

Mgr inż. PATRYK DENIZIAK

Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska

O wymiarowaniu kształtowników giętych na zimno według eurokodów i norm amerykańskich

Nośne konstrukcje z kształtowników giętych na zimno były wykorzystywane w przemyśle lotniczym i motoryzacyjnym od początku XX w. [11]. W obiektach budowlanych początkowo pełniły one rolę elementów konstrukcyjnych drugorzędnych, takich jak ościeżnice czy elementy ścian działowych. Obecnie są stosowane również jako główne elementy nośne w halach przemysłowych (słupy, więzary, konstrukcje wsporcze dźwignic) [4, 20].

Metoda obliczania nośności cienkościennych elementów grubości od 0,45 mm jest przedstawiona w normie PN-EN 1993-1-3 [26], w której określono również wymagania dotyczące maksymalnego stosunku grubości do wysokości poszczególnych ścianek kształtowników. Jeżeli podane warunki nie są spełnione, to wymagana jest uprzednia weryfikacja rozwiązania badaniami laboratoryjnymi.

Kształtowniki z blach cienkich mogą mieć zróżnicowane przekroje [19] – zarówno otwarte, jak i zamknięte.

Możliwe jest ich wykonywanie z blach stalowych z różnych gatunków stali. Kształtowniki są zazwyczaj cynkowane ogniowo. Stworzono typoszeregi kształtowników giętych z blach, a produkcja seryjna umożliwiła optymalizację kosztów wyrobów.

W literaturze są podawane wartości graniczne wymiarów poprzecznych, dla których dany przekrój jest kwalifikowany jako cienkościenny (rys. 1) [7, 13].

Pręty cienkościenne, ze względu na dużą smukłość ścianek, są wrażliwe na zjawisko utraty stateczności. Tego rodzaju prętów dotyczy m.in. opublikowana w 1940 r. teoria *Własowa* [18], a także teoria nośności nadkrytycznej *Wintera* [1, 9].

O wymiarowanie prętów cienkościennych

• **Wymiarowania według eurokodów.** Zagadnienia związane z wymiarowaniem prętów cienkościennych są opisane w normach: PN-EN 1993-1-1 [25], PN-EN 1993-1-3 [26], PN-EN 1993-1-5 [27], uwzględniające m.in. założenia teorii *Własowa* oraz *Wintera* i uzupełniające je zależności empiryczne. Poprawne stosowanie norm zapewnia odpowiedni stopień bezpieczeństwa projektowanej konstrukcji.

W celu określenia stopnia odporności przekroju na zjawisko miejscowej utraty stateczności norma [25] klasyfikuje przekroje na cztery klasy. Kształtowniki cienkościenne jako wrażliwe na miejscową utratę stateczności zalicza się do przekrojów klasy 4.

Proces produkcji kształtowników giętych na zimno wymaga zaokrąglenia naroży stosunkowo dużym promieniem. Koliste krzywizny utrudniają wyznaczanie charakterystyk geometrycznych przekrojów. W normie [26] przedstawiono praktyczne podejście, umożliwiające zamianę rzeczywistego przekroju składającego się ze ścianek prostych i zaokrąglonych naroży na przekrój składający się jedynie ze ścianek prostych, często stykających się w narożach. Jest to tzw. proces idealizacji przekroju cienkościennego.

Spełnienie wymagań normowych jest warunkiem koniecznym do przeprowadzenia idealizacji przekroju. Możliwość pominięcia wpływu zaokrąglenia naroży zależy geometrycznie od promienia gięcia i wymiarów przekroju.

W analizie nośności według norm [26, 27] jest wykorzystywana teoria nośności nadkrytycznej. Przekrój brutto (po idealizacji) jest zmniejszany o strefy, które są wyłączone ze współpracy na skutek lokalnej utraty stateczności. Pojawić się mogą również bardziej złożone formy niestateczności interakcyjnej [3], zwane niestatecznością dystorsyjną, która ma także wpływ na finalny kształt przekroju zastępczego.

Zagadnienie złożonej formy utraty stateczności jest uwzględniane stosunkowo od niedawna. Problem niestateczności dystorsyjnej zauważono w konstrukcji regałów wysokiego składowania w 1978 r. [8]. W kolejnych latach kontynuowano badania [2, 12, 17]. W roku 1996 zasady projektowe zostały ujęte w wytycznych amerykańskich [22] oraz normie australijskiej [23]. Odpowiednie zapisy przyjęto w 2002 r. w normie polskiej PN-B-03207 [24].

Zgodnie z obecną normą PN-EN 1993-1-3 [26] przy określaniu nośności początkowo pomija się podatność zagięć brzegowych oraz podłużnych przetłoczeń ścianek przekroju. Kolejno wyznacza się przekrój zastępczy na podstawie teorii nośności nadkrytycznej zarówno ścianek, jak i samego usztywnienia. Następnie wyznacza się naprężenia krytyczne przy wyboczeniu sprężystym usztywnienia brzegowego oraz współczynnik redukcyjny ze względu na wyboczenie dystorsyjne. Współczynnik redukcyjny zmniejsza naprężenia w usztywnieniu brzegowym. Na podstawie otrzymanych wyników ustala się przekrój efektywny usztywnienia brzegowego, w tym jego zastępczą, zredukowaną grubość. Na rysunku 2 przedstawiono przekrój brutto ceownika C250×100×33×3 giętego na zimno oraz odpowiadający mu przekrój zastępczy (w przypadku ściskania osiowego), stosując zasady podane w normie PN-EN 1993-1-3 [26].

• **Wymiarowanie według norm amerykańskich.** Metoda wymiarowania kształtowników cienkościennych stosowana w Europie (uwzględniająca nieliniową zależność naprężeń w przekroju przez wyznaczenie szerokości efektywnych oraz zredukowanych grubości) jest zbyt czasochłonna i podatna na błędy obliczeniowe [10]. Dlatego alternatywnie rozwinięto metodę DSM (ang. Direct Strength Method) [16], która opiera się na obliczeniach liniowych postaci wybożenia przy wykorzystaniu numerycznej metody pasm skończonych (MPS). Ta metoda zyskała popularność zwłaszcza w Australii, Kanadzie, Stanach Zjednoczonych, Meksyku oraz Brazylii.

Metoda MPS stanowi uproszczenie metody elementów skończonych. [14, 16]. Przekrój poprzeczny jest dzielony na odcinki, które tworzą krótszy bok pasm na całej długości elementu. W metodzie MPS zakłada się, że otrzymane postaci deformacji są półfalami sinusoidy oraz, że rozkład naprężeń normalnych jest jednakowy na całej długości pręta [10]. Tą metodą uzyskuje szczególnie poprawne wyniki wyników w przypadku wymiarowania ceowników giętych na zimno z zagięciem brzegowym, zwłaszcza osiowo ściskanych lub zginanych.

Na uniwersytecie Cornell (USA) stworzono oprogramowanie CUFSM [15], które umożliwia obliczanie naprężeń krytycznych odpowiadających różnym formom niestateczności [3]. Wyznaczanie nośności rozpoczyna się od uwzględnienia wpływu globalnej niestateczności. Następnie uwzględnia się interakcję globalnej oraz lokalnej niestateczności, a także wpływ dystorsyjnej utraty stateczności. Najniższa z tych nośności jest oszacowaniem nośności elementu cienkościennego [10]. Stosując omawianą metodę analizuje się jedynie przekrój brutto, co jest znacznie prostsze niż wyznaczanie przekroju efektywnego. Ta metoda nie jest jednak właściwa w analizie elementów, których środek ciężkości przesuwa się znacznie na skutek lokalnej utraty stateczności, co jest uwzględnione w podejściu europejskim.

• **Przykład analizy.** Przeanalizowano ściskany osiowo gięty na zimno ceownik C250×100×33×3 długości 3,35 m. Nośności zgodnie z wytycznymi normy europejskiej [26] wyniosła 227 kN, normy amerykańskiej [21] – 219 kN, a badania laboratoryjnego, szerzej opisanego w pracy [5] – 241 kN.

Podsumowanie

Metoda oceny ujęta w normie amerykańskiej [21], polegająca na numerycznym wyznaczeniu naprężeń krytycznych, umożliwia stosunkowo łatwe szacowanie nośności krytycznych elementów cienkościennych o stałym przekroju. Liczne publikacje i badania [6, 10, 14, 16] potwierdzają poprawność poczynionych założeń metody pasm skończonych. Algorytmy stosowane w oprogramowaniu CUFSM nie wymagają ponadto dużej mocy obliczeniowej.

Obliczenia zgodne z normą europejską [26] są bardziej pracochłonne, gdyż wymagają wyznaczenia zastępczego przekroju poprzecznego w sposób iteracyjny. Możliwa jest jednak analiza bardziej złożonych zagadnień.

W przypadku pręta o przekroju ceowym C250×100×33×3 nośność wyznaczona według normy europejskiej jest bliższa wynikowi uzyskanemu w badaniach laboratoryjnych.

- [1] *Bleich F., Ramsey L.*: Buckling strength of metal structures, London 1952
- [2] *Bradford M.*: Distorsional buckling of monosymmetric I-beams. "J. Constr. Steel Res.", Vol. 5, 1985.
- [3] *Bródka J., Broniewicz M., Giżejowski M.*: Kształtowniki gięte: poradnik projektanta. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2006.
- [4] *Ca, B.-Z., Jin C., Zhang G.-J.*: Design of light-weight steel-straw bales house, Journal of Harbin Institute of Technology, 2011
- [5] *Deniziak, P.*: Nośność stalowych słupów złożonych z kształtowników giętych na zimno o przekroju poprzecznym otwartym z dodatkowymi gałęziami przyłgowymi. Politechnika Gdańska, Gdańsk 2019.
- [6] *Georgieva, I., Schueremans, L., Vandewalle, L., Pyl, L.*: Design of built-up cold-formed steel columns according to the direct strength method. Procedia Engineering. 40 Steel Struct. Bridg, 2012
- [7] *Gosowski, B.*: Skręcanie i zginanie otwartych elementów konstrukcji metalowych, Politechnika Wroclawska, Wrocław 2004
- [8] *Hancock, G.*: Local, distorsional and lateral buckling of I-beams. Journal of the Structural Division, 1978
- [9] *Naleszkiewicz, J.*: Zagadnienia stateczności sprężystej. PWN Warszawa, 1958
- [10] *Peköz, T., Brune, B.*: Design of cold-formed steel members – comparison of EN 1993-1-3 and Direct Strength Method. Steel Construction. 6. 2013
- [11] *Petrescu, F., Ion, Petrescu, R., Victoria*: The aviation history. USA 2012
- [12] *Pi, Y., Trahair, N.*: Lateral-distorsional buckling of hollow flange beams. Journal of Structural Engineering Vol. 123, 1997
- [13] *Piechnik, S.*: Pręty cienkościenne – otwarte. Wydaw. Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki. Kraków 2000
- [14] *Schafer, B.*: Advances in the Direct Strength Method of cold-formed steel design., Thin-Walled Structures, 2019
- [15] *Schafer, B.*: Elastic buckling analysis of thin-walled members using the classical finite strip method. CUFSM v. 2.6. Johns Hopkins University. 2001
- [16] *Schafer, B., Peköz, T.*: Direct strength prediction of cold-formed steel members using numerical elastic buckling solutions. Fourteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures St. Louis, Missouri, St Louis Mo. 1998
- [17] *Trahair, N., Hancock, G.*: Distorsional buckling of single web steel members. Proceedings T. V. Galambos Symposium. 1997
- [18] *Własow, W.*: Tonkostiennoje uprugije stierzni, Moskwa 1940
- [19] *Yu, C.*: Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction, Woodhead Publishing, 2016
- [20] *Zaharia, R., Dubina, D.*: Stiffness of joints in bolted connected cold-formed steel trusses, Journal of Constructional Steel Research. 2006
- [21] AISI S100-12 North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members and AISI S100-12-C – Commentary on the Specification.
- [22] American Iron and Steel Institute. Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members, 1996
- [23] AS/NZS 4600 Cold-Formed Steel Structures. Standard Association of Australia / New Zeland, 1996
- [24] PN-B-03207 Konstrukcje stalowe – Konstrukcje z kształtowników i blach profilowanych na zimno – Projektowanie i wykonanie.
- [25] PN-EN 1993-1-1 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [26] PN-EN 1993-1-3 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-3: Reguły ogólne – Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
- [27] PN-EN 1993-1-5 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1-5: Blachownice.

Rys. 1. Graniczne wartości wymiarów przekroju poprzecznego według: a) [7], b) [13].

Rys. 2. Przekrój ceownika C250×100×33×3: a) brutto, b) zastępczy (efektywny) odpowiadający ściskaniu osiowemu

a) $\frac{t}{b} \leq \frac{1}{10}$ oraz $\frac{b}{l} \leq \frac{1}{10}$

b) $\frac{t}{c} \leq \frac{1}{8}$ oraz $\frac{c}{l} \leq \frac{1}{8}$

