

Wpływ sztywności blach fałdowych poszycia dachu na nośność płatwi



dr hab. inż.
DARIUSZ CZEPIŻAK, PROF. PWR
Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
ORCID: 0000-0003-4185-5470



mgr inż.
ADAM MACHOWIAK
STRENCO
ORCID: 0000-0002-0219-6073

W pracy badano nośność elementów konstrukcji wsporczej lekkiej obudowy hal stalowych z uwzględnieniem sprężystego podparcia bocznego wynikającego ze sztywności tarczowej obudowy (blach trapezowych).

Wprowadzenie

Celem pracy jest określenie nośności płatwi dachowych z uwzględnieniem sprężystego podparcia bocznego wynikającego ze sztywności tarczowej poszycia. Wytyczne projektowania tego rodzaju elementów podano w [1, 2, 3]. Na takie zaawansowane analizy pozwalają nowoczesne programy wykorzystujące metodę elementów skończonych.

Nowe odkrycia oraz uogólnienia opisane w pracach Papp i Szalai [4, 5] umożliwiają wykorzystywanie coraz subtelniejszych oraz bardziej wyrafinowanych metod analizy statycznej i wymiarowania konstrukcji [6, 7]. Metody te pozwalają na uzyskanie rezultatów bliższych wynikom zaawansowanych symulacji numerycznych oraz badań doświadczalnych.

Prawidłowo zaprojektowana lekka obudowa hali stalowej [1, 2, 3] ma korzystny wpływ na zwiększenie nośności konstrukcji wsporczej. W pracy przyjęto założenie, że obudowa stabilizuje jedynie pojedyncze elementy konstrukcji. Nie jest ona uwzględniana w obliczeniach statycznych i nie zapewnia stateczności całego budynku (klasa konstrukcyjna II, pkt. 2 (6) normy [1]). W tym podejściu jest tworzony model obliczeniowy konstrukcji bez obudowy i siły wewnętrzne są wyznaczone bez jej wpływu. Natomiast podczas wymiarowania płatwi uwzględnia się, że są one zabezpieczone przed utratą stateczności, jeśli obudowa ma dostateczną sztywność.

Obliczenia statyczne i wymiarowanie przeprowadzono w programie Consteel [8], który, jak zostało wykazane w pracy [9], dostarcza wiarygodnych i precyzyjnych wyników analiz.

Sztywność tarczowa poszycia dachu

Normy [10, 1] pozwalają na uwzględnienie stabilizującej roli blachy trapezowej w obliczeniach statycznych i wymiarowaniu konstrukcji wsporczej obudowy, jeśli spełniony jest waru-

nek sztywności tarczowej poszycia określony wzorem (BB.2) w [10] i (10.1a) w [1]:

$$S \geq S_{min} = \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2} \quad (1)$$

Sztywność tarczową poszycia S z blachy trapezowej można oszacować ze wzoru (10.1b) [1]:

$$S = 1000\sqrt{E^3} \left(50 + 10\sqrt[3]{b_{roof}} \right) \frac{s}{h_w} \quad (2)$$

We wzorach (1) i (2) przyjęto oznaczenia wg normy [1].

Jeżeli spełniony jest warunek (1), to zgodnie z [10, 1] belkę połączoną z blachą trapezową można uznać za stężoną w płaszczyźnie połączenia w kierunku bocznym.

W pracy przeprowadzono parametryczną analizę sztywności poszycia dachowego, przyjmując następujące założenia:

1. Płatwie o rozpiętości przęsła $L=8,0$ m i przekrojach poprzecznych IPE 270, IPE 330, IPE 400.

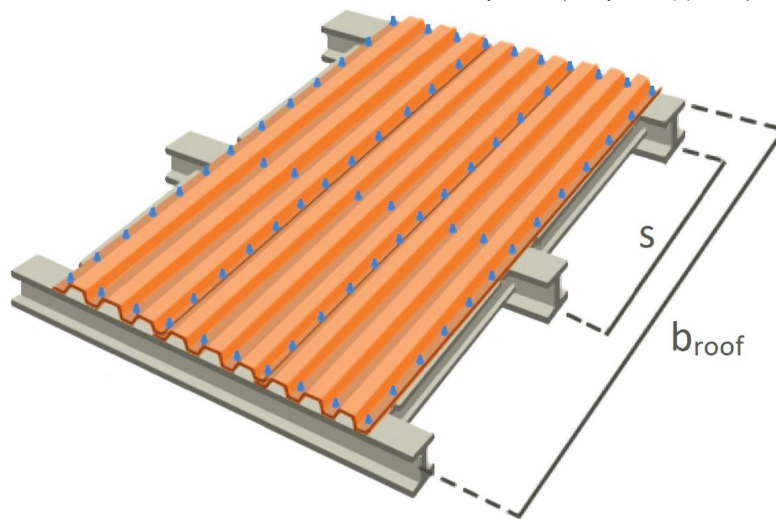
2. Półkę górną płatwi przytrzymuje na przesuw blacha trapezowa dowolnego producenta o wysokości profilu T 40, T 45, T 50, T 55, T 60, T 92, T 135, T 160 i grubościach ścianki 0,75 mm, 0,88 mm, 1,00 mm oraz 1,25 mm.

3. Płatwie i blachy trapezowe stanowią elementy poszycia połaci dachu o szerokości $b_{roof} = 15,0$ m (mierzonej od kalenicy do okapu – rys. 1.).

4. Rozstaw płatwi wynosi $s = 3,0$ m, 3,75 m, 5,0 m (rys. 1.).

W tab. 1. podano sztywności tarczowe S_{min} i S wyznaczone ze wzoru (1) oraz (2) poszycia wykonanego z blach trapezowych. Kolorami wskazano blachy spełniające minimalny warunek sztywności S_{min} dla danego kształtownika. Tłem w kolorze białym oznaczono blachy, które nie spełniły warunku sztywności dla danego z analizowanych przekrojów płatwi.

W przypadku blach trapezowych oznaczonych kolorem białym w tab. 1. wyznaczona sztywność poszycia S (2) nie spełnia wa-



Rys. 1. Schemat obliczeniowy tarczy ścinanej [11]

Tab. 1. Sztywność tarczowa poszycia z blach trapezowych

h_w [mm]	$s = 3000$ [mm]				$s = 3750$ [mm]				$s = 5000$ [mm]			
	t [mm]				t [mm]				t [mm]			
	0,75	0,88	1,00	1,25	0,75	0,88	1,00	1,25	0,75	0,88	1,00	1,25
	S [kN]				S [kN]				S [kN]			
160	3612	4591	5562	7773	4515	5739	6952	9716	6021	7652	9269	12954
135	4281	5441	6592	9212	5352	6802	8239	11515	7136	9069	10986	15353
92	6282	7985	9672	13518	7853	9981	12091	16897	10471	13308	16121	22529
60	9633	12243	14831	20727	12041	15304	18539	25909	16055	20405	24718	34545
55	10509	13356	16179	22611	13136	16695	20224	28264	17515	22260	26966	37686
50	11560	14692	17797	24872	14450	18365	22247	31091	19266	24486	29662	41454
45	12844	16324	19775	27636	16055	20405	24718	34545	21407	27207	32958	46060
40	14450	18365	22247	31091	18062	22956	27808	38863	24083	30608	37078	51818

Minimalne sztywności S_{min} wyznaczone ze wzoru (1) dla kształtowników:
IPE 270, $S_{min} = 16906$ kN, IPE 330, $S_{min} = 23159$ kN, IPE 400, $S_{min} = 32358$ kN.
 Kolorem białym oznaczono blachy niespełniające warunku sztywności dla żadnego z analizowanych kształtowników.

runku normowego S_{min} (1) wg [10, 1] i blachy te nie stanowią skutecznego zabezpieczenia analizowanych belek przed utratą stateczności. Ponadto sztywność tarczowa S (2) jest odwrotnie proporcjonalna do wysokości profilu blachy. Zatem może się okazać, że poprawnie zaprojektowana blacha trapezowa o wysokim profilu, przenosząca znaczne obciążenia poprzeczne, nie spełni warunku S_{min} (1). Analizując wartości podane w tab. 1., można zauważyć paradoks, który jest wyraźnie widoczny w przypadku rozstawu płatwi $s = 5,0$ m. Warunek normowy S_{min} (1) spełniają blachy trapezowe o małej wysokości profilu (T40-T60). Jednocześnie blachy o tych przekrojach, w przypadku typowych obciążeń, prawdopodobnie nie spełnią warunków normowych ULS i SLS. Natomiast blachy o wysokim profilu (T92-T160), które będą spełniać warunki nośności i ugięć, nie mogą być uznane, wg założeń normy [1, 10], za zabezpieczenie płatwi przed utratą stateczności (z wyjątkiem przekroju T92 o grubości ścianki $t=1,25$ mm). Zatem w praktyce grono przekrojów blach trapezowych, które spełniają jednocześnie warunki ULS, SLS i sztywności na ścinanie S_{min} (1), jest bardzo ograniczone szczególnie w przypadku większych rozstawów płatwi.

Nośność płatwi z uwzględnieniem sztywności tarczowej poszycia dachu

Nośność płatwi z uwzględnieniem podanego podparcia bocznego na przesuw oszacowano dwoma metodami:

1. metodą ogólną (General Method – GM) opisaną w normie [10] w pkt 6.3.4 oraz w pracach [12, 13];
2. metodą imperfekcyjną (Overall Imperfection Method – OIM) opisaną w pracach [4, 5, 6, 7], która bazuje na analizie GNIA.

Metoda ogólna (GM) wykorzystuje klasyczne współczynniki redukcyjne χ i χ_{LT} do

oszacowania nośności elementów. Są one obliczane na podstawie mnożnika obciążenia charakterystycznego $\alpha_{ult,k}$ (który jest odwrotnością wytrzymałości przekroju) i mnożnika obciążenia krytycznego α_{cr} (wartość własna analizy wyboczeniowej).

W metodzie imperfekcyjnej (OIM) konstrukcji jest nadawana deformacja wstępna o kształcie odpowiednio wyskalowanej postaci wyboczenia i amplitudzie obliczonej wg pracy [4]. Formy wyboczenia są wyznaczone z uwzględnieniem sztywności poszycia dachu. Następnie zdeformowany model konstrukcji jest poddawany analizie wg teorii II rzędu. Sprawdzenie SGN elementów polega na oszacowaniu poziomu wykorzystania nośności granicznej przekrojów wg pkt 6.2 [10].

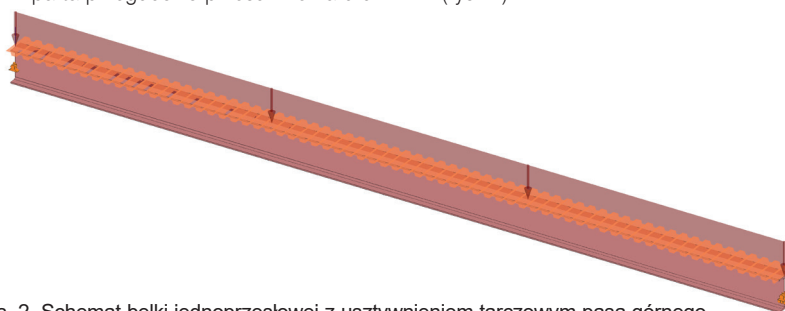
Przeprowadzono parametryczną analizę wpływu stabilizującej roli blachy trapezowej poszycia dachu na zwiększenie nośności płatwi. W analizach przyjęto następujące założenia:

1. Płatwie o rozpiętości przęsła $L=8,0$ m, przekrojach poprzecznych IPE 270, IPE 330 i IPE 400, wykonane ze stali S235 i schematach statycznych:
 - 1.1. Schemat 1 – belka jednoprzęsłowa swobodnie podparta.
 - 1.2. Schemat 2 – belka jednoprzęsłowa utwierdzona na jednym końcu i podparta przegubowo przesuwnie na dru-

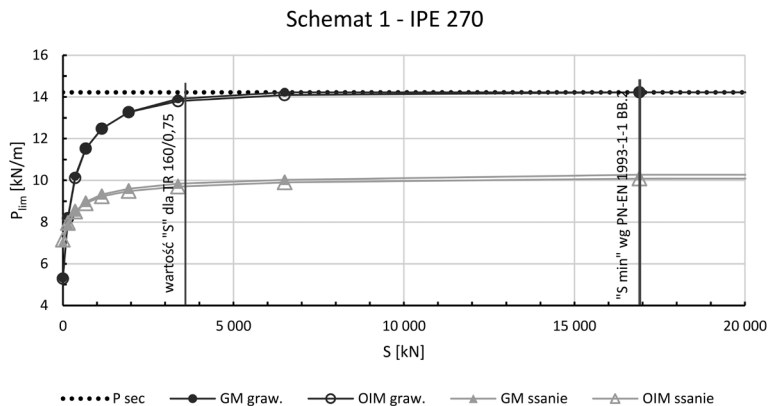
gim końcu (schemat w przybliżeniu odpowiada przęsłom skrajnym płatwi wieloprzęsłowych).

- 1.3. Schemat 3 – belka jednoprzęsłowa utwierdzona na obu końcach, z jedną podporą przesuwną (schemat w przybliżeniu odpowiada przęsłom pośrednim płatwi wieloprzęsłowych).
2. Na obu podporach element ma swobodę deplacji przekroju i obrotu wokół osi Z (mniejszej sztywności).
3. Obciążenie belek przyjęto jako równomiernie rozłożone, stałe na ich długości, które działa tylko w kierunku osi Z (dachy płaskie i o niewielkim nachyleniu) i jest przyłożone do półki górnej. W analizach dodatkowo różnicowano kierunek obciążenia (grawitacyjne, tzn. obciążenia skierowane w dół, i ssanie wiatru, tzn. obciążenia skierowane do góry).
4. Półkę górną belek przytrzymuje na przesuw podporą sprężystą (blacha trapezowa) o zmieniającej się sztywności. Brak przytrzymania na obrót.

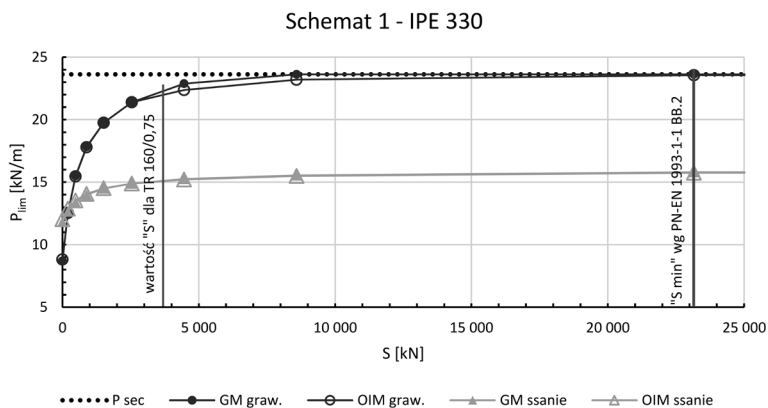
Analizy zostały przeprowadzone w programie Consteel [8] z wykorzystaniem zaimplementowanej funkcjonalności podparcia bocznego blachą trapezową o nazwie „pole ścinane”, która została opisana w [11] – o użyciu funkcjonalności informuje symbol blachy trapezowej opartej na pasie górnym belki (rys. 2.).



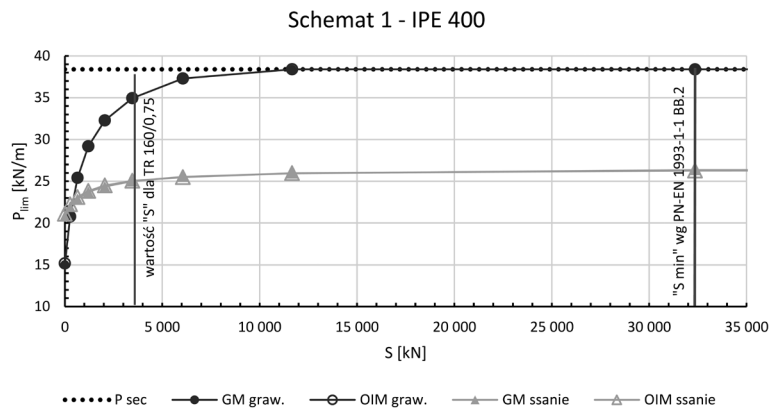
Rys. 2. Schemat belki jednoprzęsłowej z usztywnieniem tarczowym pasa górnego



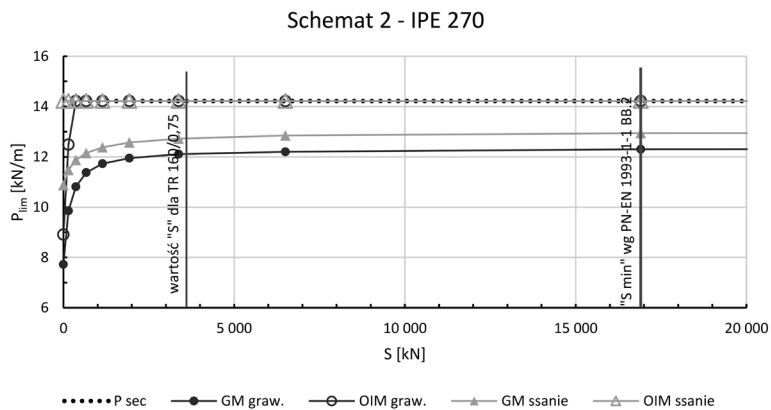
Rys. 3. Krzywe nośności granicznej – schemat 1, IPE 270



Rys. 4. Krzywe nośności granicznej – schemat 1, IPE 330



Rys. 5. Krzywe nośności granicznej – schemat 1, IPE 400



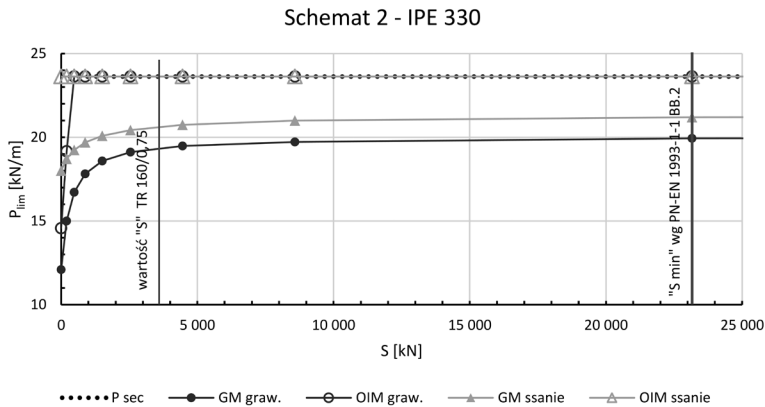
Rys. 6. Krzywe nośności granicznej – schemat 2, IPE 270

Stosowanie uregulowań normowych bez wykorzystania zaawansowanych metod obliczeniowych prowadzi do konserwatywnej oceny nośności granicznej konstrukcji wsporczej lekkiej obudowy.

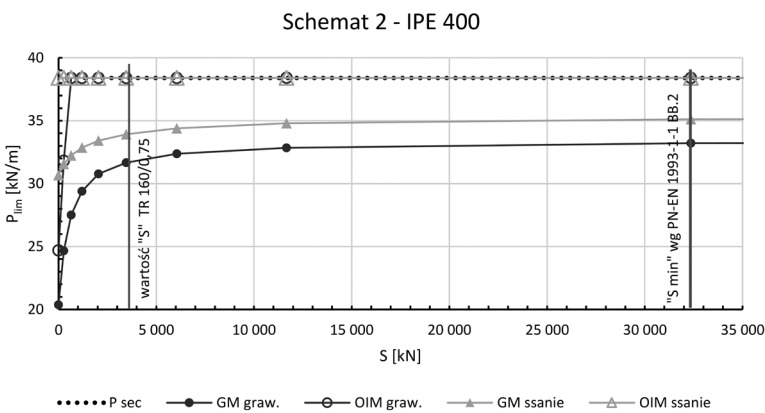
Wyniki przeprowadzonych analiz zaprezentowano na wykresach (rys. 3–11.). Na osi odciętych wykresów podano sztywność S [kN] podparcia bocznego belek, a na osi rzędnych obciążenie graniczne P_{lim} [kN/m] elementu. Linia kropkowaną (P_{sec} – rys. 3–11.) zaznaczono poziom obciążenia elementu całkowicie zabezpieczonego przed utratą stateczności (obciążenie odpowiadające nośności przekroju). Linia czarna z kropką (GM graw. – rys. 3–11.) przedstawia zmianę nośności elementu wyznaczoną metodą ogólną przy obciążeniu przyłożonym do półki górnej i skierowanym w dół. Linia szara z wypełnionym trójkątem (GM ssanie – rys. 3–11.) przedstawia to samo co linia GM graw., ale dla obciążenia działającego w górę. Linia czarna z okręgiem (OIM graw. – rys. 3–11.) przedstawia zmianę nośności elementu wyznaczoną metodą imperfekcyjną przy obciążeniu przyłożonym do półki górnej i skierowanym w dół. Linia szara z trójkątem bez wypełnienia (OIM ssanie – rys. 3–11.) przedstawia to samo co linia OIM graw., ale dla obciążenia działającego w górę. Linia pionowa na wykresach (rys. 3–11.) oznaczona symbolem „S_{min}” to poziom minimalnej sztywności S_{min} (1) (tab. 1), w przypadku którego normy [10, 1] pozwalają na uwzględnienie stabilizującej roli poszycia w obliczeniach statycznych i wymiarowaniu konstrukcji. Linia pionowa na wykresach (rys. 3–11.) oznaczona jako „wartość S” to najniższy poziom sztywności poszycia wyznaczony wg wzoru (2) i podany w tab. 1.

Z analizy wykresów (rys. 3–11.) wynika, iż przy sztywności S od 0 do 4000 kN następuje gwałtowny przyrost obciążania granicznego płatwi. Zachowanie to jest obserwowane niezależnie od użytej metody wymiarowania – GM czy (OIM).

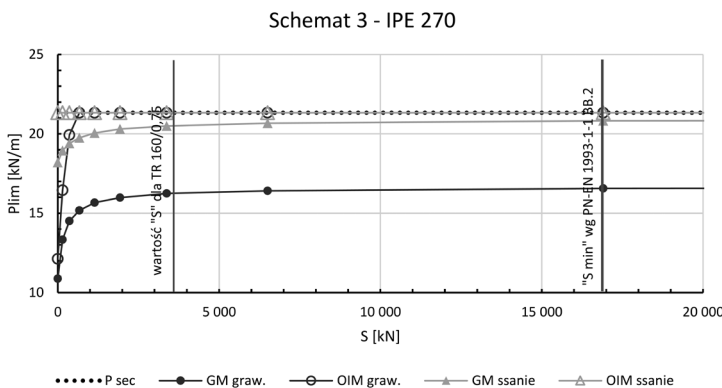
W przypadku schematu nr 1 (belka swobodnie podparta – rys. 2–5.) obema metodami wymiarowania otrzymuje się identyczne wyniki. W przypadku schematów 2 i 3 (rys. 6–11.) metodą OIM uzyskiwano do 35% większe obciążenia graniczne (schemat 3, IPE 330) od obciążień wyznaczonych metodą GM. Metoda imperfekcyjna OIM [4, 5, 6, 7] jest udoskonaleniem metody imperfekcyjnej z normy [10], pkt 5.3.2 (11) i umożliwia



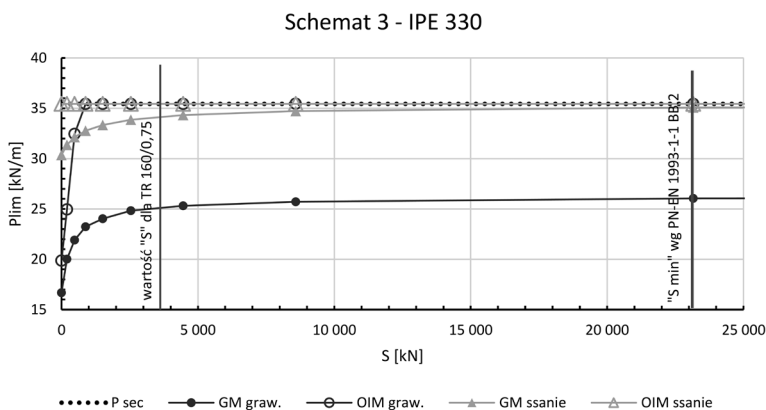
Rys. 7. Krzywe nośności granicznej – schemat 2, IPE 330



Rys. 8. Krzywe nośności granicznej – schemat 2, IPE 400



Rys. 9. Krzywe nośności granicznej – schemat 3, IPE 270



Rys. 10. Krzywe nośności granicznej – schemat 3, IPE 330

Przeprowadzone analizy parametryczne potwierdzają znaczący wpływ stabilizującej roli poszycia dachu na zwiększenie nośności granicznej elementów konstrukcji wsporczej.

obliczanie elementów zginanych oraz zginanych i ściskanych. Metoda z normy [10] pozwala na obliczanie jedynie elementów ściskanych. Według [14] obciążenia graniczne uzyskiwane metodami imperfekcyjnymi mogą być większe od oszacowań wg pkt 5.2.2(3)c) normy [10].

Z wykresów (rys. 3–11.) wynika, że bez względu na metodę obliczeń i kierunek działania obciążenia analizowane elementy już przy sztywności podparcia bocznego $11\% \div 21\% S_{min}$ (1) uzyskiwały ponad 90% obciążenia granicznego elementów podpartych sprężycie o sztywności S_{min} .

W przypadku schematów 2 i 3 wymiarowanych metodą OIM jest obserwowany szybszy przyrost nośności w porównaniu do obliczonego metodą GM. Ponadto w niektórych przypadkach (rys. 6–11.) belki wymiarowane metodą OIM okazywały się nieważliwe na utratę stateczności nawet przy zerowej wartości sztywności podparcia bocznego.

Podsumowanie i wnioski

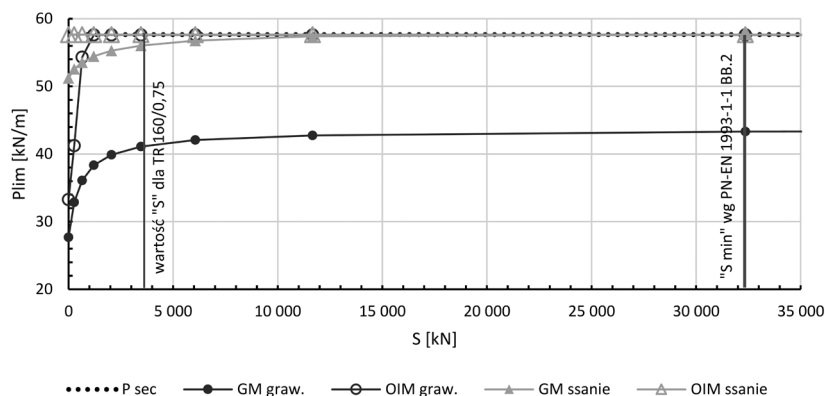
Przeprowadzone analizy parametryczne potwierdzają znaczący wpływ stabilizującej roli poszycia dachu na zwiększenie nośności granicznej elementów konstrukcji wsporczej.

Wykazano, że obliczona wg [10] minimalna sztywność S_{min} (1), przy której można uznać, że elementy konstrukcji wsporczej są w pełni zabezpieczone przed utratą stateczności, jest wartością bardzo konserwatywną. Nawet przy sztywnościach podparcia na poziomie $11\% \div 21\% S_{min}$ nośność graniczna konstrukcji wsporczej osiągała ponad 90% obciążenia granicznego przy sztywności podparcia S_{min} .

Stosunkowo wysoka wartość S_{min} (1) powoduje, że w przypadku dużej liczby blach trapezowych (tab. 1.), zgodnie z zapisami norm [10, 1], bez dodatkowych analiz nie można ich uznać za zabezpieczenie elementów przed utratą stateczności.

W przypadku płatwi o schematach 2 i 3 (rys. 6–11.) obciążenia graniczne wyznaczone metodą OIM bardzo szybko osiągają obciążenia graniczne elementu w pełni zabezpieczonego przed utratą stateczności i prawie w ogóle nie zależą od sztywności pod-

Schemat 3 - IPE 400



Rys. 11. Krzywe nośności granicznej – schemat 3, IPE 400

parcia. Jest to zaskakujące zjawisko, które jest ciekawym tematem do dalszych symulacji numerycznych i badań doświadczalnych.

Rozważano płatwie zginane jednokierunkowo. Na dachach o znacznym nachyleniu płatwie mogą być zginane dwukierunkowo, skręcane i często ściskane. Na podstawie przeprowadzonych analiz można wnioskować, że sprężyste podparcie boczne będzie zmniejszało zginanie na kierunku słabszej osi i skręcanie oraz poprawi stateczność płatwi.

Literatura

[1] PN-EN 1993-1-3:2008, Eurokod 3. Projektowanie Konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguly ogólne. Reguly uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.
 [2] European Recommendations for Application of Metal Sheeting Acting as Diaphragm – Stressed Skin Design, ECCS Publication No 88, 1995.
 [3] European Recommendations on the Stabilization of Steel Structures by Sandwich Panels, ISBN 978-90-6363-081-2, CIB Publication 379, 2nd Edition, 2014.
 [4] Ferenc Papp, 2016, Buckling assessment of steel members through overall imperfection method, *Engineering Structures* 106, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.021>.
 [5] József Szalai, 2017, Complete generalization of the Ayrtton-Perry formula for beam-column buckling problems; *Engineering Structures* 153, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.10.031>.
 [6] József Szalai, Ferenc Papp, 2019, New stability design methodology through overall linear buckling analysis, *Proceedings of Nordic Steel 2019*, vol. 3, Issue 3–4, <https://doi.org/10.1002/cepa.1145>.

[7] Ferenc Papp, József Szalai, Movahedi R. Majida, 2019, Out-of-Plane Buckling Assessment of Frames through Overall Stability Design Method, *Proceedings of Nordic Steel 2019*, vol. 3, Issue 3-4, <https://doi.org/10.1002/cepa.1146>.
 [8] Consteel 14, www.consteelsoftware.com.
 [9] Dariusz Czepizak, Adam Machowiak, 2021, Porównanie wybranych metod oceny momentu krytycznego zwichrzenia belek o zmiennej wysokości środka, *Inżynieria i Budownictwo nr 5-6/2021*, ISSN 0021-0315.
 [10] PN-EN 1993-1-1:2006, Eurokod 3. Projektowanie Konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguly ogólne i reguly dla budynków.
 [11] Determination of shear field stiffness and application in Consteel, *Consteel Knowledge Base*, 2021, <https://consteelsoftware.com/pl/knowledgebase/determination-of-shear-field-stiffness-and-application-in-consteel/>.
 [12] József Szalai, Ferenc Papp, 2011, Theory and application of the general method of Eurocode 3 Part 1-1, 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Budapest, Hungary 2011.
 [13] József Szalai, 2011, Practical application of the "General Method" of EN 1993-1-1, *New Steel Construction*, May 2011.
 [14] Eugen Chladny, Magdalena Stujberova, 2013, Frames with unique global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 1), *Stahbau* 82 (2013), Heft 8, DOI: 10.1002/stab.201310080.

DOI: 10.5604/01.3001.0015.8043

PRAWIDŁOWY SPOSÓB CYTOWANIA
 Czepizak Dariusz, Machowiak Adam, 2022, Wpływ sztywności blach fałdowych poszycia dachu na nośność płatwi, „*Builder*” 4 (297). DOI: 10.5604/01.3001.0015.8043

Streszczenie: W pracy badano nośność elementów konstrukcji wsporczej lekkiej obudowy hal stalowych z uwzględnieniem sprężystego podparcia bocznego wynikającego ze sztywności tarczowej obudowy (blach trapezowych). Przeprowadzono analizy parametryczne obciążenia granicznego płatwi zginanych jednokierunkowo. W analizach zmieniano schemat statyczny płatwi, przekrój oraz sztywność podparcia sprężystego na przesuwnie ich pasa górnego. Pominięto przy tym wpływ usztywnienia na obrót elementów, jakie zapewnia sztywność giętnej obudowy. Wykazano, że stosowanie uregulowań normowych bez wykorzystania zaawansowanych metod obliczeniowych prowadzi do konserwatywnej oceny nośności granicznej konstrukcji wsporczej lekkiej obudowy.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, blachy trapezowe, stężenie tarczowe, płatwie

Abstract: INFLUENCE OF STIFFNESS OF THE TRAPEZOIDAL STEEL SHEETING ROOF ON THE PURLIN RESISTANCE. The study investigated the load-bearing capacity of the supporting structure elements of the lightweight steel hall cladding, considering the elastic lateral support resulting from the stiffness of the trapezoidal steel sheeting acting as diaphragm. Parametric analyses of the load-bearing capacity of purlins acting in major axis bending were performed. In the analyses, the static scheme of the purlins, the cross-section and the stiffness of the elastic translational support of their top flange were changed. This ignores the effect of stiffening on component rotation provided by the flexural rigidity of the cladding. It has been shown that the application of standard regulations without the use of advanced calculation methods leads to a conservative assessment of the limit load-bearing capacity of a cladding support structure.

Keywords: steel structures, trapezoidal sheeting, diaphragm bracing, purlins