

prof. dr hab. inż. Antoni Biegus*
dr inż. Dariusz Czepiżak*

Analiza parametryczna zginania pasa górnego kratownic dachów bezpłatwowych

Parametric analysis of bending of the upper chord of purlinless roof truss

Streszczenie. W artykule omówiono warunki usztywnienia bocznego kratownic dachów bezpłatwowych blachami fałdowymi. Podano analizy parametryczne zginania międzywęzłowego ich pasów górnych. Porównano momenty zginające w pasach obliczone dla modeli kratownicy i belek.

Słowa kluczowe: kratownica bezpłatwiowa, zginanie pasów, analiza parametryczna.

Abstract. The conditions of the lateral bracing of the upper chords of purlinless truss executed by corrugated sheets have been discussed. The parametric analyses of their bending between nodes have been presented. The results of bending moments obtained for those chords and adequate beam models were compared.

Keywords: purlinless truss, chords in bending, parametric analysis.

Bogata oferta blach fałdowych i płyt warstwowych (o dostatecznej nośności i sztywności) umożliwia projektowanie dachów kratownicowych bez konieczności stosowania płatwi. Blachy fałdowe (wysokości konstrukcyjnej rzędu 200 mm) mogą być stosowane jako płyty dachowe o rozpiętości przęseł nawet 10 m. Są one bezpośrednio połączone z pasami górnymi kratownic i usztywniają je „bocznie”. Wylimitowanie płatwi z kratownicowej konstrukcji dachowej daje znaczne oszczędności kosztów i czasu realizacji obiektu. W analizowanych kratownicach obciążenie poprzeczne z dachu nie przekazuje się w węzłach, jak to przyjmuje się w idealnym modelu tego ustroju, lecz na ich pasy górne, które z tego powodu są wyteżone nie tylko siłami osiowymi, ale też zginane lokalnym obciążeniem poprzecznym. Podobne wyteżenie ustroju występuje w przypadku płatwi kratowych. W artykule podano warunki usztywnienia bocznego pasów górnych kratownic (z zastosowaniem blach fałdowych) oraz analizę parametryczną ich wyteżenia zginającego.

Sztywność podparcia bocznego pasa górnego kratownic bezpłatwowych

Pełne ciągle stężenie boczne pasa górnego kratownicy można uzyskać za pomocą blachy fałdowej połączonej w sposób ciągły (gęsty) ich dolnymi fałdami z pasem górnym kratownicy. Wówczas krępuje ona przemieszczenia liniowe i kątowe przylegającej półki pasa kratownicy. To skrępowanie wydatnie zwiększa nośność pasa z warunku wyboczenia w płaszczyźnie połączy dachu oraz zwłoczenia (rysunek 1). Pas górny kratownicy w miejscu połączenia z blachą fałdową uważa się za stężony w płaszczyźnie połączy dachu, jeśli spełniony jest warunek:

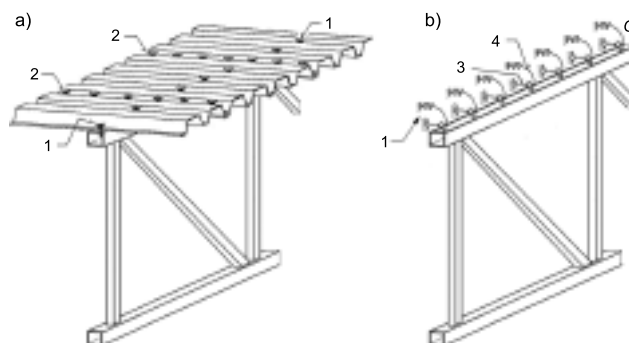
$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_r + EI_z h^2 \frac{\pi^2}{4L^2} \right) \frac{70}{h^2} \quad (1)$$

Sztywność postaciową S poszycia z blachy fałdowej połączonej z pasem górnym kratownicy w dolinie każdej fałdy, po obu stronach zakładki i na obu brzegach, można obliczać ze wzoru:

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

W (1) i (2) zastosowano oznaczenia wg [3]. Jeśli blacha fałdowa jest połączona z pasem górnym kratownicy w co drugiej fałdzie,

* Politechnika Wrocławska; Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego



Rys. 1. Stężenie kratownicy tarczą z blachy fałdowej: a) model fizyczny; b) model obliczeniowy: 1 – łącznik główny; 2 – łącznik wzdłużny; 3 – ograniczenie przemieszczeń bocznych pasa górnego; 4 – ograniczenie obrotu pasa górnego kratownicy

to zamiast S w (1) przyjmuje się sztywność postaciową $0,2S$, co świadczy o wadze gęstości tych połączeń w ocenie usztywnienia tarczowego. Aby blachę fałdową można było uznać za usztywnienie tarczowe, należy ją połączyć w każdej fałdzie z pasem górnym kratownicy. Ponadto trzeba zastosować łączniki wzdłużne „zszywające” ze sobą sąsiednie arkusze blach fałdowych. Ich odległość nie powinna przekraczać 300 mm. W świetle aktualnej wiedzy tarcza z płyt warstwowych nie jest uznawana za usztywnienie „boczne” przed utratą stateczności dźwigarów. Wynika to m.in. z powodu połączeń płyt warstwowych z dźwigarem „wysokimi” śrubami, które charakteryzuje duża odkształcalność, a także braku łączników „wzdłużnych” między sąsiednimi płytami.

Analiza parametryczna wyteżenia zginającego pas górnym kratownic bezpłatwowych

W kratownicach dachów bezpłatwowych, a także w przypadku płatwi kratowych, obciążenie poprzeczne q (od ciężaru własnego, śniegu i wiatru) jest przekazywane bezpośrednio na pas górny i powstają w nim momenty zginające $M_{i,Ed}$. W wyniku globalnego wyteżenia kratownicy w pasie górnym występują siły osiowe ściskające $N_{i,c,Ed}$ lub rozciągające $N_{i,t,Ed}$. Komplet sił wewnętrznych ($M_{i,Ed}$, $N_{i,c,Ed}$, $N_{i,t,Ed}$) analizowanych kratownic otrzymuje się, przyjmując model obliczeniowy ustroju w postaci np. ramownicy

z ciągłymi pasami (górnym oraz dolnym) i o wykratowaniu połączonym z pasami przegubowo lub w sposób sztywny.

Alternatywnie można oszacować zginanie międzywęzłowe pasów górnych badanych kratownic sposobem uproszczonym. Wyznacza się wtedy siły osiowe, obciążając kratownicę siłami skupionymi w węzłach (reakcjami poszczególnych prętów w węzłach górnych), a następnie dodatkowo uwzględnia zginanie międzywęzłowe pasów górnych. Momenty zginające pasów kratownic określa się wówczas, przyjmując ich zastępczy schemat belkowy.

W oszacowaniu zginania międzywęzłowego pasów górnych kratownic dachów bezpłatniowych od obciążenia poprzecznego przyjmuje się następujące modele obliczeniowe:

- model 1 – kratownica o ciągłych pasach (analiza sprężysta) – rysunek 2a;
- model 2 – belka wieloprzęsłowa o podporach sztywnych (analiza sprężysta) – rysunek 2b;
- model 3 – belka wieloprzęsłowa na sprężystych podporach (analiza sprężysta) – rysunek 2c [2];
- model 4 – belki jednoprzęsłowe o schematach „przegubowo-sztywnym” dla przęśła skrajnego i o „sztywno-sztywnym” dla przęśła pośredniego (analiza sprężysta) – rysunek 2d;
- model 5 – belka wieloprzęsłowa o podporach sztywnych (analiza plastyczna) – rysunek 2e [1].

W celu oceny tych modeli obliczeniowych wykonano ich porównania. Moment zginający $M_{i,Ed}^j$ w pasie górnym kratownicy obciążonej pozawęzłowo wyznacza się ze wzoru

$$M_{i,Ed}^j = m_i^j q a^2 \quad (3)$$

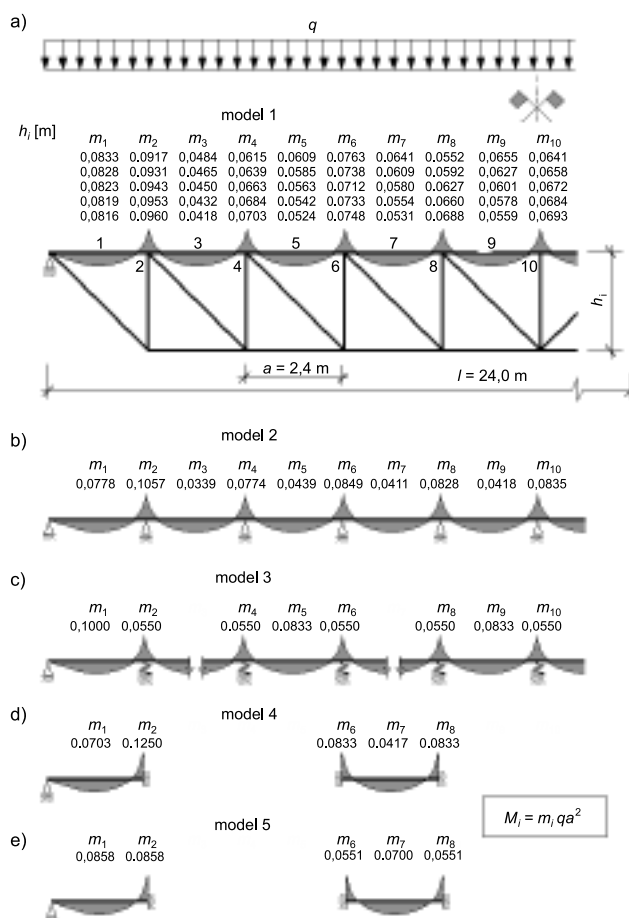
gdzie:

m_i^j – współczynnik momentu zginającego w przekroju i , obliczony wg modelu j ;
 q – obciążenie poprzeczne pasa górnego kratownicy bezpłatniowej;
 a – długość przedziału („oczka”) pasa górnego kratownicy bezpłatniowej.

Wykonano parametryczne analizy rzeczywistych jednoprzęsłowych przegubowo podpartych kratownic o rozpiętości $l = 24,0$ m (rysunek 2a). Obciążenie poprzeczne pasa górnego kratownicy wynosiło $q = 10$ kN/m. Ich zmiennymi parametrami była wysokość h_p , która wynosiła: $h_1 = 2,0$ m ($l/12$); $h_2 = 2,18$ m ($l/11$); $h_3 = 2,4$ m ($l/10$); $h_4 = 2,4$ m ($l/9$) i $h_5 = 3,0$ m ($l/8$). W analizie wg modelu 1 przyjęto, że ciągle pasy górne z dwuteowników HEA i ciągle pasy dolne z rur kwadratowych są przegubowo połączone z wykratowaniem z rur kwadratowych. Współczynniki momentu zginającego m_i^1 obliczone wg modelu 1 podano na rysunku 2a, natomiast na rysunkach od 2b do 2e współczynniki m_i^{2-5} obliczone wg modeli 2÷5.

Z analizy rysunku 2a (model 1) wynika, że wraz ze wzrostem wysokości kratownicy h_p , w jej przypodporowym pasie górnym przeszłowe momenty zginające $M_{1,Ed}^1$ maleją, wzrastają zaś przywęzłowe momenty zginające $M_{2,Ed}^1$. Różnica ich wartości nie przekracza 5%. Przęśłowe momenty zginające w modelu 1 są większe od ich oszacowań wg modelu 2 oraz modelu 4, tj. $M_{1,Ed}^1 > M_{1,Ed}^2 > M_{1,Ed}^4$ (różnice oszacowań wynoszą nawet 15,6%). Przywęzłowe momenty zginające pasa górnego w przęśle przypodporowym kratownicy obliczone wg modelu 1 są większe od ich oszacowań wg modelu 3 oraz modelu 5, tj. $M_{2,Ed}^1 > M_{2,Ed}^3 > M_{2,Ed}^5$ (w przypadku oszacowania wg modelu 3 różnica wynosi 42,7%).

W wymiarowaniu pasa górnego kratownicy (o stałym na długości przekroju poprzecznym) ma zazwyczaj zasadnicze znaczenie wyłączenie zginające przęśła pośrednich, w których występuje maksymalna siła ściskająca $N_{c,i,Ed}$. Z analizy rysunku 2a (model 1) wynika, że w pasach górnych w środku rozpiętości kratownicy wraz ze wzrostem jej wysokości h , przęśłowe momenty zginające $M_{9,Ed}^1$ maleją (różnica rzędu 17%), wzrastają zaś przywęzłowe momenty zginające $M_{10,Ed}^1$



Rys. 2. Współczynniki momentu zginającego pasa górnego kratownicy

(różnica rzędu 8%). Należy zwrócić uwagę, że oszacowanie zginania tego przęśła pasa wg modelu 2 i modelu 4, w stosunku do oceny wg modelu 1, daje zaniżenie aż o 36,3% wartości przęśłowego momentu zginającego, tj. $M_{9,Ed}^2 > M_{9,Ed}^4 > M_{9,Ed}^1$. W stosunku do oceny wg modelu 1, zaniżenie przywęzłowego momentu zginającego o 20,6% występuje też w przypadku oszacowania wg modelu 3, tj. $M_{10,Ed}^3 > M_{10,Ed}^1$.

Na podstawie wykonanej analizy porównawczej stwierdzono, że proponowane w literaturze aproksymacyjne modele 2 ÷ 4 obliczania momentów zginających pasów górnych kratownic obciążonych międzywęzłowo nie dają bezpiecznej oceny ich wyłączenia. Powinny być one stosowane tylko jako oszacowania we wstępnych analizach projektowania kratownic. Dostępne programy komputerowe umożliwiają w stosunkowo prosty sposób wykonanie analiz globalnych kratownic wg np. modelu 1 i bezpośrednio wyznaczenie miarodajnych do wymiarowania sił wewnętrznych. Z wykonanych analiz parametrycznych wynika, że wraz ze zmniejszaniem się wysokości konstrukcyjnej h_p wzrastają przęśłowe momenty zginające pasów górnych środkowej części kratownic (np. $M_{9,Ed}^1$; istotnych w wymiarowaniu tych prętów) i jednocześnie maleją momenty zginające w przekrojach węzłowych z wyjątkiem $M_{6,Ed}^1$.

Literatura

- [1] Biegus A. Stalowe budynki halowe. Arkady, Warszawa 2003.
- [2] Bródka J., Broniewicz M., Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodów. Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów 2013.
- [3] PN-EN 1993-1-3 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Cz. 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno.