

prof. dr hab. inż. Antoni Biegus<sup>1\*)</sup>  
dr inż. Dariusz Czepiżak<sup>1)</sup>

# Projektowanie kratownic dachów bezpłatwowych z zastosowaniem blach trapezowych

*Corrugated sheet as a bracing of flat truss chords their out-plane buckling*

DOI: 10.15199/33.2015.06.01

**Streszczenie.** W artykule omówiono warunki usztywnienia bocznego blachami trapezowymi kratownic dachów bezpłatwowych. Podano analizy parametryczne zginania międzywęzłowego ich pasów górnych. Porównano momenty zginające w pasach obliczone dla modeli kratownicy i belek. Zaprezentowano modele obliczeniowe oceny sprężystego podparcia bocznego pasów dolnych kratownic, w wyniku jej zamocowania w obudowie dachowej z blach trapezowych. Przedstawiono procedury oceny nośności na wyoboczenia pasów dolnych z płaszczyzny kratownicy usztywnionej dachowymi blachami trapezowymi.

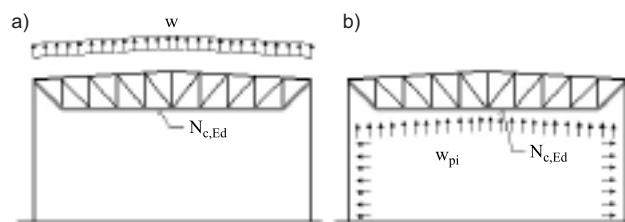
**Słowa kluczowe:** kratownica bezpłatwiowa, zginanie pasów, analiza parametryczna, blacha trapezowa, usztywnienie boczne pasa kratownicy.

**Abstract.** The conditions of the lateral bracing of the upper chords of purlinless truss executed by trapezoidal 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. The calculation models for assessment of the lateral supporting of the bottom truss chords as the flexible restraint in the roof trapezoidal sheets were given. The procedures of the assessment resistance due to out-plane buckling of the bottom truss chord braced by roof sheeting were presented.

**Keywords:** purlinless truss, chords in bending, parametric analysis, trapezoidal sheet, lateral bracing of chord.

Współcześnie produkowane blachy trapezowe mogą być stosowane jako płyty dachowe o rozpiętości przęsł nawet 10 m. Umożliwia to projektowanie m.in. dachów kratownicowych bez konieczności stosowania płatwi. Wyeliminowanie płatwi z kratownicowej konstrukcji dachowej zapewnia zmniejszenie kosztów i skrócenie czasu realizacji obiektu. W analizowanych kratownicach obciążenie poprzeczne z dachu nie jest przekazywane na węzły, jak przyjmuje się w idealnym modelu tego ustroju, lecz na ich pasy górne. Sprawia to, że są one wyężone nie tylko siłami osiowymi, ale też zginane lokalnym obciążeniem poprzecznym. Ponadto w konstrukcjach kratownic dachów bezpłatwowych blachy trapezowe, odpowiednio połączone z pasem górnym kratownicy, stanowią jego usztywnienie boczne i zabezpieczenie przed wyoboczeniem w płaszczyźnie połączenia dachu. Podobne wyężenie ustroju występuje w przypadku płatwi kratowych.

W wyniku oddziaływania „unoszącego” (rysunek 1a) lub ciśnienia wewnętrznego od obciążenia wiatru (rysunek 1b) w pasach dolnych kratownic mogą wystąpić siły ściskające  $N_{c,Ed}$ . W celu zmniejszenia długości wyoboczeniowej pasów dolnych z płaszczyzny kratownicy stosuje się zazwyczaj odpowiednie stężenia prętowe [1, 3]. W wielu przypadkach sztywność giętna blachy trapezowej i sztywność skrętna jej połączenia z pasem górnym może być wykorzystana w ocenie wyoboczenia ściskanego pasa dolnego z płaszczyzny kratownicy, gdyż sztywność skrętna ustroju ogranicza jego przemieszczenia boczne [2, 5]. Analizowane zagadnienie jest bardzo podobne do przypadku płatwi usztywnionych poszyciem dachowym [3, 4, 9].



**Rys. 1. Przykłady występowania ściskania pasów dolnych kratownic płaskich**

*Fig. 1. Examples of flat truss bottom chords subjected to compression*

W artykule omówiono warunki usztywnienia bocznego blachami trapezowymi kratownic dachów bezpłatwowych. Podano analizy parametryczne zginania międzywęzłowego ich pasów górnych i przedstawiono modele oraz zasady oceny wyoboczenia pasów górnych oraz pasów dolnych z płaszczyzny kratownic płaskich w wyniku ich usztywnienia bocznego obudową dachową z blach trapezowych. Ponadto omówiono procedury obliczeniowe wyoboczenia jednogłęziowych pasów dolnych z płaszczyzny kratownicy.

## Kategorie konstrukcyjne blach fałdowych

Zakładane zadanie konstrukcyjne i uwzględniany w obliczeniach zakres współdziałania z ustrojem nośnym pozwalają wyróżnić trzy klasy konstrukcyjne blach trapezowych [10]. Konstrukcje, które projektuje się, uwzględniając udział blach trapezowych w ocenie nośności i stateczności całego ustroju nośnego (np. rygla dachowego, słupa, ramy układu poprzecznego), zalicza się do klasy konstrukcyjnej I. Jeśli usztywnienie z blach trapezowych uwzględnia się w obliczeniach nośności oraz stateczności pojedynczych elementów (np. płatwi, rygla ściennych), to są one klasy konstrukcyjnej II. Natomiast konstrukcje, które projektuje się

<sup>1)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego  
<sup>\*)</sup> Autor do korespondencji: e-mail: antoni.biegus@pwr.edu.pl

przy założeniu, że blacha trapezowa przenosi tylko zewnętrzne obciążenia poprzeczne i przekazuje je na układ konstrukcyjny, zalicza się do klasy konstrukcyjnej III.

Blachy trapezowe klasy I i II są nie tylko płytą osłonową zginaną obciążeniem poprzecznym, ale również, przenosząc obciążenie tarczowe, są częścią składową głównego ustroju nośnego obiektu, która zapewnia niezbędną sztywność oraz stateczność. W tym sensie (podobnie jak np. stężenia prętowe), blacha trapezowa jako usztywnienie tarczowe jest elementem ustroju nośnego obiektu.

W przypadku blach trapezowych usztywniających ustrój nośny bardzo ważne jest staranne wykonanie ich połączeń ze stężanymi elementami. Jakość ich wykonania podlega kontroli i odbiorowi technicznemu [11], podobnie jak np. zbrojenie w konstrukcjach żelbetonowych. Ponadto w projektach takich obiektów powinny być oznaczone blachy fałdowe, które pełnią stężące zadanie konstrukcyjne. Dodatkowo w zrealizowanych dachach muszą być umieszczone tablice ostrzegawcze informujące o zakazie ich modernizacji, np. wykonania otworów, bez wykonania wcześniejszych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych. Zgodnie z [11], grubość ścianek takich blach trapezowych nie może być mniejsza niż 0,7 mm.

Blacha trapezowa odpowiednio połączona z pasem górnym kratownicy płaskiej (konstrukcji klasy I lub II) może być uwzględniona w ocenie stateczności z płaszczyzny ustroju zarówno jej pasów górnych, jak i pasów dolnych [2, 3, 4].

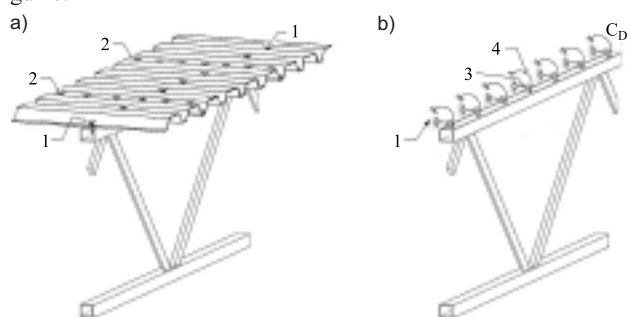
### Sztywność podparcia bocznego pasów górnych kratownic płaskich

Zgodnie z [10] pełne ciągłe stężenie boczne pasa górnego kratownicy można uzyskać za pomocą blachy trapezowej (rysunek 2). Musi być ona połączona w sposób ciągły (gęsty) ich dolnymi fałdami z pasem górnym kratownicy. Wówczas krępuje przemieszczenia liniowe w płaszczyźnie połączy dachu, a także kątowe pasa górnego kratownicy. To skrępowanie wydatnie podnosi nośność pasa górnego z warunku jego wybożenia w płaszczyźnie połączy dachu, a także zwichrzenia kratownicy.

Pas górny kratownicy jest stężony w płaszczyźnie poszycia dachu, czyli zabezpieczony przed wybożeniem z płaszczyzny ustroju [10], gdy spełniony jest warunek:

$$S \geq [EI_{\omega} (\pi^2/L^2) + GI_T + EI_z h^2 (\pi^2/4L^2)] (70/h^2) \quad (1)$$

gdzie:



Rys. 2. Schemat stężenia kratownicy płaskiej dachową tarczą z blachy trapezowej: a) model fizyczny, b) model obliczeniowy; 1 – łącznik główny, 2 – łącznik wzłużny, 3 – więź ograniczająca przemieszczenie boczne pasa górnego kratownicy, 4 – więź ograniczająca skręcanie pasa górnego kratownicy

Fig. 2. The scheme of bracing of the flat truss by the roof diaphragm constructed from corrugated sheets: a) physical model; b) calculation model; 1 – main connector; 2 – longitudinal connector; 3 – restraint limiting the lateral displacement of the truss upper chord; 4 – restraint limiting the torsion of the truss upper chord

S – sztywność postaciową poszycia z blachy trapezowej połączonej z pasem górnym kratownicy w dolinie każdej fałdy, po obu stronach zakładki i na obu brzegach można obliczyć [10] ze wzoru:

$$S = 1000\sqrt{t^3} (50 + 10\sqrt[3]{b_{\text{roof}}}) s/h_w \text{ [N]} \quad (2)$$

gdzie:

t – obliczeniowa grubość blachy poszycia [mm];

$b_{\text{roof}}$  – szerokość dachu [mm];

s – rozstaw stężanych prętów [mm];

$h_w$  – wysokość profilu poszycia [mm];

$I_{\omega}$  – moment bezwładności przy skręcaniu skrępowanym (wycinkowy) przekroju stężanego pręta;

$I_t$  – moment bezwładności przy skręcaniu swobodnym (St. Venanta) przekroju stężanego pręta;

$I_z$  – moment bezwładności przekroju stężanego pręta względem osi;

L – długość stężanego pręta;

h – wysokość przekroju stężanego pręta.

Aby blacha trapezowa stanowiła usztywnienie tarczowe, należy ją połączyć w każdej fałdzie z pasem górnym kratownicy. O znaczeniu gęstości tych połączeń w stężeniu świadczy fakt, że gdy są one w co drugiej fałdzie, to zamiast S w (1) przyjmuje się 0,2S, tj. aż pięciokrotnie mniejszą sztywność postaciową poszycia. W przypadku występowania obciążeń „unoszących”, podkładki pod łbami łączników muszą być o odpowiedniej średnicy, aby nie występowało zniszczenie blachy trapezowej w wyniku przeciągania łba łącznika. Ponadto należy dać łączniki wzłużne, „zszywające” ze sobą sąsiednie arkusze blach trapezowych, w odległości nie mniejszej niż 300 mm (rysunek 2).

W wymiarowaniu prętów kratownic analizuje się ich wybożenie w płaszczyźnie oraz z płaszczyzny ustroju. Długość wybożeniową w płaszczyźnie  $l_{ey}$  oraz z płaszczyzny  $l_{ez}$  ustroju prętów kratownic oblicza się ze wzorów:

$$l_{ey} = k_y l_y \quad (3)$$

$$l_{ez} = k_z l_z \quad (4)$$

gdzie:

$k_y, k_z$  – współczynniki długości wybożeniowej odpowiednio w płaszczyźnie (y) oraz z płaszczyzny (z) kratownicy;

$l_y$  – odległość między węzłami w płaszczyźnie kratownicy;

$l_z$  – odległość między punktami nieprzesuwanego podparcia w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny kratownicy.

Jeśli zastosowano odpowiednie połączenia blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy i spełniony jest warunek (1), to można przyjąć, że jest on zabezpieczony przed wybożeniem w płaszczyźnie połączy dachu. Wówczas w wymiarowaniu pasa górnego uwzględnia się tylko wybożenie w płaszczyźnie kratownicy oraz zginanie międzywęzłowe.

### Analiza parametryczna zginania pasa górnego kratownic dachów bezpłatwionych

Zginające obciążenie poprzeczne q (od ciężaru własnego, śniegu i wiatru) kratownic dachów bezpłatwionych jest przekazywane bezpośrednio na pas górny i powstają w nim momenty zginające  $M_{i,Ed}$ . Jednocześnie w wyniku globalnego wyteżenia kratownicy w jej 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.

W literaturze przedmiotu, np. [1, 3, 5], proponuje się alternatywne oszacowanie wyteżenia pasów górnych badanych kratownic sposobem uproszczonym. Wyznacza się wtedy siły osiowe, ob-

ciążając kratownicę siłami skupionymi w węzłach, a następnie dodatkowo uwzględnić się zginanie międzywęzłowe pasów górnych. Momenty zginające pasów górnych kratownic określa się wówczas, przyjmując ich zastępczy schemat belkowy.

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

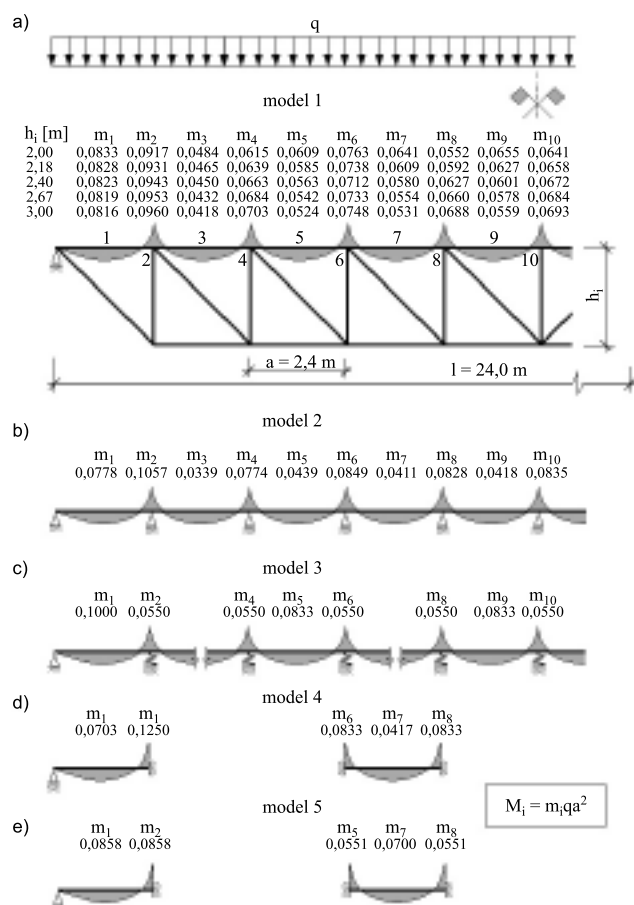
- **model 1** – kratownicy o ciągłych pasach (analiza sprężysta) – rysunek 3a;
- **model 2** – belki wieloprzęsłowej o podporach sztywnych (analiza sprężysta) – rysunek 3b;
- **model 3** – belki wieloprzęsłowej na sprężystych podporach (analiza sprężysta) – rysunek 3c [3];
- **model 4** – belek jednoprzęsłowych o schematach „przegubowo-sztywnym” dla przeszła skrajnego i „sztywno-sztywnym” dla przeszła pośrednich (analiza sprężysta) – rysunek 3d [5];
- **model 5** – belki wieloprzęsłowej o podporach sztywnych (analiza plastyczna) – rysunek 3e [1].

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

$$M_{i,Ed}^j = m_i^j q a^2 \quad (5)$$

gdzie:

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



**Rys. 3. Współczynniki momentu zginającego  $m_i^j$  pasa górnego kratownicy**  
 Fig. 3. The coefficients of the bending moment  $m_i^j$  of the upper chord of the truss

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

Na podstawie analizy rysunku 3a (model 1) stwierdzono, że wraz ze wzrostem wysokości kratownicy  $h_i$ , przeszłowe momenty zginające  $M_{1,Ed}^1$  w jej przypodporowym pasie górnym maleją, natomiast zwiększają się przywęzłowe momenty zginające  $M_{2,Ed}^1$ . Różnica ich wartości nie przekracza 5%. Prześłowe momenty zginające w modelu 1 są większe od ich oszacowań wg modelu 2 oraz modelu 4, tj.  $M_{1,Ed}^1 > M_{1,Ed}^2 > M_{1,Ed}^4$  (różnica wynosi nawet 15,6%). Przywęzłowe momenty zginające pasa górnego w przeszle 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 oceny wg modelu 3 różnica wynosi 42,7%).

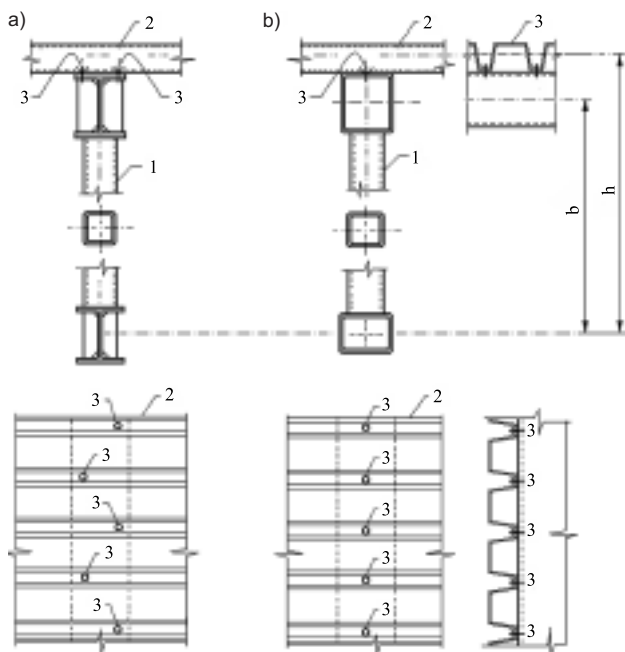
W wymiarowaniu pasa górnego kratownicy (o stałym na długości przekroju poprzecznym) zazwyczaj zasadnicze znaczenie ma wyężenie zginające przeszle pośrednich, w których występuje maksymalna siła ściskająca  $N_{c,t,Ed}$ . Z analizy rysunku 3a (model 1) wynika, że w pasach górnych w środku rozpiętości kratownicy, wraz ze wzrostem jej wysokości  $h_i$ , przeszłowe momenty  $M_{9,Ed}^1$  maleją (różnica rzędu 17%), a wzrastają przywęzłowe momenty zginające  $M_{10,Ed}^1$  (ich różnica wynosi ok. 8%). Należy zwrócić uwagę, że oszacowanie zginania tego przeszła pasa wg modelu 2 i modelu 4, w stosunku do oceny wg modelu 1, daje zniżenie aż o 36,3% wartości przeszłowego momentu zginającego, tj.  $M_{9,Ed}^1 > M_{9,Ed}^2 > M_{9,Ed}^4$ . W stosunku do oceny wg modelu 1, zniżenie przywęzłowego momentu zginającego o 20,6% występuje też w przypadku oszacowania wg modelu 3, tj.  $M_{10,Ed}^1 > M_{10,Ed}^3$ .

Proponowane w literaturze, np. [1, 3, 5], aproksymacyjne belkowe modele 2 ÷ 4 obliczania momentów zginających pasów górnych kratownic obciążonych międzywęzłowo nie zapewniają bezpiecznej oceny ich wyężenia. Powinny one być 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 sił wewnętrznych miarodajnych do ich wymiarowania. Z wykonanych analiz parametrycznych wynika, że wraz z zmniejszaniem się wysokości konstrukcyjnej  $h_i$  wzrastają przeszłowe momenty zginające pasów górnych środkowej części kratownic (np.  $M_{9,Ed}^1$ ; istotne w wymiarowaniu tych prętów) i jednocześnie maleją momenty zginające w przekrojach węzłowych.

### Sztywność podparcia bocznego pasów dolnych kratownic płaskich

W przypadku ściskanych pasów dolnych kratownic płaskich ich długość wybozeniowa z płaszczyzny ustroju  $l_{cz}$  jest zazwyczaj duża, dlatego też w celu jej skrócenia stosuje się stężenia międzywiązarowe [1]. Takie podejście jest słuszne, gdy zakłada się przegubowe połączenie obudowy dachowej z pasem górnym kratownicy płaskiej. W dachach bezpłatwiowych, gdy blacha trapezowa jest odpowiednio połączona z pasem górnym kratownicy, poprzeczna sztywność skrętna ustroju ogranicza przemieszczenie boczne jej

pasa dolnego. To sprężyste „zamocowanie” kratownicy w obudowie dachowej można uwzględnić w ocenie wybożenia jej pasa dolnego z płaszczyzny ustroju. Przykłady takich połączeń blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy pokazano na rysunku 4.



**Rys. 4. Przykłady połączeń blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy: 1 – kratownica; 2 – blacha trapezowa; 3 – łącznik**  
 Fig. 4. Examples connection of corrugated sheet with bottom chord truss: 1 – truss; 2 – corrugated sheet; 3 – connector

Warunkiem zastosowania analizowanego modelu obliczeniowego oceny stateczności pasów dolnych z płaszczyzny ustroju jest również odpowiednia konstrukcja kratownicy. Połączenia prętów wykratowania muszą mieć dostateczną sztywność giętą oraz nośność w płaszczyźnie prostopadłej do ustroju, np. rurowe końcówki krzyżulców i słupków kratownicy powinny być bez spłaszczeń i wyobień oraz całym obwodem przyspawane do pasów. Ich połączenia z pasami muszą być zaprojektowane na pełną nośność łączonego pręta wykratowania.

W ocenie zachowania się kratownicy przyjmuje się jej ciągle nieprzesuwne podparcie w płaszczyźnie połąci dachu i sprężyste podparcie ze względu na obrót  $C_D$  (rysunek 5c). Uproszczenie tego modelu polega na zastąpieniu podparcia w osi pasa górnego przeciw skręcaniu o sprężystości  $C_D$ , podparciem liniowym pasa dolnego w kierunku prostopadłym do płaszczyzny kratownicy, o sprężystości równoważnej  $K$  (rysunek 5d), którą wyznacza się ze wzoru:

$$K = 1/(1/K_{roof} + 1/K_{con} + 1/K_d) \quad (6)$$

gdzie:

- $K_{roof}$  – sprężystość giętą blachy trapezowej;
- $K_{con}$  – sprężystość giętą połączenia blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy;
- $K_d$  – sprężystość giętą wykratowania kratownicy.

W ocenie stateczności z płaszczyzny kratownicy, pas dolny (swobodny) jest traktowany jak ściskany pręt na sprężystym podłożu obustronnym o sprężystości zastępczej  $K$  i schemacie pokazanym na rysunku 5e. Sprężystość giętą blachy trapezowej  $K_{roof}$ , połączenia blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy  $K_{con}$  oraz wykratowania kratownicy  $K_d$  są obliczane na jednostkę długości pasa dolnego kratownicy. Schematy ich modeli obliczeni-

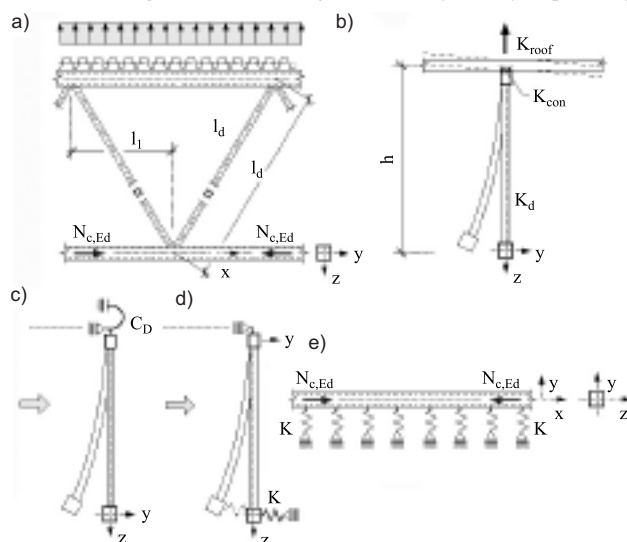
wych pokazano na rysunku 6, a sposób wyznaczania sprężystości giętych  $K_{roof}$ ,  $K_{con}$ ,  $K_d$  przedstawiono w [2]. Sprężystość giętą blachy trapezowej  $K_{roof}$  [2] (rysunek 6a) wynosi:

$$K_{roof} = 2EI_{roof}/(h^2l_{roof}) \quad (7)$$

gdzie:

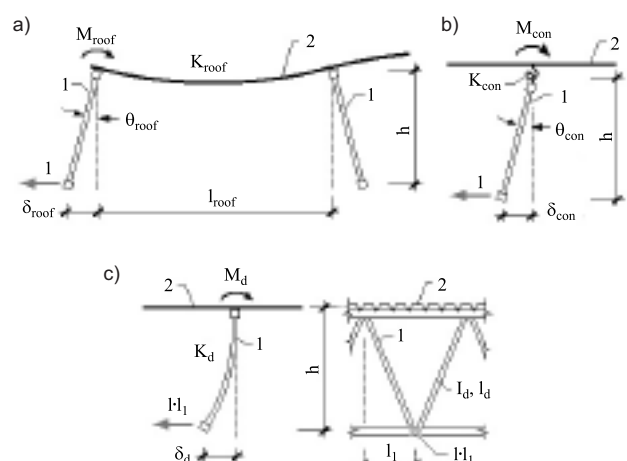
- $h$  – odległość między osią blachy trapezowej i osią pasa dolnego kratownicy;
- $l_{roof}$ ,  $I_{roof}$  – rozpiętość przęsła i moment bezwładności blachy trapezowej;
- $E$  – moduł sprężystości podłużnej stali.

Sprężystość połączenia  $K_{con}$  ma zazwyczaj największy wpływ na sztywność liniowego podparcia sprężystego  $K$  pasa dolnego kratownicy. Odształcalność tego połączenia jest dosyć duża. Aby uzyskać jego wystarczającą sztywność, stosuje się łączniki umieszczone naprzemiennie (rysunek 4a), a niekiedy po 2 wkręty lub wstrzeliwane gwoździe w każdej dolinie fałdy blachy trapezowej.



**Rys. 5. Schematy modelu fizycznego i modeli obliczeniowych ściskanego pasa dolnego stężonego bocznie sprężystym połączeniem kratownicy płaskiej z dachową blachą trapezową**

Fig. 5. Schemes of a physical and calculation model of the compression bottom chord laterally restrained by the flat truss to roof corrugated sheet connection



**Rys. 6. Schematy wyznaczania sprężystości giętej: a) blachy trapezowej  $K_{roof}$ ; b) połączenia blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy  $K_{con}$  i c) wykratowania kratownicy  $K_d$ : 1 – kratownica; 2 – blacha trapezowa**

Fig. 6. Schemes for determining the flexural stiffness of: a) corrugated sheet  $K_{roof}$ ; b) connection between corrugated sheet and upper chord of the truss  $K_{con}$ ; c) web members  $K_d$ : 1 – truss; 2 – corrugated sheet

Sprężystość połączenia  $K_{con}$  wyznacza się doświadczalnie [10], numerycznie (np. [4]) lub oblicza wg oszacowań zaproponowanych (na podstawie obszernych badań) przez Lindnera [6, 7, 8] i przyjętych w PN-EN 1993-1-3 [10]. W [10] podano też zasady wyznaczania sprężystości obrotowej połączenia blachy trapezowej z belką (pasmem górnym kratownicy)  $C_{D,A}$ , którą wyznacza się ze wzoru:

$$C_{D,A} = C_{100} k_{ba} k_i k_A k_{bT} \quad (8)$$

gdzie:

$C_{100}$  – współczynnik bazowy dla pasa stężanego elementu szerokości 100 mm;

$k_i$  – współczynniki zależne od szerokości pasa stężanego elementu, geometrii oraz ułożenia arkusza blachy trapezowej, rozstawu łączników oraz od kierunku i wartości obciążenia przekazywanego z poszycia na stężany element.

Współczynniki  $k_i$  ustala się wg pkt 10.1.5.2 PN-EN 1993-1-3 [10], a sztywność giętą połączenia blachy trapezowej z pasem górnym kratownicy  $K_{con}$  oblicza [2] ze wzoru:

$$K_{con} = C_{D,A} / h^2 \quad (9)$$

W przypadku jednakowych prętów krzyżulców kratownicy, jak na rysunku 6a (z wykratowaniem typu V) [2], sztywność giętą wykratowania  $K_d$  wynosi:

$$K_d = 3EI_d / (l_1 l_d^3) \quad (10)$$

gdzie:

$l_1$  – odległość między węzłem pasa górnego i węzłem pasa dolnego kratownicy;

$l_d$ ,  $I_d$  – długość i moment bezwładności przekroju pręta wykratowania (rysunek 5c).

W kratownicach o zmiennej wysokości konstrukcyjnej na długości we wzorze (11) można przyjąć  $l_1$  i  $l_d$  w przekroju, w którym występuje maksymalna siła ściskająca w pasie dolnym  $N_{c,Ed}$ .

### Obciążenie krytyczne i długość wyboczeniowa pasa dolnego stężonego bocznie sprężystym zamocowaniem kratownicy w obudowie dachowej

Schemat modelu obliczeniowego ściskanego pasa dolnego stężonego bocznie sprężystym „zamocowaniem” kratownicy w obudowie dachowej pokazano na rysunku 5e. W ocenie na wyboczenie z płaszczyzny kratownicy (względem osi z) jest on traktowany jako pręt ściskany na sprężystym podłożu o sprężystości  $K$ . W przypadku pokazanym na rysunku 1, obciążenie krytyczne [12] z płaszczyzny kratownicy (względem osi z) jednoogłazowego pasa dolnego (rysunek 4) sprężystość stężonego bocznie można obliczyć ze wzoru:

$$N_{cr,z,1} = 2 \sqrt{KEI_z} \quad (11)$$

gdzie:

$I_z$  – moment bezwładności pasa dolnego kratownicy względem osi.

Długość wyboczeniową jednoogłazowego ściskanego pasa dolnego (rysunek 4) z płaszczyzny kratownicy  $l_{ez}$  wyznacza się ze wzoru:

$$l_{ez} = \pi \sqrt[4]{EI_z / (4K)} \quad (12)$$

Obliczeniową nośność na ściskanie pasa dolnego kratownicy można wyznaczyć wg zasad podanych w PN-EN 1993-1-1 [9]. Przykład obliczeń oceny nośności ściskanego pasa dolnego usztywnionego bocznie sprężystym zamocowaniem kratownicy w obudowie dachowej podano w [2].

### Wnioski

Belkowe modele  $2 \div 4$  (proponowane m.in. w [1, 3, 5]) obliczenia momentów zginających pasów górnych kratownic obciążonych międzywęzłowo nie zapewniają bezpiecznej oceny ich wytrzymałości. W związku z tym należy stosować analizę globalną kratownic jako ramownic (np. wg modelu 1) i bezpośrednio wyznaczać ich miarodajne do wymiarowania siły wewnętrzne w ściskanych i zginanych pasach górnych. Z wykonanych analiz parametrycznych wynika, że wraz ze zmniejszaniem się wysokości konstrukcyjnej badanych ustrojów wzrastają przeszłowe momenty zginające pasów górnych środkowej części kratownic (istotne w wymiarowaniu tych prętów) i jednocześnie maleją momenty zginające w przekrojach węzłowych.

W dachach bezpłatwowych blachy trapezowe, odpowiednio połączone z pasem górnym kratownic, mogą być uwzględniane w ocenie stateczności z płaszczyzny ustroju zarówno ich pasów górnych, jak i pasów dolnych. Przyjęcie w obliczeniach poszycia dachowego, jako zabezpieczenie przed utratą stateczności, pasów kratownic z płaszczyzny ustroju wymaga szczególnie starannego wykonawstwa połączeń blachy trapezowej z ich pasem górnym, a także kontroli ich jakości.

Usztywnienie boczne tarczą z blach trapezowych zazwyczaj skutecznie zabezpiecza pasy górne kratownic płaskich przed ich wyboczeniem w płaszczyźnie połączy dachu. Ponadto w niektórych przypadkach sztywność skrętna ustroju złożonego z poszycia dachowego połączonego z kratownicą płaską ogranicza przemieszczenia boczne jej pasa dolnego. Wówczas sprężyste „zamocowanie” kratownicy w obudowie dachowej można uwzględnić w ocenie wyboczenia ściskanego pasa dolnego z płaszczyzny ustroju. W takim przypadku można zrezygnować z klasycznych stężeń prętowych, które skracają długość wyboczeniową pasów dolnych z płaszczyzny kratownicy. W efekcie usztywnienia bocznego pasów kratownic poszyciem dachowym uzyskuje się oszczędność stali oraz czasu wykonania konstrukcji i jej montażu.

### Literatura

- [1] Biegus A. Stalowe budynki halowe. Arkady, Warszawa, 2003.
- [2] Biegus A. Blacha fałdowa jako usztywnienie pasów kratownic płaskich przy wyboczeniu z ich płaszczyzny. *Budownictwo i Architektura* 13 (3), 2014, s. 209 – 217.
- [3] Bródka J., Broniewicz M., Giżejowski M. Kształtowniki gięte. Poradnik projektanta. Polskie Wydawnictwo Techniczne, 2006.
- [4] Gajdzicki M. Numeryczne wyznaczanie sztywności stężenia przeciwskrętnego płatwi z zetownika giętego. Rozprawa doktorska. Politechnika Łódzka, Łódź 2011.
- [5] Gozzi J. Design of roof trusses. Access-Steel SN027a-EN-EU, www.steel-access.com.
- [6] Lindner J. Stabilisierung von Trägern durch Trapezblache. *Stahlbau* 56 (1) (1987), 9 – 15.
- [7] Lindner J., Gregull T. Drehbettungswerte für Dachdeckungen mit untergelegter Wärmedämmung. *Stahlbau* 58 (6) (1989), 173 – 179.
- [8] Lindner J., Groeschel. F. Drehbettungswerte für Profilblechbefestigung mit Setzbolzen bei unterschiedlichen grossen Auflasten. *Stahlbau* 65 (6) (1996), 218 – 224.
- [9] PN-EN 1993-1-3:2008 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne. Reguły uzupełniające dla konstrukcji z kształtowników i blach profilowanych na zimno. PKN, Warszawa, 2008.
- [10] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-3: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN, Warszawa, 2006.
- [11] prEN 1090-4 Execution of steel structures and aluminium structures. CEN/TC 135 – N 661. Brussels, 2013.
- [12] Roik K. Vorlesungen über Stahlbau. Verlag, Berlin 1978.

Otrzymano 19.03.2015 r.