

URÝCHĽOVANIE TVRDNUTIA BETÓNU OHREVOM A VÝVOJ JEHO PEVNOSTI ■ ACCELERATION OF CONCRETE HARDENING BY HEATING AND DEVELOPMENT OF ITS STRENGTH

Igor Halaša, Pavol Brnula,
Stanislav Uncík

Článok sa venuje vplyvu urýchľovania tvrdnutia betónu ohrevom na jeho pevnosť v tlaku. V článku popisovaný betón je využívaný pre výrobu vopred predpätých železobetónových stožiarov, predpokladaná životnosť stožiara je minimálne tridsať rokov. Železobetónové stožiare slúžia najmä ako nosné podperné body pre vonkajšie rozvody elektrickej energie s napätím do 35 kV alebo ako podpory trakčného vedenia pre železnice. ■ *The article deals with the impact that acceleration of concrete hardening by heating may have on its strength in pressure. The concrete described in this article is being used to produce pre-stressed reinforced concrete pylons, where estimated life is 30 years minimum. Reinforced concrete pylons serve primarily as load bearing points for outdoor power distribution with voltage up to 35 kV or for railways as traction distribution supports.*

Urýchľovanie tvrdnutia betónu (ďalej len UTB) pomocou pretepľovania bolo v Československu rozvinuté najmä do 90tych rokov minulého storočia. V tomto období sa prevažná väčšina výrobní prefabrikátov, ktoré dokázali zachovať výrobu, preorientovala na iné spôsoby UTB alebo jednoducho vzhľadom na vyrábaný sortiment a aktuálne množstevné požiadavky odberateľov predĺžila čas potrebný pre vnesenie predpätia alebo odformovanie výrobku.

Zavedenie nových superplastifikátorov najskôr na báze polymelamín sulfonátov a neskôr polykarboxylátov v kombinácii s jemnejšie mletým cementom umožnilo nie len vo výrobe prefabrikátov skrátiť čas na získanie potrebnej pevnosti a prakticky odstrániť dovedy používané metódy UTB pri lepšej efektívnosti aj ekonomii výroby. V konkrétnych prípadoch však dodnes, aj napriek energetickej náročnosti, existujú prevádzky, ktoré využívajú aj teplo na UTB pre dosiahnutie odformovacej pevnosti alebo pevnosti pre vnesenie predpätia.

Pri vopred predpínaných prefabrikátoch ide najmä o prípady, kedy je potrebné dosiahnuť vysoké pevnosti betónu (zvyčajne viac ako 30 MPa) za čas kratší ako 8 h od vyrobenia. Používanie účinnejších prísad a „rých-

lych“ cementov aj v prípade UTB ohrevom viedlo k zrýchleniu nárastu pevnosti betónu, zvýšeniu pevnosti dosahovaných po 28 dňoch alebo na druhej strane umožnilo znížiť teplotu a prípadne dobu ohrevu betónu, či dávku cementu.

Kombinácia vysoko účinného superplastifikátora, cementu s rýchlym nárastom pevnosti a UTB ohrevom sa v súčasnosti javí ako veľmi efektívna pri kombinácii dostupného množstva foriem a ich požadovanej obrátkovosti. Neustálo snahou samozrejme je v maximálnej možnej miere obmedziť použitie UTB ohrevom tak, aby neutrpela kapacita ani kvalita výroby.

BETÓN A PRIEBEH UTB

V článku popisovaný betón je využívaný pre výrobu vopred predpätých železobetónových stožiarov, ktoré slúžia najmä ako nosné podperné body pre vonkajšie rozvody elektrickej energie s napätím do 35 kV alebo ako podpory trakčného vedenia pre železnice. Stožiare majú kónický tvar s typickým medzikruhovým prierezom a hladkým vonkajším povrchom, hrúbka steny stožiara závisí od jeho typu a pohybuje sa v rozmedzí od 50 do 120 mm, výška stožiarov je od 9,1 do 15 metrov.

Výroba stožiarov sa v druhej polovici 90tych rokov minulého storočia zefektívnila, v porovnaní s dovedy používaným zložením betónu bez plastifikačných prísad, použitím superplastifikátora na báze polymelamín sulfonátov. Betón s použitím takéhoto superplastifikátora bol pevnostnej triedy B 50 s konzistenciou S2 a vodným súčiniteľom 0,4, pričom obvyklé pevnosti v tlaku dosahované v tom období na nepretepľovaných skúšobných telesách boli po 28 dňoch v rozpätí 51,5 až 57 MPa. V prípade potreby vyrobiť betón pevnostnej triedy B 60 v konzistencii S3 a neskôr C50/60 XC4, XD3, XF2, XA2 v konzistencii S3 bolo potrebné zvýšiť dávku cementu o 20 kg/m³ a zároveň dávku superplastifikátora o 2 kg/m³, vodný súčiniteľ bol v tomto prípade 0,42.

Zavedenie polykarboxylátového superplastifikátora umožnilo, pri použití prakticky rovnakej dávky cementu ako pre betón B 50, avšak pri vodnom

súčiniteľi 0,35, bežne vyrábať betón pevnostnej triedy C55/67 s konzistenciou S4 a S3. Prvá generácia superplastifikátorov na báze polykarboxylátov mala okrem dovedy nepoznaného účinku, pri výrazne nižšej dávke, aj slabšie miesta. Najmä v oblasti kompatibility s cementmi a citlivosti samotného betónu na dávku zámesovej vody. Pokrok vo výrobe polykarboxylátových superplastifikátorov umožňuje v súčasnosti vyrobiť prísady menej senzitívne. Ich použitím je možné vyrábať čerstvý betón s rovnomernejšími vlastnosťami, čo je obzvlášť významný faktor pri produkcii vopred predpínaných prvkov s priamym kontaktom predpínacej výstuže a betónu, kde je súdržnosť ocele s betónom jedným z rozhodujúcich faktorov pre kvalitu celého výrobku.

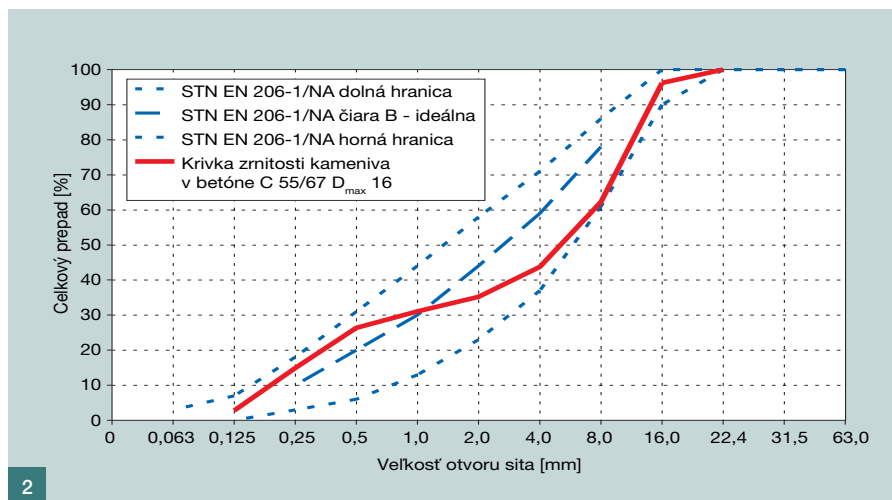
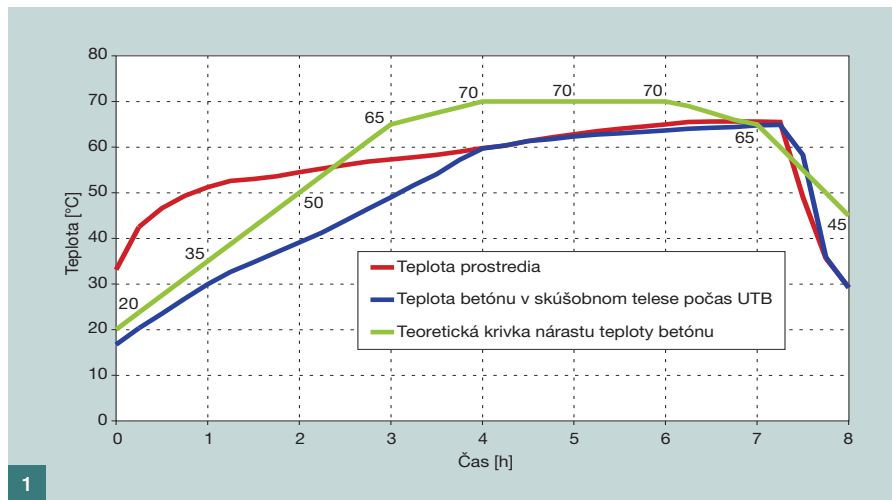
Stožiare sa vyrábajú v uzatvorených ocelových formách z betónu triedy STN EN 206-1 – C55/67 – XC4, XD3, XF2, XA1 (SK) – Cl 0,1 – D_{max} 16 – S3 – max. priesak 50 mm podľa STN EN 12390-8. Betón sa vo forme zhutňuje odstreďovaním. Pevnosť betónu v tlaku požadovaná pre vnesenie predpätia je minimálne 30 MPa.

Cykľus výroby si vyžaduje prenesenie predpätia z formy do výrobku už po 8 h od jeho vytvorenia (naplnenia formy čerstvým betónom a jeho zhutnenia). Na dosiahnutie potrebnej pevnosti pre vnesenie predpätia v tak krátkom čase je potrebné UTB ohrevom. V prípade danej technológie sa používa nepriamy spôsob UTB horúcim vzduchom. Teoretický režim ohrevu a ochladzovania betónu je znázornený na obr. 1. Pri výrobe nie je využívané štádium odležania čerstvého betónu, nárast teploty je 15 K.hod⁻¹, fáza izotermického ohrevu trvá 2 h pri teplote 70 °C a vzhľadom na využívaný spôsob nepriameho ohrevu horúcim vzduchom je hlavná fáza ochladzovania naplánovaná na jednu hodinu pri ochladzovaní o 20 K.hod⁻¹.

Skutočný priebeh teploty v pretepľovacej komore je znázornený na obr. 1 spoločne s priebehom teploty v betóne skúšobného telesa (kocka s hranou 150 mm).

V snahe zlepšovať efektívnosť výroby a zároveň vlastnosti stožiarov bo-

Obr. 1 Režim ošetrovania betónu ohrevom | Fig. 1 Curing concrete with heat
 Obr. 2 Krivka zrnitosti kameniva, D_{max} 16 | Fig. 2 Grain curve of aggregate, D_{max} 16



lo do výroby zavedené nové zloženie betónu, pričom zásadná zmena nastala v používanom superplastifikátore na báze polykarboxylátov. Doteraz používaný typ polykarboxylátu bol nahradený novým, ktorý sa v doterajšom priebehu overovania a výroby ukázal ako vhodnejší najmä z pohľadu kompatibility s cementom.

Betón s novým zložením, ktorého vlastnosti sú popisované v nasledujúcom texte, pozostáva z cementu CEM I 42,5 R, Rohožník, s obsahom C_3A v slinku obvykle v rozsahu od 6 do 9 %, pričom v roku 2011 bol priemerný obsah C_3A v slinku 7,18 % [4]. Jemnosť mletia je vyše 390 m^2/kg [5], pevnosť cementu v tlaku po 24 h zvyčajne dosahuje 15 až 18 MPa [6]. Kamenivo frakcii 0/4; 4/8 a 8/16 mm je rovnorodý kremenný štrk z lokality Hrubá Borša, stredná hodnota objemovej hmotnosti je 2 600 $kg.m^{-3}$, nasiakavosť max. 1,5 % [7]. Typická krivka zrnitosti kameniva v betóne je zná-

zorená na obr. 2. Vodný súčiniteľ betónu pri konzistencii S3 je 0,36. Obvyklý obsah vzduchu v čerstvom betóne je nižší ako 2 %. Ako superplastifikátor je používaný Berament HT 131 vyrobený na báze polykarboxylátov, s koncentráciou aktívnej látky 25 %, $pH = 2,6$ a hustotou 1 060 $kg.m^{-3}$.

EXPERIMENT A ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

V rámci zavedenia nového zloženia betónu do výroby prebieha dlhodobý experiment, pri ktorom sa na skúšobných telesách overujú vlastnosti betónu ošetrovaného pri rovnakom režime ako stožiare a v laboratórnych podmienkach. Skúšobné telesá podrobené preteplovaniu sú po jeho absolvovaní až do termínu skúšky ošetrované v laboratórnych podmienkach.

Pri UTB ohrevom má vplyv na vlastnosti betónu stupeň uzatvorenia formy, v ktorej je betón uložený. Stupeň uzatvorenia formy μ_f [%] vyjadruje po-

mer povrchu skúšobného telesa, ktorý je chránený (uzatvorený) formou (napr. dno, bočnice), k celkovému povrchu skúšobného telesa. S narastajúcim stupňom uzatvorenosti formy sa znižuje poškodenie štruktúry tvrdnúceho betónu termoexpandnými napätiami [1].

Medzi výrobkom a skúšobnými telesami je z tohto pohľadu rozdiel. Kým stožiare sú vyrábané v ocelových uzatvorených formách, skúšobné telesá (kocky s hranou 150 mm) a trámce (100 x 100 x 400 mm) sú vyrábané v ocelových formách s bočnicami a otvorenou hornou plochou. Stupeň uzatvorenia formy pre skúšobné kocky $\mu_f = 83,33$ % a pre skúšobné trámce $\mu_f = 77,78$ %. Negatívny vplyv takejto čiastočne otvorenej formy na pevnosť betónu preteplovaného skúšobného telesa je zrejмый, avšak pre porovnanie vlastností betónov nepredstavuje prekážku vzhľadom na fakt, že takéto formy boli používané pri všetkých doteraz vykonaných skúškach betónov. Navyše, dá sa očakávať, že miera poškodenia betónu stožiarov v uzatvorených formách, vplyvom termoexpandných napätí, bude menšia ako v prípade skúšobných telies vyrobených v čiastočne otvorených formách.

Pevnosť betónov v tlaku, ktoré podstúpili preteplovanie, je teda overovaná len na skúšobných telesách vyrobených vo formách s $\mu_f = 83,33$ % a skúšobné trámce pre overenie ďalších vlastností sú vyrábané vo formách s $\mu_f = 77,77$ %. Dosiahnuté výsledky skúšok pevnosti betónu v tlaku sú uvedené v tab. 1.

Z údajov uvedených v tab. 1 možno stanoviť súčiniteľ f pre výpočet korigovanej pevnosti betónu v tlaku $\beta_{t,korr}$ [2], používaný na vyhodnotenie výsledkov získaných skúškou nepreteplovaných skúšobných telies ošetrovaných v laboratórnych podmienkach. V tomto konkrétnom prípade pre „nové“ zloženie betónu $f = 78,5/81,4 = 0,96$ vo veku 28 dní.

Pre popisovanú výrobu je dlhodobým sledovaním možno konštatovať, že doterajšia hodnota súčiniteľa f vo veku betónu 28 dní sa pohybuje v rozmedzí 0,95 až 1,03. Od nového zloženia betónu sa okrem iného očakáva korekcia dosahovaného rozptylu hodnôt súčiniteľa f .

DISKUSIA A ZÁVER

Dosiahnuté výsledky potvrdili všeobecne známy vplyv preteplovania na vlastnosti betónu. Pri aplikácii daného re-



Obr. 3 Použitie stožiarov ako podpier trakčného vedenia železníc ■ Fig. 3 Usage of pylons as traction distribution support for railways

žimu UTB sa výrazne zvyšujú krátkodobé pevnosti betónu. Po ôsmich hodinách dosahuje pretepľovaný betón neporovnateľne vyššie pevnosti v tlaku a tiež po jednom dni tvrdnutia vykazuje pretepľovaný betón pevnosť v tlaku ešte dvakrát vyššiu ako nepretepľovaný betón. S ďalším ošetrovaním sa pevnosť pretepľovaného betónu zvyšovala len mierne. Už po siedmich dňoch tvrdnutia bola pevnosť nepretepľovaného betónu vyššia ako pevnosť betónu pretepľovaného. V prípade 28 dňovej pevnosti bol tento rozdiel menší ako 4 %. Režim pretepľovania nie je extrémne náročný a teda poškodenie štruktúry tvrdnúceho betónu nie je z pohľadu dosiahnutej pevnosti v tlaku významné.

Nižšie pevnosti pretepľovaných betónov dosiahnuté po 7 a 28 dňoch možno vysvetliť zhrubnutím štruktúry hydratačných produktov v dôsledku urýchlenia tvrdnutia⁷⁾ a tiež termoechanickými napätiami pri narastaní teploty v betóne skúšobného telesa. Tieto výsledky sú plne v zhode s teo-

Literatúra:

- [1] *Altner W., Reichel W.*: Urýchľovanie tvrdnutia betónu. Slovenský preklad, Alfa Bratislava, 1982
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie zur Wärmebehandlung von Beton, September 1989
- [3] *Collepari M.*: Moderní beton. Informační centrum ČKAIT, Praha 2009
- [4] Holcim (Slovensko), a. s.: Obsah C₃A v sivom slinku za rok 2011, Január 2012
- [5] Holcim (Slovensko), a. s.: Statistical evaluation of cement quality according to STN EN 197-1, Výsledky uvádzané v roku 2011
- [6] BetónRáció, s. r. o.: Protokoly o skúške cementu, 2010 až 2011
- [7] Štrkopiesky Hrubá Borša, s. r. o.: ES – Vyhlásenie zhody, 20. 2. 2010
- [8] BetónRáció, s. r. o.: Protokoly o skúške pevnosti v tlaku a objemovej hmotnosti zatvrdnutého betónu na skúšobných telesách, 2011 a 2012

retickými predpokladmi a literárnymi údajmi [1].

Dosiahnuté pevnosti pretepľovaných betónov plne vyhovujú statickým požiadavkám na dané výrobky a tiež potrebám technológie výroby železobetónových predopnutých stožiarov. V ďalšej etape riešenia úlohy budú

overené ďalšie vlastnosti pretepľovaných betónov ako nasiakavosť, vodonepriepustnosť a pod.

Poznámky:

⁷⁾ So zvyšovaním teploty (hovoríme o teplotách okolo 80 °C) sa urýchľuje hydratačný proces a vzniká viac hydratačných produktov. Ich veľkosť nie je podstatne odlišná od tých, ktoré vznikajú pri normálnej teplote. Tým, že ich tvorba je rýchla a je ich veľa, obalujú rýchlo nezhydratované jadrá zrn cementu a bránia prenikaniu vody do hĺbky zrna cementu. A práve toto obalenie zvyškov zrn cementu ťažko priepustnou vrstvou hydratačných produktov nazývajú niektorí autori „zhrubnutím štruktúry“. Nejde teda o vytváranie hrubších hydratačných produktov, ale o vytvorenie štruktúry, ktorá neumožňuje naplno využiť väzný potenciál cementu.

Ing. Igor Halaša
BetónRáció, s. r. o.
Skladová 2/C, 917 00 Trnava
tel.: +421 335 531 531
e-mail: halasa@betonracion.sk
www.betonracion.sk



Ing. Pavol Brnula
ELV Produkt, a. s.
Nitrianska 3, 903 12 Senec
tel.: +421 220 202 681
e-mail: brnula@elv.sk
www.elv.sk



Doc. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Stavebná fakulta STU v Bratislave
Radlinského 11, 813 68 Bratislava
tel.: +421 259 274 686
e-mail: stanislav.uncik@stuba.sk
www.stuba.sk



Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Tab. 1 Pevnosť betónu v tlaku bez a po pretepľovaní [8] ■
Tab. 1 Compressive strength of concrete without and after heating [8]

Stupeň uzatvorenia formy $\mu_f = 83,33\%$	Pevnosť v tlaku [MPa]			
	po 8 h.	po 24 h.	po 7 d	po 28 d
Telesá ošetrované v laboratórnych podmienkach, bez UTB	9,2	27,2	73,9	81,4
Telesá po UTB a následne ošetrované v laboratórnych podmienkach	42	54,5	68,7	78,5