

Współczynniki częściowe w ocenie nośności przekroju elementów konstrukcji stalowych

Marian Giżejowski, Zbigniew Stachura¹

¹ Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska,
e-mail: m.gizejowski@il.pw.edu.pl, z.stachura@il.pw.edu.pl

Streszczenie: Przedstawiono zagadnienia oceny bezpieczeństwa elementów konstrukcji stalowych projektowanych metodą stanów granicznych wg Eurokodów Konstrukcyjnych PN-EN i norm krajowych PN-B. Przeprowadzono dyskusję sposobu przyjęcia wartości współczynników częściowych do nośności na podstawie analizy porównawczej nośności przekroju elementów stropów o konstrukcji stalowej, gdy jedynymi składnikami kombinacji oddziaływań są obciążenie stałe oraz obciążenie zmienne użytkowe. Sformułowano wnioski do normalizacji i propozycję przyjęcia współczynników częściowych do nośności przekroju.

Słowa kluczowe: elementy stalowe, nośność przekroju, współczynniki częściowe.

1. Wprowadzenie

Eurokody konstrukcyjne, wdrożone do krajowej normalizacji projektowania konstrukcji stalowych, wykorzystują metodę stanów granicznych w ujęciu półprobabilistycznym, często nazywaną metodą współczynników częściowych. Model niezawodnościowy, służący do kalibracji współczynników częściowych, został ujęty w tzw. eurokodzie źródłowym EN 1990, normie dedykowanej podstawom projektowania. Eurokod krajowy PN-EN 1990 [1] został zaopatrzonej w Załącznik krajowy, w którym zdefiniowano wartości współczynników do oddziaływań oraz do kombinacji oddziaływań, a także sposób przyjęcia kombinacji oddziaływań.

Podobnie jak w eurokodzie podstawowym, eurokody dedykowane projektowaniu konstrukcji z konkretnych materiałów zostały wdrożone wraz z Załącznikami krajowymi, które odniosły się m.in. do przyjęcia w eurokodach krajowych wartości współczynników częściowych do nośności przekroju oraz nośności elementów. Przyjęto generalną zasadę pozostawienia wartości współczynników częściowych do nośności tak jak w eurokodach źródłowych, a więc w przypadku konstrukcji stalowych - współczynnika $\gamma_M = \gamma_{M0} = 1,0$ do wyznaczania obliczeniowej nośności przekroju oraz współczynnika $\gamma_M = \gamma_{M1} = 1,0$ do wyznaczania obliczeniowej nośności elementu narażonego niestateczność ogólną. W normie PN-EN 1993-1-1 [2] nie podano sposobu przyjęcia wartości współczynnika częściowego do obliczeniowej nośności konstrukcji $\gamma_M = \gamma_{M,ult}$, gdy projektowanie odbywa się na podstawie analizy zaawansowanej (ścieżki równowagi i na podstawie nośności konstrukcji odpowiadającej punktowi granicznemu na tej ścieżce).

W normach krajowych PN-90/B-03200 [3] wraz z towarzyszącymi dotyczącymi obciążeń [4, 5], korzysta się z innych reguł niż ujęte w Eurokodach Konstrukcyjnych. W wypadku konstrukcji stalowych nie stosuje się współczynników częściowych do nośności przekroju lub elementu. Używa się współczynnika γ_s , odnoszącego się do samego materiału w celu określenia wytrzymałości obliczeniowej stali f_d , niezależnie od klasy przekroju i typu elementu. Wartość współczynnika materiałowego uzależniono od specyfikowanej w normach hutniczych gwarantowanej wartości granicy plastyczności stali f_y .

Propozycje rozróżnienia wartości współczynników częściowych i ich reinterpretacji przedstawione zostały w pracy Giżejowskiego [6]. Współczynniki γ_{M0} i γ_{M1} odniesiono odpowiednio do nośności przekrojów o ściankach krępych klasy 1 i 2 oraz do przekrojów o ściankach smukłych klasy 4, co umożliwiło zunifikowane podejście do oceny współczynnika częściowego do nośności elementów narażonych na niestateczność ogólną. W niniejszej pracy przeprowadzono dyskusję sposobu przyjęcia wartości współczynników

częściowych do nośności przekroju na podstawie analizy porównawczej bezpieczeństwa elementów konstrukcji stropów stalowych, gdy jedynymi składnikami kombinacji oddziaływań są obciążenia stałe oraz zmienne użytkowe. Porównując nośności przekrojów obliczonych wg norm [2] i [3], reinterpretowane współczynniki częściowe wynoszą:

- przypadku elementów zginanych

$$\gamma_M = \frac{M_{c,Rk,EN}}{M_{c,Rk,PN}} \cdot \frac{\gamma_s \cdot (\gamma_{G,PN} + \gamma_{Q,PN} \cdot \psi)}{(\gamma_{G,EN} + \gamma_{Q,EN} \cdot \psi)} \quad (1)$$

- przypadku elementów ściskanych

$$\gamma_M = \frac{N_{c,Rk,EN}}{N_{c,Rk,PN}} \cdot \frac{\gamma_s \cdot (\gamma_{G,PN} + \gamma_{Q,PN} \cdot \psi)}{(\gamma_{G,EN} + \gamma_{Q,EN} \cdot \psi)} \quad (2)$$

gdzie: γ_M – reinterpretowany współczynnik częściowy do nośności przekroju,
 $M_{c,Rk,EN}$, $N_{c,Rk,EN}$; $M_{c,Rk,PN}$, $N_{c,Rk,PN}$ – nośność charakterystyczna przekroju odpowiednio wg norm PN-EN oraz PN-B,

$\gamma_{G,EN}$, $\gamma_{Q,EN}$ – współczynniki oddziaływań wg normy PN-EN,

$\gamma_{G,PN}$, $\gamma_{Q,PN}$ – współczynniki obciążeń wg normy PN-B,

ψ – parametr opisujący stosunek nominalnej wartości obciążenia zmiennego Q do obciążenia stałego G ($= Q/G$).

2. Założenia przyjęte w przeprowadzonych analizach

2.1. Przekroje

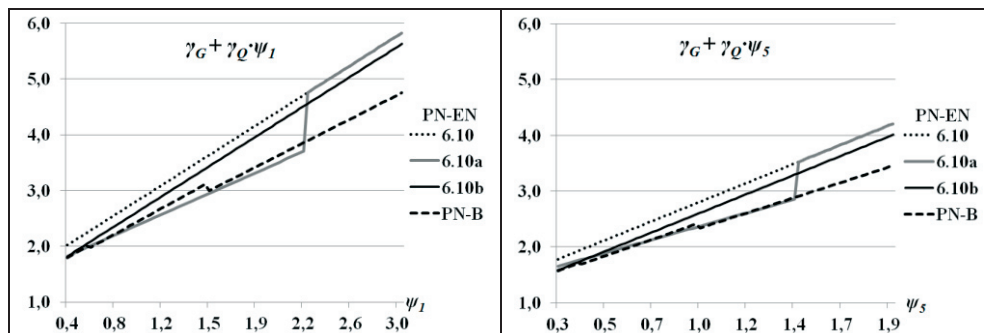
W przeprowadzonej analizie zostały wzięte pod uwagę przekroje dwuteowe walcowane i spawane oraz przekroje skrzynkowe spawane, których wymiary podano w Tabelcy 1. Każdy przekrój przeanalizowano w trzech wariantach gatunku stali: S235, S355 oraz S450.

Tabela 1. Przekroje przyjęte w analizie.

Nr	Rodzaj elementu	h_w [mm]	t_w [mm]	b_f [mm]	t_f [mm]
1		1800	10	400	20
2	Błachownica	1800	10	400	10
3	o przekroju	600	10	400	20
4	dwuteowym	600	10	400	10
5	Kształtownik IPE 240	220,4	6,2	120	9,8
6	Kształtownik HEA 240	206	7,5	240	12
7		1800	10	400	20
8	Błachownica	1800	10	400	10
9	o przekroju	600	10	400	20
10	skrzynkowym	600	10	400	10

2.2. Zakres rozpatrywanych wartości kombinacji oddziaływań

W obciążeniach stałych przyjęto typowe warstwy wykończeniowe stropu o różnych wariantach grubości płyty żelbetowej w zakresie od 80 do 160 mm. Obciążenie zmienne analizowano w zakresie od 1,5 do 10,0 kN/m². Kombinacje obliczeniowe tych oddziaływań przyjęto wg norm [1] i [4]. W kombinacjach uwzględniono trzy zakresy zmienności oddziaływań zmiennych, w zależności od wartości obciążeń użytkowych wg [4], a także zmianę kategorii powierzchni wg [1]. Na Rysunku 1 przedstawiono wykresy przedstawiające porównanie mnożników sił wewnętrznych od obciążeń obliczeniowych otrzymanych z kombinacji wg norm PN-EN [1] oraz normy PN-B [4] dla dwóch skrajnych wartości przedziału zmienności ψ , odpowiadającego obciążeniu stałemu dla najcieńszej (ψ_1) i najgrubszej (ψ_3) żelbetowej płyty stropowej uwzględnionej w analizie.

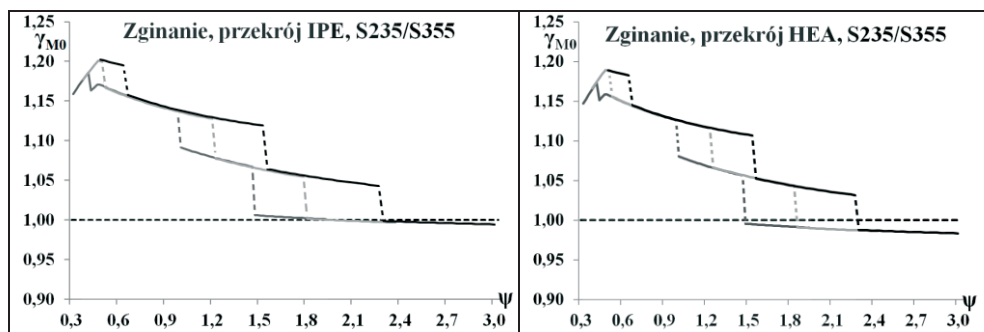


Rys. 1. Wykresy mnożników sił wewnętrznych dotyczące obliczeniowej kombinacji oddziaływań.

3. Wyniki analiz dotyczących nośności przekroju zginanych belek walcowanych

3.1. Belki ze stali z grupy S235 i S355

Wyniki przeprowadzonej analizy porównawczej przedstawiono na Rysunku 2 w postaci wykresów współczynnika częściowego $\gamma_M = \gamma_{M0}$ w zależności od parametru ψ dla przekrojów klasy 1 i 2 drugorzędnych belek stropów stalowych z dwuteownika IPE lub HEA. Wartości tego współczynnika, zastosowane w PN-EN zapewniłyby uzyskanie tego samego stopnia wykorzystania nośności przekroju wg pakietów norm PN-EN oraz PN-B. Górna linia na wykresach odpowiada najmniejszej wartości obciążenia stałego, dolna zaś największej wartości obciążenia stałego. Parametr ψ o wartości około 1,5 odpowiada w przybliżeniu obciążeniu zmiennemu o wartości 5 kN/m^2 w przypadku stropu najlżejszego, o wartości 1,0 zaś odpowiada w przybliżeniu temu samemu obciążeniu, ale w przypadku stropu najcięższego.

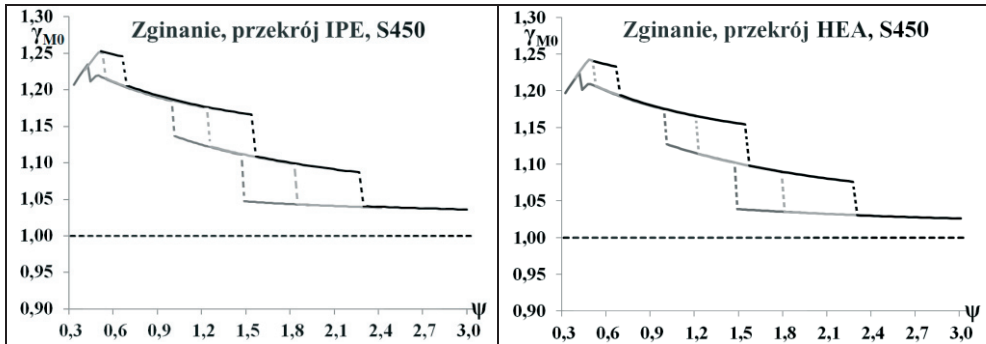
Rys. 2. Wartości współczynnika częściowego γ_{M0} dotyczące belek walcowanych wykonanych ze stali S235/S355.

Współczynnik γ_{M0} osiąga najwyższe wartości w zakresie małych wartości parametru ψ , na poziomie wartość 1,2 w przypadku stropów o najmniejszym ciężarze stałym oraz 1,15 w przypadku stropów o największym ciężarze stałym. Wartości współczynnika częściowego γ_{M0} maleją wraz ze wzrostem parametru ψ . W obszarze odpowiadającym dużym wartościom parametru ψ następuje wyrównanie poziomu wykorzystania nośności przekroju wg PN-EN i PN-B. Obniżenie wartości γ_{M0} dla przekroju dwuteownika HEA w stosunku do IPE wynika z mniejszego współczynnika rezerwy plastycznej tego przekroju w porównaniu z przekrojem IPE.

3.2. Belki ze stali z grupy S450

Na Rysunku 3 przedstawiono wyniki analizy dotyczącej, podobnie jak w 3.1, belek wykonanych z dwuteowników IPE oraz HEA. Tendencja przebiegu wykresów współczyn-

nika γ_{M0} w zależności od parametru ψ jest podobna jak dla stali S235/S355, przy czym występuje nieznaczny wzrost wartości częściowego współczynnika do nośności przekroju.



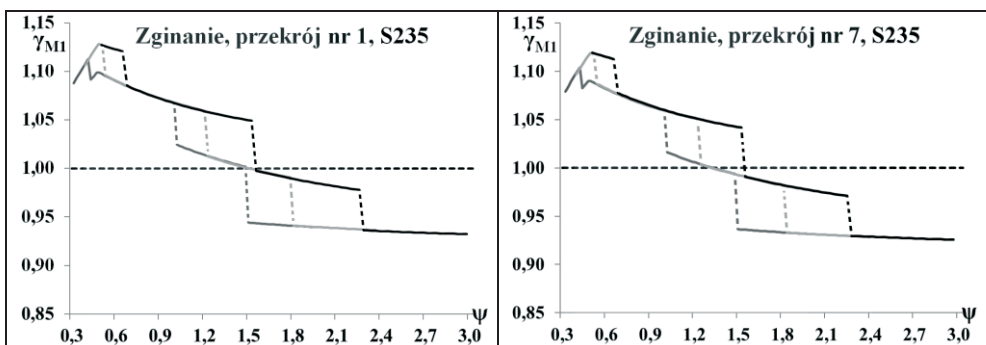
Rys. 3. Wartości współczynnika częściowego γ_{M0} dotyczące belek walcowanych wykonanych ze stali S450.

Wzrost wartości γ_{M0} na Rysunku 3 w porównaniu z wartościami tego współczynnika do pokazanymi na Rysunku 2 wynika ze zwiększonej wartości współczynnika materiałowego γ_s w normie [3] dla gatunków stali powyżej S355.

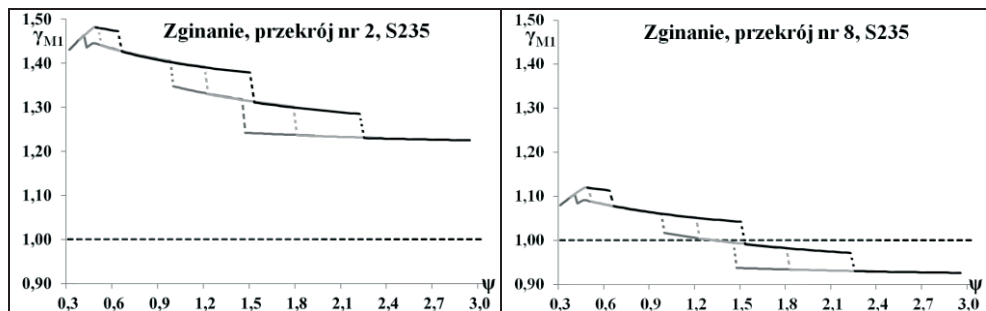
4. Wyniki analiz dotyczących nośności przekroju zgiętych blachownic spawanych

4.1. Blachownice ze stali z grupy S235

Analizie poddano blachownice spawane o przekroju dwuteowym i skrzynkowym (por. Tablica 1). Na Rysunku 4 przedstawiono wyniki analizy dotyczące blachownic o przekrojach dwuteowych i skrzynkowych o krępych pasach (klasy niższej niż 4), na Rysunku 5 zaś blachownice z pasami smukłymi (klasy 4). Zaobserwowano obniżenie wartości współczynnika częściowego γ_{M1} do określenia nośności przekroju blachownic w stosunku do wartości γ_{M0} do nośności przekroju belek walcowanych w sytuacji, gdy blachownice są o pasach krępych. Odwrotna sytuacja występuje w blachownicach o smukłych środnikach i pasach (ścianki klasy 4), gdy pas ulega niestateczności jako pierwszy. Występuje w tym wypadku wzrost wartości współczynnika częściowego γ_{M1} w stosunku do wartości współczynnika γ_{M0} do nośności przekroju belek walcowanych. Jest on wynikiem tego, że w normie PN-B [3] obowiązuje rygorystyczna reguła stanu krytycznego ścianki podpieranej i związanej z nią ograniczonej redystrybucji naprężeń w stanie nadkrytycznym ścianek podpierających.



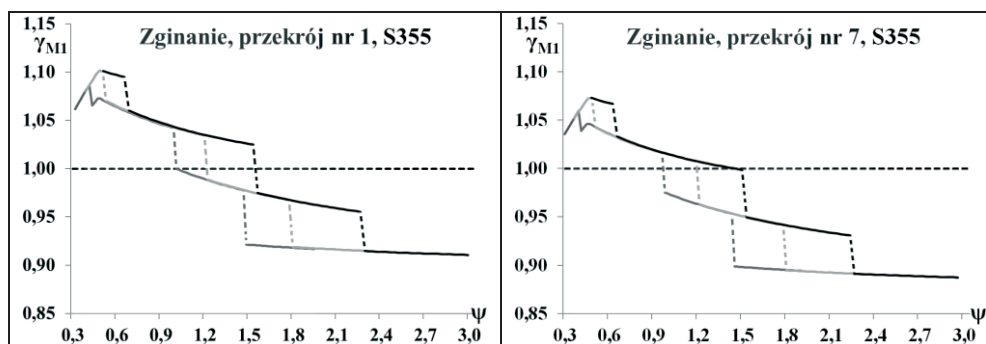
Rys. 4. Wartości współczynnika częściowego γ_{M1} dotyczące przekrojów nr 1 i 7 blachownic zgiętych.

Rys. 5. Wartości współczynnika częściowego γ_{MI} dotyczące przekrojów nr 2 i 8 blachownic zginanych.

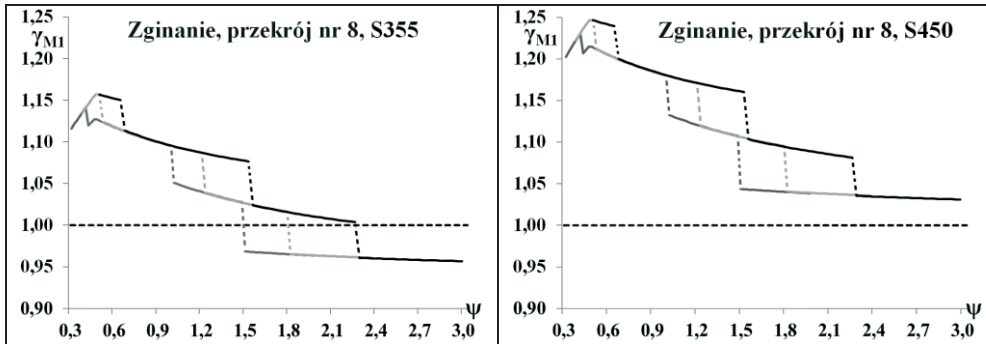
Postępowanie jest analogiczne jak stosowanie reguły ograniczonej plastyczności przy redystrybucji momentów w analizie konstrukcji prętowych metodą przegubów plastycznych, gdy układy złożone z elementów o przekrojach różnej klasy projektowane są z uwzględnieniem rezerwy plastycznej (por. Giżejowski [7]). W wypadku nadkrytycznego zachowania się ścianek przekroju, zasada ograniczenia redystrybucji prowadzi do uwzględnienia stanu krytycznego niestateczności miejscowej w ściankach podpieranych, co z kolei ogranicza (a w sytuacjach ekstremalnych nawet eliminuje) możliwość nadkrytycznej redystrybucji naprężeń w ściankach podpierających. Norma PN-EN [2] dopuszcza natomiast nadkrytyczną redystrybucję naprężeń zarówno dla ścianek podpieranych jak i podpierających, niezależnie od tego, która ze ścianek ulega niestateczności jako pierwsza.

4.2. Blachownice ze stali z grup S355 i S450

Na Rysunku 6 przedstawiono wyniki dotyczące blachownic dwuteowych i skrzynkowych ze stali S355, o przekrojach ze średnikiem klasy 4 i o krępym pasach. Zaobserwować można obniżenie wartości współczynnika częściowego w stosunku do przekrojów analogicznych blachownic wykonanych ze stali S235, a więc wartość współczynnika γ_{MI} w blachownicach klasy 4 ze stali grup S235, S275 i S355 zależy od wartości granicy plastyczności i nie jest stała, jak w przypadku przekrojów klasy 1 i 2 (por. 3). Tendencja odwrotna występuje w blachownicach o przekroju z pasami i średnikiem klasy 4, tzn. w elementach o przekrojach nr 2 i 4 (por. Tablica 1). Zastosowanie stali S450 w blachownicy o przekroju nr 2 skutkuje tym, że wartość współczynnika częściowego γ_{MI} osiąga poziom 2,0 w zakresie obciążeń użytkowych do 5 kN/m². Potwierdza to ogólnie przyjętą zasadę, aby w konstrukcjach stalowych na blachownice o przekroju klasy 4 nie stosować stali o podwyższonej wytrzymałości.

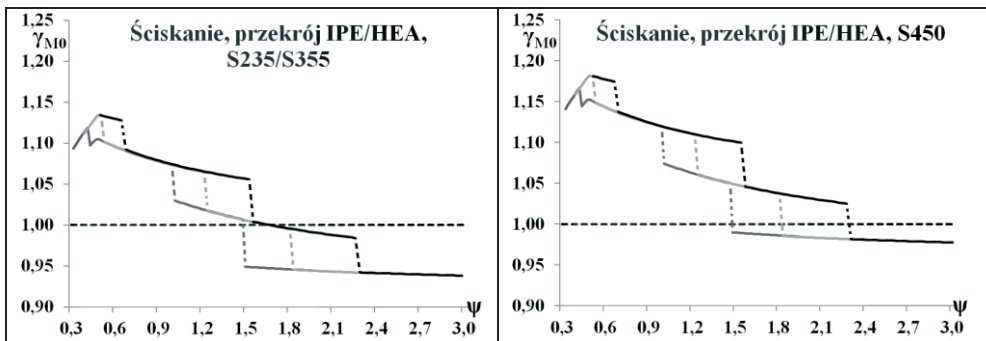
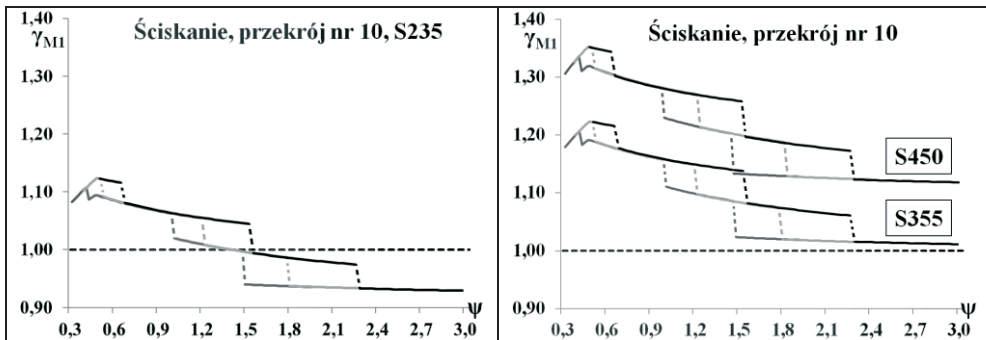
Rys. 6. Wartości współczynnika częściowego γ_{MI} zginanych blachownic o przekrojach nr 1 i 7.

Wyniki analizy dotyczące blachownic o przekroju skrzynkowym nr 8 przedstawiono na Rysunku 7 w wariancie dla stali S355 i S450.

Rys. 7. Wartości współczynnika częściowego γ_{M1} zginanej blachownicy o przekroju nr 8.

5. Wyniki analiz dotyczących nośności przekroju słupów osiowo ściskanych

Analizie poddano te same przekroje, które rozpatrywano w przypadku elementów zginanych. Wynikowe wartości współczynnika częściowego do nośności przekroju ściskanych elementów walcowanych przedstawiono na Rysunku 8.

Rys. 8. Wartości współczynnika częściowego γ_{M0} dotyczące przekrojów walcowanych.Rys. 9. Wartości współczynnika częściowego γ_{M1} ściskanej blachownicy skrzynkowej o przekroju nr 10.

Wyniki dotyczące ściskanych elementów walcowanych są zbliżone do tych, które dotyczą belek (por. Rysunki 2 i 3), a nieznaczne obniżenie wartości współczynnika częściowego w wypadku ściskania w stosunku do zginania wynika z tego, że w przekrojach ściskanych nie występuje plastyczna redystrybucja naprężeń.

Wyniki dotyczące dwuteowego przekroju blachownicowego nr 4 ze stali S235 są w wypadku osiowego ściskania niemal identyczne jak w wypadku przekroju nr 2 przy

zginaniu – Rysunek 5. Rezultaty dla przekrojów nr 3 i 9, niezależnie od gatunku stali, są w przybliżeniu takie same jak dla przekroju nr 1 ze stali S235 – Rysunek 4.

6. Wnioski

W pracy rozpatrzono zagadnienia obliczeniowej nośności przekroju elementów wchodzących w skład prostych układów konstrukcyjnych, jakimi są statycznie wyznaczalne układy stropów stalowych. Założono, że elementy konstrukcji nie doznają niestateczności ogólnej, a więc ocena ich bezpieczeństwa sprowadza się jedynie do oceny nośności ich przekrojów. Ponadto, w elementach rozpatrywanych układów nie występuje dystrybucja/redystrybucja sił przekrojowych między elementami, a więc porównanie ich bezpieczeństwa można dokonać metodami analitycznymi.

Celem pracy było porównanie wykorzystania nośności przekroju elementów wg pakietu eurokodów PN-EN oraz norm krajowych PN-B. Wyprowadzono zależności analityczne na współczynniki częściowe do nośności przekroju elementów projektowanych wg norm PN-EN przy założeniu, że współczynniki częściowe do nośności wg tych norm powinny zapewnić poziom bezpieczeństwa nie mniejszy niż wg zastępowanych norm krajowych PN-B. Ponadto założono, że techniczne i technologiczne warunki krajowe w branży konstrukcji stalowych nie uległy zmianie od czasu ustanowienia normy [3] i odpowiadają tym, które powinny być uwzględnione przy opracowaniu Załącznika krajowego do eurokodu stalowego [2].

Wyniki analiz przedstawiono na wykresach obrazujących zmienność współczynników częściowych do nośności γ_M (γ_{M0} w odniesieniu do przekroju klasy 1 lub 2 oraz γ_{M1} w odniesieniu do przekroju klasy 4). Charakterystyczną cechą wszystkich powyższych wykresów jest, w wypadku konstrukcji o najmniejszym obciążeniu stałym, początkowy wzrost wartości współczynnika częściowego do wartości maksymalnej wraz ze wzrostem wartości parametru ψ (decyduje dominacja obciążenia stałego i wybór kombinacji wg wzoru 6.10a wg [1]). Kombinacji wg wzoru 6.10b (por. eurokod [1]) odpowiada na wykresach linia górna. Skoki na wykresach odpowiadają zmianom współczynnika obciążenia odpowiadającego składnikowi zmiennemu, w zależności od przedziału w jakim znajduje się obciążenie zmienne użytkowe (zgodnie z normą [4]). W większości przypadków projektowanych stropów stalowych, wartości obciążeń zmiennych nie przekraczają 5 kN/m^2 (co odpowiada w przybliżeniu parametrowi $\psi = 1,5$ dla stropów o najmniejszym ciężarze stałym oraz $\psi = 1,0$ dla stropów o największym ciężarze stałym), w związku z tym najczęściej stosowany realny przedział zmienności parametru ψ można oszacować w przedziale od 0,5 do 1,5.

Dla realnego przedziału zmienności ψ widać, że zaproponowane w normie [2] wartości współczynników częściowych do nośności dają przy sprawdzaniu nośności przekroju mniejszy poziom bezpieczeństwa niż przyjęty w normie [3] o co najmniej $5 \div 10\%$. W przypadku zastosowania stali o granicy plastyczności powyżej 355 N/mm^2 , poziom bezpieczeństwa obniża się jeszcze bardziej.

Inaczej sytuacja wygląda w przypadku dużych obciążeń zmiennych, powyżej 5 kN/m^2 . Norma [2] wykazuje poziom bezpieczeństwa podobny do dotychczasowej normy [3], a w niektórych sytuacjach większy o $5 \div 10\%$.

W normie [3] przyjęto regułę projektowania elementów o przekroju klasy 4 w stanie nadkrytycznym ograniczonym, w którym stan krytyczny ścianek podpieranych ogranicza możliwość redystrybucji naprężeń w ściankach podpierających. W normie [2] nośność przekroju wyznacza się w pełnym stanie nadkrytycznym obu typów ścianek. W przypadku przekrojów ze środnikiem i pasem w klasie 4 wyraźnie widać, że aby zachować ten sam poziom bezpieczeństwa konstrukcji projektowanych wg obu porównywanych norm, w Załączniku krajowym do eurokodu [2] należałoby zastosować w przypadku stali S235 współczynnik częściowy w niektórych przypadkach nawet o 25% wyższy niż przyjęty obecnie w [2]. W przypadku przekrojów skrzynkowych ze stali S235 stopień wykorzystania nośności przekroju wg [3] utrzymuje się na podobnym poziomie jak w eurokodie stalowym [2], zarówno przy ściskaniu jak i zginaniu. Należy również zwrócić uwagę na fakt, iż stosowanie przekrojów klasy 4 ze stali o podwyższonej wytrzymałości jest mniej uzasadnione, o czym projektanci na ogół wiedzą. Jest to szczególnie istotne w przekrojach o ściankach podpieranych klasy 4, gdyż projektowanie wg eurokodu [2], przy zachowaniu

poziomu bezpieczeństwa jak w normie [3], elementów o tego typu przekrojach pociągałoby konieczność zastosowania współczynnika γ_{M1} o znacznych wartościach.

Aby przybliżyć stopień wykorzystania nośności wg [2] do dotychczasowo przyjmowanego w normie [3], można zasugerować zróżnicowanie wartości współczynnika częściowego γ_M w zależności od parametru ψ . Zdaniem autorów wartości współczynnika częściowego do nośności przekroju można byłoby uzależnić od trzech granicznych wartości parametru ψ odpowiadających poziomom obciążenia użytkowego, przy których następuje wg [5] zmiana wartości współczynnika obciążenia. Propozycję przedstawiono w Tablicy 2.

Tablica 2. Propozycja wartości współczynnika częściowego do nośności przekroju.

Parametr ψ	Częściowy współczynnik γ_M do nośności przekroju		
	γ_{M0} w wypadku przekrojów klasy 1, 2	γ_M w wypadku przekrojów klasy 4	
		Przekroje z krępyimi ściankami podpieranymi lub ze wszystkimi ściankami podpierającymi	Przekroje ze smukłymi ściankami podpieranymi
$\psi \leq 0,6$	1,10	1,10	1,20
$0,6 < \psi \leq 1,5$	1,05	1,05	1,15
$\psi > 1,5$	1,00	1,00	1,10

Literatura

- 1 PN-EN 1990. Eurokod - Podstawy projektowania konstrukcji.
- 2 PN-EN 1993-1-1. Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 3 PN-90/B-03200. Konstrukcje stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie.
- 4 PN-82/B-02000. Obciążenia budowli. Zasady ustalania wartości.
- 5 PN-82/B-02003. Obciążenia budowli. Obciążenia zmienne technologiczne. Podstawowe obciążenia technologiczne i montażowe.
- 6 Giżejowski M., O eurokodowych współczynnikach częściowych w projektowaniu prętowych konstrukcji stalowych. Inżynieria i Budownictwo, nr 6/2012, 319-325.
- 7 Giżejowski M., O metodach modelowania, analizy i weryfikacji w projektowaniu konstrukcji stalowych w ujęciu eurokodów. Inżynieria i Budownictwo, nr 10/2012, 545-549.

Partial factors for cross-section resistance of elements in steel structures

Marian Giżejowski, Zbigniew Stachura¹

¹ Instytut Inżynierii Budowlanej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska,
e-mail: m.gizejowski@il.pw.edu.pl, z.stachura@il.pw.edu.pl

Abstract: Issues related to safety requirements for steel elements subjected to different stress resultants in reference to limit states design philosophy according to Structural Eurocodes PN-EN and national codes PN-B are dealt with in the paper. The calibration of partial cross-section resistance factors is discussed on the basis of elements of steel floor structures where the permanent load component and the live load component of variable actions are the only components of load combinations. Final conclusions for their practical application in the codification process are formulated and values of partial factors for cross section resistance are proposed.

Keywords: steel elements, cross-section resistance, partial factors.