

Wpływ zastosowania nakładek wzmacniających środnik na nośność i sztywność doczołowego węzła śrubowego.

The influence of applying supplementary web plates on structural joint moment resistance and rotational stiffness.

mgr inż. Patryk Deniziak¹, dr hab. inż. Elżbieta Urbańska Galewska², prof. nadzw. PG

^{1,2} *Katedra Konstrukcji Metalowych i Zarządzania w Budownictwie,
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska
Ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
¹e-mail: patdeniz@pg.gda.pl, ²e-mail: ugalew@pg.gda.pl*

^{1,2} *Department of Metal Structures and Management in Civil Engineering
Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology
Ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdansk
¹e-mail: patdeniz@pg.gda.pl, ²e-mail: ugalew@pg.gda.pl*

Streszczenie

Ciągłe dążenie do upraszczania elementów konstrukcyjnych oraz znajdowania mniej czasochłonnych rozwiązań wykonawczo – montażowych wraz z nieuchronnym wzrostem kosztów robocizny determinują m.in. eliminację z procesów technologicznych tych etapów, które nie podlegają automatyzacji. Taką czynnością jest przede wszystkim spawanie dodatkowych wzmocnień i usztywnień węzłów w postaci żeber. Efektem wieloletnich badań jest metoda przedstawiona w normie PN-EN 1993-1-8 [7], pozwalająca na obliczanie nośności i sztywności węzłów pozbawionych żeber usztywniających. W poniższym referacie przedstawiono sytuacje obliczeniowe, w których znaczący wzrost nośności i sztywności węzłów okapowych ramy portalowej uzyskano poprzez zastosowanie nakładek wzmacniających środnik słupa. Rozważa się zasadność stosowania tego typu rozwiązania z uwagi na pracochłonności i trwałości konstrukcji w świetle dążenia do minimalizacji kosztów robocizny.

Abstract

Continual trend to simplify structural elements and find less time-consuming solutions on construction site as well as inevitable increase in labour costs determine for instance elimination of those technological steps that are difficult to automation. Welding additional reinforcements and web stiffeners is a great example of such a step. The method presented in EN 1993-1-8 [7] is a result of long-term studies focused on calculating moment resistance and stiffness of joints bereft of transverse web stiffeners. Design calculations shown in this paper are based on resistance and stiffness growth analysis applying supplementary web plates. Authors consider validity of this solution due to construction effort and building durability remembering about minimization of the costs.

Słowa kluczowe: konstrukcje metalowe, węzły śrubowe, 4-śrubowe króćce teowe, nakładki wzmacniające środnik
Keywords: steel structures, bolt joints, T-stubs with 4 bolts, supplementary web plates

1. Wprowadzenie

Dążenie do minimalizacji kosztów produkcji przyczyniło się do upraszczania szczegółów konstrukcyjnych poprzez eliminowanie operacji technologicznych nie podlegających automatyzacji takich jak np.: dopasowywanie żeber oraz stosowanie dodatkowych wzmocnień i usztywnień. Rezygnacja z żeber usztywniających węzły ram przyczyniła się do rozwoju badań nad tak zwanymi węzłami podatnymi, czyli węzłami o mniejszej sztywności niż tradycyjne węzły sztywne jednakże dalekie od węzłów przegubowych. Wieloletnie badania węzłów podatnych zaowocowały niezwykle złożonymi i pracochłonnymi procedurami obliczeniowymi, które zostały usankcjonowane odpowiednimi zapisami w normie europejskiej [7]. Procedury te umożliwiają nie tylko zaprojektowanie i zwymiarowanie węzłów ram, ale także określenie sztywności węzła. Z kolei uwzględnienie podatności węzłów w obliczeniach statycznych pozwala na wykorzystanie redystrybucji momentów zginających w ramach, co może skutkować kolejnymi oszczędnościami, tym razem wynikającymi ze zmniejszenia wymiarów prętów ram, a więc masy konstrukcji.

1. Introduction

Aspiration for production costs minimization causes the simplification of construction elements such as elimination of those technical steps that are difficult to automation, for instance adjusting transverse web stiffeners. Resignation of those joint stiffening elements contributes to develop research into so-called semi-rigid connections which stiffness is smaller than traditional rigid joints but still far from pinned ones. Long-term studies focused on semi-rigid links result in unusually complex and laborious design procedures that are legitimized in European Standard [7]. Mentioned rules allow not only to design structural frame joints but also determine the stiffness of the connections. Considering the rotational stiffness in calculations allows to use bending moment redistribution in frames which can result in successive savings in beam cross sections dimensions therefore mass of the whole structure.

W niniejszym referacie zostaną wskazane sytuacje projektowe, w których jesteśmy zmuszeni do zastosowania dodatkowych nakładek zwiększających nośność i sztywność środnika słupa przy ścinaniu, ściskaniu i rozciąganiu. Stosowanie takich nakładek jest prawie tak samo pracochłonne jak stosowanie usztywniających żeber poprzecznych, a więc tym samym sprzeczne z podstawowym założeniem leżącym u podstaw stosowania węzłów podatnych, a dotyczącym minimalizacji kosztów wytwarzania.

2. Analiza nośności i sztywności okapowego węzła ramy

W projektach ram portalowych z dwuteowników walcowanych, przekrojem krytycznym z uwagi na wymiary rygła jest węzeł okapowy, tj. połączenie rygła ze słupem. Zaprojektowanie węzła o pełnej nośności, czyli węzła, którego nośność obliczeniowa przy zginaniu $M_{j,Rd}$ jest większa od obliczeniowej nośności plastycznej przekroju belki przy zginaniu $M_{b,pl,Rd}$ [7] jest możliwe, gdy lokalnie zwiększymy wysokość rygła w strefie przypodporowej poprzez zastosowanie tzw. skosów. Drugą metodą podwyższenia nośności węzła jest zwiększenie liczby śrub w poszczególnych szeregach z dwóch do czterech sztuk. Ta ostatnia metoda jest możliwa do zastosowania przy projektowaniu rygli z dwuteowników szerokostopowych, o szerokości pasa minimum 300 mm.

W niniejszej pracy szczegółowej analizie poddano nośność węzła okapowego ramy portalowej wykonanej ze stali S235, w której słup zaprojektowano z dwuteownika HEB 400, natomiast rygiel przyjmowano kolejno z dwuteowników HEA 300, HEA 400, HEA 500 i HEA 600.

Konstrukcję węzła przedstawiono na rys.1. Dla każdego rodzaju rygła przeliczono po cztery warianty połączeń z uwagi na średnicę śrub (M16, M20, M25, M30), a przy każdej średnicy śruby uwzględniono wpływ grubości blachy czołowej ($t_p = 15, 20, 25$ i 30 mm). Przyjęto śruby klasy 8.8.

Składnikowa metoda określania nośności obliczeniowej $M_{j,Rd}$ i sztywności $S_{j,ini}$ węzłów ram, opisana w wielu publikacjach [1÷6] oraz normie [7], uwzględniająca nośności wszystkich aktywnych składników węzła, pozwala na precyzyjną analizę wpływu poszczególnych elementów na nośność węzła oraz identyfikację składników krytycznych, tzn. składników o najmniejszej nośności.

This paper shows exact designs examples which are forcing the construction engineers to apply supplementary web plates increasing the resistance and rotational stiffness of column panel in shear, transverse compression and tension. Applying such supplementary web plates is nearly as laborious as welding transverse web stiffeners so it's contrary to the basic semi-rigid joints assumption focused mainly on production costs minimization.

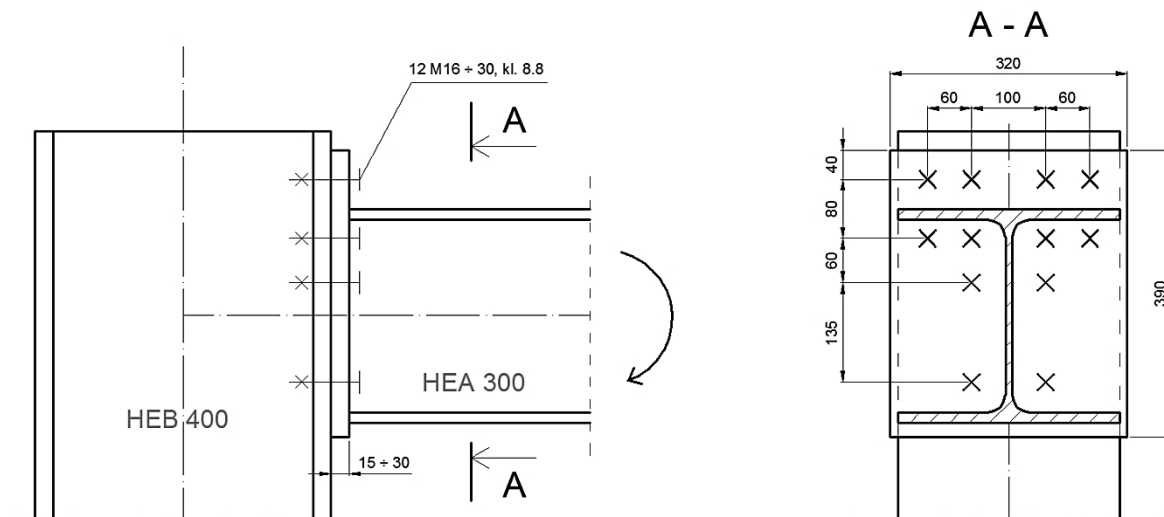
2. Analysis of moment resistance and rotational stiffness in frame joint

A connection of beam and column is usually a critical point in steel frames made of H or I sections where beam height is decisive. Designing full-strength joints (it means that joint design moment resistance $M_{j,Rd}$ is higher than plastic moment resistance of beam $M_{b,pl,Rd}$) is possible in case of local increase of beam height near the top of the column applying oblique reinforcements - so-called haunched beam. The second possibility is to increase the number of bolts in each rows from two to four. This increase is available only when width of the H or I section beams reaches at least 300 mm.

In this paper frame eaves joint moment resistances are analyzed in detail. The structure is made of S235 steel. HEB 400 is a column cross section and as a beam section HEA 300, HEA 400, HEA 500 and HEA 600 are used interchangeably.

Figure 1 shows the structure of the analysed end plate connection. There are four different bolt diameters (M16, M20, M25, M30) applied for each cross section of the beam. What is more every bolt diameter has four different end plate thicknesses ($t_p = 15, 20, 25$ i 30 mm) taken into consideration. Bolts grade 8.8 are applied.

Component method defining joint moment resistance $M_{j,Rd}$ and stiffness $S_{j,ini}$ is described in many publications [1÷6] and also in European Standard [7] as well. This method considers resistance of every basic joint component showing the designers it's influence on general joint resistance so it is possible to identify critical basic joint component (weakest element in the connection).



Rys. 1. Konstrukcja analizowanego połączenia doczołowego
 Fig. 1. Structure of the analysed end plate connection

Tabela 1. Zestawienie obliczeniowych wartości nośności i sztywności węzła bez wzmocnienia środnika słupa (rygiel z HEA 300)
 Table 1. Design values of moment resistance and rotational stiffness for joint without supplementary web plates (beam HEA 300)

Bolts class 8.8	End plate thickness [mm]	Critical basic joint component			$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [kNm/rad]
		1 st bolts row	2 nd bolts row	3 rd bolts row		
M16	15	End plate	Bolts	Bolts	136,4	50 060
	20	End plate	Bolts	Bolts	146,3	51 825
	25	Bolts	Bolts	Bolts	147,4	52 176
	30	Bolts	Bolts	Bolts	147,4	52 140
M20	15	End plate	Bolts	End plate	198,9	51 984
	20	End plate	Bolts	Column web	214,8	54 111
	25	Column flange	Column web	Bolts	225,2	54 721
	30	Column flange	Column web	Bolts	225,2	54 912
M24	15	End plate	End plate	Column web	212,8	53 108
	20	End plate	Bolts	Column web	236,8	55 456
	25	Column web	Bolts	Column web	243,1	56 229
	30	Column web	Bolts	Column web	243,9	56 564
M30	15	End plate	End plate	Column web	212,8	54 136
	20	Column web	Column web	Column web	243,6	56 688
	25	Column web	Column web	Column web	245,2	57 612
	30	Column web	Column web	Column web	246,2	58 082

W tabeli 1 zestawiono wyniki obliczeń nośności poszczególnych rodzajów węzłów z zaznaczeniem najsłabszych składników węzła. Analiza krytycznych, z uwagi na nośność, części podstawowych węzła pozwoliła zauważyć pewną prawidłowość. Najsłabszą częścią węzła, jest w zasadzie środnik słupa, a dokładniej nośność środnika słupa przy ściskaniu, rozciąganiu lub ścinaniu.

3. Nośność węzła ze wzmocnionym środnikiem słupa

Efektywną metodą zwiększenia nośności panelu środnika słupa jest zastosowanie jedno- lub dwustronnych nakładek. W celu sprawdzenia skuteczności stosowania nakładek w węzle podatnym wykonano obliczenia nośności i sztywności węzła przedstawionego na rys. 1 wzmocnionego jednostronną nakładką o grubości $t_s \geq t_{wc}$, oraz o wymiarach jak na rys. 2, spełniającą odpowiednie warunki normowe [7]. Obliczenia przeprowadzono tylko dla węzłów ze śrubami M24 i M30, w których to najsłabszym składnikiem węzła jest właśnie środnik słupa. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2. Uzyskano przyrost nośności węzła od 14% do 37%, a sztywności od 43% do 47%.

Tabela 2. Zestawienie obliczeniowych wartości nośności i sztywności węzła ramy z rygłem z HEA 300 z jednostronną nakładką wzmacniającą środnika słupa.

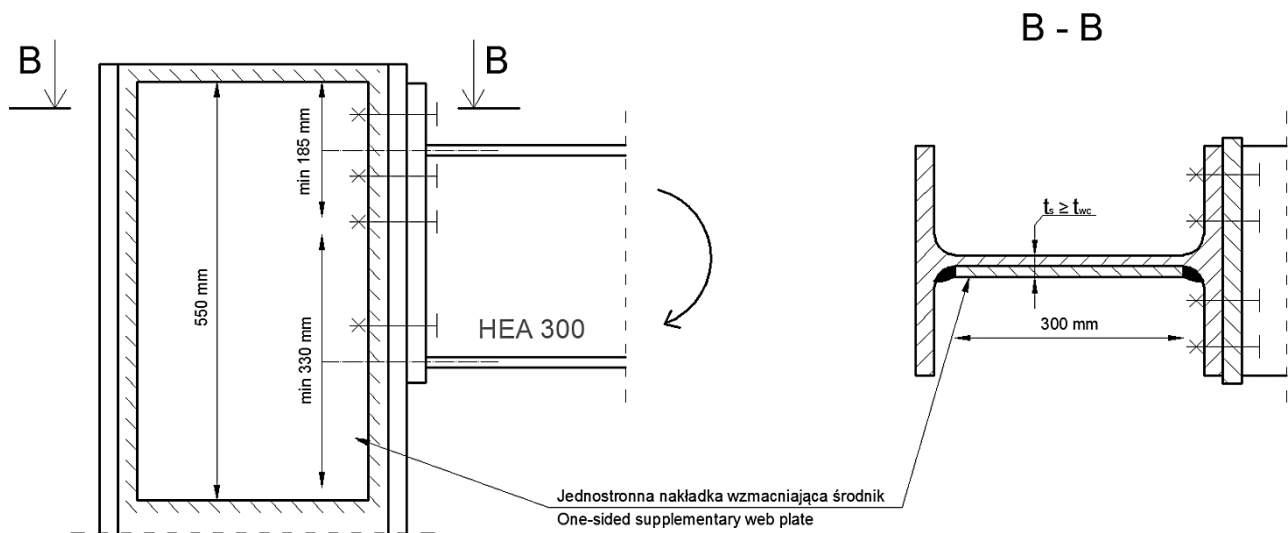
Table 2. Design values of moment resistance and rotational stiffness for joint with one supplementary web plate (beam HEA 300)

Bolts class 8.8	End plate thickness [mm]	Critical basic joint component			$M_{j,Rd}$ [kNm]	$S_{j,ini}$ [kNm/rad]
		1 st bolts row	2 nd bolts row	3 rd bolts row		
M24	15	End plate	End plate	End plate	242,3	75 951
	20	End plate	Bolts	Column flange	293,6	80 415
	25	Column flange	Bolts	Column flange	304,6	81 842
	30	Column flange	Bolts	Column flange	304,6	82 351
M30	15	End plate	End plate	Column web	245,9	78 073
	20	End plate	Column flange	Column web	321,6	83 033
	25	End plate	Column flange	Column web	336,3	84 806
	30	Column flange	Column web	Column web	337,5	85 610

Table 1 shows calculated result combinations of resistance in each analysed case presenting critical components. Analysing focused on finding weakest moment resistance joint resistance let the authors to notice some regularities. The weakest component is in fact column web, more precisely, the resistance of column web panel in compression, tension and in shear.

3. Joint resistance with reinforced column web

Applying one- or double-sided web plates is a very effective method of column web resistance increase. To check the effectiveness of this method in semi-rigid joint shown in Fig. 1 several calculations of resistance and stiffness were conducted. Connection was reinforced with one-sided supplementary web plate that thickness $t_s \geq t_{wc}$ and dimensions (in accordance with European Standard [7]) presented on Fig. 2. Column webs are critical components in joints with M24 and M30 bolts so only those cases were analysed. Results are presented in Table 2. Moment resistance increase is placed between 14% and 37% and stiffness increase between 43% and 47%.



Rys. 2. Wymiary nakładki wzmacniającej środek przyjęte zgodnie z wytycznymi [7]
 Fig. 2. Supplementary web plate dimensions in accordance with the guidelines [7]

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza parametryczna jednoznacznie potwierdziła wysoką skuteczność stosowania nakładek wzmacniających środek stupa. Efektu takiego nie można uzyskać stosując tradycyjne żebra usztywniające panel środnika stupa na przedłużeniach pasów belki / rygła. Wobec powyższego pojawia się pytanie czy możliwe jest pogodzenie dążenia do eliminowania kosztów i pracochłonnych rozwiązań konstrukcyjnych z projektowaniem konstrukcji efektywnych z uwagi na całkowite zużycie materiału? Ponadto zastosowanie takich nakładek utrudnia wykonanie ochronny antykorozyjnej elementów konstrukcyjnych poprzez cynkowanie na gorąco.

4. Summary

Taken parametric analysis explicitly confirms high effectiveness of applying supplementary web plates reinforcing the column web panel. This effect is impossible to attain using traditional transverse web stiffeners extending beam flanges. There is a very important question appearing on this stage if it's actually possible to combine aspiration to eliminate expensive and laborious technological solutions with structure designing in an effective way focused on complete steel consumption? Furthermore applying such plates makes corrosion protection hard to put on galvanized elements.

Literatura • References

- [1] Bródka J., Kozłowski A., (1996), *Sztywność i nośność węzłów podatnych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów-Białystok.
- [2] Bródka J., Kozłowski A., Ligocki I., Łąguna J., Ślęczka L., (2009), *Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych*, Polskie Wydawnictwo Techniczne, Rzeszów.
- [3] Kozłowski A., Pisarek Z., Wierzbicki S., (2010), *Metoda składnikowa określania według PN-EN 1993-1-8 strukturalnych właściwości spawanych węzłów ramowych konstrukcji stalowych*, Inżynieria i Budownictwo, No. 2, 2010, pp. 74-81.
- [4] Kozłowski A., Pisarek Z., (2009), *Projektowanie doczołowych połączeń śrubowych według PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8*, Inżynieria i Budownictwo, No. 4, 2009, pp.193-204.
- [5] Kozłowski A., Pisarek Z., (2008), *Resistance and stiffness of T-stub with four bolts*, Archives of Civil Engineering, Vol. 54, No.1, 2008, pp. 167-191.
- [6] Pisarek Z., Kozłowski A., (2006), *End plate steel joint with four bolts in the row*, In: Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures, Ed.: Giżejowski, Kozłowski, Ślęczka & Ziółko, Taylor & Francis Group, London.
- [7] PN-EN 1993-1-8 Eurokod 3: *Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-8: Projektowanie węzłów*, PKN, 2006