

Navrhování železobetonových sloupů zesílených ocelovou bandáží

Design of Reinforced Concrete Columns Strengthened with Steel Lining

(Pokračování z č. 3/98)

Ladislav Čírtek

Doporučení pro navrhování a provádění zesilující ocelové bandáže železobetonových sloupů. Uvedené skutečnosti vycházejí z výsledků experimentálních zkoušek a z teoretického rozboru chování takto zesílených sloupů.

This paper presents recommendations for design and implementation of strengthening steel lining for reinforced columns. The described experience ensues from results of experimental tests and from theoretical analysis of behaviour of the strengthened columns.

Ocelová zesilující bandáž je dodatečně provedená ocelová konstrukce obepínající železobetonový sloup. Tato bandáž je sestavena z podélných úhelníků a příčných pásků (obr. 1) a je určena k zesílení stávajících sloupů, které nevyhovují z hlediska mezního stavu porušení normálovou silou (N) a ohybovým momentem (M). Omezením přetvoření betonu v příčném směru u sloupů zatížených tlakem vzniká v betonu trojosý stav napjatosti, jehož důsledkem je zvýšení pevnosti betonu. Bandážováním lze výhodně zvýšit únosnost stávajících sloupů pouze v případech, kdy k síle na mezi porušení podstatně přispívá tlakem beton. Účinnost bandáže klesá při zvětšující se výstřednosti normálové síly. Dosáhne-li výstřednost hranici plochy A_e bandážovaného sloupu (obr. 2) předpokládá se, že z hlediska mezního stavu porušení N a M je účinnost bandáže zanedbatelná. Uváděný návrh bandážovaných sloupů vychází z výsledků experimentálních zkoušek [1] a z teoretického rozboru chování takto zesílených sloupů [2], [3]. Výpočet mezního stavu porušení N a M stávajících železobetonových sloupů se provádí podle ČSN 73 1201 *Navrhování betonových konstrukcí* [4]; navrhování sloupů s ocelovou bandáží na tento předpis navazuje.

Podmínky pro zvýšení únosnosti sloupů

Ocelovou bandáží lze zvětšit únosnost stávajících železobetonových sloupů, jsou-li splněny následující podmínky:

- beton nevykazuje charakteristické znaky poruch v tlaku,
- průřez sloupu má tvar čtverce nebo obdélníku se stranami a, b , kde delší strana b má délku nejvýše 1,2 m a pro poměr délek stran platí

$$a/b \geq 0,5, \quad (1)$$
- beton sloupu vykazuje vlastnosti odpovídající třídám betonu v rozmezí

$$B12,5 \text{ až } B25, \quad (2)$$
- štíhlostní poměr vyhovuje podmínce:

$$l_e / i_{b,min} < 35, \quad (3)$$
- výpočtová výstřednost e_d splňuje podmínku (obr. 2)

$$e_d \leq e_{im}, \quad (4)$$
- pro dosažení větší účinnosti bandáže je nutno stávající konstrukci po dobu provádění bandáží maximálně odlehčit, alespoň odstraněním krátkodobých nahodilých zatížení.

V uvedených vztazích je:

- $a(b)$ kratší (delší) strana obdélníkového průřezu sloupu,
- l_e účinná délka sloupu podle čl. 5.2.4.2 předpisu [4],
- $i_{b,min}$ min. poloměr setrvačnosti betonového průřezu sloupu,

- e_d výpočtová výstřednost normálové síly N_d od účinků extrémního zatížení,
- e_{im} maximální přípustná výstřednost měřená od těžiště betonového průřezu po hranici plochy přípustných výstředností na průsečnici roviny ohybu s rovinou průřezu (obr. 2).

Konstrukční uspořádání a kvalita oceli bandáže

Konstrukční uspořádání bandáže musí vyhovovat následujícím podmínkám:

- rovnostranný úhelník
 - minimální rozměr úhelníku

$$L 50 \times 50 \times 5 \text{ [mm]},$$
 - délka strany a_{uh} , tloušťka t_{uh} a délka l_{uh} úhelníku (obr. 1):

$$a_{uh} \geq 0,2 \alpha, \quad t_{uh} \geq 0,1 a_{uh}, \quad (5), (6)$$

$$l_{uh} \cong l_{st} - 0,05 \text{ [m]}, \text{ kde } \alpha = 0,5 (a + b), \quad (7), (8)$$
- pásek
 - osová vzdálenost a_p pásků

$$0,40 \alpha \leq a_p \leq 0,75 \alpha, \quad (9)$$
 - průřezová plocha A_p pásku

$$A_p \geq 0,004 \alpha^2, \quad (10)$$
 - tloušťka t_p pásku

$$t_p \leq t_{uh}, \quad (11)$$
- třídu oceli bandáže je nutno volit s ohledem na požadavky dané tab. 1

Tab. 1 – Požadavky na volbu oceli bandáže / Demands on type of steel

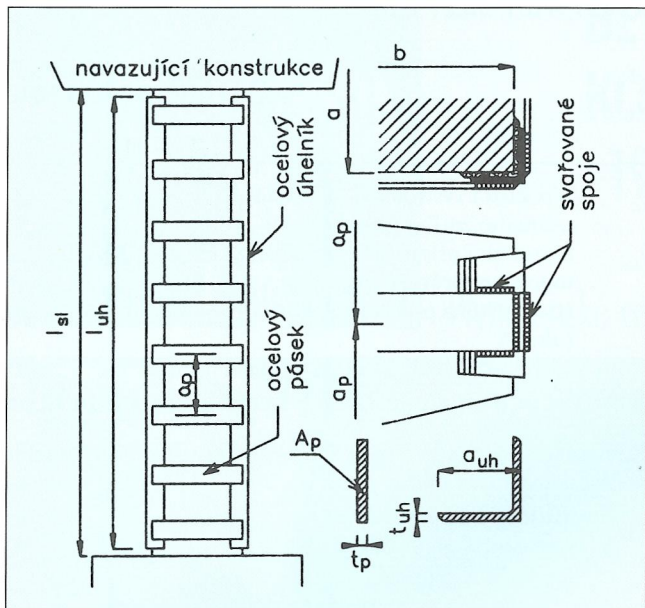
prvek bandáže	třída betonu	min. výpočtová pevnost f_d [MPa]	min. pevnostní třída (ČSN EN 10025)
pásek	B12,5; B15	213	Fe 360
	B20; B25	239	Fe 430
úhelník	B12,5+B25	213	Fe 360

- bandáž nutno provést po celé výšce sloupu tak, aby krajní pásky, tj. horní a dolní, byly co nejbližší k okrajům navazujících konstrukcí (např. průvlak, základová konstrukce),
- pásek je přivařen k úhelníku svařem s únosností $N_u = N_{p,ft}$.

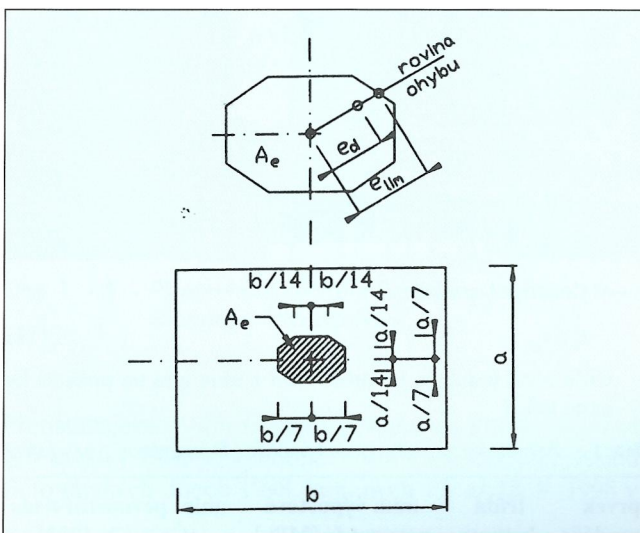
V uvedených vztazích i v tab. 1 je:

- $a_{uh}, (t_{uh})$ délka (tloušťka) strany rovnostranného úhelníka bandáže,
- l_{uh} délka úhelníku,
- l_{st} světlá délka sloupu,
- a_p osová vzdálenost pásků,
- $t_p (A_p)$ tloušťka (průřezová plocha) pásků,
- f_d výpočtová pevnost oceli bandáže.

Při návrhu délky strany a_{uh} úhelníku, tloušťky t_{uh} úhelníku a průřezové plochy A_p pásku je vhodné volit minimální hodnoty z hodnot vyhovujících vztahům (5), (6) a (10). Tloušťku pásků t_p , vyhovující vztahu (11), je vhodné volit $t_p = t_{uh}$ nebo hodnotu bezprostředně menší, než je tloušťka úhelníku t_{uh} .



Obr. 1 – Ocelová bandáž sloupu / Steel lining of column



Obr. 2 – Plocha A_e případných výstředností e_d / Area A_e of possible eccentricities e_d

Mez porušení ohybovým momentem a normálovou silou

1) Jsou-li dodrženy výše uvedené podmínky, konstrukční uspořádání a kvalita oceli bandáží, stanoví se **únosnost bandážovaného sloupu**, vyjádřená normálovou silou na mezi porušení bandážovaného sloupu N_{ub} , vztahem:

$$N_{ub} = N_u + \Delta N_{su} \left(1 - \frac{e_d}{e_{lim}} \right), \quad (12)$$

s omezením

$$N_{ub} \leq N_{eu} + \Delta N_{su}. \quad (13)$$

Přitom

N_u je výpočtová normálová síla na mezi porušení zesilovaného železobetonového průřezu nebandážovaného sloupu stanovená podle čl. 5.2.8 předpisu [4] pro výstřednost e_d ,

ΔN_{su} přírůstek výpočtové normálové síly na mezi porušení bandážovaného sloupu pro výstřednost $e_d = 0$, stanovený podle bodu 2 tohoto odstavce,

e_d výpočtová výstřednost normálové síly N_d od účinků extrémních zatížení (obr. 2),

e_{lim} maximální přípustná výstřednost měřená od těžiště betonového průřezu po hranici plochy A_e přípustných výstředností na průsečnici roviny ohybu s rovinou průřezu (obr. 2),

N_{eu} výpočtová normálová síla na mezi porušení železobetonového průřezu nebandážovaného sloupu stanovená podle vztahu (119) v bodě 5.2.7.3 předpisu [4].

2) **Přírůstek výpočtové normálové síly na mezi porušení bandážovaného sloupu ΔN_{su}** je určen vztahem:

$$\Delta N_{su} = 0,8 \gamma_u \gamma_b A_b R_{bd} (\Phi_b - 1), \quad (14)$$

kde

γ_u je součinitel geometrie podle čl. 5.2.2 předpisu [4],

γ_b součinitel podmínek působení betonu stávající konstrukce podle čl. 2.3 předpisu [4],

A_b průřezová plocha betonové části průřezu sloupu,

R_{bd} výpočtová pevnost betonu v tlaku podle tab. 1 předpisu [4],

Φ_b součinitel únosnosti betonu bandážovaných sloupů stanovený podle bodu 3 tohoto odstavce.

3) **Součinitel únosnosti betonu Φ_b bandážovaných sloupů** je vyjádřen vztahem

$$\Phi_b = \Phi_{ap} \Psi_B \Psi_{ab} \Psi_a \Psi_N \Psi_{dg} \text{ s omezením: } \Phi_b \leq 1,75. \quad (15)$$

Ve vztahu (15) se součinitelé parametrů bandáže vyjádří podle vztahů:

Součinitel vzdálenosti pásků, tj. Φ_{ap}

$$\Phi_{ap} = 2,137 - 0,663 \frac{a_p}{\alpha}, \quad (16)$$

Součinitel kvality betonu, tj. Φ_B

$$\Phi_B = 1,02; 1,00; 0,96; 0,92 \quad (17)$$

kde uvedené hodnoty odpovídají třídám B12,5; B15; B20; B25 betonu stávajícího sloupu,

Součinitel tvaru průřezu sloupu, tj. Φ_{ab}

$$\Phi_{ab} = 0,2 \frac{a}{b} + 0,8, \quad (18)$$

Součinitel velikosti průřezu, tj. Φ_a

$$\Phi_a = \left(1 - \frac{\alpha - 0,3}{7,1\alpha} \right)^{\exp}, \quad (19)$$

$$\text{kde } \exp = -1,691 \Phi_{ap} \Psi_B + 2,017, \quad (20)$$

Součinitel zatížení působícího na sloup v době provádění bandáží, tj. Ψ_N

$$\Psi_N = 1 - 0,200 \left(\frac{N_{d1}}{X_u} \right)^3, \quad (21)$$

Součinitel maximálního rozměru kameniva betonu tj. Ψ_{dg}

$$\Psi_{dg} = 6,8 d_g + 0,892 \quad (22)$$

s omezením $\Psi_{dg} \leq 1$;

$$\text{jestliže } d_g \text{ nebylo stanoveno, uvažuje se: } \Psi_{dg} = 0,95. \quad (23)$$

Přítom ve vztazích (16) až (23):

- a_p je osová vzdálenost pásků [m],
- α průměrná délka stran průřezu: $\alpha = 0,5 (a + b)$,
- $a (b)$ kratší (delší) strana obdélníkového průřezu sloupu,
- N_{dl} výpočtová síla působící na sloup v době provádění bandáže,
- d_g maximální rozměr kameniva [m],
- N_u viz vztah (12).

Technologický postup provádění bandáží

- Nejprve se v oblasti rohových úhelníků a pásků z povrchu stávajícího sloupu odstraní všechny nenosné vrstvy (obklady, omítky, podlaha, podhled apod.) a povrch betonu se očistí;
- povrch betonu se provlhčí a nanese se na něj v oblastech rohových úhelníků vrstva jemnozrnného betonu třídy B20 (s kamenivem o zrnitosti do 2 mm) o průměrné tloušťce přibližně 5 mm;
- pokud je beton ještě tvárný, zatlačí se do ní úhelník tak, aby jeho povrch po celé délce k betonu dobře přilnul;
- poloha čtyř úhelníků sloupu se po celou dobu provádění bandáže zajišťuje svěrkami;
- po zatuhnutí betonové vrstvy (2 až 7 dní) se k úhelníkům přivaří koutovými svary pásky, avšak pouze na jednom konci;
- aktivace pásků ohřevem se provede tak, aby se dokončila bandáž v krocích vždy po jedné celé objímce, tvořené čtveřicí pásků umístěných v jedné horizontální úrovni:
 - pásky se nahřejí po celé délce plamenem na teplotu 130 až 150 °C (100 až 120 °C) jestliže beton stávajícího sloupu odpovídá třídám betonu B12,5; B15 (B20, B25);
 - při udržování výše této teploty až do ukončení prací na celé objímce, provede se přivaření všech čtyř doposud nepřivařených konců pásků k úhelníkům;
 - postupně se takto po jednotlivých objímkách provede bandáž celého sloupu.

Odolnost proti korozi

Odolnost ocelové konstrukce bandáže proti korozi a její případnou ochranu je třeba posoudit a navrhovat podle předpisů [5], [6].

Požární odolnost

Vhodnost bandáže z hlediska požadavků protipožární ochrany musí být posouzena podle příslušných předpisů [7], [8], [9].

Vztahy (16) až (22) v tomto článku jsou převzaty z [3]. Pevnosti betonu v tlaku R_b a tahu R_{bt} ve vztazích (4PM) a (6PM2) v [3] byly vyjádřeny přibližnými výrazy:

$R_b \cong 0,8R_{bg} + 8$ [MPa]; $R_{bt} \cong 0,3(R_b)^{2/3}$, kde R_{bg} je zaručená krychelná pevnost zatříděného betonu [10].

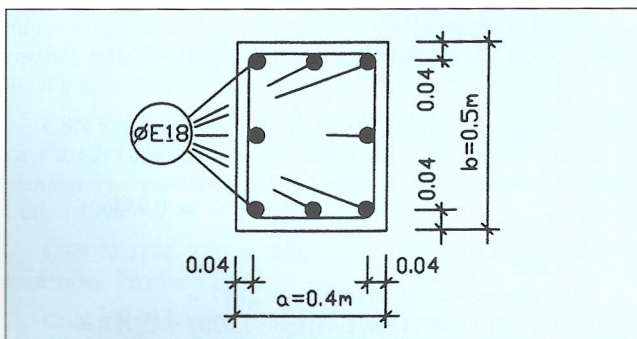
Posouzení „míry bezpečnosti“ sloupů zesílených ocelovou bandáží v tomto článku je možno se „skutečnou únosností“ těchto sloupů metodou uvedenou v [2], [3].

Příklad:

Úkolem je navrhnout ocelovou bandáž monolitického železobetonového sloupu - staticky působícího jako kyvná stojka o světlé výšce $l_{sl} = 3,7$ m, s průřezem podle obr. 3, protože stávající sloup nespĺňuje požadavky meze porušení M a N předpi-

su [4]. Beton nevykazuje znaky poruch v tlaku a odpovídá třídě B12,5. Maximální rozměr kameniva $d_g = 16$ mm. Normálová síla od extrémního zatížení (v základní kombinaci) $N_d = 1700$ kN. V době provádění bandáže bude na sloup působit výpočtová síla $N_{dl} = 850$ kN.

$$N_d = 1700 \text{ kN}; N_{dl} = 700 \text{ kN}; l_{sl} = 3,7 \text{ m}$$



Obr. 3 – Průřez sloupu / Cross-section of the column

Beton: $R_{bd} = 7,5$ MPa (B12,5); $d_g = 16$ mm
 Ocel 10216: $R_{scd} = 165$ MPa; $A_{sc} = 20,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

• Kontrola podmínek pro zvýšení únosnosti sloupu

(1) $a/b \geq 0,5$; $0,4/0,5 = 0,8 \geq 0,5 \Rightarrow$ podmínka (1) splněna.

Třída betonu B12,5 stávajícího sloupu splňuje podmínku (2).

(3) $l_e / i_{b,\min} < 35$; $3,7/0,116 = 31,896 < 35 \Rightarrow$ podmínka (3) splněna,

kde

$$l_e = l_{sl} = 3,7 \text{ m}; i_{b,\min} = (J_y / A)^{0,5} = \{[(1/12)0,4^3 \cdot 0,5] / [0,4 \cdot 0,5]\}^{0,5} = 0,116 \text{ m};$$

(4) $e_d \leq e_{\lim}$; $0,014 \text{ m} < 0,057 \text{ m} \Rightarrow$ podmínka (4) splněna,

kde

$$e_d = \eta(e_f + e_e) = 1(0 + 0,014) = 0,014 \text{ m};$$

$$e_a \geq l_{sl} / 400 = 3700 / 400 = 9,3 \text{ mm};$$

$$(a + 450) / 60 = (400 + 450) / 60 = 14,2 \text{ mm};$$

$$e_{\lim} = a / 7 = 0,4 / 7 = 0,057 \text{ m};$$

• Návrh ocelové bandáže

• Navržený úhelník L 90×90×10–3650 mm ($a_{uh} = 0,090$ m; $t_{uh} = 0,010$ m; $l_{uh} = 3,650$ m).

(5) $a_{uh} \geq 0,2\alpha$; $a_{uh} = 0,09 \text{ m} = 0,2\alpha = 0,2 \cdot 0,45 = 0,09 \text{ m} \Rightarrow$ podmínka (5) splněna.

kde $\alpha = 0,5(a+b) = 0,5(0,4 + 0,5) = 0,45$ m;

(6) $t_{uh} \geq 0,1a_{uh}$; $t_{uh} = 0,01 \text{ m} > 0,1a_{uh} = 0,1 \cdot 0,09 = 0,009 \text{ m} \Rightarrow$ podmínka (6) splněna.

• Navrženy pásky 90×9–380 a 90×9–480 mm ($t_p = 0,009$ m; $A_p = 0,00081$ m²)

s osovou vzdáleností $a_p = 0,240$ m.

(9) $0,4\alpha \leq a_p \leq 0,75\alpha$; $0,40\alpha = 0,40 \cdot 0,450 = 0,18 \text{ m} < 0,240 \text{ m} \leq 0,75\alpha = 0,75 \cdot 0,45 = 0,337 \text{ m} \Rightarrow$ podmínka (9) splněna.

(10) $A_p \geq 0,004\alpha^2$; $A_p = 0,00081 \text{ m}^2 = 0,004\alpha^2 = 0,004 \cdot 0,45^2 = 0,00081 \text{ m}^2$; \Rightarrow podmínka (10) splněna.

(11) $t_p \leq t_{uh}$; $t_p = 0,009 \text{ m} < t_{uh} = 0,010 \text{ m} \Rightarrow$ podmínka (11) splněna.

Pro ocel bandáže je zvolena třída oceli Fe 360 (podle tab. 1).

– Mez porušení M a N

Součinitel únosnosti betonu bandážovaného sloupu:

$$(15) \Phi_b = \Phi_{ap} \Psi_B \Psi_{ab} \Psi_a \Psi_N \Psi_{dg} = \\ = 1,783 \cdot 1,020 \cdot 0,960 \cdot 0,953 \cdot 0,966 \cdot 1 = \\ = 1,607 < 1,75;$$

kde

$$(16) \Phi_{ap} = 2,137 - 0,663(a_p / \alpha) = \\ = 2,137 - 0,663(0,24/0,45) = 1,783;$$

$$(17) \Psi_B = 1,020;$$

$$(18) \Psi_{ab} = [0,2(a/b)] + 0,8 = [0,2(0,4/0,5)] + 0,8 = \\ = 0,960;$$

$$(19) \Psi_a = \left(1 + \frac{\alpha - 0,3}{7,1\alpha} \right)^{\text{exp}} = \\ = \left(1 + \frac{0,45 - 0,3}{7,1 \cdot 0,45} \right)^{-1,058} = 0,953;$$

kde

$$(20) \text{exp} = -1,691 \Phi_{ap} \Psi_B + 2,017 = \\ = -(1,691 \cdot 1,783 \cdot 1,020) + 2,017 = \\ = -1,058;$$

$$(21) \Psi_B = 1 - 0,200 \left(\frac{N_{d1}}{N_u} \right)^3 = \\ = 1 - 0,200 \left(\frac{850}{1285,1} \right)^3 = 0,966;$$

kde

$N_{d1} = 700$ kN je výpočtová síla působící na sloup v době provádění bandáže,
 $N_u = 1285,1$ kN je výpočtová normálová síla na mezi porušení železobetonového průřezu stávajícího nebandážovaného sloupu stanovená podle čl. 5.2.4 [4] pro výstřednost

$$(22) \Psi_{dg} = 6,8d_g + 0,892 = (6,8 \cdot 0,016) + 0,892 = 1.$$

Přírůstek výpočtové normálové síly na mezi porušení bandážovaného sloupu

$$(14) \Delta N_{su} = 0,8 \gamma_u \gamma_b A_b R_{bd} (\Phi_b - 1) = \\ = 0,8 \cdot 0,955 \cdot 0,850 \cdot 0,198 \cdot 7,5 \cdot 10^3 (1,607 - 1) = \\ = 585,4 \text{ kN};$$

kde

$$\gamma_u = 1 - [20/(a+50)] = 1 - [20/(400+50)] = 0,955; \\ \gamma_b = 0,850; A_b = 0,198 \text{ m}^2; R_{bd} = 7,5 \text{ MPa}.$$

Normálová síla na mezi porušení bandážovaného sloupu

$$(12) N_{ub} = N_u + \Delta N_{su} [1 - (e_d / e_{lim})] = \\ = 1285,1 + 585,4 [1 - (0,014/0,057)] = 1726,7 \text{ kN};$$

$$(13) N_{ub} \leq N_{eu} + \Delta N_{su}; \\ N_{ub} = 1726,7 \text{ kN} < N_{eu} + \Delta N_{su} = 1285,1 + 585,4 = \\ = 1870,5 \text{ kN} \Rightarrow \text{podmínka (13) splněna};$$

kde

$$N_{eu} = \gamma_u (0,8 A_b \gamma_b R_{bd} + A_{sc} \gamma_s R_{scd}) = \\ = 0,955 [(0,8 \cdot 0,198 \cdot 0,85 \cdot 7,5 \cdot 10^3) + \\ + (20,36 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 165 \cdot 10^3)] = \\ = 1285,1 \text{ kN};$$

$$N_{ub} = 1726,7 \text{ kN} > N_{d1} = 1700 \text{ kN}.$$

Bandážovaný sloup splňuje podmínky meze porušení M a N. Dále se provede návrh svařovaných spojů; posoudí se ochrana proti korozi a požární odolnost ocelové bandáže.

Literatura:

- [1] Čírtek L.: Zkoušky železobetonových sloupů s ocelovou bandáží. *Beton a zdivo*, 1994/4, s. 25–29.
- [2] Čírtek L.: Výpočtový model železobetonových sloupů zesílených ocelovou bandáží. *Beton a zdivo*, 1998/1, s. 19–22
- [3] Čírtek L.: Chování železobetonových sloupů zesílených ocelovou bandáží. *Beton a zdivo*, 1998/2 s. 15–20
- [4] ČSN 73 1201 *Navrhování betonových konstrukcí*.
- [5] ČSN 03 8260 *Ochrana ocelových konstrukcí proti atmosférické korozi*.
- [6] ČSN 03 8240 *Volba nátěrů pro ochranu kovových technických výrobků proti korozi*.
- [7] ČSN 73 0821 *Požární bezpečnost staveb. Požární odolnost stavebních konstrukcí*.
- [8] ČSN 73 0802 *Požární bezpečnost staveb. Nevýrobní objekty*.
- [9] ČSN 73 0804 *Požární bezpečnost staveb. Výrobní objekty*.
- [10] ČSN 73 2400 *Provádění a kontrola betonových konstrukcí*.

Ing. Ladislav Čírtek, CSc., Ústav betonových a zděných konstrukcí, Údolní 53, 662 42 Brno

Normalizace

Tento výčet nových norem navazuje na přehledy norem uvedených v číslech 1997/4 a 1998/2.

ČSN P ENV 10080 (42 1039) *Ocel pro výztuž do betonu – Svařitelná, žebírková, betonářská ocel B500 – Technické dodací podmínky pro tyče, svitky a svařované sítě*. Červenec 1997. Předběžná evropská norma sjednocuje požadavky na betonářskou výztuž. Vzhledem k tomu, že bylo obtížné dosáhnout shody, předpokládá se, že před zavedením EN do soustavy národních norem bude nutno znění znovu projednat. Uvádí se oceli B500A a B500B, které se liší geometrií žebírek a tažností při stejné mezi kluzu 500 MPa. Příloha A uvádí postup při prověřování shody certifikací a Příloha B stanoví postup při zjišťování vlastností betonářské oceli.

ČSN EN 492-2, *Oprava 2* (72 2201) *Stavební vápno – Část 2: Zkušební metody*. Listopad 1997. Oprava se týká dvou článků v kap. 5.

ČSN P ENV 1992-1-2 (73 1201) *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru*. Březen 1998. Tato část se týká konstrukcí, u kterých se požaduje vyloučení předčasného selhání konstrukce a omezení šíření požáru. Neplatí pro konstrukce s vnější předpínací výztuží a pro skořepinové konstrukce. Součástí je NAD ČR, podle kterého se směrné hodnoty pro ČR nemění.

ČSN EN 445 (73 2408) *Injektážní malta pro předpínací kabely – Zkušební metody*. Duben 1998.

ČSN EN 446 (73 2409) *Injektážní malta pro předpínací kabely – Postupy injektování*. Duben 1998.

ČSN EN 447 (73 2410) *Injektážní malta pro předpínací kabely – Požadavky na běžnou maltu*. Duben 1998.