

dr inż. Robert Studziński^{1*)}
mgr inż. Paweł Ordziniak²⁾

Wpływ podatności węzłów na analizę globalną stalowych ram portalowych

Influence of semi-rigid joints on the global analysis of the steel portal frames

DOI: 10.15199/33.2019.02.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ sztywności obrotowej węzłów okapowych na rozkład sił wewnętrznych i przemieszczeń w stalowych ramach portalowych. Analiza numeryczna obejmowała jeden układ poprzeczny wydzielony z układu przestrzennego, dla którego przeanalizowano 12 wariantów węzłów okapowych. Każdy z węzłów spełniał warunki nośności, ale charakteryzował się różną sztywnością obrotową, za pomocą której definiowano skończoną sztywność węzła okapowego ramy. Wykorzystano analizę nieliniową dla arbitralnie ustalonego obciążenia zewnętrznego. Otrzymane wyniki porównano z prętowym modelem referencyjnym zawierającym węzły sztywne. Wszystkie obliczenia przeprowadzono w programie AxisVM X4.

Słowa kluczowe: ca.

Abstract. The article presents the influence of the rotational stiffness of eaves joints on the distribution of internal forces and displacements in the steel portal frames. The numerical analysis consisted of one transverse system separated from the 3D model, for which 12 variants of eave joints were analyzed. Each of the joints fulfilled the load capacity conditions. The joints were characterized by different rotational stiffness. The tasks were solved using non-linear analysis for an arbitrarily determined external load. All calculations were carried out in the AxisVM X4 program.

Keywords: c.

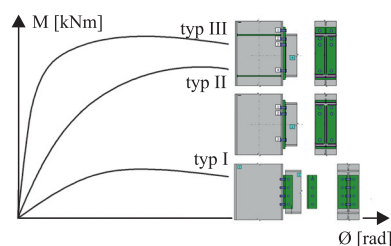
Projektowanie konstrukcji stalowych wymaga od projektanta właściwego odzwierciedlenia geometrii układu i przekrojów, poprawnego zdefiniowania obciążeń i relacji między nimi, właściwego przypisania parametrów mechanicznych materiału, a także określenia odpowiedniej sztywności podpór i połączeń między elementami. Aspekty te wraz z poprawnie wybraną metodą analizy globalnej [1, 2] gwarantują sensowność wyników obliczeń statycznych, na podstawie których projektowana jest konstrukcja. W artykule omówiono wpływ sztywności obrotowej węzłów na rozkład sił wewnętrznych, momentów i przemieszczeń wraz z obrotami w stalowych ramach portalowych. Temat ten był podejmowany również w [3], gdzie analizowano wpływ podatności obrotowej połączenia rygiel – słup na sztywność połączenia energoaktywnego przekrycia. Z kolei w [4] omówiono zachowanie się połączeń doczołowych obciążonych w sposób powtarzalny.

Klasyfikacja węzłów

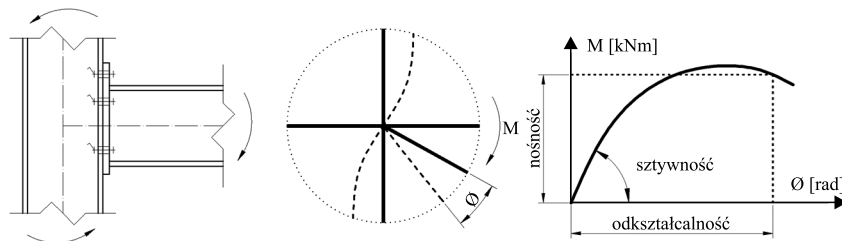
Zgodnie z normą [5] od węzłów w konstrukcjach stalowych wymaga się, aby odwzorowywały schemat statyczny konstrukcji, tj. aby po pierwsze miały odpowiednią wytrzymałość (nośność), warunkującą przeniesienie sił wewnętrznych, a po drugie aby charakteryzowały się odpowiednim stopniem podatności. Kolejnym, trzecim aspektem definiującym węzeł jest jego odkształcalność, która często jest trudna do zwerifikowania. Duża odkształcalność węzła (ciągłość) przekłada się na bezpieczeństwo konstrukcji w przypadku jego przeciążenia oraz może być wymagana w przypadku analizy plastycznej zakładającej formowanie się przegubu plastycznego w węźle. Na rysunku 1 przedstawiono relacje między nośnością, sztywnością i odkształcalnością

przykładowego węzła. Wśród nieskończonej wielu charakterystyk **nośność** – **sztywność** wyszczególnia się trzy graniczne rozwiązania węzłów (rysunek 2) nazwane w artykule jako typ I (quasi-przegubowe), typ II (podatne) i typ III (sztywne), o następującym zastosowaniu:

- typ I – w stężonych ramach;



Rys. 2. Graniczne charakterystyki nośności – sztywności węzłów konstrukcyjnych
Fig. 2.



Rys. 1. Charakterystyka mechaniczna węzła
Fig. 1.

¹⁾ Politechnika Poznańska; Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

²⁾ GammaCAD

^{*)} Adres do korespondencji:
robert.studzinski@put.poznan.pl

• typ II – w stężonych i niestężonych ramach, aczkolwiek w przypadku ram niestężonych należy uwzględnić podatność węzła w analizie globalnej;

• typ III – w stężonych i niestężonych ramach.

Szczegółowy podział węzłów, ze względu na nośność i sztywność, wprowadzony przez Eurokod 3 [5] przedstawiono w tabeli 1.

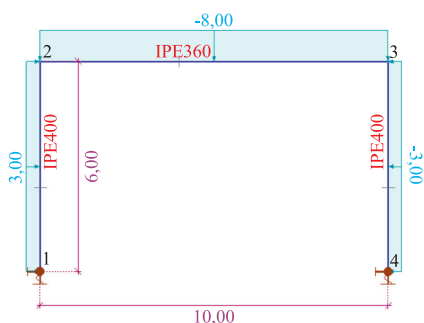
Tabela 1. Klasyfikacja węzłów ze względu na nośność i sztywność wg Eurokodu 3 [5]
Tabela 1.

Typ węzła	Klasyfikacja węzłów ze względu na:			
	nośność		sztywność	
I	nominalnie przegubowe	$M_{Rd} \leq 0,25 \cdot M_{pl,Rd}$	nominalnie przegubowe	$S_j \leq 0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b$
II	o ograniczonej nośności	$0,25 \cdot M_{pl,Rd} < M_{Rd} < M_{pl,Rd}$	podatne	$0,5 \cdot E \cdot I_b / L_b < S_j < 8 \cdot E \cdot I_b / L_b$ (ramy stężone) lub $25 \cdot E \cdot I_b / L_b$ (ramy niestężone)
III	o pełnej nośności	$M_{Rd} = M_{pl,Rd}$ (konieczność weryfikacji sztywności obrotowej) lub $M_{Rd} = 1,2 \cdot M_{pl,Rd}$ (brak konieczności weryfikacji sztywności obrotowej)	sztywne	$S_j = 8 \cdot E \cdot I_b / L_b$ (ramy stężone) lub $25 \cdot E \cdot I_b / L_b$ (ramy niestężone)

M_{Rd} i $M_{pl,Rd}$ – obliczeniowa nośność na zginanie odpowiednio połączenia i belki; S_j (styczna) – sztywność obrotowa połączenia; $E \cdot I_b$ – sztywność na zginanie belki; L_b – rozpiętość belki.

Metoda uwzględnienia podatności węzłów w modelu statycznym – przykład obliczeniowy

Metodę uwzględnienia podatności węzłów w analizie globalnej przedstawiono na przykładzie stalowej ramy portalowej pokazanej na rysunku 3.



Rys. 3. Stalowa rama portalowa – geometria, przekroje i obciążenia [model prętowy w programie AxisVM]
Fig. 3.

W pierwszym etapie zaprojektowano słupy i rygiel układu poprzecznego dla zadanego obciążenia. Przyjęto, że rozkłady sił wewnętrznych i momentów są wartościami referencyjnymi do wyników z kolejnych etapów zadania. W drugim etapie dla ustalonych przekrojów poprzecznych słupa i rygla oraz

ustalonego rozkładu sił wewnętrznych zaprojektowano 12 wariantów węzła okapowego, przy czym każdy z nich różnił się przyjętym rozwiązaniem konstrukcyjnym, tj.:

- liczbą rzędów śrub;
- brakiem lub występowaniem szeregu zewnętrznego śrub;
- brakiem lub występowaniem żeberrek;

■ brakiem lub występowaniem wzmocnienia w pasie dolnym rygla.

Ustalając rozwiązania konstrukcyjne węzłów, przyjęto jedno kryterium weryfikacyjne – kryterium nośności

Tabela 2. Geometria, nośność i sztywność obrotowa węzłów okapowych grupy A – dwa szeregi śrub w strefie rozciąganej
Tabela 2.

Grupa węzła	Geometria	Warunek nośności $M_{j,Ed}/M_{j,Rd}$	η [-]	S_j [kNm/rad]	Klasyfikacja	Komentarz
A1		$0,82 < 1,00$ $0,82 > 2/3$	2,0	11032	podatny	–
A2		$0,56 < 1,0$ $0,56 < 2/3$	1,0	32798	podatny	dodano żeberka usztywniające środknik słupa
A3		$0,38 < 1,0$ $0,38 < 2/3$	1,0	71801	podatny	dodano wzmocnienie rygla
A4		$0,32 < 1,0$ $0,32 < 2/3$	1,0	71801	podatny	dodano żeberko na wysokości wzmocnienia

($M_{j,Ed}/M_{j,Rd}$, gdzie $M_{j,Ed}$ – moment obliczeniowy w węźle, $M_{j,Rd}$ – obliczeniowa nośność połączenia na zginanie). Spełnienie tego kryterium jest zgodne z pkt 5.1.2 (2) normy [5] mówiącym, że w przypadku globalnej analizy sprężystej (GAS) „węzły powinny mieć nośność wystarczającą do przeniesienia sił i momentów węzłowych wynikających z analizy”. Geometria zaproponowanych węzłów została przedstawiona w drugiej kolumnie tabel 2, 3 i 4. Dodatkowo wyznaczono sztywność obrotową wg [5] każdego węzła. W punkcie 5.1.2 (3) norma [5] mówi, że „w przypadku węzłów podatnych na ogół w analizie stosuje się sztywność obrotową S_j odpowiadającą momentowi zginającemu $M_{j,Ed}$. Jeżeli $M_{j,Ed}$ nie przekracza $2/3 M_{j,Rd}$ to w analizie można przyjmować sztywność początkową $S_{j,ini}$ ”. W kolejnym punkcie normy [5] (pkt 5.1.2 (4)) zapisano, że: „Jako uproszczenie... można w analizie przyjmować sztywność obrotową równą $S_{j,ini}/\eta$... gdzie η jest współczynnikiem modyfikacji sztywności, ustalonym zgodnie z Tablicą 5.2” (w naszym przypadku $\eta = 2,0$). Analizując sztywność węzłów, Eurokod na-

rzuca dodatkowo tzw. klasyfikację węzłów (tabela 1). W przypadku rozpatrywanego zadania granice sztywności są następujące:

- połączenie sztywne:
 $S_j \geq 85412,1 \text{ kNm/rad}$;
- połączenie podatne
 $S_j \in (1708,2; 85412,1 \text{ kNm/rad})$;
- nominalnie przegubowe, jeżeli
 $S_j \leq 1708,2 \text{ kNm/rad}$.

Zestawienie sztywności obrotowej (S_j) i warunków nośności ($M_{j,Ed}/M_{j,Rd}$) przedstawiono w tabelach 2 ÷ 4.

W trzecim etapie wyznaczone sztywności obrotowe przypisano węzłom okapowym za pomocą modyfikacji zwolnień węzłowych [6], co pokazano na rysunku 4.

Wprowadzenie sztywności s_{yy} nie wymaga przeprowadzenia analizy nieliniowej w przeciwieństwie do sytuacji, w której wprowadzona zostanie wartość momentu granicznego M_{yG} . Wyniki dwunastu analiz (12 ram, każda o innej sztywności obrotowej węzła okapowego) wraz z odniesieniem ich do wyników referencyjnych przedstawiono w tabelach 5 ÷ 7. W ostatnich dwóch wierszach tabeli pokazano pro-

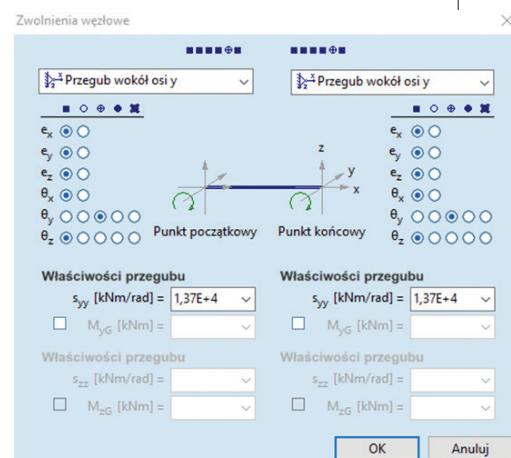
Tabela 4. Geometria, nośność i sztywność obrotowa węzłów okapowych grupy C – trzy szeregi śrub w strefie rozciąganej, w tym jeden szereg poza obrysem przekroju belki
Table 4.

Grupa węzła	Geometria	Warunek nośności $M_{j,Ed}/M_{j,Rd}$	η [-]	S_j [kNm/rad]	Klasyfikacja	Komentarz
C1		$0,53 < 1,00$ $0,53 < 2/3$	2,0	32156	podatny	–
C2		$0,37 < 1,0$ $0,37 < 2/3$	1,0	50456	podatny	dodano żeberka usztywniające środknik słupa
C3		$0,33 < 1,0$ $0,33 < 2/3$	1,0	101282	sztywny	dodano wzmocnienie rygla
C4		$0,24 < 1,0$ $0,24 < 2/3$	1,0	101282	sztywny	dodano żeberko na wysokości wzmocnienia

Tabela 3. Geometria, nośność i sztywność obrotowa węzłów okapowych grupy B – trzy szeregi śrub w strefie rozciąganej
Table 3.

Grupa węzła	Geometria	Warunek nośności $M_{j,Ed}/M_{j,Rd}$	η [-]	S_j [kNm/rad]	Klasyfikacja	Komentarz
B1		$0,69 < 1,00$ $0,69 > 2/3$	2,0	11098	podatny	–
B2		$0,45 < 1,0$ $0,45 < 2/3$	1,0	34955	podatny	dodano żeberka usztywniające środknik słupa
B3		$0,38 < 1,0$ $0,38 < 2/3$	1,0	79986	podatny	dodano wzmocnienie rygla
B4		$0,27 < 1,0$ $0,27 < 2/3$	1,0	79986	podatny	dodano żeberko na wysokości wzmocnienia

centową zmianę odpowiedzi mechanicznej konstrukcji po wprowadzeniu sztywności obrotowej węzła danego typu. Rozpatrując wpływ podatności węzłów na stateczność ramy [7], przeprowadzono liniową analizę wyboczeniową (LBA – ang. *linear buckling analysis*). Otrzymano globalne postacie (mody) wyboczenia dwunastu ana-



Rys. 4. Definicja sztywności węzłów w programie AxisVM
Fig. 4.

Tabela 5. Wyniki analizy nieliniowej ram z węzłami typu A
Table 5.

Charakterystyka	Typ węzła		
	A1	A2	A3 & A4
Wykres M_{Ed} [kNm]			
u_z [mm]	17,18	13,43	12,01
Zmiana M_{Ed}	Prześło: +39,8% Okap: -32,6% $M_{Ed,max}$: +14,6%	Prześło: +17,0% Okap: -14,0% $M_{Ed,max}$: -4,0%	Prześło: +8,4% Okap: -6,9% $M_{Ed,max}$: -6,9%
Zmiana u_z	+63,2%	+27,6%	+14,1%

Tabela 6. Wyniki analizy nieliniowej ram z węzłami typu B
Table 6.

Charakterystyka	Typ węzła		
	B1	B2	B3 & B4
Wykres M_{Ed} [kNm]			
u_z [mm]	17,18	13,28	11,88
Zmiana M_{Ed}	Prześło: +39,8% Okap: -32,6% $M_{Ed,max}$: +14,6%	Prześło: +16,1% Okap: -13,2% $M_{Ed,max}$: -4,8%	Prześło: +7,6% Okap: -6,2% $M_{Ed,max}$: -6,2%
Zmiana u_z	+63,2%	+26,2%	+12,9%

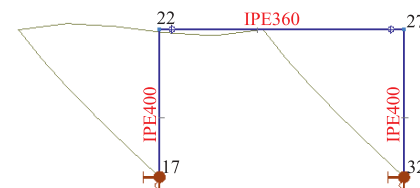
Tabela 7. Wyniki analizy nieliniowej ram z węzłami typu C
Table 7.

Charakterystyka	Typ węzła		
	C1	C2	C3 & C4
Wykres M_{Ed} [kNm]			
u_z [mm]	13,48	12,54	11,63
Zmiana M_{Ed}	Prześło: +17,3% Okap: -14,2% $M_{Ed,max}$: -3,8%	Prześło: +11,7% Okap: -9,6% $M_{Ed,max}$: -8,4%	Prześło: +6,1% Okap: -5,0% $M_{Ed,max}$: -5,0%
Zmiana u_z	28,1%	19,2%	10,5%

Tabela 8. Wartości mnożnika obciążenia krytycznego ram z węzłami podatnymi i sztywnymi
Table 8.

	A1	A2	A3 & A4	B1	B2	B3 & B4	C1	C2	C3 & C4	Sztywne węzły
α_{cr}	22,673	33,318	38,136	22,673	33,806	38,612	33,162	36,278	39,521	44,361
Zmiana	[49%]	[25%]	[14%]	[49%]	[24%]	[13%]	[25%]	[18%]	[11%]	—

lizowanych ram. Wszystkie pierwsze postacie globalnej utraty stateczności rami są postaciami przechyłowymi (rysunek 5). W tabeli 8 zestawiono wartości mnożnika obciążenia krytycznego każdej rami.



Rys. 5. Przykładowa pierwsza postać przechyłowa rami portalowej
Fig. 5.

Podsumowanie

Przedstawione wyniki pokazują, że projektując układy ramowe, należy zwrócić szczególną uwagę na **rozwiązanie konstrukcyjne** węzłów. Samo spełnienie kryterium nośności węzła nie jest wystarczające do stwierdzenia, że konstrukcja została bezpiecznie zaprojektowana. Konieczne jest bowiem wyznaczenie sztywności obrotowej węzłów, która w znaczny sposób wpływa na rozkład momentów zginających i wartość ugięcia konstrukcji.

Literatura

- [1] PN-EN 1993-1-1:2006. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [2] Studziński Robert, Paweł Ordziniak. 2014. „Analiza globalna konstrukcji stalowych w ujęciu Eurokodu 3”. *Materiały Budowlane* 505 (9): 69 – 70.
- [3] Brzezińska Karolina, Andrzej Szychowski. 2013. „Wpływ podatności obrotowej połączenia rygiel – słup na sztywność połączenia energoaktywnego przekrycia hali ramowo-płatwiowej”. *Budownictwo i Architektura* 12 (2): 197 – 204.
- [4] Ślęczka Lucjan. 2013. „Zachowanie śrubowych węzłów doczołowych obciążonych w sposób powtarzalny”. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury* 60 (2/13): 269 – 284.
- [5] PN-EN 1993-1-8:2006. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów.
- [6] Podręcznik użytkownika AxisVM14.
- [7] Litewka Przemysław, Michał Bąk. 2015. „Stateczność ram stalowych z węzłami podatnymi”. *Przegląd Budowlany* 10: 42 – 47.

Przyjęto do druku: 08.01.2019 r.