

ZOSILŇOVANIE VALCOVITÝCH BETÓNOVÝCH KONŠTRUKCIÍ PREDPÄTÍM ■ STRENGTHENING OF CYLINDRICAL CONCRETE STRUCTURES BY PRESTRESSING

Juraj Bilčík, Milan Chandoga

Zosilňovanie vonkajším predpätím je elegantná, účinná, trvanlivá a cenovo výhodná metóda na zosilňovanie rôznych betónových konštrukcií. Zvlášť výhodná je pre konštrukcie valcovitého tvaru, ako sú nádrže, silá, komíny a chladiace veže. Analýza príčin porúch a spôsob zosilnenia sú prezentované na príklade komína a vyhnávacej nádrže. ■ The external post-tensioning is an elegant, powerful, durable and cost effective method of strengthening a great variety of concrete structures. It is especially advantageous for cylindrical structures as reservoirs, silos, chimneys and cooling towers. Analysis of failures and strengthening methods are presented on a chimney and sludge digester.

Spoločným znakom valcovitých konštrukcií ako sú nádrže, silá, komíny a chladiace veže je veľký pomer medzi plochou vystavenou obklopujúceho prostrediu a prierezovými rozmermi. Vzhľadom na charakter a využívanie týchto konštrukcií je ich spoľahlivosť, tzn. bezpečnosť, použiteľnosť a trvanlivosť, najviac ohrozená objemovými zmenami od teplotných účinkov, koróziou betónu a výstuže. U nádrží sa často vyskytuje aj poddimenzovanie stien, čo je príčina vzniku a rozvoja zvislých trhlin. Tieto môžu spôsobiť čiastočnú alebo úplnú stratu schopnosti prvku alebo konštrukcie plniť požadované funkcie.

ZOSILŇOVANIE 150M KOMÍNA

Komíny, podobne ako chladiace veže, patria ku konštrukciám, ktoré sú zaťažované predovšetkým vlastnou tiažou, vetrom, seizmicitou a účinkami objemových zmien. Na rozdiel od chladiacich veží je v betónovom drieku komí-

na väčší teplotný spád, vyvolaný vysokou teplotou odvádzaných spalín (do 300 °C). Aj keď betónový driek je z vnútornej strany chránený ochranným puzdrom, možno na komínoch pozorovať vznik a rozvoj trhlin od teplotného spádu. Vyznačujú sa nasledovnými spoločnými znakmi: zvislý priebeh, malé množstvo, veľké dĺžky.

Príčinou vzniku týchto trhlin je vodorovne pôsobiace ohybovo-ťahové namáhanie betónového drieku komína od rozdielu teplôt na vonkajšom a vnútornom povrchu. V zimnom období, keď spád teplôt pri prevádzke komína možno zapísať v tvare $T_i \gg T_e$ (obr. 1, rez A-A), vznikajú zvislé trhliny na vonkajšom povrchu. Ak je komín mimo prevádzky, dochádza za slnečného počasia k obrátenému spádu teplôt ($T_i < T_e$), ktorý vyvoláva ťahové napätia na vnútornej strane drieku, ktorá často vôbec nie je vystužená, čo vedie k vzniku menšieho množstva širokých trhlin (obr. 1, rez B-B). Vzniku týchto trhlin sa dá ťažko vyhnúť. Ak ich šírka a napätie vo výstuži neprekročí určité limitné hodnoty, väčšinou nie je ohrozená bezpečnosť a použiteľnosť komína. V každom prípade majú nepriaznivý vplyv na trvanlivosť. Železobetónový driek komína je vystavený stupňom prostrediu XC4, XF3, XA1 [1]. Pre prostredie XC4 odporúča EN 1992-1-1 [2] maximálnu šírku trhlin 0,3 mm. ČSN 73 4111 [3] pripúšťa, od teplotných účinkov, najväčšiu šírku trhlin 0,2 mm.

Šírku zvislých trhlin a veľkosť napätia výstuže v trhline možno kontrolovať druhom, množstvom, priemerom a tvarom povrchu vodorovnej prsten-

covej výstuže. Navyše sú ovplyvnené aj pevnosťou betónu, hrúbkou steny a krycej vrstvy. V tab. 1 je uvedený prehľad o vývoji požiadaviek na minimálny stupeň vystuženia komínov vodorovnou prstencovou výstužou v zahraničných normových predpisoch.

Tab. 1 Min. stupeň vystuženia betónového komína vodorovnou výstužou [4]

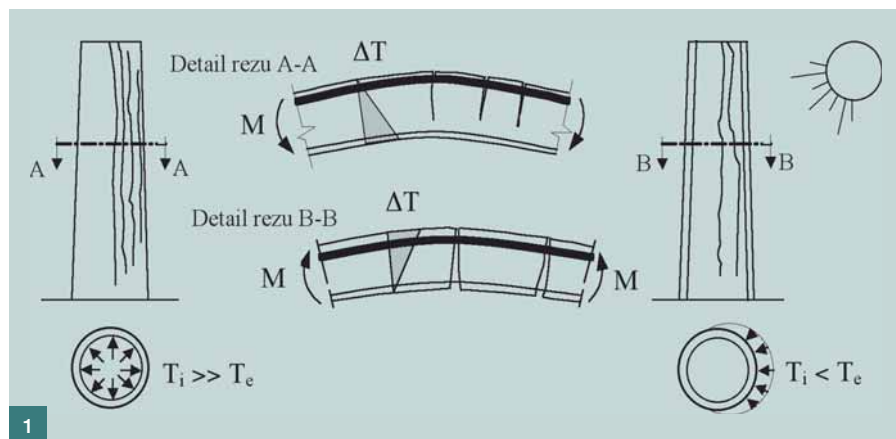
■ Tab. 1 Minimal horizontal reinforcement ratio for concrete chimneys

Predpis	Rok vydania	Min. stupeň vystuženia [%]	
		vnútorný povrch	vonkajší povrch
DIN 1056	1959	0,15	
ACI 307	1969	0,2	
DIN 1056	1969	0,1	0,15
ACI 307	2008	0,1	0,1
CICIND	1984	0,1	0,1
DIN 1056	1984	0,2	0,2

Hodnoty v tabuľke dokumentujú narastajúci význam prstencovej výstuže so stupňom poznania účinkov objemových zmien a sú reakciou na široké zvislé trhliny v starších komínoch:

- DIN 1056 zvýšením minimálnej plochy výstuže z 0,15 na 0,4 %,
- ACI 307 rozdelením výstuže k obom povrchom a ohraničením max. napätia zvislej a vodorovnej výstuže.

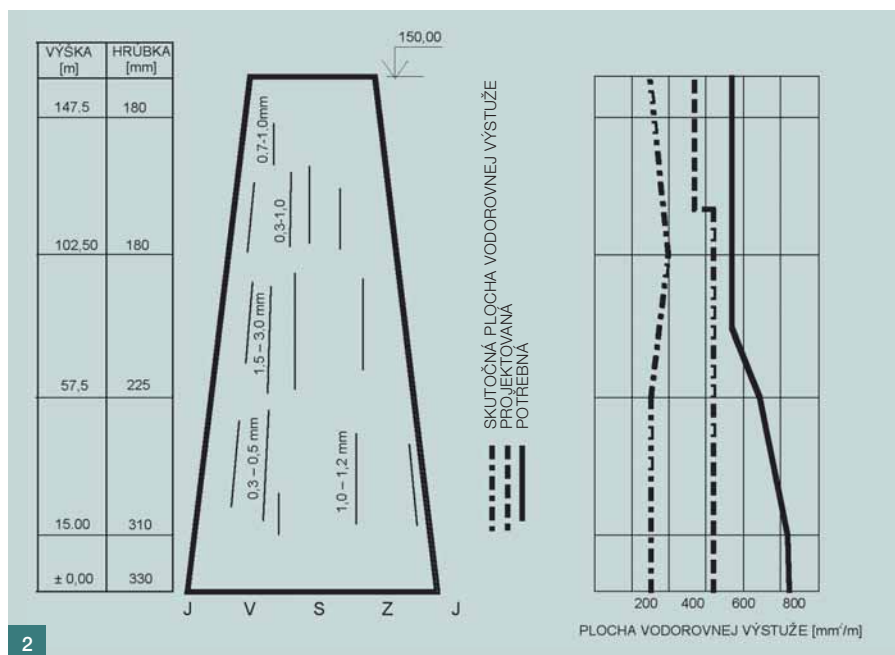
Vzhľadom na nedostatočné vystuženie drieku komínov vodorovnou výstužou pri vonkajšom povrchu a častú absenciu výstuže pri vnútornom povrchu, vznikajú široké zvislé trhliny. Ak je napätie vo vodorovnej výstuži väčšie, ako medza klzu použitej ocele, dochádza k plastickému pretváraniu výstuže v trhline a s tým spojenému zväčšovaniu šírky trhlin. Ak sa uváži zároveň prebiehajúca korózia výstuže v trhline,



Obr. 1 Vznik zvislých trhlin v drieku komína od teplotného spádu ■ Fig. 1 Formation of vertical temperature cracks in chimney shaft

Obr. 2 Priebeh a šírka trhlin na rozvinutom povrchu drieku komína, porovnanie skutočnej, projektovanej a potrebnej plochy vodorovnej výstuže ■ Fig. 2 Crack pattern and width in outside of shaft, existing, designed and required horizontal reinforcement

Obr. 3 Pohľad na a) porušený a b) sanovaný driek komína počas predpínania ■ Fig. 3 a) The damaged and b) repaired chimney shaft during the prestressing operation



• **Aktívne zosilnenie** – vonkajším predpätím pomocou nesúdržných lán Monostrand \varnothing 15,5 mm/1 600 MPa, s osovou vzdialenosťou 300 až 400 mm [5].

Po posúdení oboch alternatív [6] bolo jednoznačne odporučené zosilniť driek komína vonkajšími predpínacími lanami. Po sanácii zvislých trhlin komína sa predpätím lán vnieslo do drieku komína dostatočne veľké tlakové napätie, ktoré pokrylo všetky ťahové účinky klimatického a prevádzkového zaťaženia.

Celkovo bolo po výške drieku komína od +17,5 do +132,5 m rozmiestnených 310 kusov lán. Na montáž a predpínanie lán sa použilo prekladacie konzolové lešenie. Laná sa predpínali jednostranne, v dvoch etapách. V prvej etape sa laná vyrovnali pri sile 71 kN a následne dopli na konečnú silu 180 kN. Laná boli striedavo kotvené do zvislých kotevných rebier, umiestnených na dvoch protiláhlych stranách drieku. Kotevné rebra z oceľových valcovaných profilov tvaru U sú v mieste kotvenia zosilnené privarenými výstuhami.

ZOSILŇOVANIE VYHNÍVACÍCH NÁDRŽÍ

V posledných rokoch bol zaznamenaný neúmerne veľký počet porúch nádrží, ktoré spôsobujú problémy pri ich prevádzke a trvanlivosti. Väčšina porúch sa týkala nádrží vyšších ako 6 m a boli zavinené poddimenzovaním ťahom namáhanej železobetónovej steny. Zvislé trhliny sa pri skúške vodotesnos-

je veľmi pravdepodobné, že v priebehu niekoľkých rokov dôjde, narastajúcou šírkou trhlin, k rozdeleniu prstencového prierezu drieku komína na niekoľko viac-menej samostatne pôsobiacich segmentov. Trhliny prechádzajúce cez celú hrúbku drieku vyvolávajú podstatne nepriaznivejšie rozdelenie zvislých napätí a nárast priehybu komína od účinkov vodorovného zaťaženia.

Betónový komín vysoký 150 m je v prevádzke od roku 1963. Železobetónový driek má v dolnej časti priemer 10,95 m a hrúbku 585 mm, na hornom okraji priemer 6,84 m a hrúbku 180 mm. Skutočný stupeň vystuženia drieku vodorovnou prstencovou výstužou pri vonkajšom povrchu, zistený profometrom Proceq SA, sa pohyboval po výške komína od 0,1 do 0,21 %. Vnútorý povrch je podľa projektovej dokumentácie bez výstuže. Teplota komínom odvádzaných neodsírených plynov bola 175 ± 15 °C.

V roku 1994 boli na drieku zaznamenané zvislé trhliny, ktoré dosahovali dĺžku niekoľkých metrov až desiatok metrov a šírku 0,2 až 1,8 mm. Pri dlhodobom sledovaní dynamiky šírky trhlin bolo zistené, že ich šírka sa postupne zväčšuje. Ako ukázal výpočet, tento stav je následok plastického pretvárania výstuže v mieste trhlin, v dôsledku poddimenzovania vodorovnej výstuže drieku komína, ktorá je namáhaná za medzu klzu. Počas prehliadky v roku 2001 boli na drieku zaznamenané zvislé trhliny šírky 0,3 až 3 mm (obr. 2). Na základe týchto skutočností bolo odporúčané zosilnenie drieku komína, ktoré by stabilizovalo šírku jestvu-

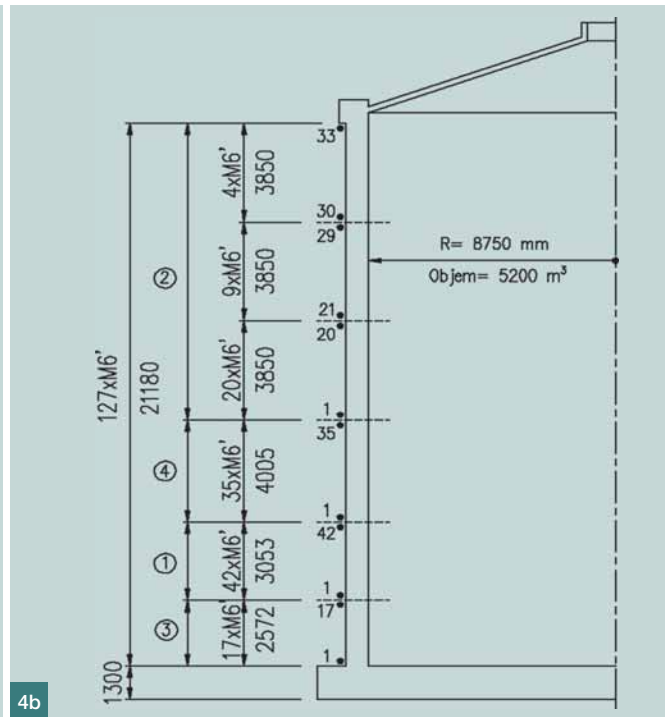
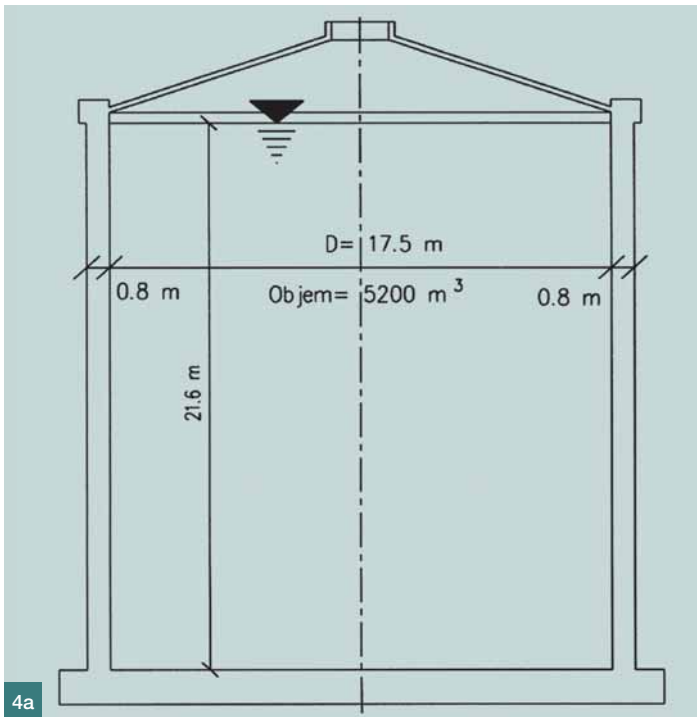
júcich a zabránilo tvorbe nových trhlin.

Kritériom návrhu výstuže potrebnej na zosilnenie komína bolo dosiahnutie takého stavu napätia, pri ktorom od teplotného zaťaženia neprekročí šírka trhlin 0,3 mm a napätie v betónárskej výstuži charakteristickú medzu klzu $f_{yk} = 400$ MPa.

Návrh zosilnenia sa robil v dvoch alternatívach:

• **Pasívne zosilnenie** – uhlíkovými lamelami s rozmermi 60 x 1,4 mm s modulom pružnosti $E_1 = 210$ GPa v dolnej časti komína, resp. s rozmermi 50 x 1,2 mm s modulom pružnosti $E_1 = 165$ GPa v hornej časti komína, s osovou vzdialenosťou 400 mm.





ti [7] objavili už od 6 m vodného stĺpca (obr. 5). Z dôvodov životnosti konštrukcie, resp. ochrany životného prostredia, či obsahu nádrže sa nepripúšťa alebo limituje únik látok z a do nádrže. Priesaky sa prejavujú na povrchu ohraničujúcich konštrukcií:

- vlhkým alebo lesklým povrchom,
- rosením vody,
- únikom vody v kvapkách,
- sústredeným únikom.

Z hľadiska veľkosti plochy priesakov sa rozlišujú plošné priesaky alebo miestne výrony, najčastejšie líniové. Príčinou plošných priesakov je prie-

pustnosť betónu. Lokálne výrony vznikajú v miestach:

- širokých trhlín,
- pracovných a dilatačných škár,
- lokálnych porúch betónu (napr. štrkové hniezda),
- potrubných prestupov.

Vodonepriepustnosť betónu je ohrozená predovšetkým trhlinami prechádzajúcimi cez celý prierez (deliace trhliny). Kým ČSN 73 1209 [8] pripúšťa pre vodonepriepustné betónové konštrukcie iba čiastočné trhliny, tak EN 1992-3 [9] pripúšťa pre nádrže aj deliace trhliny. Je to dôsledok overen-

ho samoutesňovania trhlín, ak sú preto vytvorené priaznivé podmienky. Prípustné šírky deliacich trhlín sú uvedené v tab. 2.

Tab. 2 Limitné šírky trhlín pre vodonepriepustné konštrukcie [10]

■ Tab. 2 Limits on crack widths for watertight structures

Hydraulický spád $i = \frac{\text{výška vody}}{\text{hrúbka steny}}$	Prípustná stredná šírka trhlín w_m [mm]
do 10	0,20
11 až 20	0,15
21 až 30	0,10
31 až 40	0,05



Z hľadiska dynamiky šírky trhlín sa rozlišujú **aktívne** trhliny, ktoré menia šírku (od vplyvu zaťaženia, zmeny teploty apod.) a **pasívne** trhliny, ktoré majú konštantnú šírku. Samoutesnenie trhlín je reálne iba u pasívnych trhlín. Keďže sa hladina vody (kalu) v nádržiach neustále mení, je zjavné, že zvislé trhliny v stenách nádrží majú charakter aktívnych trhlín a samoutesnenie nezabezpečí ich vodonepriepustnosť.

Osobitnú kategóriu tvoria vyhnívacie nádrže – tzv. reaktory (obr. 4a). Aby došlo ku kvasnému procesu, musia byť v našich klimatických podmienkach reaktory zateplené a opláštené. Dokonalá tesnosť steny je zárukou, že výbušný metán, ako produkt kvasenia, sa nebude zhromažďovať medzi plášťom a betónovou konštrukciou a pri kritickej koncentrácii nedôjde k samovznieteniu. Pre tieto konštrukcie je akákoľvek netesnosť nežiaduca.



V nedávnej minulosti boli zosilnené viaceré vyhnívacie nádrže ČOV na Slovensku [11] i v Čechách. Pri skúške vodonepriepustnosti vyhnívacích nádrží v Bratislave-Petržalke, s objemom 5 200 m³, vznikli od tlaku vody v stene nádrže zvislé trhliny (obr. 5). Líniové priesaky v trhlinách a pracovných škárách viedli k záveru, že nádrže nevyhovujú medznému stavu použiteľnosti. Pri overovaní sa ukázalo, že navrhnutá železobetónová stena hrúbky 800 mm je schopná, bez vzniku trhlín, preniesť tlak vody zodpovedajúci výške vody približne 8 m. Stena bola pre výšku 21,6 m poddimenzovaná (obr. 4a). Ako optimálne riešenie na zosilnenie steny nádrže sa ukázalo dodatočné predpätie nádrže prstencovými predpínacími lanami, ktoré vniesli tlakové napätie potrebné na uzavretie zvislých trhlín, s dostatočnou tlakovou rezervou pre zmeny zaťaženia. Na tento účel sa použili laná \varnothing_{Lp} 15,5 – 1 800 MPa bez súdržnosti (Monostrand) (obr. 6). Rozmiestnenie lán po výške steny je znázornené na obr. 4b.

Na zosilňovanie a utesnenie vyhnívacích nádrží boli na Slovensku použité iba predpínacie laná, kým v Čechách sa použila kombinácia predpínacích lán a CFRP lamiel. Pri sanáciách nádrží ČOV realizovaných firmou Projstar PK, s. r. o., na Slovensku boli vypracované aj alternatívy s pasívnym zosilnením. Cena pasívneho zosilnenia bola o 60 až 100 % vyššia. Bolo by zaujímavé porovnanie účinnosti a nákladov oboch alternatív zosilnenia v Čechách.

Obr. 4 a) Schéma vyhnívacej nádrže, b) rozmiestnenie predpínacích lán po výške steny ■ Fig. 4 a) Scheme of a waste water reservoir, b) arrangement of prestressing tendons on the wall height

Obr. 5 a) Nádrž po skúške vodotesnosti, b) po dodatočnom predpätí ■ Fig. 5 a) Sludge digester wall after watertightness test, b) after prestressing

Obr. 6a, b) Detaily a diely kotvenia lán Monostrand ■ Fig. 6a, b Anchor Monostrand tendon details and components

Z uvedeného je zjavné, že železobetónové nádrže navrhnuté na medzný stav vzniku trhlín sú použiteľné iba pre nízke nádrže. Pre vyhnívacie nádrže väčších objemov treba použiť predpätý betón a tomu prispôbiť aj tvar nádrže. Namiesto klasického valcovitého tvaru je vhodné vytvoriť škrapinu s krivosťou vo zvislom aj vodorovnom smere, čomu vyhovuje napríklad vajcovitý tvar s predpätím v oboch smeroch.

ZÁVER

Účinky zaťaženia, ale aj objemových zmien, najmä zmeny teploty alebo veľký teplotný spád v betónových konštrukciách často spôsobujú vznik aktívnych trhlín. Nedostatočné vystuženie vedie k plastickému pretváraniu výstuže v trhline a ich nadmerným šírkam. Vonkajšie predpätie je účinný spôsob na dodatočné zosilňovanie a utesnenie deliacich trhlín v betónových konštrukciách. Zvlášť výhodné je jeho použitie v betónových konštrukciách valcovitého tvaru, kde vyvolávajú iba tlakové napätia. Výhodou použitia lán Monostrand je nielen spoľahlivá protikorózna ochrana

Literatúra:

- [1] ČSN 206-1: 2000: Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [2] EN 1992-1-1: 2004: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [3] ČSN 73 4111:1961: Vysoké komíny železobetónové
- [4] Noakowski P, Schäfer H. G.: Rissbildung in Turmschäften, VGB Kraftwerks-technik, 1992, Heft 9, str. 823–831
- [5] Chandoga M., Bilčík J., Čerňanský L.: Rehabilitation of 150 m ENO Nováky Chimney. In: Proceedings of the 2nd fib Congress, Naples, Italy, pp. 410–411, CD 8 pp. June 2006
- [6] Bilčík J., Halvoník J., Ďuriš D.: Posúdenie stavu a podklady pre opravu vonkajšieho drieku 150 m komína ENO, 2001, 52 str.
- [7] Chandoga M. a kol.: Sanácia železobetónových nádrží ČOV Petržalka, Inžinierske stavby 8-9, ročník 47, 1999
- [8] ČSN 73 1209: 1985: Vodostavebný betón
- [9] EN 1992-3: 2006: Design of concrete structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures
- [10] Meichsner H.: Über die Selbstdichtung von Trennrissen in Beton, Beton und Stahlbetonbau, 1992, č. 4, str. 95–99
- [11] Chandoga M.: Zosilňovanie železobetónových valcových nádrží ČOV vonkajším predpätím. Zborník prednášok „Betonárske dni 2006“, STU Bratislava, str. 311–318, 2006

ocelových lán, ale aj výrazné zmenšenie strát od trenia ($\mu = 0,05$) oproti klasickým injektovaným káblom ($\mu = 0,2$ až 0,35). Týmto spôsobom sa podarilo uzavrieť zvislé trhliny v stenách vyhnívacích nádrží a zabezpečiť ich vodonepriepustnosť a plynosť. Pozitívne skúsenosti s nádržami povzbudili autorov k použitiu predpínacích lán na zosilnenie komína. Podľa dostupných informácií sa jednalo o prvú aplikáciu nesúdržných predpínacích lán na komínovom objekte.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Prof. Ing. Juraj Bilčík, CSc.
e-mail: juraj.bilcik@stuba.sk
tel.: +421 259 274 546



Doc. Ing. Milan Chandoga, CSc.
e-mail: milan.chandoga@stonline.sk
tel.: +421 259 274 549



oba: Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta STU Bratislava
Radlinského 11, 813 68 Bratislava