

Wpływ przewiązek skrajnych na moment krytyczny i nośność stalowych belek dwuteowych

Influence of end battens on critical moment and load capacity of steel I-beams

dr inż. Krzysztof Wierzbicki (ORCID: 0000-0002-1388-4226), Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

DOI: 10.5604/01.3001.0053.9355

Streszczenie: W artykule zwrócono uwagę na możliwość wykonania efektywnego wzmocnienia stalowych belek dwuteowych z wykorzystaniem przewiązek skrajnych. Przedstawiono analizy parametryczne, z których wynika, że wzmocnienie elementów może sięgać kilkudziesięciu procent. Zależy to jednak od wielu czynników, jak np. długość czy przekrój poprzeczny wzmacnianych belek, wymiary zastosowanych blach wzmacniających czy ich lokalizacja na długości belki. Jest to sposób nieujęty w obowiązujących normach do projektowania konstrukcji, lecz w niektórych przypadkach może się okazać wyjątkowo efektywną metodą wzmocnienia konstrukcji.

Słowa kluczowe: przewiązki, deplanacja, zwichrzenie, belki stalowe, IPE, wzmocnienie.

Abstract: The paper highlights the possibility of performing effective strengthening of steel I-beams using batten plates. Parametric analyses are presented which show that the strengthening of the members can reach several tens of percent. However, this depends on many factors, such as the length or cross-section of the beams to be strengthened, the dimensions of the reinforcing plates used and their location along the length of the beam. This is a method not included in current standards for structural design, but in some cases it can prove to be an extremely effective method of structural strengthening.

Keywords: battens, deplanation, lateral buckling, steel beams, IPE, reinforcement.

1. Wprowadzenie

Istniejące konstrukcje budowlane coraz częściej wymagają wzmocnienia. Jest to często spowodowane tym, że ich właściciele dążą do ocieplenia przegród wewnętrznych, planują montaż instalacji fotowoltaicznej na dachu lub innego typu działania powodujące wzrost wartości obciążeń przekazywanych na dach czy strop. Z uwagi na to, że demontaż istniejącej i wykonanie nowej konstrukcji wiąże się z ogromnymi kosztami, najczęściej dąży się do tego, aby w sposób maksymalny wykorzystać nośność istniejącej konstrukcji z uwzględnieniem dodatkowych wzmocnień.

Istnieje wiele sposobów wzmacniania istniejących konstrukcji. Najbardziej powszechną metodą jest rozbudowa przekroju poprzecznego poszczególnych elementów konstrukcyjnych. W przypadku stalowych belek dwuteowych projektowanych na zginanie wzmocnienie często polega na dospawaniu do pasa dolnego płaskowników stalowych lub innych elementów gorącowalcowanych. Powoduje to zwiększenie pola przekroju poprzecznego, wskaźnika wytrzymałości oraz momentu bezwładności. Wymaga jednak przeprowadzenia procesu wzmocnienia na całej (bądź co najmniej znacznej) długości belki, w tym w najbardziej wyciężonych przekrojach.

W przypadku belek, których nośność na zginanie ze zwichrzeniem została zredukowana za pomocą współczynnika

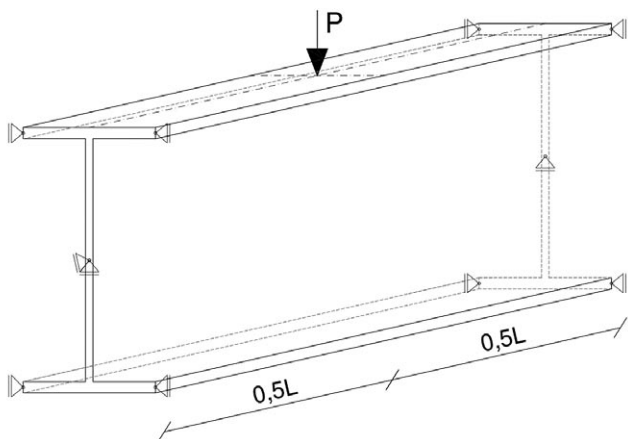
χ_{LT} , możliwe jest także poprawienie stateczności giętno-skrętnej elementu za pomocą np. dodatkowych tężników ograniczających długość zwichrzeniową belki czy żeber usztywniających.

W niniejszej pracy przedstawiony zostanie wpływ jednego z typów żeber (określanych w literaturze jako przewiązki skrajne) na moment krytyczny i nośność belek wykonanych z dwuteowników gorącowalcowanych IPE.

2. Charakterystyka przewiązek skrajnych

Blachy, które zwane są przewiązkami skrajnymi, łączą ze sobą zewnętrzne krawędzie pasa górnego i dolnego belki dwuteowej. W celu zobrazowania ich działania rozpatrzmy schemat belki wolnopodpartej o obustronnym podparciu widełkowym, która obciążona jest pionową siłą skupioną w środku rozpiętości ze zwrotem w dół. Podczas zginania pas górny, który jest poddany ścisaniu, dąży do wyboczenia objawiającego się wygięciem w płaszczyźnie poziomej. Powoduje to przesunięcie punktu przyłożenia siły skupionej tak, że powstanie moment skręcający w środku rozpiętości belki.

Dla danego schematu statycznego powstanie wobec tego na długości belki rozkład momentu skręcającego Saint Venanta, który może zostać obliczony na podstawie wzorów Ruteckiego [1] oraz przedstawiony za pomocą wykresu na rysunku 2.



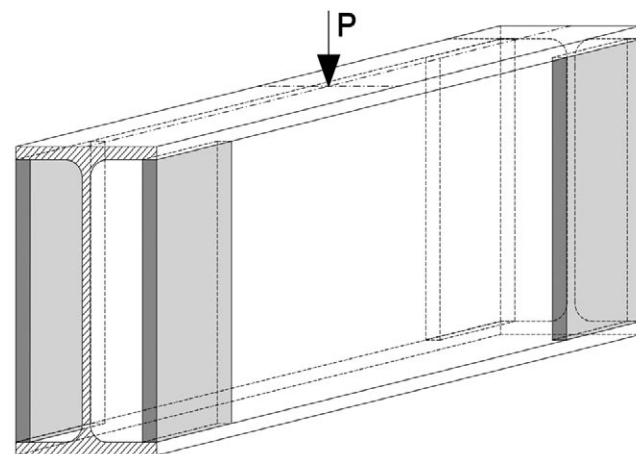
Rys. 1. Przyjęty do rozważań schemat statyczny

$$M_v = M \left[\frac{L}{2} - \frac{\sinh\left(k \cdot \frac{L}{2}\right)}{\sinh(k \cdot L)} \cosh(kx) \right] \quad \text{dla } x \in \left\langle 0, \frac{L}{2} \right\rangle \quad (1)$$

$$M_{v'} = M \left[-\frac{L}{2} + \frac{\sinh\left(k \cdot \frac{L}{2}\right)}{\sinh(k \cdot L)} \cosh(kx') \right] \quad \text{dla } x' \in \left\langle 0, \frac{L}{2} \right\rangle \quad (2)$$

Jak widać z wykresu największe wartości momentu skręcającego Saint Venanta występują przy końcach belki, a w środku jej rozpiętości wartości są zbliżone do zera. Oznacza to, że przy tym schemacie statycznym i obciążeniu najefektywniejsze jest zastosowanie elementów ograniczających skręcanie Saint Venanta w miejscach, gdzie jest ono największe, a więc przy podporach. Dodatkowo wynika z tego, że zastosowanie przewiązek w środku rozpiętości wspomnianej belki nie wpłynie znacząco na nośność czy moment krytyczny belki, co zostało potwierdzone doświadczalnie w pracy [2].

Badania numeryczne dotyczące wpływu przewiązek skrajnych na wartość momentu krytycznego zostały przeprowadzone przez pracowników Uniwersytetu Ain Shams w Egipcie [3]. W pracy [4] zaproponowano wzory korygujące wartości



Rys. 3. Widok belki z przewiązkami skrajnymi – zaznaczono je na szaro

wycinkowego momentu bezwładności oraz momentu bezwładności przekroju przy skręcaniu swobodnym wchodzące w skład wzoru na wyznaczenie momentu krytycznego [5]. Bazując na wzorze ogólnym, którego wyprowadzenie można znaleźć w [6]:

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z \cdot G \cdot I_{\omega}^*}{L^2} + \frac{\pi^4 \cdot E \cdot I_z \cdot E \cdot I_T^*}{L^4}} \quad (3)$$

zaproponowano w [4]:

$$I_T^* = \frac{I_{T,1} \cdot L_1 + I_{T,2} \cdot L_2 \cdot F}{L} \quad (4)$$

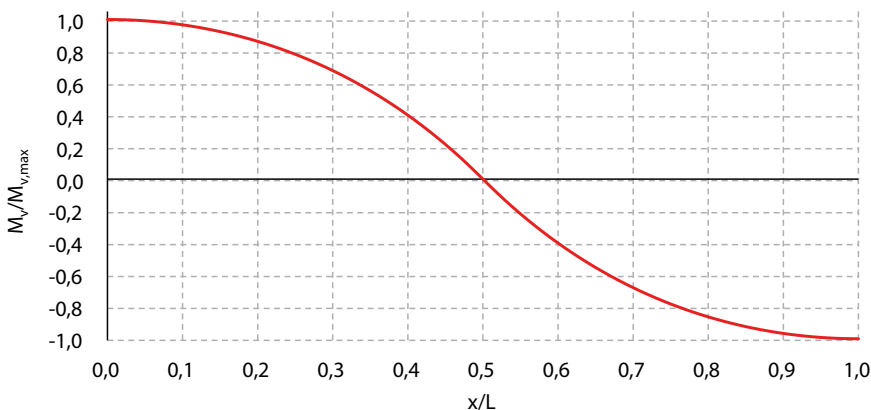
$$I_{\omega}^* = \frac{I_{\omega,1} \cdot L_1 + I_{\omega,2} \cdot L_2}{L} \quad (5)$$

$$F = 0,1106 \left(\frac{Z_{bp}}{L}\right)^2 - 0,1347 \frac{Z_{bp}}{L} + 0,0413 \quad (6)$$

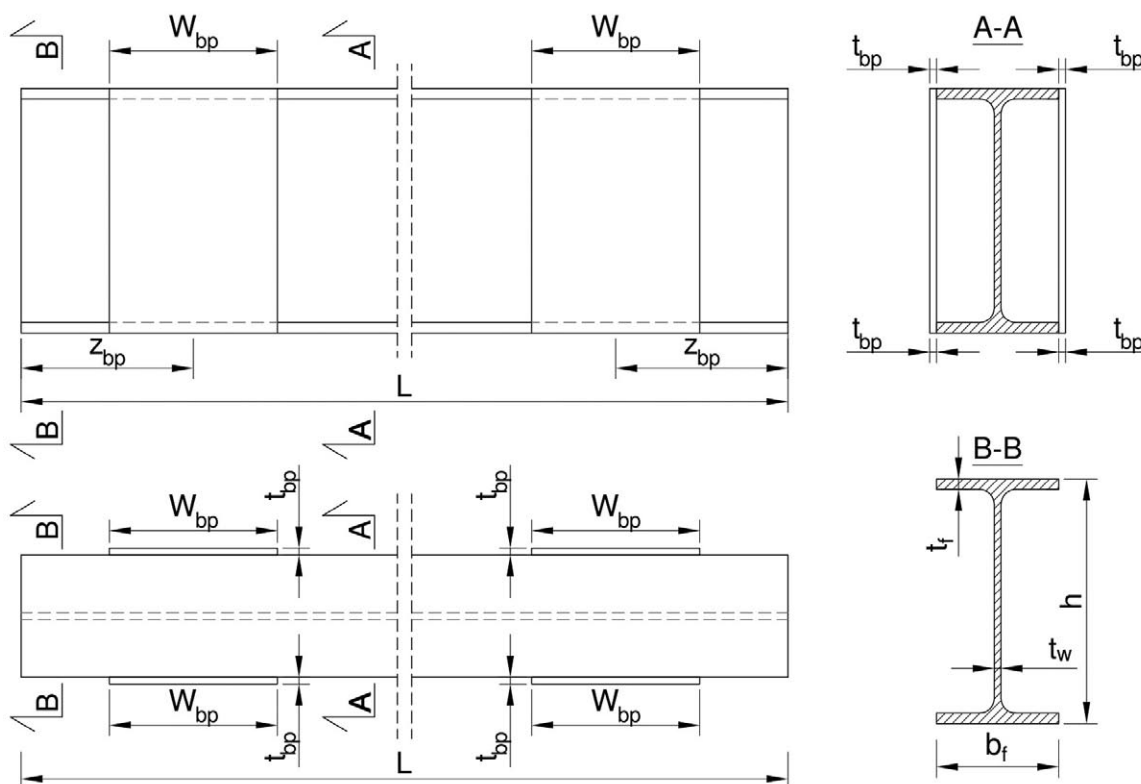
$$I_{T,2} = \frac{2t_f \cdot t_{bp} \cdot b^2 \cdot h^2}{b^2 \cdot t_{bp} + h \cdot t_f} \quad (7)$$

gdzie:

- I_T^* – średnia ważona (po długości belki) momentu bezwładności przy skręcaniu swobodnym dla przekroju skrzynkowego (ze wzmocnieniem z przewiązek) oraz przekroju bez wzmocnień;
- $I_{T,1}$ – moment bezwładności przy skręcaniu swobodnym dla przekroju bez wzmocnień;
- $I_{T,2}$ – moment bezwładności przy skręcaniu swobodnym dla przekroju ze wzmocnieniami w postaci przewiązek;
- L_1 – długość niewzmocnionej części belki dwuteowej ($L_1 = L - L_2$);
- L_2 – suma długości przewiązek po jednej ze stron dwuteownika ($L_2 = 2W_{bp}$);
- Z_{bp} – odległość od końca belki do środka długości żebra;



Rys. 2. Zależność wielkości momentu skręcającego Saint Venanta od lokalizacji na belce



Rys. 4. Widok belki z przewiązkami skrajnymi – wymiary zgodnie ze wzorami zawartymi w [4], zgodnie z pracą [7]

T_{bp} – grubość blach wzmacniających – w pracy [4] przyjęto, że jest równa grubości środka wzmacnianej belki;

b – szerokość wzmacnianej belki łącznie z dwoma grubościami blach wzmacniających ($b = b_f + 2t_{bp}$);

I_{ω}^* – średnia ważona (po długości belki) wycinkowego momentu dla przekroju skrzynkowego (ze wzmocnieniem z przewiązek) oraz przekroju bez wzmocnień;

$I_{\omega,1}$ – wartość wycinkowego momentu bezwładności dla przekroju bez blach wzmacniających;

$I_{\omega,2}$ – wartość wycinkowego momentu bezwładności dla przekroju z blachami wzmacniającymi; należy przyjąć, że przekrój dwuteowy z przewiązkami stanowi łącznie przekrój skrzynkowy niewrażliwy na deplanację, czyli można założyć $I_{\omega,2} \sim 0$ [4]

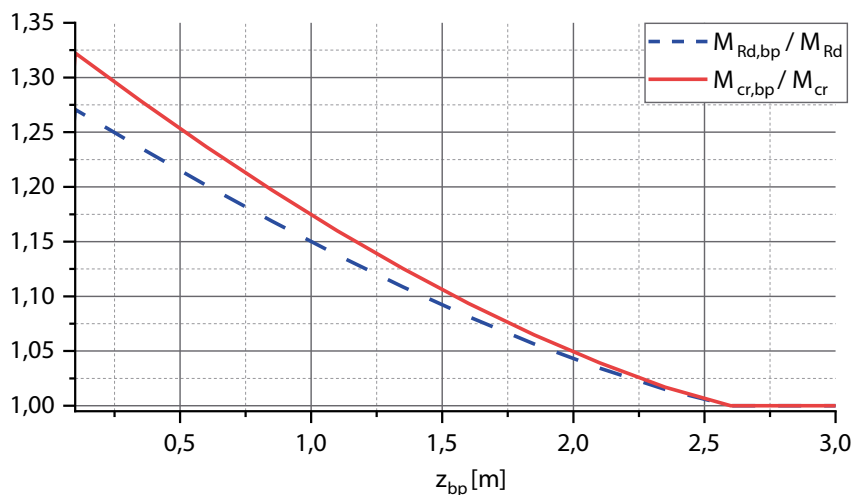
Przeprowadzone obliczenia zostały potwierdzone z wynikami zawartymi w pracy [4].

W pierwszej kolejności przyjęto do analiz belkę o długości 6 m, którą obciążono siłą skupioną do pasa górnego w sposób destabilizujący. Wzmocnienie z przewiązek wykonano na końcach belki jako kwadratowe w planie, o długości 200 mm i grubości blach równej grubości środka. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że poprzez włączenie do współpracy przewiązek na końcach belki można się spodziewać wzrostu wartości momentu krytycznego o około 32% oraz wzrostu nośności o około 27%. Im bliżej przewiązki znajdują się środka przęsła, tym mniej efektywne stanowią wzmocnienie. Potwierdziło to informacje, które zawarto we wcześniejszym rozdziale.

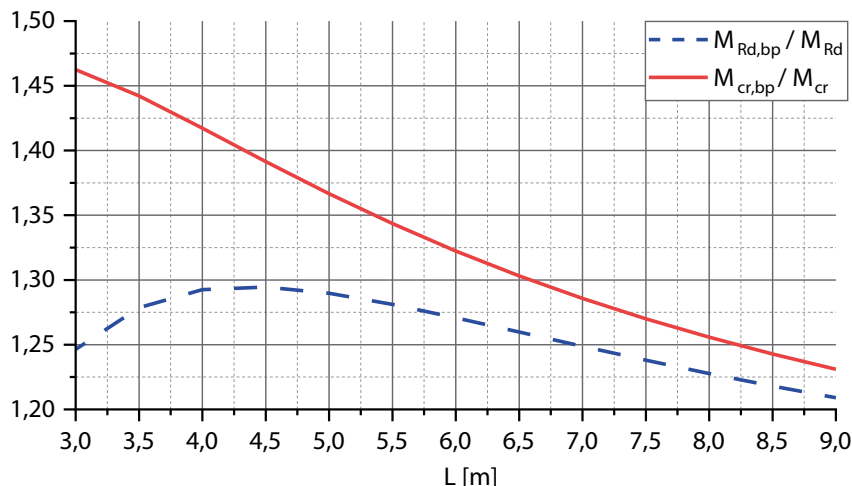
3. Analiza parametryczna

Wykorzystując wyżej wymienione zależności przeanalizowano, w jaki sposób wpływa lokalizacja przewiązek na moment krytyczny i nośność według [8] belek wykonanych z dwuteowników stalowych gorącowalcowanych IPE200 ze stali klasy S355.

Rys. 5. Zależność pomiędzy wzrostem nośności oraz momentu krytycznego belki a odsunięciem przewiązek od końca belki



Rys. 6. Zależność pomiędzy wzrostem nośności oraz momentu krytycznego belki a jej długością



Warto zauważyć, że wzory zaproponowane w [4] są empiryczne i zostały skalibrowane dla grubości przewiązek równej średnikom wzmacnianych belek dwuteowych. Z przeprowadzonych na podstawie nich obliczeń wynika, że zwiększanie w nieskończoność grubości przewiązek będzie powodowało ciągle zwiększanie wartości momentu krytycznego i nośności, co nie jest prawdą. Przeprowadzone wcześniej

obliczenia w programie ABAQUS [9] pokazały, że zwiększanie grubości przewiązek jest efektywne do grubości, przy której ich odkształcenia pod wpływem skręcania wzmacniającej belki są znikome. Dla analizowanej we wspomnianej pracy [9] belki IPE200 o długości 6 m nie zaobserwowano znaczącego wzrostu nośności czy momentu krytycznego przy pogrubianiu blach powyżej 30 mm.

W kolejnej analizie poddano wzmocnienie belek IPE200 o różnych długościach za pomocą przewiązek skrajnych (rys. 6). Z obliczeń wynika, że im krótsza belka, tym większy wzrost momentu krytycznego, lecz sam wzrost nośności elementu przyjmuje wartość ekstremalną dla belek o długości około 4,5 m, co odpowiada smukłości względnej na zwichrzenie równej około 1,45. Jest to spowodowane tym, że im bardziej krępa jest belka, tym bardziej wartość współczynnika redukującego nośność na zginanie ze zwichrzeniem XLT jest bliższa jedności i dalsze usztywnienie za pomocą przewiązek niewiele zmienia.

Przeprowadzone obliczenia nie uwzględniają ryzyka lokalnej utraty stateczności przez przewiązki.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone obliczenia dowiodły, że zastosowanie przewiązek skrajnych może w sposób efektywny zwiększyć nośność belek, co dla przekroju IPE200 i blach o grubości równej średnikowi wyniosło nawet o około 30%. Z uwagi na to, że przewiązki te zamontowane są w płaszczyźnie równoległej do średnika belki, stanowią zdecydowanie bardziej efektywną blokadę deplanacji w porównaniu do żeber czy blach czołowych wykonanych z blach o odpowiadającej grubości [10, 11].

Ze względu na to, że najefektywniejsze jest wykorzystanie tych wzmocnień z blach przy końcach belki wolnopodpartej, a więc w miejscu, gdzie występuje najmniejsze wyężenie elementu z uwagi na zginanie, ten sposób podniesienia nośności może być wykorzystany przy wzmacnianiu istniejących elementów dwuteowych o odpowiedniej smukłości.

Negatywny wpływ np. obróbki termicznej podczas procesu spawania nie spowoduje obniżenia nośności w miejscach, gdzie wyężenie spowodowane istniejącym obciążeniem jest największe, co zostało dowiedzione za pomocą wcześniej przeprowadzonych analiz [7].

W trakcie projektowania wzmocnienia konstrukcji z uwzględnieniem współpracy przewiązek należy zwrócić uwagę na ryzyko lokalnej utraty stateczności tych blach wzmacniających. Ze względu na to, że w obowiązujących normach dotyczących projektowania konstrukcji stalowych nie ma wytycznych dotyczących uwzględnienia przewiązek podczas wymiarowania konstrukcji, należy prowadzić obliczenia z ich udziałem ze szczególną starannością, a najlepiej w oparciu o modele powłokowe belek dwuteowych, weryfikując otrzymane wyniki z tymi dostępnymi w literaturze przedmiotu.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Rutecki J., Wytrzymałość konstrukcji cienkościennych, 1957, Warszawa, PWN
- [2] Sorensen C. O., Rasmussen K. M., Effects of Stiffeners on the Warping Resistance of Steel I-Beams, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) 4(2)2014, str. 7–14
- [3] Hassanien M. et al., Effect of vertical web stiffeners on lateral torsional buckling behavior of cantilever steel i-beams, Journal of applied mechanics 7/2004, str. 233–246
- [4] Metwally O., El-Aghoury I. M., Ibrahim S. M., Effect Of Batten Plates On Elastic Moment Capacity of Standard IPE Profiles, International Journal of Scientific & Technology Research 10/2021, str. 333–340
- [5] ENV 1993-1-1:1992 Eurocode 3: Design of steel structures Part 1.1: General rules and rules for buildings. 1992, CEN
- [6] Galambos T. V., Guide to stability design criteria for metal structures, John Wiley, New York, 1998
- [7] Wierzbicki K., Wpływ elementów ograniczających deplanację na moment krytyczny belek stalowych w eksperymencie numerycznym i fizycznym, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2022
- [8] PN-EN 1993-1-1:2005+AC:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, 2006
- [9] Wierzbicki K., Influence of Bimoment Restraints on the Load-Bearing Capacity of a Steel I-Beam, Civil and Environmental Engineering Reports, 30(4)2020, str. 33–47
- [10] Wierzbicki K., Influence of endplates on the value of critical moment., in 2018 International Interdisciplinary PhD Workshop, IIPhDW, 2018
- [11] Kurzawa Z. et al., Wpływ blach czołowych na moment krytyczny belek dwuteowych, Inżynieria i Budownictwo 3/2006, str. 163–166