

Wybrane aspekty wzmacniania konstrukcji stalowych w ujęciu Eurokodów Chosen aspects of strengthening of steel structures in Eurocode formulation

Wiesław Paczkowski¹

¹*Katedra Teorii Konstrukcji, Zespół Konstrukcji Metalowych
Wydział Budownictwa i Architektury, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin
e-mail: wespa@ps.pl*

Streszczenie

Z ogólnej liczby 58 Eurokodów stosowanych w budownictwie aż 20 dotyczy konstrukcji stalowych w tym 12 zawiera reguły ogólne, ale w żadnym nie określa się zasad wzmacniania tych konstrukcji. Konstrukcje stalowe w sposób szczególny nadają się do wzmacniania przez rozbudowę przekroju ze względu na dwie wyjątkowe właściwości nie spotykane w innych rodzajach konstrukcji: spawalność i plastyczność. W pracy dokonano zestawienia wybranych wzorów służących do sprawdzania warunków nośności w podstawowych przypadkach pracy konstrukcji prętowych. Wyróżniono zmianę warunków pracy spowodowaną zmianą obciążenia statycznego oraz kinematycznego. Zaproponowano przyjęcie współczynników materiałowych o wartości wyższej niż 1,0 stosowanej w typowych przypadkach wymiarowania konstrukcji ze względu na trudne do ustalenia imperfekcje.

Abstract

20 out of 58 Eurocodes concern steel structures and among them 12 Eurocodes refer to general rules, but no one describes rules concerning strengthening of steel structures. Steel structures are especially predisposed to strengthening by the extension of the cross-section due to two exceptional features not common in other types of structures: weldability and ductility. The paper presents the set of selected formulae used to verify resistance conditions of strut structures in basic cases of their work. Two fundamental sources of changing structural work conditions were highlighted: statical and kinematical. It is suggested to apply the value of the partial factors γ_M greater than typically used in design of structures 1,0 due to unavoidable imperfections.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, wzmacnianie konstrukcji stalowych, rozbudowa przekroju, warunki nośności

Keywords: steel structures, strengthening of steel structures, extension of the cross-section, resistance conditions

1. Wstęp

Wzmacnianie konstrukcji stalowych może być realizowane z różnych powodów, w różnych warunkach i różnymi technikami. Niniejszy artykuł przedstawia wybrane aspekty wzmacniania konstrukcji stalowych przez rozbudowę przekroju klasy 1, 2 lub 3 za pomocą spawania, przy czym warunki nośności formułowane są w ujęciu stosowanym przez Eurokod 3, mimo że ani Eurokod 3 z podstawową normą [7], ani też normy z grupy PN-B z główną normą [6] nie zawierają żadnych wzmianek dotyczących wzmacniania.

Sprawa wzmacniania konstrukcji stalowych za pomocą spawania była przedmiotem szeregu publikacji ([1], [2], [3], [8]), w których autorzy podjęli kwestię uwarunkowań określających sensowność stosowania tego typu wzmocnienia dla całego spektrum pracy konstrukcji. Podkreśla się, że ingerencja termiczna towarzysząca spawaniu elementów wzmacniających do istniejącej konstrukcji [1] niesie w sobie ryzyko ujawnienia lub wykreowania szeregu wad, które mogą obniżyć bezpieczeństwo konstrukcji. Przyjmuje się, że decyzja o wzmocnieniu przez rozbudowę przekroju za pomocą spawania podejmowana zostaje po racjonalnej analizie problemu i że żadne inne sposoby nie mogą być zastosowane. Spawalność i ciągliwość stali stanowią podstawę do formułowania warunków nośności wzmacnianych elementów.

Przyjmuje się, że przekrój wzmacniany ma pole A_o i momenty bezwładności I_{oy} oraz I_{oz} . Rozbudowa przekroju powoduje zmianę pola o A_Δ , a momentów bezwładności o $I_{\Delta y}$ oraz $I_{\Delta z}$. Charakterystyki przekroju po wzmocnieniu wynoszą:

1. Introduction

Different reasons, different conditions and different technologies can influence the strengthening of steel structures. The paper presents chosen aspects of strengthening of the steelwork by the extension of the 1, 2 and 3 class cross-sections by use of welding. The resistance criteria are formulated according to Eurocode 3 though neither the Eurocode 3 with its basic standard [7] nor the Polish standards PN-B with the main standard [6] have any mentions referring to that problem.

There is wide literature concerning problem of strengthening of steel structures by use of welding ([1], [2], [3], [8]). The authors discussed the criteria of application of that way of strengthening depending on the type of structure. There is emphasized that the thermal action accompanying the welding of strengthening elements to the existing structure [1] increases the risk of creating or activating many imperfections which can inversely influence the safety of the structure. It is assumed that the decision concerning strengthening of the cross-section by its extension by welding is taken after deep consideration and no other methods can be applied. Weldability and ductility are the basis for the formulation of resistance criteria for strengthened elements.

It is assumed that the strengthened cross-section has an area A_o and second moments of area I_{oy} and I_{oz} . Extension of the cross-section changes the area by A_Δ while the second moment of area by $I_{\Delta y}$ and $I_{\Delta z}$. So, the final values are:

$$A = A_o + A_\Delta \quad (1)$$

$$I_i = I_{oi} + I_{\Delta i} \tag{2}$$

Na ich podstawie wyznacza się charakterystyki pochodne, takie jak wskaźnik wytrzymałości przekroju W_i , wskaźnik oporu plastycznego przy zginaniu W_{pli} , smukłość λ_i . Indeks i oznacza oś y lub z , względem której zachodzi zginanie lub wyoboczenie. Siły wewnętrzne w konstrukcji w stanie wyjściowym wynoszą N_o, M_{oy}, M_{oz} , zaś ich zmiany wynoszą odpowiednio $N_{\Delta}, M_{\Delta y}, M_{\Delta z}$ dając końcowe wartości N, M_y i M_z . Sprawdzanie stanu granicznego nośności wymaga posługiwania się wartościami obliczeniowymi.

2. Kryteria wzmacniania przekrojów zginanych.

2.1. Wzmacnianie elementów odciążonych

Jeśli wymagane jest wzmocnienie konstrukcji z powodu zmiany warunków obciążenia i możliwe jest daleko idące jej odciążenie, wówczas wzmocnienie konstrukcji dotyczy praktycznie jej pracy w zakresie sprężystym. W przypadku jednokierunkowego zginania warunek nośności prawidłowo zaprojektowanej konstrukcji ma postać:

$$\eta_o = \frac{M_{Edo}}{M_{b,Rdo}} \leq 1,0 \tag{3}$$

gdzie η_o jest stopniem wykorzystania nośności elementu, a pozostałe wartości są zgodne ze wzorem (6.54) [7]. W przypadku, gdy zmiana warunków eksploatacyjnych mogłaby prowadzić do niespełnienia warunku (3), czyli wystąpienia $\eta_o > 1,0$ należy wzmocnić przekrój lub zastosować inną technikę zapewnienia bezpiecznej pracy konstrukcji. Wzmacnianie konstrukcji odciążonej (pozostającej pod działaniem jedynie obciążenia własnego stanowiącego nieznaczną część całości obciążenia) prowadzić powinno do spełnienia warunku nośności po wzmocnieniu:

$$\eta = \frac{M_{Edo} + M_{Ed\Delta}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \tag{4}$$

Przyjmując, iż rozbudowanie przekroju ma nieznaczący wpływ na współczynnik zwichrzenia elementu, efekt skutecznego wzmocnienia wymaga, by:

$$W > W_o \tag{5}$$

W przypadku przekrojów klasy 3 zwiększenie wysokości przekroju może prowadzić do zmniejszenia wartości wskaźnika wytrzymałości W mimo zwiększenia pola przekroju A_o o A_{Δ} .

Na rys. 1a pokazano przykładowe wzmocnienie przekroju dwuteowego za pomocą żeber o wymiarach $a \times t$ umieszczonych prostopadle do pasów.

The derivative parameters such as section modulus W_i , plastic section modulus W_{pli} , slenderness λ_i are calculated on the basis of (1) and (2). Index i denotes axis y or z for bending or buckling. The initial internal forces are denoted as N_o, M_{oy}, M_{oz} , while their changes are respectively $N_{\Delta}, M_{\Delta y}, M_{\Delta z}$ giving the final values N, M_y i M_z . Checking of the ultimate limit state criteria requires to use design values.

2. Resistance criteria for strengthened cross-sections in bending

2.1. Strengthening of unloaded elements

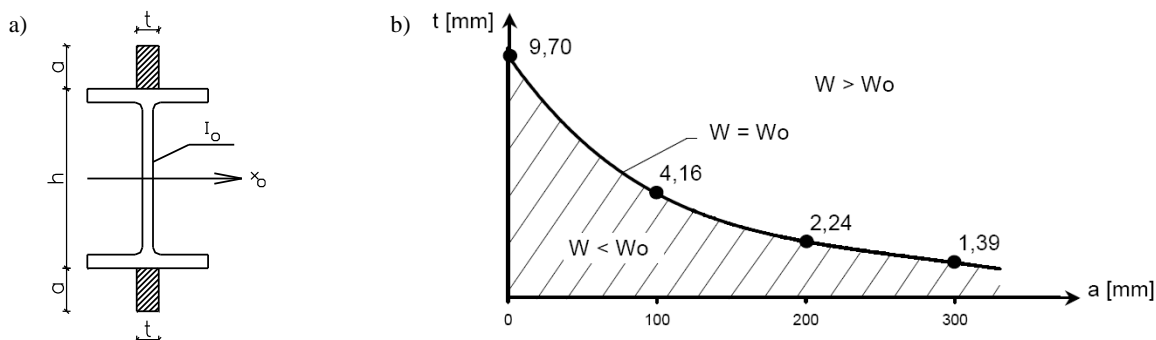
In the case when the strengthening is required due to the change of loading conditions and it is possible to unload the structure, the strengthening will be made in elastic range. For uniaxial bending the resistance criterion for properly designed structure is as follows:

where η_o is utilization factor and remaining variables are as in formula (6.54) in [7]. In the case when operational conditions could lead to the violation of (3), the strengthening or other appropriate solution should be applied to secure safe work of structure. Strengthening of the unloaded structure (remaining only under the self-weight being a minor part of the total load) should lead to satisfying the criterion of resistance after strengthening:

Assuming that the extension of the cross-section has a limited influence on the reduction factor for lateral-torsional buckling, the effective strengthening can be achieved when:

In the case of 3 class cross-section increase of the height of the cross-section can lead to the decrease of the section modulus W though the cross-section area A_o will be extended by A_{Δ} .

On Fig. 1a it is shown an I-section strengthened by the mean of stiffeners of dimension $a \times t$ situated perpendicularly to the flanges.



Rys. 1. a) wzmacniany przekrój , b) krzywa graniczna dotycząca IPE200
 Fig. 1. a) strengthened cross-section, b) limit curve for IPE200

Przy założonym wysięgu a grubość t , przy której nie dojdzie do zmiany wartości wskaźnika wytrzymałości wynosi [5]:

$$t = \frac{12I_o}{h(4a^2 + 6ha + 3h^2)} = \frac{6W_o}{4a^2 + 6ha + 3h^2} \quad (6)$$

Zwiększenie grubości t powyżej wartości (6) prowadzi do zwiększenia wskaźnika wytrzymałości W . Funkcja $t(a)$ według (6) stanowi krzywą graniczną pokazano na rys. 1b. Dane dotyczą dwuteownika IPE200 ($I_o = 1940 \text{ cm}^4$, $h = 20 \text{ cm}$).

W przypadku wzmacnianych przekrojów klasy 1 i 2 na pełne uplastycznienie zależność (5) jest zawsze spełniona.

2.2. Wzmacnianie elementów bez odciążenia z ograniczeniem do pracy sprężystej

Ograniczenie pracy przekroju po wzmocnieniu do zakresu sprężystego oznacza w kategoriach Eurokodu 3 konieczność posługiwania się wskaźnikami wytrzymałości przekroju niezależnie od klasy przekroju. Rozbudowa przekroju powoduje najczęściej, że w narożnikach prostokąta opisanego na konturze rozbudowanego przekroju nie występują punkty materialne przekroju, co uniemożliwia posługiwanie się wskaźnikami wytrzymałości przekroju przy zginaniu dwukierunkowym. W celu uproszczenia zapisu podaje się zatem warunki nośności przy zginaniu jednokierunkowym przy założeniu, że wzmocnienie nie spowoduje zmiany położenia osi obojętnej przekroju:

– z warunku uplastycznienia skrajnych włókien przekroju wzmacnianego:

$$\frac{M_{\Delta Ed o}}{M_{b, Rdo}} + \frac{M_{Ed \Delta}}{M_{b, Rd} \frac{z_{\Delta}}{z_o}} \leq 1,0 \quad (8)$$

– z warunku uplastycznienia skrajnych włókien przekroju wzmacniającego (dolożonego, wyłącznie przy $z_{\Delta} > z_o$):

$$\frac{M_{\Delta Ed}}{M_{b, Rd}} \leq 1,0 \quad (9)$$

gdzie: $M_{b, Rdo}$ – nośność obliczeniowa elementu wzmacnianego z uwzględnieniem zwichrzenia;

$M_{b, Rd}$ – nośność obliczeniowa elementu na zginanie z uwzględnieniem zwichrzenia po wzmocnieniu;

z_{Δ}/z_o – współczynnik korekcyjny położenia włókien skrajnych przekroju z z_o przed wzmocnieniem na z_{Δ} po wzmocnieniu (stosowany, gdy $z_{\Delta} > z_o$);

przy pozostałych oznaczeniach według tekstu.

2.3. Wzmacnianie elementów na pełne wykorzystanie nośności plastycznej

Największy efekt wzmocnienia z punktu widzenia ekonomiki możliwy jest do osiągnięcia w przypadku przekrojów klasy 1 lub 2 poddanych działaniu obciążeń statycznych. Możliwe jest wówczas przyjęcie, że zarówno przekrój wzmacniany jak i elementy rozbudowujące przekrój ulegają uplastycznieniu. Oznacza to, że przy spełnieniu warunków stateczności przekroju wzmacnianego podlega on plastycznej deformacji w stopniu umożliwiającym pełne wykorzystanie nośności plastycznej części wzmacniających. Szczegółowe warunki umożliwiające plastyczną redystrybucję sił wewnętrznych określa załącznik nr 4 normy [6].

Nośność przekroju jednokierunkowo zginanego po wzmocnieniu sprawdza się przy oznaczeniach jak w tekście z zależności:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b, Rd}} \leq 1,0 \quad (10)$$

For given a the thickness t which will not change the value of section modulus is given by [5]:

Increase of t above (6) will lead to increase of section modulus W . Function $t(a)$ according to (6) is a limit curve shown on Fig. 1b. The data is for IPE200 ($I_o = 1940 \text{ cm}^4$, $h = 20 \text{ cm}$).

In the case of strengthening of 1 and 2 class cross-sections working in full plastic range the relation (5) is always satisfied.

2.2. Strengthening of not unloaded elements in the elastic range

Limitation of the cross-section work to the elastic range, means according to Eurocode 3 that the elastic section modulus must be used regardless the cross-section class. Extension of the cross-section makes that in the corners of a rectangular circumscribed on the cross-section usually there is no material, so use of section moduli for biaxial bending is not possible. To make the presentation simpler the resistance criteria are given for uniaxial bending with the assumption that the strengthening does not change the position of the neutral axis:

– the condition of yielding of the face of strengthened cross-section:

– the condition of yielding of the face of extension part (only when $z_{\Delta} > z_o$):

where: $M_{b, Rdo}$ – design buckling resistance moment of the original element;

$M_{b, Rd}$ – design buckling resistance moment after strengthening;

z_{Δ}/z_o – correction coefficient for the location of the cross-section face from z_o to z_{Δ} (only when $z_{\Delta} > z_o$);

with the rest of notation as in the text.

2.3. Strengthening for full plastic bearing capacity

The greatest effect of strengthening from economical point of view is possible to be achieved in the case of 1 and 2 class cross-sections under statical loading. In such a case both the strengthened and strengthening parts become yielded. Assuming that the stability conditions are satisfied, the strengthened part is yielded to the extend which allows full yielding of the strengthening part. Detailed description of conditions, which allow to utilize plastic redistribution of internal forces is given in annex 4 in the standard [6].

The resistance criterion for uniaxial bending of strengthened element for notation used in the text can be checked from the formula:

2.4. Wzmacnianie w warunkach wymuszenia kinematycznego

Wystąpienie niezależnych od sztywności konstrukcji przemieszczeń węzłów traktowane jest jako wymuszenie kinematyczne powodujące wzrost sił wewnętrznych. Występująca w tych warunkach redystrybucja sił wewnętrznych jest najczęściej trudna do teoretycznego wyliczenia. Z tego powodu przyrosty sił wewnętrznych $M'_{Ed\Delta}$ wyznacza się w stanie sprężystym konstrukcji przed wzmocnieniem. Bezpieczne eksploataowanie konstrukcji wymaga wykazania, że spełniony jest warunek nośności:

$$\frac{M_{Edo} + M'_{Ed\Delta}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (11)$$

3. Typowe przypadki wzmocnienia

Struktura wzorów przedstawionych w p. 2 dotyczących zginania może mieć zastosowanie do innych przypadków wzmocnienia elementów pod warunkiem zastosowania spójnego systemu sił wewnętrznych i parametrów geometrycznych przekrojów i elementów. Najczęściej zachodzi konieczność wzmocnienia elementów: rozciąganych osiowo, ściskanych osiowo, rozciąganych i zginanych oraz ściskanych i zginanych. Konieczne jest także sprawdzenie nośności łączników mocujących elementy wzmocniające do wzmocnianego przekroju.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono przykładowy zestaw wzorów dotyczących wybranych przypadków wzmocnienia elementów konstrukcji stalowej przez rozbudowę przekroju za pomocą spawania. Podane wzory przedstawiono w konwencji zgodnej z Eurokodem 3. Eurokod 3 wprowadził przy sprawdzaniu nośności przekrojów klasy 1 i 2 wskaźnik oporu plastycznego przy zginaniu, co nie występowało w standardowych procedurach sprawdzania nośności według norm systemu PN-B. Stosowany w Eurokodach zapis warunków nośności z jawną obecnością współczynnika materiałowego γ_M powinien pozwolić na wprowadzenie w załączniku krajowym wartości tego współczynnika np. 1,1. Przykładowy opis problemów związanych ze wzmocnianiem konstrukcji stalowej przez rozbudowę przekroju można znaleźć w [4] i [5].

Literatura • References

- [1] Augustyn J., Skotny J., (1991), Tymczasowe wytyczne wzmocnienia elementów konstrukcji stalowych przy pomocy spawania pod obciążeniem, Izba Projektowania Budowlanego, Warszawa.
- [2] Bródka J., (1995), Przebudowa i utrzymanie konstrukcji stalowych, Mostostal-Projekt S.A., Politechnika Łódzka, Warszawa/Łódź.
- [3] Łaguna J., (2008), Naprawa i wzmocnianie konstrukcji stalowych przez zmianę przekrojów, XXIII Ogólnopolska Konferencja Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji, Szczyrk.
- [4] Paczkowska T., Paczkowski W., Wróblewski T., (2007), Wpływ osiadania podłoża na stan stalowej konstrukcji szkieletowej, Konferencja Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 23-26 maj 2007, s. 639-646.
- [5] Paczkowski W., Pełka-Sawenko A., (2011), Wzmocnienie słupów stalowej konstrukcji szkieletowej w warunkach osiadania podłoża, Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2011, s. 261-265.
- [6] PN-B-03200:1990 Konstrukcje stalowe – Obliczenia statyczne i projektowanie.
- [7] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [8] Ziółko J., (1991), Utrzymanie i modernizacja konstrukcji stalowych, Arkady, Warszawa.

2.4. Strengthening due to kinematical action

Forced displacements of nodes independent from the stiffness of the structure are treated as a kinematical action leading to the increase of the internal forces in the structure. Redistribution of internal forces in a real structure is usually in such a situation difficult to be theoretically found. Because of that the increase of internal forces $M'_{Ed\Delta}$ is calculated for the elastic range of the structure behaviour before strengthening. Safe operational use of the structure requires to prove that the following condition is satisfied:

3. Typical cases of strengthening

The structure of formulae presented in section 2 concerning elements in bending can be utilized for other cases of strengthening providing that proper internal forces and geometrical parameters of the cross-section are used. The most common cases of the strengthening are: axial tension, axial compression, bending with axial force in tension or compression. It is also necessary to check resistance of joints used to connect the strengthening parts with the original cross-section.

4. Summary

The paper presents a selected set of formulae concerning strengthening of steel structures by the extension of a cross-section by welding. Presented formulae correspond to the pattern used in Eurocode 3. Eurocode 3 has introduced plastic section modulus used for resistance criteria of 1 and 2 class cross-sections in bending. It was not the case in PN-B standards. The open presence of partial coefficient γ_M in all formulae concerning all cases of resistance criteria should allow to introduce in national annexes the increased value of that coefficient equal e.g. 1,1. An exemplary description of problems related to the strengthening of the steel structure by extension of a cross-section can be found in [4] and [5].