

Nośność podstaw słupów z zamkniętych kształtowników o przekrojach prostokątnych ściskanych i zginanych dwukierunkowo

Część 1. Ocena nośności

1. Wprowadzenie

W publikacjach [2], [3], [4] i [6] podano podstawowe informacje o kształtowaniu geometrycznym trzonów i podstaw słupów z zamkniętych kształtowników o przekrojach prostokątnych ściskanych i zginanych względem mocnej osi. Podstawy o trzonach z takich kształtowników wtedy, kiedy są projektowane pod działaniem siły podłużnej, przyłożonej w punkcie leżącym poza osiami głównymi środkowymi, a więc dodatkowo zginanych dwukierunkowo są kształtowane podobnie. Należy tu jednak zauważyć, że w takich sytuacjach projektowych stosunkowo rzadko są stosowane kształtowniki o bokach, których iloraz wynosi $1,8 < h/b < 3,5$. Zwykle jego wartość pozostaje w granicach 1,3 do 1,7. Jeżeli te mimośrodowość są duże, to najczęściej stosuje się przekroje kwadratowe. Zamiast takich wyrobów stosuje się także trzony z rur okrągłych lub z elementów o przekrojach skrzynekowych.

Kształtowniki zamknięte o przekrojach prostokątnych, produkowane według PN-EN 10210 [17], [18], [4] spełniają przy zginaniu względem mocnej osi warunki klasy przekrojów 1 i 2. Natomiast przy ich zginaniu w kierunku prostopadłym w wypadku niektórych przekrojów o najcieńszych ściankach tak nie jest. Wówczas zalicza się je do przekrojów klasy 3. Dalsze wywody niniejszego opracowania będą odnosić się tylko do trzonów z elementów o przekrojach klas 1 i 2. W praktycznym projektowaniu trzonów ściskanych i zginanych dwukierunkowo stosuje się przede wszystkim wyroby tych klas. Należy jednak zawsze sprawdzić, gdyż ocena klasy przekroju zależy także od gatunku stali, z której trzon jest projektowany.

W wypadku stosowania zamkniętych kształtowników ze szwem spawanym produkowanych na zimno według PN-EN 10219 [19], [20], [4], których ścianki mają w dostępnym asortymencie zwykle mniejsze grubości, stwierdza się częściej klasę przekroju 3.

Zgodnie z PN-EN 1993-1-1 [14] w wypadku dwukierunkowego zginania i ściskania siłą podłużną elementów z zamkniętych kształtowników o przekrojach prostokątnych stosuje się następujący warunek oceny ich nośności:

$$(M_{y,Ed}/M_{N,y,Rd})^\alpha + (M_{z,Ed}/M_{N,z,Rd})^\beta \leq 1 \quad (1)$$

w którym:

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ – obliczeniowe momenty zginające względem osi y-y lub z-z,

$M_{N,y,Rd}$, $M_{N,z,Rd}$ – zredukowane obliczeniowe nośności plastyczne przy zginaniu względem osi y-y lub z-z przy równoczesnym działaniu siły podłużnej,

$$\alpha = \beta = 1,66/(1 - 1,13n^2), \text{ lecz } \alpha = \beta \leq 6, \quad (2)$$

gdz:

$$n = N_{Ed}/N_{pl,Rd},$$

N_{Ed} – obliczeniowa podłużna siła ściskająca,

$N_{pl,Rd}$ – obliczeniowa nośność plastyczna przy obciążeniu podłużną siłą ściskającą.

Zredukowane nośności $M_{N,y,Rd}$ oraz $M_{N,z,Rd}$ ustala się wzorami (6.39) i (6.40), podanymi w PN-EN 1993-1-1 [14].

W niniejszym opracowaniu mocną osią jest oś y-y, natomiast słabą jest oś z-z.

Aby ułatwić dalsze wnioskowanie modelu, zastosowanego do oceny nośności rozważanych podstaw słupów, zestawiono w tabl. 1.

Tablica 1. Wartości współczynników α i β

| n | 0 | 0,15 | 0,30 | 40 | 0,45 | 0,60 | 0,75 | 0,80 |
|---|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1,66 | 1,703 | 1,84 | 2,026 | 2,153 | 2,798 | 4,556 | 5,997 |

2. Stan zagadnienia

W publikacjach [3], [6] przedstawiono reguły oceny nośności podstaw słupów o trzonach z zamkniętych kształtowników o przekrojach prostokątnych, poddanych ściskaniu i zginaniu względem mocnej osi, posługując się modelami, ustalonymi zgodnie ze wskazaniami PN-EN 1993-1-8 [15]. Rozpatrzone podstawy słupów, których blachy poziome bezpośrednio spawano do trzonów lub z dodatkowymi usztywnieniami w postaci pionowych żeber. Przedstawiono wskazania, odnoszące się do oceny nośności podstaw słupów w ich strefach ściskania i rozciągania oraz obliczania połączeń spawanych i śrubowych.

Badania eksperymentalne i studia analityczne w [8], przeprowadzone przez **Gresnigha**, **Jasparta**, **Romeijna**, **Sokola**, **Starka**, **Steenhuisa** i **Walda**, dostarczyły projektantom obszernej wiedzy, uzasadniającej stosowania modeli do oceny podstaw słupów o trzonach z pojedynczych dwuteowników. Reasumpcji tych prac dokonali Jaspert i Weynand [9] oraz Wald [22]. W polskim piśmiennictwie w odniesieniu do elementów z kształtowników zamkniętych prace analityczne i doświadczalne przedstawił **Ligocki** [10], [11], [12].

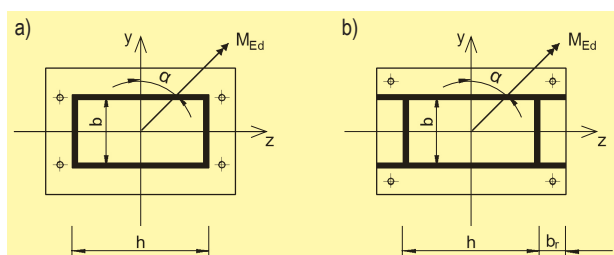
W odniesieniu do prac doświadczalnych i analitycznych, dotyczących obciążenia siłą podłużną i momentami zginającymi względem ich osi głównych środkowych, stwierdza się nieliczne publikacje. Ze względu na wskazania praktyczne podstawowe informacje zostały przedstawione w [1] i [21]. Propozycje oblicze-

niowe Amoral [1] w odniesieniu do pojedynczych dwuteowników zostały rozszerzone na trzony z zamkniętymi kształtownikami o przekrojach prostokątnych.

3. Obliczanie nośności podstaw według reguł Eurokodu 3

3.1. Ocena w strefie ściskania

Podczas dwukierunkowego zginania momentami $M_{y,Ed}$ i $M_{z,Ed}$ rozpatruje się podstawę słupa pod działaniem momentu zginającego $M_{\alpha,Ed} = (M_{y,Ed}^2 + M_{z,Ed}^2)^{0,5}$, jak pokazano na rys. 1. Zamknięty kształtownik o przekroju prostokątnym z zaokrąglonymi narożnikami pokazano z narożnikami ostrymi. Ze względu na obecny stan wiedzy zrezygnowano z oceny nośności w wypadku podstawy słupa z żebrami projektowanymi z kątowników równoramiennych.



Rys. 1. Moment zginający działający na podatną podstawę słupa

Wysięg żebra b_r powinien spełniać warunki, podane w Tabelcy 5.2 (arkusz 2) PN-EN 1993-1-1 [14] w odniesieniu do przekrojów klasy 1 lub 2. Natomiast wysokość żebra, traktowanego jako wspornik o przekroju teowym należy przyjmować tak, jak wskazano w [3], [6]. Ugięcie żebra nie powinno przekraczać wartości $b_r/1000$. Zaleca się, aby grubość ścianki tego żebra przyjmować o wartości $t_r \approx t$ (t – grubość ścianki zamkniętego kształtownika, zastosowanego na trzon słupa).

W wypadku zginania względem słabej osi współpracujące pole $A'_{c,red}$ ustala się zgodnie z regułami PN-EN 1993-1-8 [15], rozpatrując przekrój zamkniętego kształtownika jako przekrój złożony z dwóch ceowników lub dwuteowników o zerowych wartościach ich środków. Uzyskuje się w wypadku podstawy słupa z:

a) rys. 1a):

$$A'_{c,red} = h(t + 2c), \quad (3)$$

b) rys. 1b):

$$A'_{c,red} = (h + 2b_r)(t + 2c), \quad (4)$$

przy czym:

h – wysokość zamkniętego kształtownika, zastosowanego na trzon,

c – wysięg strefy docisku,

t – grubość ścianki kształtownika, zastosowanego na trzon,

b_r – wysięg żebra.

Wysięg strefy docisku ustala się zgodnie z PN-EN 1993-1-8 [15]:

$$c = t_p [f_y / (3f_{jd} \gamma_{M0})]^{0,5}, \quad (5)$$

gdzie:

t_p – grubość poziomej blachy podstawy,

f_y – granica plastyczności stali tejże blachy,

f_{jd} – obliczeniowa wytrzymałość połączenia na docisk,

$\gamma_{M0} = 1,0$ – współczynnik bezpieczeństwa.

Obciążenie stref (1) ściskanej i rozciąganej podstawy słupa przy działaniu momentu zginającego $M_{y,Ed}$ względem słabej osi ustala się z zależności:

$$F_{C,y} = -M_{y,Ed}/y, \quad (6)$$

$$F_{T,y} = M_{y,Ed}/y, \quad (7)$$

w których:

$F_{C,y}$ – siła w ściance trzonu, obciążająca fragment podstawy słupa, określonego jako ściskany króciec teowy (1),

$F_{T,y}$ – siła w połączeniu śrub kotwiących, obciążająca fragment podstawy słupa, określonego jako rozciągany króciec teowy (1).

$y = y_T + y_C$ – ramę dźwigni,

$y_C = 0,5(b - t)$ – odstęp od środka ciężkości strefy docisku (1) do środka ciężkości przekroju trzonu (także blachy podstawy),

$y_T = 0,5b + \Delta y$ – odstęp od osi śruby kotwiącej do środka ciężkości przekroju trzonu słupa (także blachy podstawy),

b – szerokość przekroju kształtownika zamkniętego o przekroju prostokątnym,

Δy – odstęp od osi śruby kotwiącej do ścianki trzonu, określonej jako jego wysokość.

Oceny strefy ściskanej dokonuje się przy działaniu $M_{y,Ed}$, sprawdzając:

$$F_{C,y}/A'_{c,red} < f_{jd}. \quad (9)$$

Wartość docisku, określona za pomocą (9), powinna dawać rezerwę wystarczająco dużą, gdyż trzeba pamiętać, że wystąpi jeszcze docisk od obciążenia tej strefy siłą podłużną i momentem zginającym względem mocnej osi. W tym wypadku projektowym ocenę przeprowadza się zgodnie z procedurą, opisaną w [3], [6], pamiętając, że podane tam działania przeprowadza się, przyjmując $M_{Ed} = M_{z,Ed}$.

3.2. Ocena w strefie rozciągania

Oceny dokonuje się zgodnie ze wskazaniem, podanymi w PN-EN 1993-1-8 [15], dobierając współpracującą długość l_{eff} jako wartość najmniejszą z możliwych mechanizmów plastycznego zginania blachy podstawy. Odnosi się to zarówno do zginania podstawy względem mocnej, jak też słabej osi. Należy pamiętać, że bierze się pod uwagę tylko część połączenia, w którym śruby są rozciągane [21].

Oznaczenia i długości współpracujące ustala się według rys. 2 [2], [7], [21], [23]:

$$l_{eff} = 2\pi m, \quad (10a)$$

$$l_{eff} = b_p/4, \quad (10b)$$

$$l_{eff} = h_p/4, \quad (10c)$$

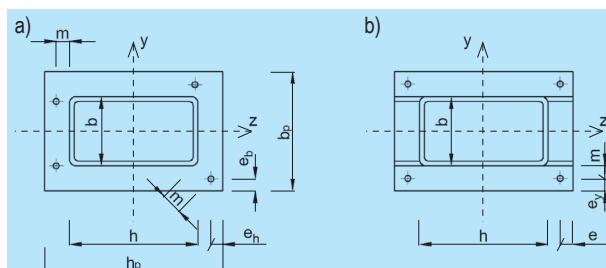
$$l_{eff} = 0,125[(b_p - b)^2 + (h_p - h)^2]^{0,5} (e_h/e_b + e_b/e_h)^*, \quad (10d)$$

$$l_{eff} = \pi m + 4e, \quad (10e)$$

$$l_{eff} = 4m + 1,25e_y, \quad (10f)$$

$$l_{eff} = 2m + e + 0,625e_y. \quad (10g)$$

Długości współpracujące według (10a) rozpatruje się w każdym wypadku rozmieszczenia śruby kotwiącej w blasze podsta-



Rys. 2. Wymiary do oceny długości współpracujących

wy. Długości współpracujące według (10b) do (10d) rozpatruje się w wypadku podstawy, pokazanej na rys. 2a), jednak według (10b) tylko podczas zginania względem mocnej osi, a według (10c) względem słabej osi. Natomiast w wypadku podstawy, pokazanej na rys. 2b), bierze się pod uwagę zależności (10e) do (10g).

Jednak jeżeli oceny dokonuje się w wypadku wystąpienia efektu dźwigni, to zamiast zależności (10e) stosuje się:

$$l_{\text{eff}} = \pi m + 2e. \quad (11)$$

3.3. Bezpieczeństwo podstawy słupa

Podłużna siła ściskająca jest przyłożona w trzonie słupa na mimośrodkach, odmierzanych od środka ciężkości jego przekroju wzdłuż osi głównych środkowych y-y i z-z.

Mimośród tej siły względem środka ciężkości przekroju trzony wynosi:

$$e = - (e_y^2 + e_z^2)^{0,5}, \quad (12)$$

gdzie:

- e – mimośród siły podłużnej względem środka ciężkości przekroju trzony słupa,

$e_y = -e \cdot \cos \alpha$ – mimośród siły podłużnej, odłożony wzdłuż osi y-y,

$e_z = -e \cdot \sin \alpha$ – mimośród siły podłużnej, odłożony wzdłuż osi z-z
 α – kąt nachylenia wypadkowej obliczeniowego momentu zginającego względem osi y-y (patrz rys. 1).

Na trzon słupa działają:

$$M_{y,Ed} = N_{Ed} \cdot e_y \text{ – obliczeniowy moment zginający względem osi y-y,} \quad (13)$$

$$M_{z,Ed} = N_{Ed} \cdot e_z \text{ – obliczeniowy moment zginający względem osi z-z,} \quad (14)$$

co można także zapisać:

$$M_{\alpha,Ed} = (M_{y,Ed}^2 + M_{z,Ed}^2)^{0,5}. \quad (15)$$

Podczas oceny bezpieczeństwa zarówno względem mocnej jak też słabej osi należy wyznaczyć składowe obliczeniowych nośności podstawy słupa $M_{j,z,Ed}$ i $M_{j,y,Ed}$, ustalane na podstawie Tablicy 6.7 z PN-EN 199-18 [15]. Z obliczeń uzyskuje się wartości oddziaływań $F_{T,z,Rd}$ i $F_{C,z,Rd}$ oraz $F_{T,y,Rd}$ i $F_{C,y,Rd}$ w zależności od występujących w podstawie obciążeń podłużną siłą ściskającą i momentami zginającymi. Te oddziaływania mogą występować w różnej konfiguracji ściskania i rozciągania (patrz Rysunek 6.18 w PN-EN 1993-1-8). Sposób postępowania podczas obliczania składowych obliczeniowych nośności $M_{j,Ed}$ będzie podany w przykładzie obliczeniowym Części 2 artykułu, przy czym:

$F_{T,z,Rd}$ – minimalna nośność strefy rozciąganej podstawy słupa podczas rozpatrywanej sytuacji obciążenia względem mocnej osi,

$F_{C,z,Rd}$ – nośność strefy ściskanej podstawy słupa podczas rozpatrywanej sytuacji obciążenia względem mocnej osi,

$F_{T,y,Rd}$ – minimalna nośność strefy rozciąganej podstawy słupa podczas rozpatrywanej sytuacji obciążenia względem słabej osi,

$F_{C,y,Rd}$ – nośność strefy ściskanej podstawy słupa podczas rozpatrywanej sytuacji obciążenia względem słabej osi,

z = $z_c + z_T$ – ramię dźwigni podczas oceny względem mocnej osi,
 z_c – odstęp od środka ciężkości strefy ściskanej docisku (1) do środka ciężkości przekroju trzony słupa,

z_T – odstęp od osi śruby kotwiącej do środka ciężkości przekroju trzony słupa,

y – ramię dźwigni podczas oceny względem słabej osi.

Tak wyznaczone składowe nośności węzła podstawy słupa służą do ustalenia momentów zginających, działających względem mocnej lub słabej osi podstawy słupa. W tym celu dokonuje się oceny nośności węzła ściskanego i zginanego dwuosiowo.

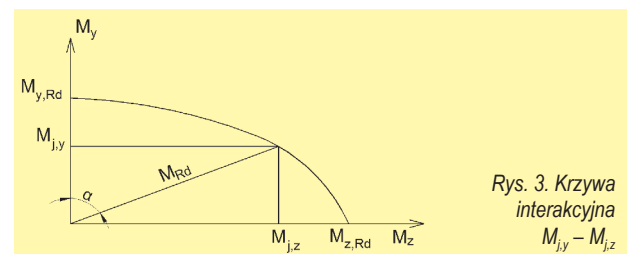
W publikacji [1] przedstawiono model takiego węzła, w którym trzon słupa był zaprojektowany z dwuteownika szerokostopowego. P. Amaral, jej autorka, zaproponowała elipsę, potwierdzając wybór studium komputerowym. W PN-EN 1993-1-1 [14] w wypadku dwukierunkowego zginania dwuteowników bismetrycznych wskazano zależności o wykładnikach $\alpha = 2$ oraz $\beta \geq 1$ zależne od n. Natomiast w teźże normie w odniesieniu do dwukierunkowego zginania zamkniętych kształtowników o przekrojach prostokątnych wskazano zależności $\alpha = \beta$ o wartościach, podanych w tabl. 1. Porównując wartości tych wykładników, stwierdza się, że są one w obszarze $0,3 \leq n \leq 0,6$ różnią się tylko w granicach 22,7% do -6,7%, przy czym gdy $n = 2$ różnica wynosi tylko 2,6%. Rozważany obszar wartości n odnosi się do najczęściej spotykanych sytuacji projektowych dwukierunkowego zginania trzonów słupów.

Biorąc pod uwagę powyższe stwierdzenia, proponuje się również w niniejszym opracowaniu elipsę:

$$(M_{j,y,Rd}/M_{y,Rd})^2 + (M_{j,z,Rd}/M_{z,Rd})^2 = 1, \quad (16)$$

Wychodząc z zdefiniowanego kształtu krzywej interakcyjnej (rys. 3), uzyskuje się:

$$M_{j,y,Rd} = M_{j,z,Rd} \cdot \cot \alpha. \quad (17)$$



Rys. 3. Krzywa interakcyjna $M_{j,y} - M_{j,z}$

Przekształcając (16), otrzymuje się zależność:

$$M_{j,y,Rd} = \{ [1 - (M_{j,z,Rd}/M_{z,Rd})^2] M_{y,Rd}^2 \}^{0,5} = M_{j,z,Rd} \cdot \cot(\alpha), \quad (18)$$

która służy do obliczenia wartości $M_{j,z,Rd}$.

Mając te wartości, ustala się:

$$M_{j,\alpha,Rd} = (M_{j,y,Rd}^2 + M_{j,z,Rd}^2)^{0,5}. \quad (19)$$

Sprawdzenia bezpieczeństwa podstawy słupa dokonuje się, jak następuje:

$$M_{\alpha,Ed} \leq M_{j,\alpha,Rd}. \quad (20)$$

Maksymalną siłę rozciągającą śrubę kotwiącą ustala się jako:

$$\max F_T = 0,5(F_{T,z,f} + F_{T,y,f}) \leq F_{T,Rd}, \quad (21)$$

gdzie:

$F_{T,Rd}$ – nośność śruby kotwiącej, ustalona przy jej rozciągnięciu z ewentualnym obciążeniem siłą poprzeczną.

$F_{T,y,f}$, $F_{T,z,f}$ – siły strefy rozciąganej podczas zginania względem osi słabej lub mocnej.

Natomiast sprawdzenia bezpieczeństwa w strefie ściskanej docisku dokonuje się, jak następuje:

$$f_{j,y} + f_{j,z} \leq f_{jd}, \quad (22)$$

przy czym:

$f_{j,y}$ – wartość lewej strony wzoru (9),

$f_{j,z}$ – odpowiednia wartość obliczona zgodnie z procedurą, opisaną w [3], [4], pamiętając, że podane tam działania przeprowadza się, przyjmując $M_{Ed} = M_{z,Ed}$.

Piśmiennictwo

[1] Amoral P.M.: Steel column bases under biaxial loading conditions. Department of Civil Engineering. Faculty of Engineering of the University of Porto. Diploma Thesis. 2011.

- [2] Bródka J.: Konstrukcje stalowe z kształtowników zamkniętych. Tom 1. PWT. Rzeszów 2016.
- [3] Bródka J.: Podstawy słupów o trzonach z kształtowników innych niż pojedyncze dwuteowniki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2018.
- [4] Bródka J., Broniewicz M.: Kształtowniki o przekrojach zamkniętych. Poradnik dla projektantów i konstruktorów. Tom 1. Koenigstahl. Warszawa.
- [5] Bródka J., Broniewicz M.: Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodów. PWT. Rzeszów 2013.
- [6] Bródka J., Głuszko A., Górski M., Kozłowski A.: Nośność podstaw słupów z zamkniętych kształtowników o przekrojach prostokątnych ściskanych i zginanych. Inżynieria i Budownictwo. 2016, nr 10.
- [7] Bródka J., Kozłowski A., Ligocki I., Łąguna J., Ślęczka L.: Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. Tom 2. Drugie wydanie. PWT. Rzeszów 2013.
- [8] Heron. Vol. 53, no 1/2. Special issue. Steel column bases.
- [9] Jaspart. J.-P., Weynand K.: Design Joints in Steel and Composite Structures. Wiley. Ernst und Sohn. Berlin 2016.
- [10] Ligocki I.: Badania eksperymentalne podatnych połączeń słupa z fundamentem. Konstrukcje Stalowe.
- [11] Ligocki I.: Połączenia słupów z fundamentami. Nowoczesne rozwiązania konstrukcyjno-materiałowo-technologiczne. Tom III. XXVII Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta Konstrukcji. Szczyrk 7–10 marca 2012 r.
- [12] Ligocki I.: Stiffness and strength of RHS column bases. Eurosteel 2008. 5th European Conference of Steel and Composite Structures.
- [13] PN-EN 1992-1-1:2006 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu – Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [14] PN-EN 1993-1-1:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- [15] PN-EN 1993-1-8:2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 8: Projektowanie węzłów.
- [16] PN-EN 1993-1-10:2007 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 10: Dobór stali ze względu na kruche pękanie i ciągliwość międzywarstwową.
- [17] PN-EN 10210-1:2007 Kształtowniki zamknięte wykonane na gorąco ze stali konstrukcyjnych i drobnoziarnistych – Część 1: Warunki techniczne dostawy.
- [18] PN-EN 10210-2:2007 Kształtowniki zamknięte wykonane na gorąco ze stali konstrukcyjnych i drobnoziarnistych – Część 2: Tolerancje, wymiary i wielkości statyczne.
- [19] PN-EN 10219-1:2007 Kształtowniki zamknięte ze szwem wykonane na zimno ze stali konstrukcyjnych i drobnoziarnistych – Część 1: Warunki techniczne dostawy.
- [20] PN-EN 10219-2:2007 Kształtowniki zamknięte ze szwem wykonane na zimno ze stali konstrukcyjnych i drobnoziarnistych – Część 2: Tolerancje, wymiary i wielkości statyczne.
- [21] Sokol Z., Wald F.: Modelování tuhosti a únosnosti tažené části patek sloupů. Czech Technical University in Prague. 2000.
- [22] Wald F.: Column bases. ČVUT. Praha 1995.
- [23] Wald F., Bouguin V., Sokol Z., Muzeau J.-P.: Effective Length of T-stub of RHS Column Base Plates. Proceedings of Conference in Steel Structures IV: Steel Connections in the New Millennium. Oct. 22–25. Roanoke 2000.

* Autor pragnie skorygować błędną ocenę długości współpracującej, podanej w [6]. Korzystając z obecnego ustalenia długości l_{eff} , odnoszącej się do naroża, należy ustalać tak, jak podano w (10d). Wtedy grubość blachy podstawy tego artykułu ulega zwiększeniu.