

Obciążenia żeber pośrednich blachownic dwuteowych w stanie nadkrytycznym Intermediate stiffeners loads of I-girder in post-critical range

Krzysztof Kuchta¹, Izabela Tylek²

^{1,2}Katedra Konstrukcji Metalowych,
Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: kkuchta@pk.edu.pl¹, itylek@pk.edu.pl²

^{1,2}Chair of Metal Structures,
Faculty of Civil Engineering, Cracow University of Technology
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: kkuchta@pk.edu.pl¹, itylek@pk.edu.pl²

Streszczenie

Zgodnie z procedurą wymiarowania żeber poprzecznych blachownic według PN-EN 1993-1-5 [5] wymaga się sprawdzenia warunków nośności i sztywności. W przypadku wykorzystywania nadkrytycznej rezerwy nośności blachownicy, podstawowym źródłem obciążenia żebra jest działanie pola ciągnięć w środku dźwigara. W niniejszym artykule krytycznej analizie poddano normowy [5] sposób wyznaczania tej siły. Weryfikację wstępnych wniosków przeprowadzono przy użyciu numerycznego powłokowego modelu blachownicy. Wykazano, że siły podłużne w żebrach pośrednich obliczone według formuły normowej [5] mogą być nawet kilkukrotnie większe od wartości wyznaczonych za pomocą modelu numerycznego.

Abstract

In accordance with plate girders transversal stiffeners design procedure according to PN-EN 1993-1-5 [5] it is required to verify resistance and rigidity conditions. In case when plate girder post-critical reserve of strength is used, primary source of stiffener load is tension field action in girder web. In the paper critical analysis of Standard [5] recommendations of this load determination was made. Verification of preliminary conclusions was executed with the use of shell numerical model of plate girder. It was shown that longitudinal force in stiffeners determined according to Standard formula [5] may be even several times larger than those reached from numerical model.

Słowa kluczowe: blachownice, żebra usztywniające, żebra pośrednie, nadkrytyczna rezerwa nośności
Keywords: plate girders, stiffeners, intermediate stiffeners, post-critical reserve of strength

1. Wstęp

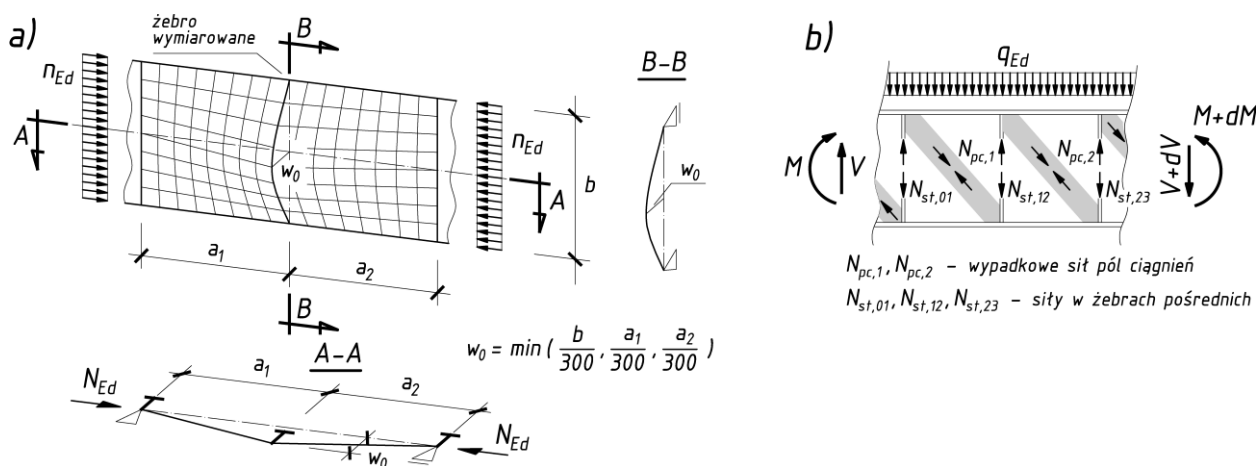
Zastosowanie uzebrzenia było pierwszą historycznie odnotowaną formą konstrukcyjnego zwiększenia stateczności smukłych ścianek środków i pasów, umożliwiającą ekonomicznie efektywne kształtowanie przekrojów blachownic stalowych [10]. Korzyści wynikające ze stosowania żeber usztywniających nie ograniczają się jedynie do zwiększenia nośności blachownicy w dokrytycznej i nadkrytycznej fazie pracy. Żebra poprzeczne zapewniają również: bezpieczne wprowadzenie sił skupionych do tarczy środkowej, punkty podparcia żeber podłużnych, zwiększenie nośności pasów ściskanych w układach konstrukcyjnych typu most otwarty z jazdą dołem, zabezpieczenie blachownicy przed dystorsyjnymi formami niestateczności oraz pomagają kształtować połączenia z elementami drugorzędowymi. Mimo pojawienia się na rynku pierwszych w pełni zrobotyzowanych spawalniczych linii produkcyjnych, w większości wytwórni konstrukcji stalowych, uzebrzenie belki blachownicowej spawane jest ręcznie, co znacząco zwiększa ich koszt wykonania. Niezwykle istotnym zagadnieniem jest zatem stosowanie takich modeli obliczeniowych i metod projektowania, które z odpowiednim zapasem bezpieczeństwa zapewnią wykorzystanie rezerwy nośności, które pojawiają się po zastosowaniu uzebrzenia.

1. Introduction

Stiffeners application was the first historically recorded structural way to increase stability of slender web and flange panels, enabling economically effective shaping of steel plate girder cross-sections [10]. Benefits resulting from stiffeners applying are not limited only to increase of plate girder resistance in prebuckling and post-critical range of work. Transversal stiffeners also provide: safe introducing concentrated loads into web disk, supporting points for longitudinal stiffeners, increase of compressed flange resistance in structures like open deck bottom-road bridge, protection of the girder against distortional instability and facilitate to shape connections with secondary elements. Despite the appearance on the market the first fully robotic welding production lines, in most steel structures production plants, plate girder stiffeners are welded manually what significantly increase their production costs. Using such analytical models and design methods which, with adequate margin of safety, will provide utilizing of reserve of strength occurring with stiffeners application is of great importance.

2. Wymiarowanie żeber pośrednich w świetle wymagań normy PN-EN 1993-1-5 [5]

Model obliczeniowy i procedura wymiarowania żeber poprzecznych blachownic zawarta w normie PN-EN 1993-1-5 [5] w sposób istotny różni się od wymagań projektowych poprzedniej normy polskiej PN-B-03200:1990 [4]. Ze względu na to, że w normie PN-EN 1993-2 [6] nie podano przepisów dotyczących weryfikacji stateczności dźwigarów blachownicowych, norma [5] jest obecnie dokumentem wspólnym zarówno dla projektantów obiektów kubaturowych jak i mostowych. Konieczność uwzględnienia przypadków projektowych, w których zebró poprzeczne może być prętem o wielometrowej rozpiętości, wymusiła przyjęcie modelu obliczeniowego w postaci ściskanego i zginanego pręta z wstępną imperfekcją geometryczną w postaci półfali sinusoidy o strzałce wygięcia w_0 (rys.1).



Rys. 1. Model obliczeniowy żebra pośredniego blachownicy wg PN-EN 1993-1-5 [5]: a) schemat statyczny, b) obciążenie siłą podłużną pochodzącą od działania pól ciągnięć

Fig. 1. Design model of girder intermediate stiffener according to PN-EN 1993-1-5 [5]: a) static system, b) direct force load due to tension field action

Weryfikacja przekroju żebra pośredniego zgodnie z procedurą normy [5] wymaga przeprowadzenia sprężystej analizy statycznej II-ego rzędu oraz sprawdzenia przekroju żebra zarówno ze względu na stan graniczny nośności (1) jak i użytkowalności (2)

Verification of intermediate stiffener cross-section according to procedure given in [5] requires to carry out second-order elastic analysis and to check stiffener cross-section due to both ultimate (1) and serviceability (2) limit states.

$$\sigma_{z,max} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \tag{1}$$

$$u_{y,max} \leq u_{dop} = b/300, \tag{2}$$

gdzie:

- $\sigma_{z,max}$ – maksymalne naprężenie normalne w przekroju żebra,
- f_y – granica plastyczności zastosowanej stali,
- γ_{M1} – częściowy materiałowy współczynnik bezpieczeństwa,
- $u_{y,max}$ – maksymalne ugięcie żebra w płaszczyźnie prostopadłej do środka.

where:

- $\sigma_{z,max}$ – maximum direct stress in stiffener cross-section,
- f_y – yield strength of applied steel grade,
- γ_{M1} – partial safety factor for material,
- $u_{y,max}$ – maximum stiffener deflection in plane perpendicular to the web.

Warunki nośności i sztywności żebra rozpatrywanego jako ściskany i zginany pręt w przestrzeni dwuwymiarowej są uzupełnione o dodatkowe kryterium stateczności skrętnej żebra, które bywa miarodajne przy wymiarowaniu w przypadku krzyżowego kształtu przekroju żebra.

Resistance and rigidity conditions of the stiffener considered as beam-column in two-dimensional space are supplemented by additional criterion of stiffener torsional buckling which can prevail in the case of cross shape of stiffener cross-section.

W dokrytycznej fazie pracy blachownicy naprężenia normalne

In prebuckling range of plate girder behaviour direct stresses $\sigma_{z,max}$ are the result of acting of equivalent imperfectional

$\sigma_{z,max}$ są efektem działania zastępczego równomiernie rozłożonego obciążenia imperfekcyjnego. uniformly distributed load.

$$q_{eq} = \frac{\pi}{4} (w_0 + w_{el}) \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \left[\left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) \frac{N_{Ed}}{b} \right], \quad (3)$$

gdzie:

w_0 – strzałka wygięcia wstępnego osi żebra,
 w_{el} – strzałka sprężystego ugięcia osi żebra, którą można wyznaczyć podejściem iteracyjnym albo konserwatywnie przyjmując równą $b/300$,

$\sigma_{cr,c}$ – sprężyste naprężenia krytyczne ścianki nieuzębrowanej przy niestateczności typu prętowego,

$\sigma_{cr,p}$ – sprężyste naprężenia krytyczne ścianki nieuzębrowanej przy niestateczności typu płytowego.

W fazie pracy nadkrytycznej dodatkowe obciążenie żebra stanowi siła podłużna N_{st} , która uaktywnia się dopiero po przejściu blachownicy do stanu nadkrytycznego

$$N_{st,RS} = V_{Ed} - \tau_{cr}bt, \quad (4)$$

gdzie τ_{cr} – krytyczne naprężenie styczne płyty środknika.

Oprócz wymienionych wyżej obciążeń, podstawowym źródłem dodatkowych naprężeń normalnych w przekroju żebra pośredniego może być również działanie: obciążenia zewnętrznego, obciążenia zewnętrznego na mimośrodkie połączenia z elementem drugorzędym, reakcji żeber podłużnych oraz sił normalnych na mimośrodkie konstrukcyjnym żebrze jednostronnego. Należy zwrócić uwagę na to, że zalecana przez normę [5] formuła (5) określająca wartość siły podłużnej w stanie granicznym nośności żebra pośredniego, wyprowadzona została na podstawie równań równowagi modelu pola ciągnięć Cardiff (Rockeya-Škalouda) [8], podczas gdy nośność obliczeniową panelu środknika na siłę poprzeczną wyznaczana jest na podstawie modelu pola ciągnięć Stockholm (Höglunda) [2]. Niespójność normowego modelu obliczeniowego [5] nie jest problemem akademickim. Siła podłużna w żebrze pośrednim jest integralnym elementem modelu pola ciągnięć, stanowiącym część zrównoważonego układu sił w stanie granicznym nośności blachownicy. W przypadku modelu pola ciągnięć Stockholm wartość siły w żebrze pośrednim należy wyznaczyć stosując formułę

$$N_{st,H} = \frac{4M_{fp}}{c} \quad (5)$$

gdzie:

M_{fp} – moment plastyczny pasa,
 c – odległość pomiędzy przegubami plastycznymi w pasie ściskanym albo rozciągającym.

W zapisach normy [5] nie wspomina się również na temat obciążeń żeber pośrednich wywołanych zamierzoną nieprostoliniowością pasów blachownic. W przypadku blachownic o pasie załamanym dodatkową siłą podłużną można wyznaczyć z warunku równowagi sił normalnych w punkcie styku pasa i żebra, przy czym przekrój żebra można oszacować według propozycji Kowala [3] jako wektorową sumę powierzchni pasów zbiegających się w załamaniu. Przy krzywoliniowym kształtowaniu blachownicy, składową siłę normalnej w żebrze pochodzącą od tzw. ściskania międzypasowego można wyznaczyć korzystając z normy [1]

$$N_{st,p} = \frac{\sigma_x b_f t_f b_{we}}{r}, \quad (6)$$

where:

w_0 – initial deflection of stiffener axis,

w_{el} – elastic deformation, that may be either determined iteratively or be taken as the maximum additional deflection $b/300$,

$\sigma_{cr,c}$ – elastic critical stress of unstiffened for column type buckling,

$\sigma_{cr,p}$ – elastic critical stress of unstiffened for plate type buckling.

In post-critical range stiffener additional load constitute axial force N_{st} which become active not until girder passes to post-critical range of work.

where τ_{cr} – critical shear stress of web plate panel.

Apart of loads mentioned above, primary source of additional normal stresses in stiffener cross-section may be also acting of: external load, eccentricity of external load due to secondary element connection, reaction of longitudinal stiffeners and eccentricity of axial forces in one-sided stiffeners. It should be noticed that recommended by [5] formula (5) describing value of axial force in ultimate limit state of intermediate stiffener was derived on the basis of equilibrium equations of Cardiff (Rockey-Škaloud) tension field model [8], while web panel design resistance to transverse load is calculated on the basis of Stockholm (Höglund) tension field model [2]. Discrepancy of Standard analytical model [5] is not an academic problem. Axial force in intermediate stiffener is an integral element of tension field model and is a part of well-balanced force system in plate girder ultimate limit state. In case of Stockholm tension field model force value in intermediate stiffener should be calculated using the formula

where:

M_{fp} – plastic moment of the flange,

c – distance between plastic hinges in compressed or tensioned flange.

Provisions of [5] do not mentioned issue of intermediate stiffener loads due to intended out-of-straightness of plate girders flanges. In case of haunched plate girders, additional axial force can be calculated from equilibrium condition of axial forces in the point of flange and stiffener joint; stiffener cross-section area may be estimated according to Kowal's proposal [3] as vector sum of flange areas converge in line of flanges and stiffener connection. In case of curvilinear shaping of plate girder, component of axial force in stiffener due to so called interflange compression can be determined using [1]

gdzie:

σ_x – naprężenia normalne w pasie,
 b_f, t_f – szerokość i grubość pasa odpowiednio,
 b_{we} – mniejsza z wartości $16t$ i $a/2$,
 r – promień krzywizny dźwigara.

3. Weryfikacja obciążeń żeber pośrednich za pomocą numerycznego modelu powłokowego blachownicy

W celu doświadczalnej weryfikacji wartości sił w żebrach pośrednich za pomocą programu ANSYS utworzono numeryczny model powłokowy wolnopodpartej blachownicy obciążonej siłą skupioną w środku swej rozpiętości. Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, że wartości sił podłużnych wyznaczone wg (5) mogą być znacznie przeszacowane. W przypadku analizowanej blachownicy różnica pomiędzy wartościami wyznaczonymi wg propozycji normowej [5] a wynikami obliczeń numerycznych wynosiła ponad 350%. Podobne spostrzeżenia sygnalizowali w swoich pracach Presta, Hendy i Turco [7] oraz Sinur i Beg [9].

4. Podsumowanie i wnioski

Procedura wymiarowania żeber pośrednich blachownic wprowadzona w normie PN-EN 1993-1-5 [5] jest bardziej złożona i pracochłonna w porównaniu z analogiczną procedurą normy PN-B-03200 [4]. Weryfikacja, bardzo ogólnie przedstawionych w zapisie normy [5], warunków nośności i sztywności jest utrudniona ze względu na konieczność prowadzenia analizy statycznej II-ego rzędu. Brak spójności pomiędzy normowym [5] modelem nośności panelu środknika a siłą poprzeczną a metodą wyznaczania siły podłużnej w żebrze wynikającej z działania pola ciągnięć może być przyczyną znacznego, nawet kilkukrotnego, przeszacowania jej wartości, a w konsekwencji przewymiarowania przekroju żebra.

where:

σ_x – normal stress in flange,
 b_f, t_f – width and thickness of the flange, respectively,
 b_{we} – minimum of the values: $16t$ and $a/2$,
 r – girder radius of curvature.

3. Verification of intermediate stiffener loads with the use of shell numerical model of plate girder

In order to verify values of force in intermediate stiffeners with the use of ANSYS computer program, shell numerical model of simply supported beam with concentrated load in the middle of the span was created. On the basis of achieved results it can be noticed that values of axial force calculated according to (5) may be significantly overestimated. In case of analyzed plate girder differences between values determined according to [5] and numerical results was over 350%. Similar observations were point out in the following authors' papers: Presta, Hendy and Turco [7], Sinur and Beg [9].

4. Conclusions

Procedure of plate girder intermediate stiffeners design contained in PN-EN 1993-1-5 [5] is more complex and time-consuming in comparison with analogous procedure from PN-B-03200:1990 [4]. Verification, very generally presented in Standard [5] provisions, resistance and rigidity conditions is difficult due to necessity of second order static analysis. Lack of consistency in Standard models [5] of web panel resistance to transversal load and axial force in stiffener due to acting of tension field, may be the reason of significant, even several times, overestimation of its value and, as a consequence, cross-section of the stiffener.

Literatura • References

- [1] BS 5400-3, (2000), *Steel, concrete and composite Bridges – Part 3: Code of practice for design of steel bridges*, British Standard Institution, London.
- [2] Höglund T., (1997), *Shear buckling resistance of steel and aluminium plate girders*, Thin-Walled Structures, Vol. 29, No. 1-4, 1997, pp. 13-30.
- [3] Kowal Z., (1973), *Wybrane działy z konstrukcji metalowych. Część I i II*, Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.
- [4] PN-B-03200:1990, (1995), *Konstrukcje Stalowe. Obliczenia statyczne i projektowanie*, Wydawnictwa Normalizacyjne Alfa-Wero Sp. z o.o., Warszawa.
- [5] PN-EN 1993-1-5, (2008), *Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-5: Blachownice*, PKN, Warszawa
- [6] PN-EN 1993-2, (2010), *Eurokod 3. Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 2: Mosty stalowe*, PKN, Warszawa.
- [7] Presta F., Hendy C.R., Turco E., (2008), *Numerical validation of simplified theories for design rules of transversely stiffened plate girders*, The Structural Engineer, Vol. 86, No. 21, 2008, pp. 37-46.
- [8] Rockey K. C., Škaloud M., (1972), *The ultimate load behaviour of plate girders loaded in shear*, The Structural Engineer, Vol. 50, Issue 1, 1972, pp. 29-47.
- [9] Sinur F., Beg D., (2012), *Intermediate transverse stiffeners in plate girders*, Steel Construction, Vol. 5, Issue 1, 2012, pp. 23-32.
- [10] Timoshenko S. P., (1966), *Historia wytrzymałości materiałów*, Wydawnictwo Arkady, Warszawa.