN} \end{aligned}$$

Na podstawie sił krytycznych oraz przypisanych do przekroju krzywych wybocheniowych wyliczone zostały współczynniki wybochenia:

$$\begin{aligned} \chi_y &= 0,87 \\ \chi_z &= 0,40 \end{aligned}$$

Do dalszych obliczeń, jako mniejsza wartość, zostaje użyta wartość współczynnika wybocheniowego względem osi z-z. Podobnie program przedstawia wyniki dotyczące wyznaczania współczynnika zwichrzenia. Przedstawiona zostaje wartość momentu krytycznego, w przypadku gdy ściskany jest pas górny i wyliczona dla niego wartość współczynnika zwichrzenia, oraz analogiczne wyniki w przypadku pasa dolnego. W rozpatrywanej ramie decydujące wartości otrzymano dla pasa dolnego i wynosiły one:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= 1446,75 \text{ kNm} \\ \chi_{LT} &= 0,80 \end{aligned}$$

Aby skorzystać z interakcyjnych warunków stateczności elementów, konieczne jest wyznaczenie czterech współczynników interakcyjnych. Program podaje w raporcie ich ostateczne wartości, wynoszące kolejno:

$$k_{yy} = 0,91 \quad k_{yz} = 0,93 \quad k_{zy} = 0,99 \quad k_{zz} = 0,93$$

Ostatecznie zostają sprawdzone warunki nośności elementu dla obu kierunków:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{75,90}{0,87 \cdot 3096,61} + 0,91 \frac{410,62}{0,80 \frac{654,95}{1,0}} = 0,84 < 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{75,90}{0,40 \cdot 3096,61} + 0,99 \frac{410,62}{0,80 \frac{654,95}{1,0}} = 0,95 < 1,0$$

Podsumowanie

Powyższy przykład miał za zadanie przybliżyć sposób wymiarowania konstrukcji stalowych według zapisów nowej normy PN-EN 1993-1-1. Rozpatrzona w przykładzie rama jest bardzo typowym układem ramowym, wykorzystywanym w różnego rodzaju obiektach halowych o konstrukcji stalowej. Przy użyciu prezentowanego programu w sposób kompleksowy została rozpatrzona część dotycząca przygotowania elementu do wymiarowania (nadanie przekroju poprzecznego, przypisanie gatunku stali), jak i późniejsze wymiarowanie oraz interpretacja otrzymanych wyników.

MICHAŁ GAJDZICKI

W następnym wydaniu zostanie przedstawiony Eurokod 6, czyli norma dotycząca projektowania konstrukcji murowych.