

Wpływ właściwości łączników mocujących poszycie na sztywność obrotową podparcia sprężystego płatwi z zetownika giętego

Influence of the sheet-to-purlin fastener properties on the rotational restraint of cold-formed Z-purlins

Michał Gajdzicki¹, Jerzy Goczek¹

¹Katedra Mechaniki Konstrukcji, Zakład Konstrukcji Stalowych,
Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
e-mail: michal.gajdzicki@p.lodz.pl

¹Department of Structural Mechanics, Division of Steel Structures,
Faculty of Civil Engineering, Architecture and Environmental Engineering, Łódź University of Technology
Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź
e-mail: michal.gajdzicki@p.lodz.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznych, zalecanego przez Eurokod 3-1-3 badania doświadczalnego, na podstawie których wyznaczano sztywność obrotową C_D w przypadku średnic wkrętów i podkładek uszczelniających innych niż te, do których ograniczono przepisy normowe. Otrzymane wyniki wykorzystano do wyznaczenia maksymalnego granicznego obciążenia płatwi ciągłej przy obciążeniach grawitacyjnych i unoszących. Porównanie wyników pozwoliło wnioskować, że ograniczenia narzucone na przepisy normowe mogą być usunięte.

Abstract

The paper presents the results of a numerical simulations of the standard test recommended by Eurocode 3-1-3 to determine the rotational stiffness C_D , for different then the specified in the code sheet-to-purlin fastener and washer diameters. The obtained results were used to calculate the ultimate limit load of continuous Z-purlin for gravity and uplift loading. The comparison of the results leads to the conclusion that the limits of EC3 provisions can be lifted.

Słowa kluczowe: płatwie gięte, sztywność obrotowa podparcia sprężystego, podkładki neoprenowe, symulacja numeryczna
Keywords: cold-formed Z-purlin, rotational restraint, neoprene washer, numerical simulation

1. Wprowadzenie

Celem pracy jest zbadanie poprawności wyznaczania sztywności obrotowej podparcia sprężystego płatwi C_D według Eurokodu 3-1-3 [1] w przypadku innych łączników mechanicznych niż tam wymienione. Z uwagi na poważne ograniczenia stosowalności przepisów [1] powstaje wątpliwość, czy sztywność C_D wyznaczona według nich może być wykorzystana do obliczania nośności płatwi giętej w innych sytuacjach projektowych. W pracy przedstawiono wyniki symulacji numerycznej, w której wyznaczono sztywność C_D z modelu MES stanowiska badawczego, w przypadku średnic łączników i podkładek innych niż określone w [1]. Ponadto rozpatrzono przypadki, gdy blacha trapezowa jest wewnętrzną warstwą obudowy i stosuje się łączniki bez podkładek uszczelniających. Otrzymane wyniki użyto do określenia maksymalnych granicznych obciążeń płatwi $q_{ult,Ed}$ w przypadku różnych schematów statycznych, które następnie porównano z wynikami otrzymanymi według [1], pomijając ograniczenia rozmiarów łączników i podkładek.

2. Sztywność obrotowa podparcia sprężystego – PN-EN 1993-1-3

Sztywność obrotowa C_D może być wyznaczona wg [1] w ograniczonych przypadkach według dwóch wzorów –

1. Introduction

The purpose of this paper is to investigate the correctness of the Eurocode 3-1-3 [1] rules for the determination of the rotational restraint C_D , given to the purlin by the sheeting for other sheet-to-purlin fasteners than the specified there. Due to strong limitations on the use of the rules there is a doubt if the values of rotational stiffness C_D obtained from [1] for different fasteners can be used to determine the buckling resistance of cold-formed Z-purlins. The paper presents the results of numerical simulations of the standard test to determine the rotational stiffness C_D , in which the fastener and neoprene washer diameters were different than specified in [1]. In the design situation, when the trapezoidal sheeting is an inner cladding layer, the fasteners without neoprene washers are used and therefore the simulations were also performed without neoprene washers. Subsequently, the numerical results of the C_D stiffness were used to calculate the ultimate limit load $q_{ult,Ed}$ of purlins for different static schemes and compared with the results obtained from [1] disregarding its fastener limitation.

2. The rotational spring stiffness – PN-EN 1993-1-3

The stiffness C_D can be determined, in the limited cases, from two formulae recommended by [1] – simple (130p) and complex (Eq.1). The stiffness C_D calculated from the simple

uproszczonego (130p) oraz rozbudowanego (1). Wartości C_D wyznaczone ze wzoru uproszczonego zależą tylko od rozstawu łączników na długości płatwi p , przez co jest on częściej stosowany. Jak wykazano w [3], wartości te w każdym rozpatrywanym przypadku dają zawyżone wartości nośności i wzór ten powinien być usunięty z [1]. W niniejszej pracy wyniki numeryczne porównano z obliczonymi tylko ze wzoru (1).

Wzór (1) oparty jest na badaniach doświadczalnych przeprowadzonych przez Lindnera w Berlinie [4, 5, 6, 7]. Na podstawie tych badań zaproponowano wcześniejszą jego postać zamieszczoną w normie niemieckiej, a następnie w ENV 3-1-3. Jego stosowność ograniczono do parametrów łączników użytych w tych badaniach. W [1] zamieszczono wzór zmodyfikowany przez Höglunda, Vransy'ego oraz Lindnera, uwzględniający większą liczbę parametrów połączenia. Jego stosowność została ograniczona do jednej średnicy wkręta i podkładki, co jest poważnym ograniczeniem.

Jeśli łączniki mocujące poszycie do płatwi rozmieszczone są w linii środkowej pasa, to w przypadku blachy trapezowej wartość sztywności $C_{D,A}$ można wyznaczyć według wzoru:

$$C_{D,A} = C_{100} k_{ba} k_t k_{br} k_A k_{bT} \quad (1)$$

gdzie: C_{100} jest współczynnikiem bazowym odpowiadającym wartości $C_{D,A}$ dla pasa o szerokości 100 mm (Tablica 10.3 w [1]); k_t są to współczynniki zależne od szerokości pasa płatwi, geometrii oraz ułożenia arkusza blachy, rozstawu łączników oraz od kierunku i wartości obciążenia przekazywanego z poszycia na płatwę.

Wzór (1) jest ważny tylko w przypadku łączników o średnicy 6,3 mm oraz grubości podkładek nie przekraczających 1,0 mm. Wartości C_{100} zdefiniowane są dla podkładek o średnicy 22 mm w przypadku obciążeń grawitacyjnych oraz 16 mm w przypadku obciążeń unoszących.

Jeżeli nie są spełnione ograniczenia [1], wartość sztywności C_D może być wyznaczona ze wzoru (2), w którym sztywność boczno podparcia pasa swobodnego płatwi K na jednostkę długości należy określić w badaniu doświadczalnym.

$$C_D = h^2 / (1/K - 1/K_B) \quad (2)$$

Jak wykazano w [2, 3] badania takie mogą być symulowane z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Porównanie wyników analiz numerycznych z doświadczalnymi [8] w przypadku 36 modeli różniących się przekrojem poprzecznym płatwi, grubością profilu blachy oraz zwrotem obciążenia pozwoliło stwierdzić, że użyty w pracy model numeryczny daje wystarczająco dokładne wyniki.

3. Wyniki analizy numerycznej

3.1. Średnice łączników oraz podkładek uszczelniających

Wartości sztywności C_D wyznaczone zgodnie z [1] są miarodajne w przypadku łączników o średnicy 6,3 mm i średnicy podkładek równej 22 mm przy obciążeniach grawitacyjnych i 16 mm przy unoszących. W praktyce minimalna zalecana średnica wkrętów w przypadku grubości ścianek płatwi do 2 mm wynosi $d_{min} = 4,8$ mm, natomiast w przypadku grubości od 2 do 3 mm wynosi $d_{min} = 5,5$ mm. Zamiast podkładek o średnicy 22 mm częściej stosowane są podkładki o średnicach 14, 16 lub 19 mm.

W celu sprawdzenia wpływu średnic łączników i podkładek

formuła zależy tylko od p - liczby łączników na metr długości płatwi. Dlatego, prostą formułę używa się częściej. Jednak, daje ona wyniki zawsze z zastrzeżeniem, co zostało pokazane w [3] i powinno być usunięte z [1]. W tym artykule wyniki numeryczne porównano z tymi obliczonymi z wzoru (1).

Równanie (1) jest oparte na licznych badaniach doświadczalnych przeprowadzonych przez Lindnera [4, 5, 6, 7]. Wcześniej było ono zawarte w normie niemieckiej, a później w ENV 3-1-3. Stosowność tej formuły została ograniczona do parametrów badań. Eurocode 3-1-3 [1] zaleca bardziej złożoną formułę, z współczynnikami zależnymi od właściwości połączenia blachy z płatwią, jak zaproponował Höglund, Vransy i Lindner. Jej stosowność jest ograniczona do jednej średnicy łączników i podkładek.

Jeżeli łączniki mocujące poszycie do płatwi rozmieszczone są w linii środkowej pasa, to w przypadku blachy trapezowej wartość sztywności $C_{D,A}$ można wyznaczyć według wzoru:

gdzie: C_{100} jest współczynnikiem bazowym odpowiadającym wartości $C_{D,A}$ dla pasa o szerokości 100 mm, podane w Tabeli 10.3 w [1]; k_t to współczynniki zależne od szerokości pasa, geometrii i ułożenia arkusza blachy, rozstawu łączników oraz od kierunku i wartości obciążenia przekazywanego z poszycia na płatwę.

Równanie (1) jest ważne tylko dla łączników o średnicy 6,3 mm i podkładek o grubości nie przekraczającej 1,0 mm. Wartości C_{100} podane są dla podkładek o średnicy 22 mm dla obciążenia grawitacyjnego i 16 mm dla obciążenia unoszącego.

Jeżeli nie są spełnione ograniczenia [1], wartość sztywności C_D można wyznaczyć z wzoru (2), w którym sztywność boczno podparcia pasa swobodnego płatwi K na jednostkę długości należy określić w badaniu doświadczalnym.

Wzór (1) jest ważny tylko w przypadku łączników o średnicy 6,3 mm i podkładek o grubości nie przekraczającej 1,0 mm. Wartości C_{100} podane są dla podkładek o średnicy 22 mm dla obciążenia grawitacyjnego i 16 mm dla obciążenia unoszącego.

3. The results of numerical simulations

3.1. The sheet-to-purlin fastener and washer diameters

According to [1] the C_D value can be determined only for the fastener diameter 6,3 mm and the washer diameter 22 mm for gravity loading, and 16 mm for uplift loading. In practice the minimum fastener diameter $d_{min} = 4,8$ mm is recommended for thicknesses of purlin cross-sections up to 2 mm and $d_{min} = 5,5$ mm for thicknesses between 2 and 3 mm. Instead of the washer diameter 22 mm, the diameters 14, 16, and 19 mm are more often used.

The numerical models were used to investigate the influence of fastener and washer diameters on the C_D stiffness.

na sztywność C_D wykonano szereg obliczeń numerycznych. Wyniki tych symulacji w przypadku obciążeń grawitacyjnych jak i unoszących zamieszczono w Tablicach 1 i 2. Obliczono również wartości maksymalnych granicznych obciążeń $q_{ult.Ed}$ płatwi ciągłej o rozpiętości przeszła 5m z jednym stężeniem pośrednim (wartości w nawiasach w Tablicach 1 i 2). W ostatniej kolumnie Tablicy 1 zamieszczono wyniki w przypadku płatwi obciążonej grawitacyjnie, gdy użyto wartość sztywności C_D wyznaczoną ze wzoru (1), pomimo jego ograniczeń.

Tables 1 and 2 present the C_D values for the most frequent used fastener and washer diameters in the cases of gravity and uplift loading. The values of the ultimate limit load $q_{ult.Ed}$ for the 5 m span continuous purlin with one intermediate antisag bar in the cases of gravity and uplift loading are in brackets. For comparison, the values of $q_{ult.Ed}$ for gravity loading, determined using the stiffness C_D calculated from Eq. (1), despite its restrictions, are given in the last column of Table 1.

Tabela 1. Wartości sztywności C_D oraz obciążenia granicznego płatwi $q_{ult.Ed}$ w przypadku obciążeń grawitacyjnych
Table 1. The C_D values and the ultimate limit load $q_{ult.Ed}$ for gravity loading

Purlin and sheeting	Washer diameter [mm]	Fastener diameter [mm]			$C_{D,3-1-3}$ [Nm/m/rad]
		4,8	5,5	6,3	
Z150x1,5	14,0	291 (1,174)	293 (1,174)	-	412 (1,204)
- LTP 45x0,6	16,0	304 (1,177)	309 (1,179)	313 (1,180)	
	19,0	-	322 (1,182)	328 (1,184)	
Z150x1,5	14,0	352 (1,190)	354 (1,191)	-	527 (1,225)
- LTP 45x0,7	16,0	367 (1,194)	372 (1,195)	377 (1,196)	
	19,0	-	388 (1,199)	395 (1,200)	
Z150x1,0	14,0	167 (0,557)	169 (0,557)	-	408 (0,579)
- LTP 45x0,6	16,0	173 (0,558)	175 (0,558)	177 (0,558)	
	19,0	-	180 (0,559)	183 (0,559)	

Tabela 2. Wartości sztywności C_D oraz obciążenia granicznego płatwi $q_{ult.Ed}$ w przypadku obciążeń odrywających
Table 2. The C_D values and the ultimate limit load $q_{ult.Ed}$ for uplift loading

Purlin and sheeting	Washer diameter [mm]	Fastener diameter [mm]			$C_{D,3-1-3}$ [Nm/m/rad]
		4,8	5,5	6,3	
Z150x1,5	14,0	353 (1,052)	357 (1,053)	-	-
- LTP 45x0,6	16,0	368 (1,054)	375 (1,055)	381 (1,056)	
	19,0	-	392 (1,058)	400 (1,059)	
Z150x1,5	14,0	427 (1,062)	432 (1,063)	-	-
- LTP 45x0,7	16,0	446 (1,065)	454 (1,066)	459 (1,066)	
	19,0	-	473 (1,068)	481 (1,069)	
Z150x1,0	14,0	214 (0,492)	216 (0,492)	-	-
- LTP 45x0,6	16,0	220 (0,492)	223 (0,492)	226 (0,492)	
	19,0	-	229 (0,493)	233 (0,493)	

Wartości sztywności C_D zmieniają się w małym zakresie (Tablice 1 i 2). Zwiększenie średnicy łącznika z 4,8 do 6,3 mm powoduje przyrost sztywności C_D maksymalnie o 3,5%. Większe różnice występują w przypadku zmiany średnicy podkładek uszczelniających. W przypadku modeli z Z150x1,5 wartości sztywności C_D rosną o 9,9%, a w przypadku płatwi Z150x1,0 różnica maleje do 6,0%.

3.2. Wkręty bez podkładek uszczelniających

W [1] nie sprecyzowano, czy wzory na sztywność C_D mogą być stosowane w przypadku wkrętów z podkładkami uszczelniającymi czy bez nich. W wielu przypadkach podkładki uszczelniające nie są wymagane, dlatego przeprowadzono symulacje numeryczne, w których modelowano łączniki bez takich podkładek. Otrzymane wartości sztywności C_D oraz obliczone na ich podstawie maksymalne graniczne obciążenia $q_{ult.Ed}$ płatwi ciągłej, z jednym stężeniem pośrednim przedstawiono w Tablicy 3. W ostatnich dwóch kolumnach zestawiono stosunki wartości sztywności i nośności w przypadku łączników z podkładkami i bez nich.

The differences in the C_D stiffness vary in a small range. The comparison of the values in Table 1 and 2 for the fastener diameters 4,8 and 6,3 mm shows the increase in the C_D stiffness up to 3,5%. Larger differences occur if the diameter of washer varies. For Z150x1,5 the differences amount up to 9,9% and for Z150x1,0 decrease to 6,0%.

3.2. Fasteners without neoprene washer

Eurocode 3-1-3 [1] does not specify whether the formulae for the determination of the C_D stiffness take the presence of neoprene washers into account. In many design cases, the sealing washers are not required, therefore the additional simulations were performed for models without the neoprene washer. The obtained numerical C_D values and the ultimate limit load $q_{ult.Ed}$ are shown in Table 3 for the continuous purlin with one intermediate antisag bar. The last two columns in Tables 3 presents the ratio of the C_D stiffness and the ultimate limit load $q_{ult.Ed}$ for fasteners with and without neoprene washers.

Tabela 3. Wartość sztywności C_D oraz obciążenia granicznego $q_{ult.Ed}$ płatwi ciągłej o rozpiętości 5m z jednym stężeniem pośrednim
 Table 3. The C_D values and the ultimate limit load $q_{ult.Ed}$ of 5 m span continuous purlin with one intermediate antisag bar

Purlin and sheeting	Loading	With neoprene washer		Without neoprene washer		Ratio	
		C_D	$q_{ult.Ed}$	C_D	$q_{ult.Ed}$	C_D	$q_{ult.Ed}$
Z150x1,0 – LTP 45x0,5	gravity	137	0,551	210	0,563	1,53	1,02
Z200x1,0 – LTP 45x0,5		107	0,703	162	0,711	1,51	1,01
Z150x2,0 – LTP 45x0,7		520	1,667	880	1,742	1,69	1,04
Z200x2,0 – LTP 45x0,7		463	2,296	802	2,379	1,73	1,04
Z150x1,0 – LTP 45x0,5	uplift	180	0,489	263	0,495	1,46	1,01
Z200x1,0 – LTP 45x0,5		136	0,625	199	0,630	1,46	1,01
Z150x2,0 – LTP 45x0,7		599	1,456	1032	1,501	1,72	1,03
Z200x2,0 – LTP 45x0,7		529	2,050	917	2,100	1,73	1,02

W analizowanych przypadkach użycie łączników bez podkładek neoprenowych spowodowało przyrost wartości sztywności C_D od 46% do 73%. Jednak te większe wartości C_D , powodują tylko 4% przyrost obciążenia granicznego w przypadku płatwi ciągłej o rozpiętości 5 m. Różnice będą inne w przypadku odmiennych schematów statycznych płatwi i każdy taki przypadek powinien być analizowany oddzielnie.

4. Wnioski

Eurokod 3-1-3 [1] ogranicza stosowalność wzorów na wyznaczanie sztywności C_D do ściśle określonych średnic łączników i podkładek uszczelniających. Analiza wyników symulacji numerycznych zaprezentowana w pracy pozwala wnioskować, że normowy wzór (1) może być stosowany do wyznaczenia wartości C_D w przypadku innych średnic. We wszystkich analizowanych przypadkach (Tablice 1 i 2) wartości sztywności C_D w wypadku różnych rozmiarów łączników, otrzymane z symulacji numerycznych, były bliższe wartości doświadczalnej zaczerpniętej z [8] niż wyniki otrzymane z [1] (z pominięciem ograniczeń). Można zatem stwierdzić, że ograniczenia stosowania wzoru (1) w tablicy 10.3 [1] powinny być usunięte.

W przypadku stosowania wkrętów bez podkładek uszczelniających wartości otrzymywane ze wzoru (1) mogą być zwiększone o 50%. Przyrost sztywności C_D zwiększa nośność płatwi z zetownika giętego, co może być szczególnie ważne w przypadku płatwi jednoprzęsłowych lub ciągłych bez stężeń pośrednich.

Literatura • References

- [1] EN 1993-1-3:2006 Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting.
- [2] Gajdzicki M.,(2011), *Numeryczne wyznaczanie sztywności stężenia przeciwskrętnego płatwi z zetownika giętego* (in Polish). Ph.D. thesis, Łódź University of Technology.
- [3] Gajdzicki M., Goczek J.,(2011), *Numerical simulation to determine torsional restraint of cold-formed Z-purlin*. XII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Konstrukcje Metalowe – ICMS, Wrocław 15-17 czerwca 2011, s. 424-433.
- [4] Lindner J., Gregull T.,(1989), *Drehbettungswerte für Dachdeckungen mit untergelegter Wärmedämmung*. Stahlbau 58, No. 6, 1989, pp. 173-179.
- [5] Lindner J., Groeschel F.,(1996), *Drehbettungswerte für die Profilblechbefestigung mit Setzbolzen bei unterschiedlich grossen Auflasten*, Stahlbau 65, No. 6, 1996, pp. 218-224.
- [6] Lindner J.,(1998), *Restraint of beams by trapezoidally sheeting using different types of connection*. Stability and ductility of steel structures, Elsevier 1998, pp. 27-36.
- [7] Lindner J.,(1987), *Stabilisierung von Trägern durch Trapezbleche*, Stahlbau 56, No. 1, 1987, pp. 9-15.
- [8] Vranský T.,(2002), *Rotační podepření tenkostěnné ocelové vaznice krytinou*, Habilitační práce (In Czech). Praha 2002.

The use of sheet-to-purlin fasteners without neoprene washer increases the C_D stiffness from 46 to 73% in the analysed cases. However, such an increase in the C_D stiffness causes only up to 4% increase in the ultimate limit load of 5 m continuous purlins. It is obvious, that the differences vary depending on the span of purlin, the static scheme and the number of antisag bars, so each case should be calculated individually.

4. Conclusions

Eurocode 3-1-3 [1] provides sufficient rules to determine the rotational spring stiffness C_D only in some limited cases. The analysis of numerical results presented in this paper shows that Eq. (1) can also be used for different fastener and washer diameters. All the C_D values (Table 1 and 2) obtained from numerical simulations for different diameters of fasteners and washers were closer to the experimental test results [8] than the values determined from [1]. Therefore, the limitations on the use of Eq. (1) in Table 10.3 [1] should be lifted.

In the design situations, in which the fasteners without neoprene washer are used, the C_D values obtained from Eq. (1) can be multiplied by 1.5. The increased value of C_D raises the ultimate limit load of cold-formed Z-purlins. It may be particularly important for simply supported purlins and continuous large span purlins without antisag bars.