

Lesław Niewiadomski<sup>1</sup>, Jan Zamorowski<sup>2</sup>

## WSTĘPNE IMPERFEKCJE ŁUKOWE W ANALIZIE POŁACIOWYCH STĘŻEŃ POPRZECZNYCH

### Wprowadzenie

Zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN 1993-1-1 [1], w analizie poprzecznych stężeń dachowych zaleca się uwzględniać zastępczą imperfekcję geometryczną, w postaci wstępnej, łukowej imperfekcji górnych pasów rygli o wartości  $e_0 = \alpha_m L/500$ , gdzie  $L$  - rozpiętość stężenia oraz  $\alpha_m \leq 1$  współczynnik ujmujący wpływ liczby elementów stężanych, jak w opisie do normowego wzoru (5.12). Imperfekcję tę można wprowadzić bezpośrednio do modelu obliczeniowego jako wstępne wygięcia górnych pasów rygli z ich płaszczyzny lub zastąpić ją równoważną siłą stabilizującą jak na rysunku 5.6 w tej normie. Wpływ sił bocznego oddziaływania ściskanych pasów rygli dachowych na stężenia został potraktowany zatem jako zagadnienie płaskie, występujące w płaszczyźnie połączy dachu.

W dostępnych publikacjach zawierających także przykłady obliczeń stężeń dźwigarów jednoprzęsłowych, jak np. [2-6], zastosowano również płaski normowy model obliczeniowy. W pracy [2] podano ponadto propozycje obliczania sił w poprzecznych stężeniach, wspornikowych dźwigarów dachowych oraz dźwigarów wieloprzęsłowych. Propozycje te bazują również na płaskim, normowym modelu obliczeniowym.

W normie wykonawczej PN-EN 1090-2 [7] podano tolerancje geometryczne dotyczące wytwarzania i montażu elementów i budynków o konstrukcji stalowej. Wprowadzono dwa rodzaje odchyłek geometrycznych - podstawowe i funkcjonalne oraz określono ich dopuszczalne wartości. Tolerancje podstawowe są istotne ze względu na podstawowe kryteria oceny nośności i stateczności całej konstrukcji, a funkcjonalne - ze względu na możliwość dopasowania elementów i wygląd konstrukcji. Zarówno tolerancje podstawowe, jak i funkcjonalne obejmują tolerancje

<sup>1</sup> Politechnika Śląska w Gliwicach, Wydział Budownictwa, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice, e-mail: leslaw.niewiadomski@polsl.pl

<sup>2</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała, e-mail: zamski@interia.pl

wytwarzania oraz tolerancje montażu. Tolerancje podstawowe powinny być zgodne z pkt. D1 w załączniku D do normy [7], a tolerancje funkcjonalne są określone za pomocą dwóch opcji - jako wartości stabilizowane wg pkt. D2 tego załącznika bądź wg kryteriów alternatywnych opisanych w pkt. 11.3.3 normy [7].

Wstępne wygięcie górnych pasów rygli (wiązarów) w konstrukcji hali może być spowodowane wystąpieniem odchyłek zakwalifikowanych w normie [7] do:

- a) podstawowych tolerancji wytwarzania; będą to odchyłki od:
  - prostoliniowości kształtowników giętych na zimno i pasów kształtowników spawanych, których dopuszczalne wartości dla odcinka swobodnego (bez stężeń) wynoszą  $L/750$ ,
  - prostoliniowości prętów skratowania o maksymalnych wartościach  $L/750$  i nie mniej niż 6 mm oraz
  - w elementach kratowych, odchylenie punktów węzłowych od projektowanej linii prostej lub krzywej o maksymalnej wartości  $L/500$  i nie mniej niż 12 mm,
- b) podstawowych tolerancji montażu:
  - odchyłki od prostoliniowości elementów zginanych lub ściskanych na odcinku swobodnym (bez stężeń) o dopuszczalnej wartości  $L/750$  oraz
  - lokalny kąt załamania w styku dociskowym o dopuszczonej wartości  $L/500$ ,
- c) funkcjonalnych tolerancji wytwarzania; będą to odchyłki od:
  - prostoliniowości pasa kształtownika spawanego oraz elementu składowego (kształtownika wytwarzanego lub giętego), o maksymalnych wartościach w klasie 1.  $L/750$  i w drugim przypadku nie mniej niż 5 mm (klasę tolerancji 2 o większych wymaganiach przyjmuje się do fragmentów konstrukcji, do których łączy się elewację szklaną),
  - prostoliniowości elementów skratowania, przy dopuszczalnych wartościach w klasie 1.  $L/500$  i nie mniej niż 6 mm oraz
  - w elementach kratowych odchylenie punktów węzłowych od projektowanej linii prostej lub krzywej o maksymalnej wartości w klasie 1.  $L/500$  i nie mniej niż 12 mm,
- d) funkcjonalnych tolerancji montażu w zakresie belek w budynkach:
  - odchyłki od prostoliniowości belki w planie o dopuszczalnej wartości w klasie 1.  $L/500$ .

Analizując wyżej przedstawione rodzaje odchyłek, można stwierdzić, że w przypadku stężeń dachowych mogą wystąpić w zakresie podstawowych tolerancji wytwarzania (istotnych z uwagi na nośność konstrukcji) odchyłki od prostoliniowości elementów składowych (prętów) o dopuszczalnych wartościach  $L/750$  i nie mniej niż 6 mm oraz odchylenia punktów węzłowych od projektowanej linii prostej o wartościach  $L/500$  i nie mniej niż 12 mm. Odpowiadające wartości funkcjonalnych tolerancji wytwarzania i montażu są nie mniejsze od wartości podstawowych tolerancji. Należy się zatem spodziewać, że w zmontowanej konstrukcji maksymalne wartości odchyłek z zakresu podstawowych tolerancji mogą zostać utrwalone.

W przypadku załamania styków dociskowych w elementach ściskanych wartości dopuszczone normą wykonawczą [7] są znacznie mniejsze od imperfekcji zastępczych przewidzianych normą [1].

Powyższa analiza wskazuje, że hala może być zmontowana z wygiętymi górnymi pasami wiązarów (rygli) z ich płaszczyzny, przy maksymalnej strzałce wstępnego wygięcia  $L/500$  równej zastępczej imperfekcji geometrycznej elementów stężeń. Istnieje zatem podstawa do wprowadzenia tej imperfekcji do przestrzennego modelu hali, a nie tylko do płaskiego modelu stężeń, jak to mogą sugerować przepisy zawarte w normie [1].

W wyniku pionowego obciążenia dachu przestrzennie zamodelowanej hali z lukową imperfekcją pasów stężeń pojawią się sprężyste wygięcia górnych pasów rygli o kierunku zgodnym z ich kierunkiem wstępnych wygięć oraz sprężyste wygięcia dolnych pasów, o przeciwnie skierowanej strzałce. To ostatnie zjawisko jest pomijane w przypadku płaskiego modelowania stężeń.

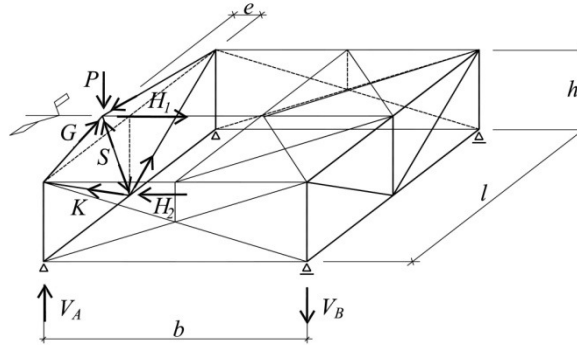
W artykule przedstawiono autorski model obliczeniowy stężeń dachowych, w którym zaproponowano sposób wyznaczania obciążenia stabilizującego dla stężeń, zastępującego wstępne wygięcia górnych pasów w modelu przestrzennym. Praktyczne zastosowanie tego sposobu przedstawiono na przykładzie obliczeń jednonawowej hali stalowej. Uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi dla przestrzennych konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi, analizowanymi za pomocą geometrycznie nieliniowego modelu obliczeniowego oraz z wynikami dla płaskiego, normowego modelu obliczeniowego stężeń.

## **1. Model obliczeniowy stężeń dachowych**

Siły boczne oddziaływania ściskanych rygli ram na stężenia połaciowe poprzeczne pojawiają się w wyniku działania pionowych obciążeń na przestrzenną konstrukcję dachu hali ze wstępnie wygiętymi z płaszczyzny bądź załamanymi w planie (w styku) ściskаныmi pasami rygli (wiązarów) dachowych. W takiej konstrukcji, ze wstępnie wygiętymi, ściskаныmi pasami wiązarów, pojawiają się również dodatkowe siły wewnętrzne w pozostałych prętach wiązarów i prętach pionowych tężników dachowych. Siły te można wyznaczyć tylko za pomocą przestrzennego modelu obliczeniowego. Model ten można ograniczyć do konstrukcji dachowej.

Mechanizm powstawania sił boczne oddziaływania ściskanego, wstępnie wygiętego bądź załamanego w planie pasa wiązara dachowego na poprzeczne stężenia połaciowe i wpływ tego zjawiska na wartości sił wewnętrznych w prętach układu, można przedstawić na przykładzie segmentu konstrukcji dachowej, złożonego z dwóch wiązarów, płatwi oraz stężeń jak na rysunku 1 [8-10]. W takim ustroju jeden z wiązarów, w miejscu załamania pasa w planie, obciążono pionową siłą węzłową  $P$ . W wyniku załamania górnego pasa w planie możliwa jest równowaga sił wewnętrznych w obciążonym węźle górnym dopiero po uwzględnieniu siły wewnętrznej  $H_1$  w poziomym pręcie kalenicowym, a w przypadku węzła

dolnego - po uwzględnieniu siły  $H_2$  poprzecznego oddziaływania pasa dolnego na węzeł dolny. Na skutek wstępnego wygięcia pasa zmieniają się więc wartości sił w prętach wiązarów dachowych (w tym siły  $S$ ,  $K$ ,  $G$ ), płatwi i stężeń oraz reakcje podporowe.



Rys. 1. Segment konstrukcji dachowej z załamanym pasem górnym (zwróty pokazują oddziaływanie sił na węzły)

W przepisach normy [1], przy zastąpieniu imperfekcji łukowych równoważnym obciążeniem stabilizującym  $q_d$  pominięto wpływ zginania pasa dolnego w płaszczyźnie poziomej siłą  $H_2$  i wynikające stąd jego poziome wygięcie sprężyste, powodujące zwiększenie przechyłu wiązara.

Najdokładniejsze wyniki w sprężystej analizie konstrukcji dachowej uzyskuje się, przyjmując wstępne wygięcie górnych pasów wiązarów z ich płaszczyzny i obliczając układ wiązarów ze stężeniami jako ustrój przestrzenny wg teorii nieliniowej, a nieco mniej dokładne, analizując taki układ wg teorii II rzędu.

### 1.1. Obciążenie stabilizujące

Stężenie poprzeczne o długości  $L_g$  (rys. 2) jest obciążone siłami  $H_i$ , które wynikają z rozłożenia pionowego obciążenia węzłowego  $P_i$  na kierunek poziomy i ukośny określony wstępnym i sprężystym, poziomym przesunięciem węzłów górnego pasa ( $u_{g,0,i} + u_{g,el,i}$ ) oraz sprężystym przesunięciem dolnego pasa ( $u_{d,el,i}$ ), które jest wynikiem działania obciążenia pionowego na wiązar ze wstępnie wygiętym górnym pasem. To przesunięcie nie jest uwzględnione w płaskim, normowym modelu obliczeniowym.

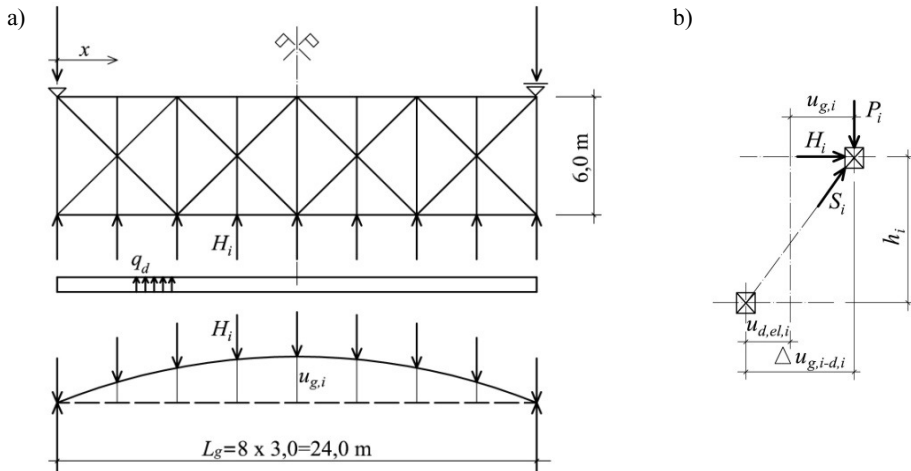
Znając całkowite poziome przesunięcie górnego pasa w węźle  $u_{g,i} = u_{g,0,i} + u_{g,el,i}$  oraz sprężyste przesunięcie dolnego pasa w odpowiadającym przekroju  $u_{d,el,i}$ , można obliczyć, przy danym obciążeniu węzła  $P_i$ , poziome obciążenie  $H_i$  przekazywane na stężenie poprzeczne

$$H_i = P_i \frac{\Delta u_{g,i-d,i}}{h_i} \quad (1)$$

gdzie  $\Delta u_{g,i-d,i} = u_{g,i} + u_{d,el,i}$ ,  $h_i$  - rozstaw osiowy pasów w węźle  $i$ .

Przyjęto wstępne wygięcie górnego pasa o długości  $L_g$  w postaci funkcji trygonometrycznej  $\sin$  wg wzoru (2), a strzałkę tego wygięcia  $e_{g,0}$  określono zgodnie z normą [1] wg wzoru  $e_{g,0} = \alpha_m \cdot L_g / 500$ .

$$u_{g,0} = e_{g,0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{L_g}, \text{ a stąd } u_{g,0,i} = e_{g,0} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_i}{L_g} \quad (2)$$

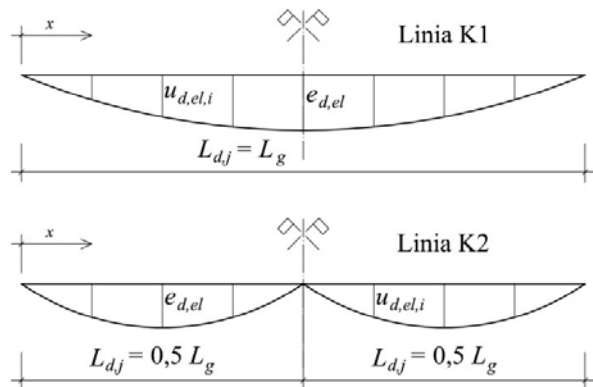


Rys. 2. Schemat stężenia (a) i obciążenie wynikające z pochylenia więzara (b)

### 1.2. Sprężyste wygięcie dolnego pasa

Rozpatrzono trzy sposoby określania wartości sprężystego wygięcia dolnych pasów więzarów z ich płaszczyzny.

W sposobie pierwszym, celem uproszczenia obliczeń, przyjęto przemieszczenie w postaci funkcji trygonometrycznej sinus jak na rysunku 3.



Rys. 3. Kształty linii wygięcia dolnego pasa więzara - K1 i K2

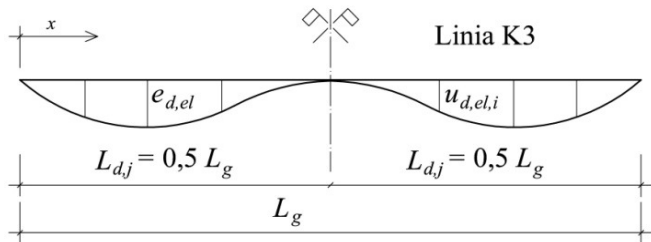
$$u_{d,el,i} = e_{d,el} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x_i}{L_{d,j}} \quad (3)$$

gdzie  $L_{d,j}$  - odległość między stężeniami pionowymi w przedziale  $j$ .

W przypadku braku pionowych stężeń wiązarów we wzorze (3) przyjmuje się  $L_{d,1} = L_g$ , a przy pionowym stężeniu usytuowanym w połowie rozpiętości hali  $L_{d,1} = L_{d,2} = L_g/2$  (rys. 3).

Strzałki sprężystego wygięcia dolnego pasa  $e_{d,el}$  powinny być dobrane o takiej wartości, aby siły osiowe w prętach stężenia poprzecznego, obliczone na podstawie modelu płaskiego, jak na rysunku 2a, odpowiadały siłom wyznaczonym za pomocą przestrzennych modeli obliczeniowych segmentów hali. W analizowanych w niniejszym artykule przykładach wartości strzałek poziomego wygięcia dolnego pasa wiązarów poszukiwano, korzystając z modeli przestrzennych. W celu uogólnienia uzyskanych wyników na inne przypadki należałoby przeprowadzić dalsze analizy obejmujące wiązary o różnych rozpiętościach, kształtach i wysokościach przy różnej liczbie stężeń pionowych.

W sposobie drugim uwzględniono zbliżony do rzeczywistego kształt wygięcia dolnego pasa jak dla belki ciągłej podpartej stężeniami pionowymi. Maksymalne wartości strzałek wygięcia dolnego pasa przyjęto jak w sposobie 1 (rys. 4).

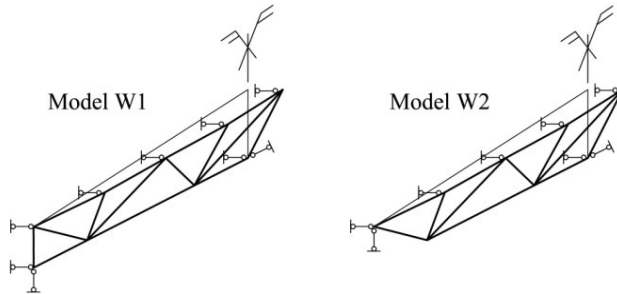


Rys. 4. Zbliżony do rzeczywistego kształt linii wygięcia dolnego pasa wiązara - K3

W przypadku pojedynczego, pionowego stężenia wiązarów w kalenicy kształt linii wygięcia dolnego pasa między przegubową podporą skrajną a stężeniem pionowym przyjęto jak dla jednoprzęsłowej belki podpartej przegubowo z jednej strony, a z drugiej utwierdzonej, obciążonej obciążeniem równomiernie rozłożonym. Z kolei, przy większej liczbie pionowych stężeń wiązarów kształt linii wygięcia pasa dolnego między stężeniami można przyjąć jak dla jednoprzęsłowej belki obustronnie utwierdzonej, obciążonej obciążeniem równomiernie rozłożonym.

Wzory opisujące równania linii ugięcia oraz strzałki ugięcia można przyjąć wg ogólnie dostępnej literatury technicznej.

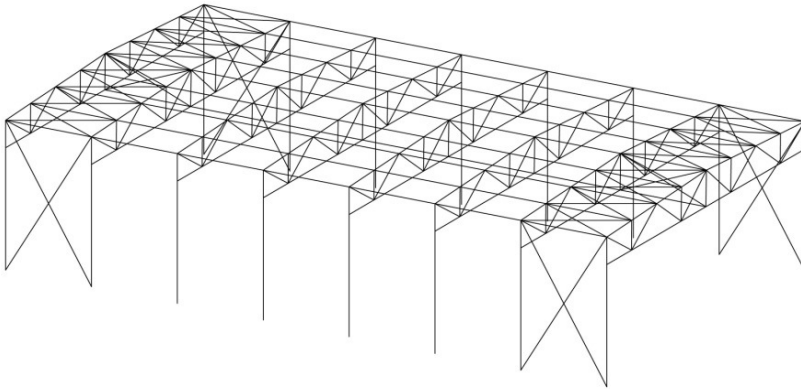
W sposobie trzecim wygięcie dolnego pasa wiązara wyznaczono, stosując jednowiązarowe ustroje przestrzenne ze wstępnie wygiętym, wg przepisów normy [1], górnym pasem jak na rysunku 5, obciążone w węzłach górnego pasa siłami pionowymi  $P_i$ . Podparcie górnego pasa przez tężnik poprzeczny i dolnego przez pionowe stężenie wiązarów zamodelowano za pomocą podpór przegubowo przesuwnych.



Rys. 5. Jednowiązarowe modele przestrzenne (typ W1 i W2) dwutrapezowych wiązarów typu Ws (W ze słupkami)

## 2. Obliczenia testowe na przykładzie jednonawowej hali

Analizie poddano segment hali o rozpiętości 24,0 m, długości 42,0 i wysokości do poziomu oparcia wiązarów 9,8 m (rys. 6).



Rys. 6. Model obliczeniowy segmentu hali

Przyjęto wiązary dwutrapezowe z skratowaniem typu W ze słupkami (Ws). Pasy wykonano z kształtowników HEA, a skratowanie z rur kwadratowych.


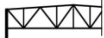
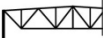

Dolnym pasem, połączonym przegubowo ze słupkami, umożliwiono w połączeniach przesuw wzdłuż osi pasa. Założono wygięcie początkowe górnych pasów wszystkich wiązarów w jedną stronę, o strzałce  $e_{g,0}$  obliczonej wg [1]:  $e_{g,0} = \alpha_m \cdot L/500 = 0,791 \cdot 24,0/500 = 0,038$  m. Współczynnik korekcyjny  $\alpha_m$  wyznaczono dla 4 elementów stężanych. Wygięcia pasów przyjęto według funkcji sinus.

### 2.1. Modele przestrzenne

W przypadku przestrzennego modelu hali obliczenia wykonano w czterech wariantach, różniących się konstrukcją wiązarów oraz liczbą pionowych stężeń. Charakterystyki analizowanych modeli przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1

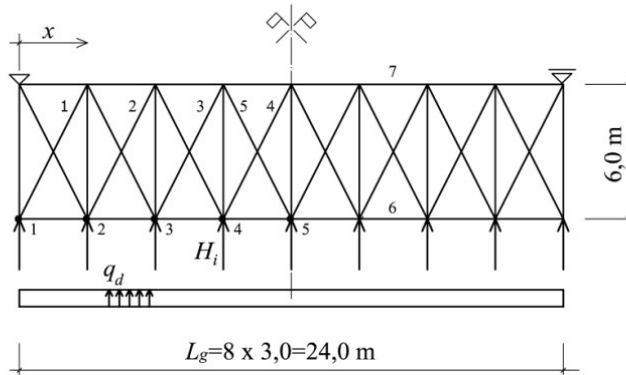
## Analizowane modele hali

Model	Typ wiaźara	Typ skratowania	Strefa podporowa wiaźara		Lokalizacja stężenia poprzecznego	Liczba pionowych stężeń wiaźarów	
		Ws				1	2
1	2	3	4	5	6	7	8
P1	+	+	+		+	+	
P2	+	+		+	+	+	
P3	+	+	+		+		+
P4	+	+		+	+		+

We wszystkich modelach przyjęto przegubowe podparcie wiaźarów na poziomie górnych pasów. Założono, że pręty poprzecznych stężeń  $\phi 20$  mogą przenosić tylko siły rozciągające. Wiaźary obciążono pionowymi siłami w węzłach górnych pasów. Siły te wyznaczono, przyjmując lekkie pokrycie z płyt warstwowych oraz obciążenie śniegiem wg strefy I. W celu eliminacji wpływu różnic w ugięciach wiaźarów na siły w prętach poprzecznego stężenia wiaźary skrajne zostały obciążone tak samo jak wiaźary pośrednie. Obliczenia przeprowadzono wg teorii nieliniowej, określonej w programie komputerowym jako teoria nieliniowa z uwzględnieniem efektów II rzędu.

## 2.2. Płaski model normowy

W płaskim, normowym modelu obliczeniowym obciążenie stężenia poprzecznego obliczono wg [1], zastępując wstępną imperfekcję łukową górnych pasów o strzałce  $e_{g,0} = 0,038$  m równoważną siłą stabilizującą  $q_d$ . Schemat obliczeniowy stężenia wraz z numeracją prętów i węzłów przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Płaski model obliczeniowy stężenia poprzecznego



Obliczona wartość obciążenia stabilizującego, bez wpływu sprężystego ugięcia od tego obciążenia, wynosiła  $q_d = 0,512$  kN/m, a po uwzględnieniu sprężystego ugięcia  $q_d = 0,524$  kN/m.

W modelu tym rozpatrzono jeszcze wpływ zamiany obciążenia równomiernie rozłożonego na siły węzłowe, stosując typowy, inżynierski sposób polegający na zbieraniu równomiernie rozłożonego obciążenia z połowy odległości między węzłami. Uzyskano, bez wpływu sprężystego ugięcia: w węzłach skrajnych  $H_s = 0,768$  kN i pośrednich  $H_p = 1,536$  kN, a po uwzględnieniu tego wpływu:  $H_s = 0,786$  kN i  $H_p = 1,572$  kN.

### 2.3. Płaskie modele autorskie

Analizowane autorskie modele płaskie zestawiono w tabeli 2. W modelach A1 i A2 kształt i strzałkę linii wygięcia dolnego pasa przyjęto wg sposobu 1, w modelach A3 i A4 wg sposobu 2, a w modelach A5 i A6 wg sposobu 3.

TABELA 2

Analizowane modele autorskie

Model	Kształt linii wygięcia dolnego pasa wg rys. 3 i 4		Strzałka wygięcia dolnego pasa		Przestrzenny model wiaźara wg rys. 5 (typ wiaźara)	
	K2	K3	L/1600	L/700	W1	W2
1	3	4	5	6	7	8
A1	+		+		(+)	
A2	+			+		(+)
A3		+	+		(+)	
A4		+		+		(+)
A5					+	
A6						+

Wartość strzałki wstępnego wygięcia dolnego pasa w modelach od A1 do A4 oszacowano na podstawie wyników obliczeń modelu przestrzennego. W rezultacie w przypadku wiaźara z dolnym pasem dochodzącym do słupa (model P1 wg tabeli 1) przyjęto  $e_{d,el} = L_g/1600$ , a w przypadku strefy podporowej wiaźara jak w modelu P2 wg tabeli 1  $e_{d,el} = L_g/700$ .

Modele A5 i A6 posłużyły do bezpośredniego określenia poziomych przemieszczeń węzłów dolnych pasów wiaźarów.

### 2.4. Analiza wyników obliczeń

Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w tabelach 3 i 4. W tabeli 3 zestawiono wartości poziomych przemieszczeń pasów wiaźarów z ich płaszczyzny oraz odpowiadające im siły poziome, obciążające stężenie poprzeczne.

TABELA 3

## Poziome przemieszczenia pasów wiązarów i odpowiadające im obciążenie poprzeczne

Model	Oś węzła wg rys. 7	Przemieszczenia poziome [cm] wg rys. 2				Siły poziome [kN]	
		$u_{g,0,i}$	$u_{g,el,i}$	$u_{d,el,i}$	$\Delta u_{g,i-d,i}$	$H_i$	$4 \cdot H_i$
1	2	3	4	5	6	7	8
A1	1	0	0	0	0	0	0
	2	1,45	0,101	-1,061	2,614	0,328	1,312
	3	2,68	0,176	-1,50	4,359	0,508	2,032
	4	3,51	0,221	-1,061	4,788	0,521	2,083
	5	3,79	0,234	0	4,029	0,411	1,643
A2	1	0	0	0	0	0,000	0,000
	2	1,45	0,137	-2,425	4,014	0,504	2,015
	3	2,68	0,236	-3,429	6,348	0,740	2,959
	4	3,51	0,291	-2,425	6,222	0,677	2,707
	5	3,79	0,305	0	4,100	0,418	1,672
A3	1	0	0	0	0	0,000	0,000
	2	1,45	0,099	-1,219	2,770	0,348	1,390
	3	2,68	0,171	-1,445	4,299	0,501	2,004
	4	3,51	0,213	-0,677	4,396	0,478	1,912
	5	3,79	0,227	0	4,022	0,410	1,640
A4	1	0	0	0	0	0,000	0,000
	2	1,45	0,132	-2,789	4,373	0,549	2,195
	3	2,68	0,225	-3,305	6,213	0,724	2,896
	4	3,51	0,274	-1,549	5,329	0,580	2,318
	5	3,79	0,288	0	4,083	0,416	1,665
A5	1	0	0	0	0	0,000	0,000
	2	1,45	0,100	-1,755	3,307	0,415	1,660
	3	2,68	0,170	-1,393	4,246	0,495	1,979
	4	3,51	0,212	-0,577	4,295	0,467	1,868
	5	3,79	0,225	0	4,020	0,410	1,639
A6	1	0	0	0	0	0,000	0,000
	2	1,45	0,122	-3,548	5,122	0,643	2,571
	3	2,68	0,202	-2,324	5,209	0,607	2,428
	4	3,51	0,246	-0,925	4,677	0,509	2,035
	5	3,79	0,260	0	4,055	0,413	1,654

Sprężyste przemieszczenia górnego pasa  $u_{g,el,i}$  obliczono w dwóch krokach iteracyjnych, rozwiązując modelem liniowym układ płaski jak na rysunku 7. Dalsze przybliżanie wartości sprężystego wygięcia górnego pasa okazało się mało istotne z uwagi na wartości poziomych obciążeń.

W analizowanych modelach wpływ sprężystego wygięcia górnego pasa na wartości poziomych obciążeń wyniósł w pierwszym kroku iteracyjnym kilka procent, a w drugim już tylko 0,5%. W kolumnie 7 tabeli 3 zestawiono wartości sił poziomych wynikające z przemieszczeń jednego wiązara, a w kolumnie 8 dla czterech wiązarów stabilizowanych przez jedno stężenie poprzeczne.

W tabeli 4 zestawiono wartości sił osiowych w prętach stężenia poprzecznego obliczone za pomocą różnych modeli obliczeniowych.

TABELA 4

## Siły w prętach stężenia (znakowanie sił: „-” rozciąganie, „+” ściskanie)

Lp.	Model		Siły w prętach stężenia [kN] (wg rys. 7)					Siły w pasach górných [kN]	
			1	2	3	4	5	6	7
1	Przestrzenny (wg tab. 1)	P0	-	-	-	-	-	243,6	243,6
2		P1	-7,470	-5,391	-2,326	-	-1,273	245,3	243,0
3		P2	-8,737	-6,187	-1,372	-	-1,392	244,1	244,2
4		P3	-6,266	-4,419	-2,123	-1,160	-	244,4	244,3
5		P4	-6,818	-4,727	-1,243	-1,116	-	243,1	245,1
6	Płaski normowy (wg rys. 7)	N1	-6,530	-4,490	-2,735	-0,901	-	+6,6	-6,2
7								250,2	237,5
		N2	-6,340	-4,539	-2,722	-0,905	-	+6,5	-6,1
								250,1	237,6
8	Płaski autorski (wg tab. 2)	A1	-6,979	-5,515	-3,247	-0,920	-	+7,5	-7,0
								251,1	236,6
9		A2	-9,511	-7,264	-3,962	-0,942	-	+9,7	-9,3
								253,3	234,4
10		A3	-6,841	-5,291	-3,056	-0,917	-	+7,2	-6,8
								250,8	236,9
11	A4	-9,202	-6,756	-3,527	-0,934	-	+9,1	-8,7	
							252,8	234,9	
12	A5	-6,945	-5,157	-2,990	-0,916	-	+7,2	-6,7	
							250,8	236,9	
13	A6	-8,516	-5,801	-3,801	-0,925	-	+8,2	-7,8	
							251,9	235,8	

Model P0 jest przestrzennym modelem hali z wiązarami prostymi bez wstępnych wygięć pasów górnych. Numerację prętów przyjęto według rysunku 7. Siły w prętach stężenia poprzecznego, obliczone za pomocą uproszczonych modeli obliczeniowych: normowych N1 (obciążenie równomiernie rozłożone), N2 (siły skupione) i autorskich od A1 do A6, porównano z siłami obliczonymi przy zastosowaniu przestrzennych modeli hali z imperfekcjami łukowymi górnych pasów wiązarów, przyjętymi wg normy [1] (modele P1 do P4).

W modelu hali, w którym zastosowano pionowe, kalenicowe stężenie wiązarów, z dolnymi pasami doprowadzonymi do słupów (model P1), maksymalne wartości sił w prętach stężenia poprzecznego obliczone za pomocą płaskich modeli normowych (modele N1 i N2) są mniejsze od wartości sił otrzymanych z modelu przestrzennego, odpowiednio o 14,4 i 17,8%, a w przypadku dolnych pasów zakończonych w przedskrajnym węźle wiązara (model P2), różnice te są znacznie większe i wynoszą odpowiednio 33,8 i 37,8%.

Wyniki uzyskane z modeli normowych można porównać z rezultatami otrzymanymi dla modelu przestrzennego hali z dwoma stężeniami pionowymi wiązarów, z dolnymi pasami doprowadzonymi do słupów (model P3). Różnice w wartościach sił wynoszą tylko 4,0% dla modelu N1 i 1,2% dla modelu N2. Różnice te są nieco większe w przypadku hali z wiązarami, w których ich dolne pasy nie dochodzą do słupów (model P4). Wynoszą one odpowiednio 4,4 i 7,5%.

Zbliżone do rzeczywistych maksymalne siły w prętach stężenia poprzecznego otrzymano, stosując autorskie modele płaskie A5 i A6, w których przy określaniu obciążenia stężenia uwzględniono wygięcia sprężyste dolnych pasów wiązarów, wyznaczone za pomocą jednowiązarowych modeli przestrzennych (por. rys. 5). W tym przypadku wartości sił otrzymane przy zastosowaniu modeli płaskich są mniejsze od otrzymanych za pomocą modeli przestrzennych hali o 7,6% dla modelu P1 hali i o 2,6% dla modelu P2.

W przypadku płaskich, autorskich modeli obliczeniowych A1 do A4, w których przy wyznaczaniu obciążenia stężenia poprzecznego uwzględniono wygięcia sprężyste dolnych pasów wiązarów, maksymalne wartości sił w prętach stężenia są mniejsze od rzeczywistych o 9,2% w modelu P1 hali i większe o 8,1% w modelu P2. Różnice między wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu uproszczonego sposobu 1 do wyznaczenia przemieszczeń dolnych pasów (por. rys. 3, modele A1 i A2) i sposobu 2 (por. rys. 4, modele A3 i A4) są niewielkie i wynoszą 2,0% dla modelu P1 hali i 3,4% dla modelu P2.

Maksymalne wartości sił osiowych w górnych pasach wiązarów obliczone przy wykorzystaniu płaskich modeli normowych N1 i N2 są nieznacznie większe (maksymalnie o ok. 2,4%) od wartości rzeczywistych, obliczonych za pomocą modeli przestrzennych P1 i P2.

Wartości sił osiowych w górnych pasach wiązarów, obliczone autorskimi modelami płaskimi A1 do A6 są większe od rzeczywistych maksymalnie o ok. 2,3% w przypadku modelu P1 hali i o 3,6% dla modelu P2.

## Podsumowanie

Zaproponowany w normie [1] płaski model obliczeniowy do określenia sił w prętach poprzecznych stężeń połączeniowych umożliwia jedynie przybliżone szacowanie wartości tych sił. Model ten nie ujmuje wpływu sprężystych wygięć dolnych pasów wiązarów, które zwiększają pochylenie wiązarów, a tym samym ich oddziaływanie na tężniki. Jest to szczególnie istotne w przypadku konstrukcji dachu z pojedynczym stężeniem pionowym w kalenicy i dolnymi pasami wiązarów niedoprowadzonymi do słupów (model P2 hali). Korzystając z modelu normowego, zbliżone do rzeczywistych wyniki uzyskuje się w przypadku hali z większą liczbą pionowych tężników dachowych i dolnymi pasami wiązarów doprowadzonymi do słupów jak w modelu P3 hali. Wynika to z mniejszych wartości poziomych przemieszczeń dolnych pasów wiązarów w kierunku podłużnej osi hali.

W przypadku braku pionowych stężeń wiązarów sprężyste wygięcie ich dolnych pasów jest na tyle istotne, że maksymalne siły w prętach stężenia obliczone z wykorzystaniem normowego modelu są około trzykrotnie mniejsze od sił obliczonych za pomocą modelu przestrzennego [9].

Przedstawiony w artykule autorski model wyznaczania obciążenia poprzecznych tężników dachowych od imperfekcji łukowych górnych pasów wiązarów, na podstawie pochylenia rygli, uwzględnia zarówno wpływ wygięcia ich górnych, jak i dolnych pasów. Przy odpowiednim skalibrowaniu krzywych opisujących wygięcie dolnych pasów można uzyskać wyniki bardziej adekwatne do uzyskiwanych z dokładniejszych modeli przestrzennych z geometrycznymi imperfekcjami.

Zadowolające wyniki uzyskano, stosując do wyznaczania wygięć dolnych pasów jednowiazarowe modele przestrzenne (modele A5 i A6). Sposób ten nie wymaga arbitralnego ustalania wygięcia dolnego pasa i pozwala na uzyskanie miarodajnych wyników dla różnorodnych rozwiązań konstrukcyjnych hal po uwzględnieniu odpowiednich więzi podporowych.

Można również przybliżyć przestrzenne rozwiązanie za pomocą odpowiednio skalibrowanych krzywych sprężystych wygięć dolnych pasów wiązarów. W tym zakresie potrzebna jest jednak szersza analiza w celu doboru odpowiedniej krzywej i strzałki wygięcia pasa na odcinku między pionowymi stężeniami. Można tu wykorzystać np. szeregi trygonometryczne lub wielomianowe funkcje kształtu.

Wpływ podatności stężeń poprzecznych na zwiększenie wartości sił w prętach tych stężeń wyniósł w analizowanych modelach hali od ok. 4 do 6%.

## Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1:2006/AC 2009: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] Biegus A., Projektowanie stężeń stalowych budynków halowych. Wykłady [www.kkm.wroc.pl](http://www.kkm.wroc.pl), Politechnika Wrocławska Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Wrocław 2012.
- [3] Gizejowski M., Ziółko J., Budownictwo ogólne, tom 5. Stalowe konstrukcje budynków. Projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń, Praca zbiorowa, Arkady, Warszawa 2010.

- [4] Goczek J., Supel Ł., Gajdzicki M., Eurokod 3-1-1, 3-1-2, 3-1-3, 3-1-5, 3-1-8. Przykłady obliczeń konstrukcji stalowych, Politechnika Łódzka, Łódź 2013.
- [5] Kozłowski A., Konstrukcje stalowe. Przykłady obliczeń według PN-EN 1993-1. Część trzecia. Hale i wiaty, Praca zbiorowa, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015.
- [6] Kucharczuk W., Labocha S., Hale o konstrukcji stalowej. Poradnik projektanta, PWT 2012.
- [7] PN-EN 1090-2+A1:2012/Ap1: Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych. Część 2: Wymagania techniczne dotyczące konstrukcji stalowych.
- [8] Niewiadomski L., Zamorowski J., The influence of geometrical imperfections of roof trusses on the internal forces in the elements in the structure of the roof of an assembly hall, 11<sup>th</sup> International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, October 3-4, 2013 Bratislava, Slovakia.
- [9] Niewiadomski L., Zamorowski J., The load of transversal bracings resulting from geometric imperfections of single-span trusses of roofs, 12<sup>th</sup> International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, October 16-17, 2014 Bratislava, Slovakia.
- [10] Niewiadomski L., Zamorowski J., Second-order loads of roof bracings in roofs with vertical bracings. 13<sup>th</sup> International Conference on New Trends in Statics and Dynamics of Buildings, October, 15-16, 2015 Bratislava, Slovakia.

### Streszczenie

W artykule zaprezentowano autorski sposób wyznaczania obciążenia stabilizującego dla stężeń, zastępującego wstępne wygięcia górnych pasów w modelu przestrzennym. Praktyczne zastosowanie tego sposobu przedstawiono na przykładzie obliczeń jednonawowej hali stalowej. Uzyskane wyniki porównano z wynikami otrzymanymi dla przestrzennych konstrukcji z imperfekcjami geometrycznymi, analizowanymi za pomocą geometrycznie nieliniowego modelu obliczeniowego oraz z wynikami dla płaskiego, normowego modelu obliczeniowego stężeń.

**Słowa kluczowe:** stężenia, imperfekcje, hala stalowa

### Analysis of the horizontal roof bracings in terms of the initial bow imperfection

#### Abstract

The author's approach has been presented in this paper for the determination of the stabilizing load for bracing systems. Such an approach allows replacing the pre-bending of the upper flanges in the 3D model. An example of a practical application of this approach has been presented in this paper for a single-nave hall. The obtained results were compared to the geometrical non-linear calculations of 3D construction model with the geometrical imperfections and to the 2D calculation of the bracing systems model based on codes.

**Keywords:** concentrations, imperfections, steel hall