

Patryk DENIZIAK¹
 Elżbieta URBAŃSKA-GALEWSKA²
 Wojciech MIGDA³

ANALIZY WPŁYWU WSPÓŁPRACY BLACH POSZYCIA Z KONSTRUKCJĄ NOŚNĄ NA WARTOŚCI SIŁ WEWNĘTRZNYCH I PRZEMIESZCZEŃ HALI STALOWEJ

W niniejszej pracy, wykorzystując możliwości programu Dlubal RFEM 5.04, przedstawiono efekty uwzględniania współpracy konstrukcji nośnej hali z poszyciem wykonanym z blach trapezowych. Przeprowadzono analizy obliczeniowe kilku wariantów modelu 3D przykładowej hali stalowej. Wyniki obliczeń oraz wnioski zestawiono w tablicach.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, hala stalowa, przepona, projektowanie z uwzględnieniem współpracy poszycia

1. Wprowadzenie

Wpływ usztywniającego oddziaływania blachy trapezowej na nośność i sztywność zarówno pojedynczych prętów stalowych (płatwie, słupy, rygle) jak i całych układów ramowych jest znany i wykorzystywany w projektowaniu konstrukcji stalowych od wielu lat [2,3,4]. Zagadnienie zwiększania nośności prętów ściskanych i zginanych na skutek ich zespolenia z blachą trapezową jest dobrze opracowane, a literatura dotycząca badań oraz analitycznych i numerycznych metod określania nośności pojedynczych prętów usztywnionych blachą trapezową jest tak obszerna, że w niniejszej pracy została celowo pominięta.

Nieco odmiennie kształtuje się sytuacja w zakresie analiz ustrojów konstrukcyjnych, których nośność zwiększa się na skutek stosowania układów tarczowych z blachy trapezowej. Budynek o konstrukcji stalowej, w którym obudowa z blachy trapezowej została odpowiednio połączona ze szkieletem nośnym tworząc **przepony**, stanowi

¹ Autor do korespondencji: Patryk Deniziak, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. (0 58) 347 13 39 patdeniz@pg.gda.pl

² Elżbieta Urbańska-Galewska, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. 58 347 17 51, ugalew@pg.gda.pl

³ Wojciech Migda, Politechnika Gdańska, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, tel. (0-58) 347 23 87 wmigda@pg.gda.pl

przestrzenny ustrój tarczowo-plytowy. Obudowa takiego budynku nie tylko przenosi obciążenia od prostopadłych do jej powierzchni oddziaływań (płyta), ale również pracuje jako stężenie powierzchniowe (tarcza). Deformacje poszczególnych prętów wchodzących w skład przepon zależą od przestrzennych deformacji całego układu, które są znacznie ograniczone na skutek przestrzennego charakteru pracy całego ustroju. Ponadto uwzględnianie w analizie ustrojów konstrukcyjnych układów przepon powoduje korzystną redystrybucję sił wewnętrznych w głównych prętach szkieletu stalowego zwiększając ich nośność.

Stosowane dotychczas metody projektowania prętowych układów nośnych, w których obudowa stanowi integralną część konstrukcji budynku, bazowały na analizach płaskich układów ramowych [1,4,5]. Są to metody analityczne, przybliżone, które nie umożliwiają pełnego wykorzystania efektów współpracy poszycia ze szkieletem nośnym.

Jednakże ostatnio coraz to nowsze narzędzia projektowe w postaci zaawansowanych programów komputerowych umożliwiają przestrzenną analizę numeryczną omawianego typu konstrukcji, a co za tym idzie niezwykle efektywne projektowanie budynków o szkielecie stalowym.

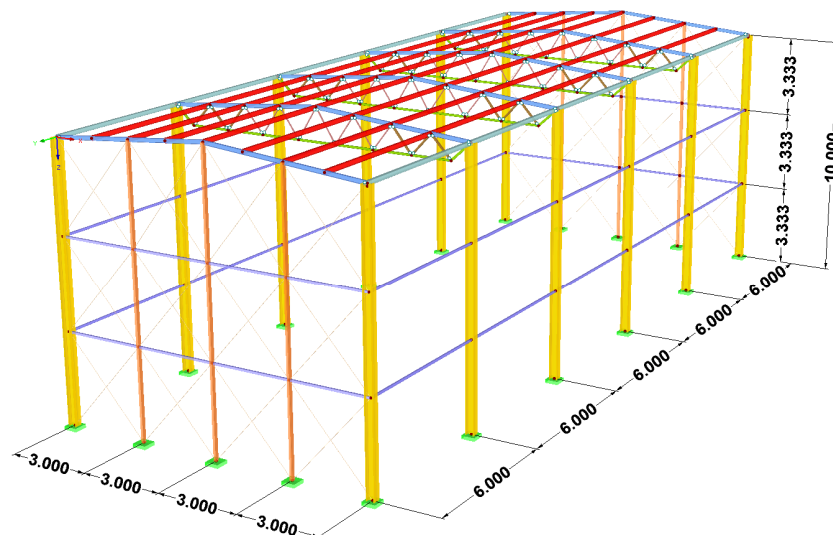
Celem niniejszej pracy jest wykonanie analiz parametrycznych wpływu różnego stopnia usztywnienia ustroju nośnego hali tarczami z blach trapezowych na masę konstrukcji szkieletu nośnego. Obliczenia 3D przeprowadzono na przykładzie hali o wymiarach i konstrukcji jak na rys. 1. Jest to ustrój słupowo-kratownicowy, wykonany z kształtowników walcowanych na gorąco ze stali S235, o słupach utwierdzonych w fundamencie. W celu uzyskania jednoznacznych i porównywalnych wyników analiz ograniczono liczbę zmiennych do jednego schematu obciążenia. Z tego też powodu pominięto stężenia połaciowe poprzeczne w konstrukcji dachu i stężenia ścienne oraz przyjęto quasi-sztywną ścianę szczytową. Stateczność w kierunku podłużnym hali (do celów obliczeniowych) jest zapewniona poprzez rygle okapowe oraz płatwie.

2. Modele obliczeniowe

W programie RFEM firmy Dlubal utworzono przestrzenny model konstrukcji przedstawiony na rys. 1, składający się z ram pośrednich (z kratownicowymi ryglami) oraz ram skrajnych. W modelu tym przyjęto pełne utwierdzenie wszystkich słupów u podstawy i przegubowe podparcie dźwigarów kratownicowych. Pręty wykratowania przyjęto jako połączone przegubowo z uciążlonymi pasami górnymi i dolnymi. W pozostałych elementach takich jak płatwie, rygle ścienne oraz słupy i rygle ścian szczytowych nie stosowano zwolnień na końcach prętów, z uwagi na pomijalny wpływ sztywności tych węzłów na globalne przemieszczenia całej konstrukcji. Stężenia ściany szczytowej zaprojektowano jako ciągną, przenoszące tylko rozciąganie. Zastosowane do budowy modelu kształtowniki zestawiono w tablicy 4.

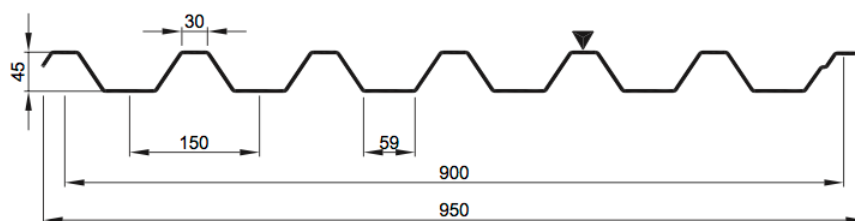
Na pokrycie dachu przyjęto blachę trapezową ze stali S250GD i o wymiarach jak na rys. 2. Została ona dobrana z uwagi na warunek nośności i sztywności przy obciążeniu ciężarem własnym pokrycia oraz śniegiem dla strefy 3 ($sk = 1,2 \text{ kN/m}^2$), dla schematu belki ciągłej, wieloprzęsłowej.





Rys. 1. Geometria konstrukcji nośnej analizowanej hali

Fig. 1. Geometry of the 3D steel structure used in the analysis



Rys. 2. Geometria przyjętej blachy trapezowej (grubość blachy 0,7 mm)

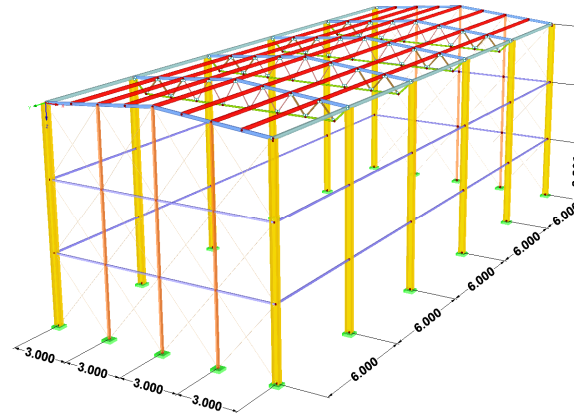
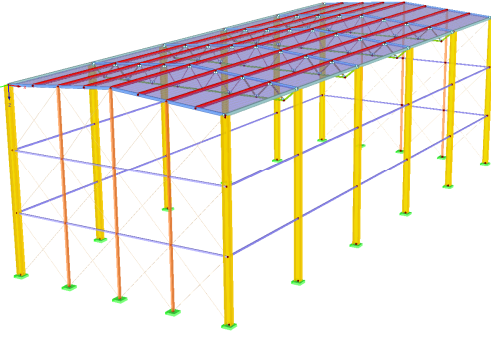
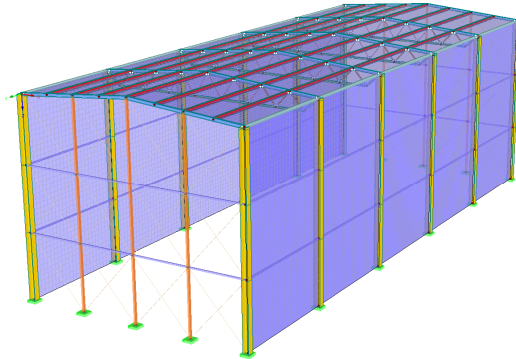
Fig. 2. Geometry of the analysed profiled sheeting (sheet thickness 0.7 mm)

Do celów analizy parametrycznej opracowano trzy modele numeryczne:

- A. model prętowy, nie uwzględniający współpracy poszycia z konstrukcją nośną dachu;
- B. model prętowo-tarczowy uwzględniający współpracę poszycia dachu;
- C. model prętowo-tarczowy uwzględniający współpracę zarówno poszycia dachu jak i obudowy ścian podłużnych.

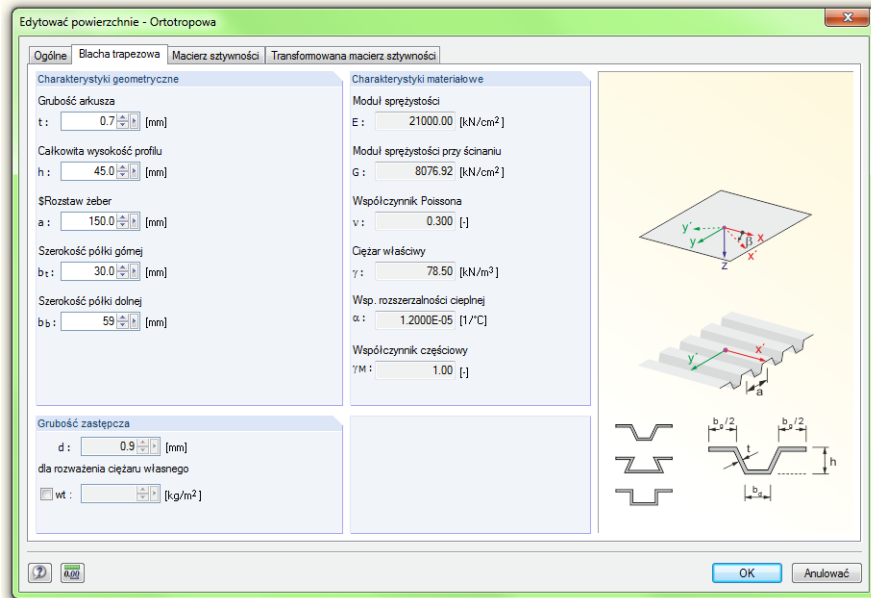
Model prętowy „A” jest modelem podstawowym, wykorzystanym również do budowy modeli „B” i „C”. Modele prętowo-tarczowe charakteryzują się uwzględnieniem konstrukcji przepon w formie tarcz ortotropowych wprowadzonych w płaszczyźnie dachu (model B) oraz w płaszczyznach ściana podłużnych (model C). Modele te przedstawiono schematycznie na rys. 3.



Model	Konstrukcja modelu
A prętowy	 A 3D wireframe model of a truss structure. The structure consists of a rectangular frame with a truss roof. The columns are yellow, and the roof truss members are red. The dimensions are indicated by arrows: the width of the structure is 12,000 (divided into four 3,000 segments), and the length is 24,000 (divided into four 6,000 segments).
B prętowo- tarczowy	 A 3D wireframe model of a truss-plate structure. It shows a rectangular frame with a truss roof and vertical columns. The columns are yellow, and the roof truss members are red. The structure is more complex than model A, with additional horizontal members connecting the columns.
C prętowo- tarczowy	 A 3D mesh model of a truss-plate structure. The structure is rendered with a blue mesh, showing the truss roof and the vertical columns. The columns are yellow, and the roof truss members are red. The mesh is more detailed than the wireframe models, showing the individual elements of the structure.

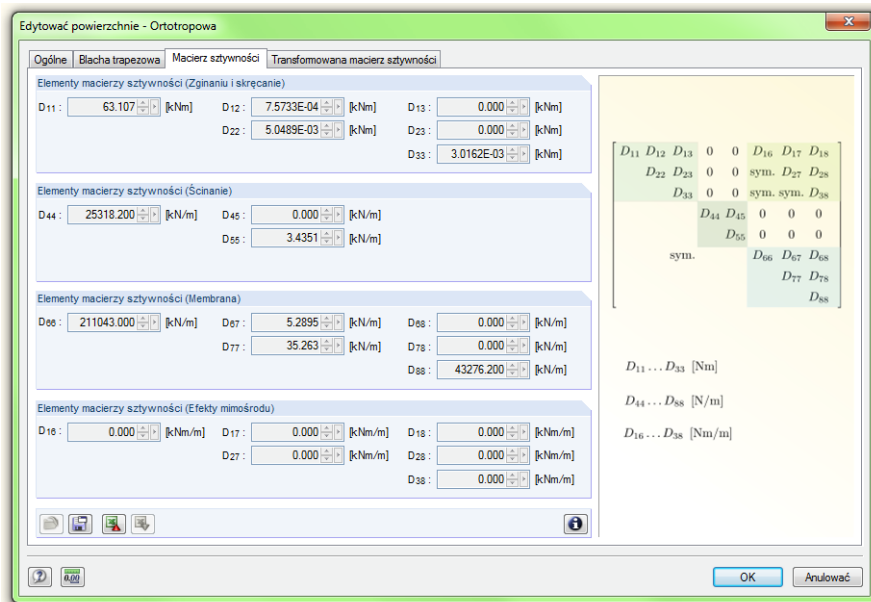
Rys. 3. Zestawienie analizowanych modeli obliczeniowych

Fig .3. Comparison of analysed numerical models



Rys. 4. Definiowanie płyty ortotropowej w programie RFEM

Fig. 4. Defining of the trapezoidal steel sheet profiles in RFEM software



Rys. 5. Utworzona macierzy sztywności płyty ortotropowej

Fig. 5. Generated stiffness matrix for the orthotropic plate



Cechy charakterystyczne każdej przepony to zamocowanie blachy trapezowej na wszystkich czterech krawędziach do prętów szkieletu nośnego oraz odpowiednia sztywność na ścinanie, która zależy przede wszystkim od sztywności postaciowej blachy trapezowej oraz podatności łączników. Program RFEM tworzy na podstawie wprowadzonych przez użytkownika parametrów blachy trapezowej (rys.4) płytę ortotropową o odpowiednio zdefiniowanej macierzy sztywności. Po wprowadzeniu parametrów blachy trapezowej należy zwrócić uwagę na prawidłowy kierunek ułożenia poszycia (kierunek fałd) i w razie potrzeby odpowiednio dostosować układ płyty. Jest to istotne, gdyż sztywność płyty na ścinanie zależy między innymi od kierunku fałd.

Na podstawie wprowadzonych danych geometrycznych blachy trapezowej formułowana jest globalna macierz sztywności płyty ortotropowej. Postać macierzy widoczna jest na rys. 5.

3. Wyniki analiz numerycznych

Każdy z wyżej wymienionych modeli był analizowany dla dwóch wariantów konstrukcji słupów ściany podłużnej, tj. dla słupów z HEB 200 i HEB 300. Pozostałe elementy konstrukcyjne były identyczne we wszystkich analizowanych przypadkach (patrz tablica 4)

Wszystkie obliczenia przeprowadzono w zakresie sprężystym, ograniczając się do jednego kierunku wiatru, działającego prostopadle do ściany podłużnej obiektu, jako obciążenia powodującego największe przemieszczenia układu poprzecznego hali. Obciążenie wiatrem przyjęto zgodnie z normą [7], a śniegiem zgodnie z normą [6]. W tablicy 1 zestawiono analizowane przypadki obciążeń oraz przyjęte kombinacje obciążeń.

Tablica 1. Zestawienie przypadków obciążeń i kombinacji obciążeń

Table 1. Comparison of load cases and load combinations

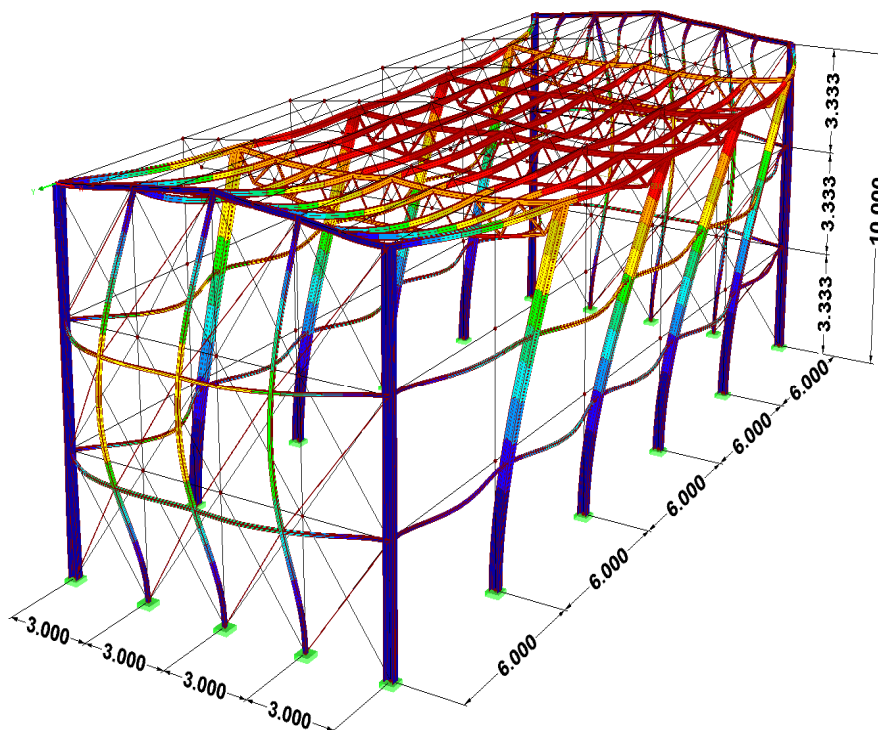
L.p.	Przypadek obciążenia/kombinacji obciążeń	
1	PO1	G: ciężar własny
2	PO2	S1: śnieg symetryczny
3	PO3	S2: śnieg niesymetryczny - z prawej strony pełne obciążenie
4	PO4	S3: śnieg niesymetryczny – z lewej strony pełne obciążenie
5	PO5	W1: wiatr działający na ścianę podłużną z parciem na powierzchni dachu
6	PO6	W2: wiatr działający na ścianę podłużną z ssaniem na powierzchni dachu
7	KO1	$1,35 \cdot G + 0,75 \cdot S1 + 0,9 \cdot W1$
8	KO2	$1,35 \cdot G + 0,75 \cdot S2 + 0,9 \cdot W1$

Wyniki obliczeń przeprowadzonych zgodnie z [8] zestawiono w tablicy 2. Konstrukcja hali w wersji tradycyjnej (bez wykorzystywania wpływu przepon dachowych



i ściennych) wymaga zastosowania słupów z kształtownika HEB 300 z uwagi na spełnienie warunku granicznego przemieszczenia wierzchołka słupa $\Delta \leq H / 150 = 10\,000 / 150 = 66,6$ mm [8]. Nośność słupów w tym przypadku jest wykorzystana tylko w 32%.

Zastosowanie elementów tarczowych w płaszczyźnie dachu pozwala na redukcję przekroju słupa z HEB 300 do co najmniej HEB 200. W analizowanym przypadku zarówno wartości przemieszczeń wierzchołków słupów jak i ich nośności nie osiągają wartości granicznych. Wprowadzenie elementów tarczowych dodatkowo w płaszczyznach ścian podłużnych (model C) nie powoduje istotnych zmian w przemieszczeniach, a co za tym idzie i w redystrybucji sił wewnętrznych. Na rys. 6 przedstawiono deformacje analizowanej konstrukcji dla kombinacji obciążeń KO1.



Rys. 6. Deformacje konstrukcji (model B – prętowo-tarczowy)

Fig. 6. Structure deformation (numerical model B – with cooperation between roof profiled sheeting and the structure)

Tablica 2. Porównanie przemieszczeń i stopnia wykorzystania nośności elementów konstrukcyjnych

Table 2. Comparison of displacements and design ratio

Rodzaj modelu i wariantu słupa	HEB 200			HEB 300		
	Przemieszczenia słupa	Stopień wykorzystania nośności:		Przemieszczenia słupa	Stopień wykorzystania nośności:	
	U_x [mm]	słupy główne	pozostałe elementy	U_x [mm]	słupy główne	pozostałe elementy
Model A	242	82%	87% (pas dolny)	65,2	32%	85% (pas dolny)
Model B (z tarczą dachową)	10,3	47%	89% (rygiel ścienny)	8,5	14%	82% (pas dolny)
Model C (z tarczą dachową i ścienną)	10,3	44%	89% (rygiel ścienny)	8,6	14%	81% (pas dolny)

W tablicy 3 zestawiono procentowe wykorzystanie nośności elementów konstrukcyjnych hali (bez słupów), uzyskane z analizy parametrycznej modeli A i B. Tablica ta pozwala zaobserwować efekty redystrybucji sił wewnętrznych w elementach konstrukcyjnych na skutek wprowadzenia do modelu numerycznego tarczy dachowej w płaszczyźnie dachu. W przypadku górnych pasów kratownic, rygli dachowych ram szczytowych oraz słupów ścian szczytowych (wyróżnione w tablicy 3 kolorem szarym) stopień wykorzystania ich nośności znacznie zmniejsza się. Jednocześnie dwa elementy konstrukcyjne (rygle ścian podłużnych i stężenia ścian szczytowych) przejmują na siebie większe obciążenia, co wynika z przestrzennego charakteru pracy całego ustroju nośnego.

Z kolei w tablicy 4 przedstawiono zużycie stali na prętowe elementy konstrukcyjne hali zaprojektowanej zgodnie z normami europejskimi. W przypadku hali tradycyjnej, w której nie uwzględniamy współpracy obudowy ze stalowym szkieletem nośnym musimy zastosować słupy z większych kształtowników, tj. z HEB 300 (wariant 2). Uwzględnienie elementów tarczowych w połąci dachu pozwala na znaczną redukcję masy konstrukcji (26%) z uwagi na zastosowanie mniejszych kształtowników, tj. HEB 200 na słupy główne (wariant 1).



Tablica 3. Porównanie stopnia wykorzystania elementów konstrukcyjnych w modelu hali bez tarczy i z tarczą w połaci dachowej

Table 3. Comparison of the design ratio for the structural elements with the integration of the steel plate and without

Rodzaj modelu i wariantu słupa	HEB 200		HEB 300	
	Model A (bez tarczy)	Model B (z tarczą)	Model A (bez tarczy)	Model B (z tarczą)
płatwie	77%	76%	61%	76%
pasy górne kratownic	74%	23%	56%	23%
wykratowania skrajne kratownic	10%	10%	10%	9%
wykratowania wewnętrzne kratownic	8%	9%	8%	8%
pasy dolne kratownic	87%	84%	85%	82%
rygle dachowe ram szczytowych	74%	23%	56%	23%
rygle okapowe	24%	21%	9%	9%
rygle ścienne	64%	89%	47%	76%
słupy ścian szczytowych	47%	28%	47%	26%
stężenia ścian szczytowych	21%	41%	12%	36%
słupy	82%	47%	32%	14%

Tablica 4. Zużycie stali na elementy prętowe konstrukcji hali w wariantach 1 (słupy z HEB 200, tarcza w połaci dachowej) i w wariantach 2 (słupy HEB 300, brak współpracy z poszyciem)

Table 4. Steel usage for members in the steel structure for variant 1 (HEB 200 columns with roof sheet diaphragms) and variant 2 (HEB 300 columns without roof sheet diaphragms)

L.p.	Elementy konstrukcji		Kształtownik	Łączna masa [kg]
1	płatwie		IPE160	3 313
2	pasy górne kratownic		IPE140	620
3	wykratowania skrajne kratownic		70x70x8	411
4	wykratowania wewnętrzne kratownic		40x40x4	184
5	pasy dolne kratownic		IPE80	300
6	rygle dachowe ram szczytowych		IPE140	310
7	rygle okapowe		140x140x8	1 959
8	rygle ścienne		80x80x8	2 954
9	słupy ścian szczytowych		120x120x8	1 715
10	stężenia ścian szczytowych		pręty ϕ 16	345
11	słupy	wariant 1	HEB200	7 358
		wariant 2	HEB300	14 035
SUMA		wariant 1		19 469
		wariant 2		26 148



4. Podsumowanie

Korzystny wpływ współpracy obudowy z blach trapezowych ze szkieletem nośnym konstrukcji jest znany i wykorzystywany w praktyce projektowej od wielu lat. Jednakże, z uwagi na przestrzenny charakter pracy takiej konstrukcji oraz stosowanie przybliżonych, analitycznych metod obliczeniowych, korzyści te nie mogły być w pełni oszacowane i wykorzystane. Pojawienie się zaawansowanych narzędzi numerycznych w formie komercyjnych programów obliczeniowych umożliwiło przeprowadzanie dokładniejszych analiz parametrycznych oraz pełniejszego wykorzystania rezerw nośności elementów prętowych, wynikających z tarczowo-płytowego charakteru pracy całej konstrukcji.

Tablica 5. Redukcja przemieszczeń wierzchołka słupa

Table 5. Reduction of the displacement of column top

Model numeryczny	Wartość przemieszczeń [mm]	Redukcja przemieszczeń względem modelu prętowego [%]
A	242	0
B	10,3	95,7
C	10,3	95,7

W niniejszej pracy wykazano, iż nawet w stosunkowo wysokich konstrukcjach ($H/L = 0,8$) uwzględnienie współpracy poszycia z konstrukcją nośną dachu zmniejsza przemieszczenia wierzchołków słupów o 90% (patrz tablica 5) oraz zwiększa nośność słupów głównych niemal dwukrotnie. Ponadto stwierdzono, że uwzględnianie elementów tarczowych w płaszczyźnie ścian podłużnych nie ma istotnego znaczenia z punktu widzenia optymalnego projektowania.

Literatura

- [1] Biegus A.: Blacha fałdowa jako usztywnienie pasów kratownic płaskich przy wyboczeniu z ich płaszczyzny. *Budownictwo i Architektura*, 13 (3) 2014, s 209-217
- [2] Bródka J., Garncarek R., Miłaczewski K.: *Blachy fałdowe w budownictwie stalowym*. Warszawa, Arkady 1999 (Wydanie 2)
- [3] Broniewicz M., Nazarko W., Szlendak J.: Badania sztywności hali stalowej bez obudowy i z lekką obudową. *Konstrukcje Stalowe*, 2003, nr 5 s 36.
- [4] European recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm – Stressed skin design. ECCS Committee TC7 , TWG 7.2, April 1995, ECCS publication No 88
- [5] Kowalczyk K., Nowicki M.: O wykorzystaniu tarczowego charakteru pracy pokrycia z blach fałdowych. *Inżynieria i Budownictwo*, 1/2003
- [6] PN-EN-1991-1-3: 2005 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1.3: Oddziaływania ogólne: Obciążenie śniegiem
- [7] PN-EN 1991-1-4: 2008 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1.4: Oddziaływania ogólne: Oddziaływania wiatru



- [8] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

ANALYSES OF STEEL SHEETS COOPERATION WITH STRUCTURAL BEAM MEMBERS INFLUENCE ON INTERNAL FORCES AND DISPLACEMENTS VALUES.

S u m m a r y

Previous construction analysing methods were based on 2D models what is inaccurate and does not give a possibility to use a full, precise members mutual cooperation.

In this article authors show an influence of taking into consideration the cooperation between trapezoidal sheeting and structural beam members illustrated with an example of a single storey buildings. This analysis was carried out in the state of the art computer program called Dlubal RFEM 5.04.

This paper shows the stiffening profiled sheeting application impact on a general construction mass. 3D numerical calculations were based on a frame construction with 10 metre-high columns and a span of 12 m. Hot rolled truss-column system made out of S235 steel with stiff base in the foundation was used here. Steel profiled sheeting were assumed as an orthotropic surfaces, called diaphragm.

Those 3 separate numerical models were analysed. The first one did not consider the cooperation between trapezoidal sheets and the structure. The second did consider the cooperation but only on the roof and the last one account the full integration (on the roof and on longitudinal walls as well).

Calculations gave a surprising results. The displacement decreased by about 90% between the first and the second numerical models. Authors also noticed the decrease of general mass by 26%.

Keywords: steel structures, single storey buildings, diaphragm, stress skin design

Przesłano do redakcji: 25.06.2015

Przyjęto do druku: 10.01.2016

DOI: 10.7862/rb.2015.177