

Úvod do ošetrovania betónu 1

V letnom období

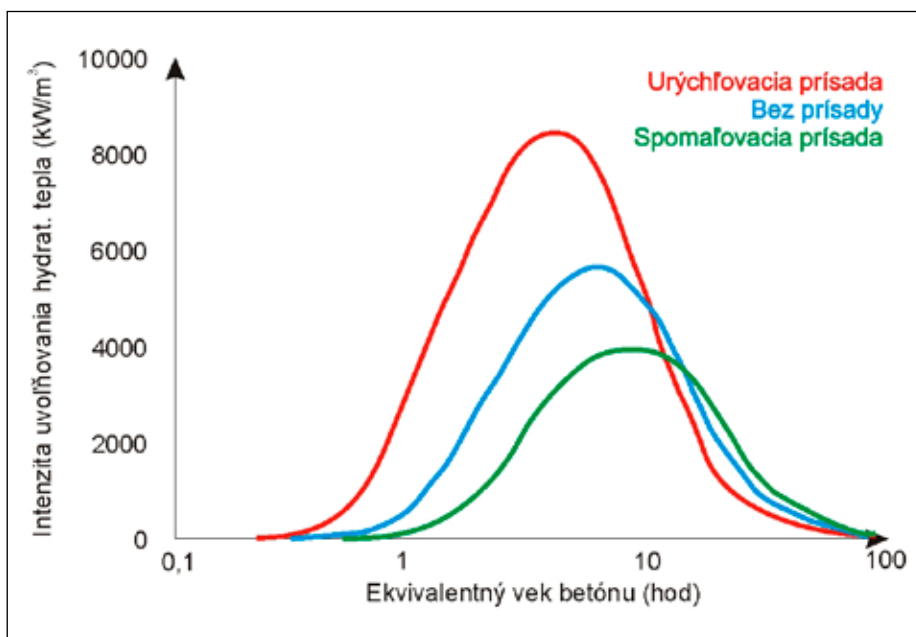
Betón a všeobecne materiály na báze cementu sú citlivé na okrajové podmienky najmä v čerstvom stave a mladom veku, pričom nevhodná kombinácia okrajových podmienok môže mať za následok, v lepšom prípade, mierne zhoršenie ukazovateľov úžitkových vlastností alebo, v horšom prípade, výraznú redukciu týchto parametrov až znemožnenie užívania konštrukcie/stavby.

V princípe sa rozlišujú dve alternatívy negatívneho vplyvu prostredia, pričom sa zovšeobecňujú podľa jediného činiteľa prostredia – teploty. Za ideálnu teplotu pre priebeh hydratácie, a teda pre tuhnutie a tvrdnutie betónu sa považuje teplota 15–20 °C. Pri teplote prostredia výrazne nad 20 °C sa hovorí o letnom období a pri teplote pod 5 °C sa hovorí o zimnom období. Obe obdobia sú pre betonáž nevhodné, ak

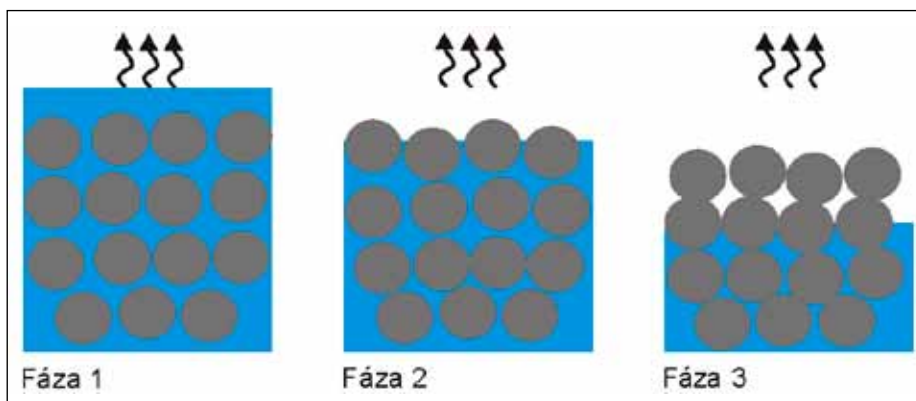
sa nevykonajú príslušné opatrenia eliminujúce vplyv prostredia. Táto časť cyklu sa venuje technológiám ošetrovania betónu v letnom období.

Ošetrovanie betónu

Za ošetrovanie čerstvého a mladého betónu sa považuje vedomý výkon takých činností, ktorých cieľom je umožniť hydratáciu cementu v podmienkach približujúcich sa ideálnym (15–20 °C; 100 % RH).



Obr. 1: Tempo uvoľňovania hydratačného tepla [2]



Obr. 2: Tri fázy odparovania vody do prostredia [3]

Existujú dva základné prístupy k významu ošetrovania. Prvým je, že ošetrovanie má v maximálnej miere zvýšiť trvanlivosť konštrukcie pri zachovaní predpokladaných iných úžitkových vlastností. Druhým prístupom je snaha o dosiahnutie maximálnej novej pevnosti [1]. Oba prístupy sú opodstatnené a ich syntézou sa dopracujeme ku komplexnému významu ošetrovania, ktorým je maximálne využitie potenciálu (receptúry) čerstvého betónu pre dosiahnutie vhodných mechanických vlastností a dlhej životnosti. Význam ošetrovania zdôrazňuje aj skutočnosť, že zväčša sa jedná o finálny proces zhotovenia betónových konštrukcií, preto jeho zanedbaním môžu vzniknúť najväčšie škody z hľadiska už vynaložených prostriedkov.

Hlavné čerstvý, no i mladý betón je potrebné chrániť proti mechanickému poškodeniu statickým alebo dynamickým zaťažením, ktoré by mohlo nevratne poškodiť formujúce sa väzby v cementovom tmele. Ďalej, a to sa dostávame k všeobecne rozšírenému chápaniu ošetrovania, je potrebné chrániť betón proti vzniku ťahových a tlakových napätí vo vznikajúcej alebo existujúcej štruktúre betónu, ktorá v danom okamihu nemá dostatočnú pevnosť na to, aby ich dokázala preniesť. Tieto napätia vznikajú v dôsledku objemových zmien samotného materiálu alebo jeho zložiek, vyvolaných nepriaznivým pôsobením vonkajšieho prostredia. Ak zanedbáme zloženie betónu, ktoré v dôsledku veľkého množstva premenných parametrov môže rôznym spôsobom ovplyvňovať objemové zmeny, potom hlavné (veľmi zjednodušene pomenované) mechanizmy objemových zmien sú teplotná a vlhkosťná kontrakcia.

Teplotná kontrakcia

Teplotná kontrakcia je spôsobená teplotnou dĺžkovou rozťažnosťou zložiek betónu. Hydratácia je proces exotermický – uvoľňuje sa teplo. Tempo hydratácie nie je konštantné. Hydratácia je najintenzívnejšia (v závislosti od zloženia betónu) rámcovo v čase 1–10 hodín po zamiešaní. V tomto období je konštrukcia dotovaná výrazným množstvom tepla uvoľneného počas hydratácie, čo už počas samotného tuhnutia spôsobuje zväčšenie objemu betónu (teplotná rozťažnosť). Asi po 10 hodinách intenzita vývinu hydratačného tepla poklesne pod intenzitu odovzdávania tepla z betónu do okolitého prostredia, čo spôsobí pokles teploty. V konečnom dôsledku sa pokles teploty betónu prejaví teplotnou dĺžkovou kontrakciou.

Strata vody z betónu

Ak zanedbáme stratu vlhkosti z kameniva, potom strata vlhkosti je faktorom generujúcim napätia

len v jednej zložke betónu – v cementovom tmele. Vznik a rozvoj napätí týmto mechanizmom je daný stratou vody (vlhkosti z betónu). Tá sa spotrebováva na hydratáciu (autogénne vysychanie) a na vonkajšie – povrchové vysychanie spôsobené nižšou relatívnou vlhkosťou prostredia ako vlhkosť cementového tmele. Priebeh vysychania možno popísať tromi fázami.

Prvá fáza predstavuje odparovanie tenkej vrstvičky „vypotenej“ vody. Počas tejto fázy sa intenzita odparovania nemení, nakoľko ide o odparovanie voľnej vody z povrchu konštrukcie. Akonáhle sa intenzita začne znižovať, nastupuje fáza číslo dva.

Druhá fáza sa začína presúvaním oblasti odparovania do najvrchnejšej vrstvičky tuhých častíc, kde sa stratou vody začínajú formovať kapilárne menisky. So stratou vlhkosti sa menisky zmenšujú, vznikajú kapilárne napätia. Keďže ešte neexistuje pevná štruktúra cementového tmele, ťahové napätia spôsobujú kolaps systému a výsledné zmraštenie sa prejavuje v smere pôsobiacej gravitácie – cementový tmel konsoliduje. Tým sa zni-

žuje stlačiteľnosť systému, až sa dosiahne kritický bod a straty vlhkosti pokračuje fázou číslo tri.

Tretia fáza je charakteristická výrazne klesajúcou intenzitou straty vlhkosti, čo je dané presunom oblasti odparovania hlbšie do cementového tmele a stratou priameho kontaktu kapilárnych pórov s okolitým prostredím.

Strata vody z betónu je reakcia na určitý podnet z okolitého prostredia, ktorého účinok sa v čase mení. Podnetom sa v tomto prípade rozumie stav prostredia charakterizovaný relatívnou vlhkosťou RH [%], teplotou ovzdušia tesne nad povrchom betónu T_s [°C] a rýchlosťou prúdenia vzduchu v_w [km/h] vo výške 0,5 m nad povrchom betónu. Prvotný koncept výpočtu straty vody predstavil Menzel. Založený bol na rozdiel tlakov vodnej pary medzi betónom a prostredím. Model prešiel vývojom, výsledkom ktorého je v súčasnosti rozšírený a akceptovaný výpočet straty vody vyparovaním, ako sa uvádza v obr. 3 a vo vzťahu 1, kde E_e je intenzita straty vody, r [-] je desiatinné vyjadrenie R_H a T_A [°C] je teplota vzduchu prostredia.

$$E_e = (T_s^{2.5} - r \cdot T_A^{2.5}) \cdot (1 + 0,4 \cdot v_w) \cdot 10^{-6} \text{ [kg/m}^2 \cdot \text{h]} \quad (1)$$

V modeli sa zistilo viacero nedostatkov rôznej závažnosti. V modeli absentuje činiteľ slnečného žiarenia a súčiniteľ pohltivosti slnečného žiarenia povrchom betónu. Model ďalej nevystihuje ochladzovanie povrchu betónu stratou vody ekvivalentné skupenskému teplu vyparovania vody. Možnosti vylepšenia modelu sú bližšie popísané v [5].

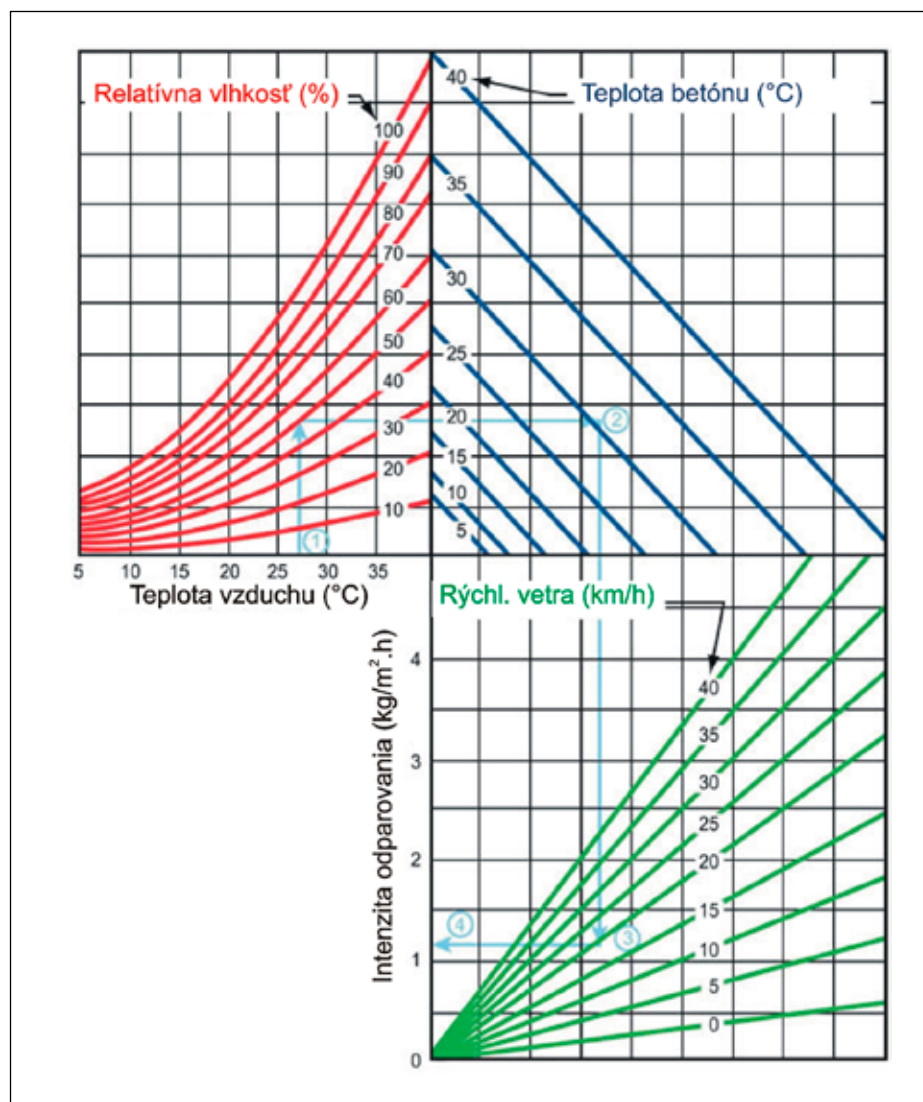
Pri laboratórnych skúškach plastického zmrašťovania, kedy sa sledoval aj úbytok vody vo vzorky, sa ukázalo, že pri daných normových okrajových podmienkach prostredia ($T_A = 36 \pm 3$ °C; $R_H = 30 \pm 10$ % a $v_w = 24 \pm 2$ km/h) sa nezhoduje výpočtová intenzita straty vody $0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ so skutočne nameranou $1,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$. Tento model možno bezpečne aplikovať až pri výpočte intenzity straty vody po cca 10–12 hodine veku.

Strata vody z betónu môže na betón vplyvať rôzne a vzhľadom na rozmanitosť druhov a tried cementu, rôzne receptúry betónu a široké spektrum stavebnej chémie do betónov aj rôzne technológie jeho spracovania nie je možné identifikovať všetky vplyvy tak, aby platili všeobecne. V princípe však môžeme očakávať, že strata vody z betónu spôsobí spomalenie, možno až predčasné ukončenie, resp. prerušenie hydratácie, a to v závislosti od vodného súčiniteľa. Výsledkom môže byť nižšia pevnosť betónu. Pri strate vody z betónu možno očakávať aj výrazný prejav objemových zmien betónu vo forme trhlin, ktorých tvar, hustota, šírka a vzdialenosť závisia od vodného súčiniteľa, množstva cementu a jemných zložiek v betóne, od rýchlosti hydratácie, od geometrie konštrukcie (plocha, hrúbka) a súčiniteľa šmykového trenia podkladnej vrstvy. Trhliny vznikajú aj v cementovom tmele, čo opäť môže viesť ku zníženiu pevnosti. Pri extrémne vysokej teplote a veľmi intenzívnej strate vody môže dochádzať ku vzniku pórov, ktoré môžu mať za následok zníženie pevnosti, zvýšenie permeability, väčšiu difúziu CO_2 a zníženie pasívneho účinku betónu.

Princípy pri ošetrovaní

Laicky povedané, akékoľvek ošetrovanie je lepšie, než žiadne. I tu však existujú výnimky potvrdzujúce pravidlo. Jednou z nich je ošetrovanie vodou (nie z verejného vodovodu) s obsahom síry. Ten môže spôsobiť iniciovanie tvorby etringitu a zrušenie už existujúcich väzieb, no to už odbíhame od témy tohto článku.

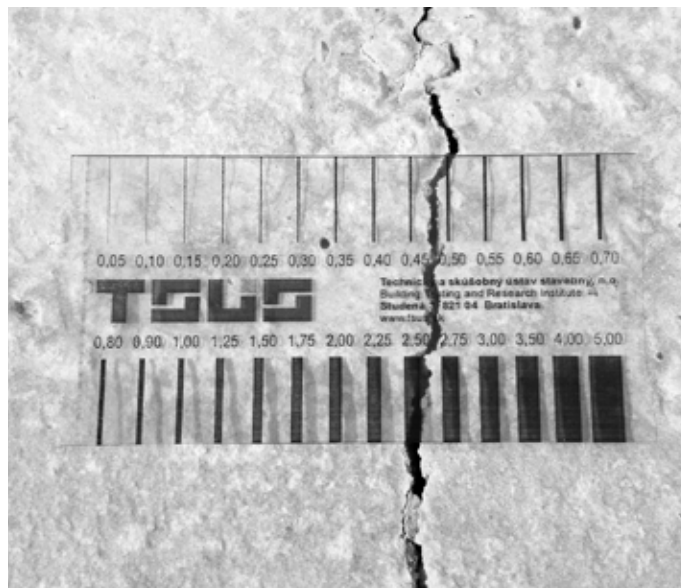
Jednou zo zásad je, že s ošetrovaním sa začína ihneď, ako nám to dovoľia podmienky konštrukcie s ohľadom na jej aktuálnu pochádznosť a rozmery. Ošetrovanie sa delí na dve veľké tradičné skupiny. Aplikáciou nejakej metódy z prvej sku-



Obr. 3: Nomogram intenzity odparovania vody z povrchu betónovej konštrukcie [4]



Obr. 4: Ošetrovanie mostovky kropením tkaninovej pokrývky [13]



Obr. 5: Trhlina v stropnej doske v dôsledku podcenenia ošetrovania



Obr. 6: Trhliny prechádzajúce celou hrúbkou stropnej dosky



Obr. 7: Ošetrovanie vozovky pomocou generátorov hmly [13]

piny sa snažíme udržať vodu v betóne – ak je to možné. Ak sa pristúpi k aplikácii niektorej z metód z druhej skupiny, potom sa snažíme doplniť chýbajúcu (stratenú) vodu. Množstvo chýbajúcej, resp. ošetrovacej vody sa určí výpočtom. Pri ošetrovaní dodávaním ošetrovacej vody je dôležité, aby sa tak dialo rovnomerne v rámci konštrukcie, ale i v čase.

Konvenčné metódy ošetrovania

Konvenčnými, resp. tradičnými metódami ošetrovania sa rozumejú také metódy, postupy a techniky ošetrovania, ktoré sú zaužívané, odbornou verejnosťou dostatočne osvojené a princípy ich fungovania sú na teoretickej úrovni objasnené, pričom je vymedzená oblasť ich použiteľnosti (funkčná oblasť). Ako už bolo uvedené, delia sa na dve skupiny. Prvá skupina predstavuje techni-

ky, ktorých cieľom je obmedziť alebo eliminovať stratu vlhkosti z betónu. Hlavným reprezentantom sú aplikácie bariér s vysokým difúznym odporom (napr. fólie). V tenkej vrstvičke vzduchu vymedzenej povrchom betónu a bariérou dôjde rýchlo k dosiahnutiu rovnovážneho stavu s vlhkosťou betónu, čím sa eliminuje ďalšia strata vlhkosti z betónu. Na princípe akejsi bariéry fungujú aj samodegradovateľné nástreky na betón, ktoré vytvoria na povrchu konštrukcie nepriepustný film a po určitej dobe sa rozložia. Ďalšou metódou (hraničiacou s dopĺňaním stratenej vody) je aplikácia saturovaných absorbčných materiálov na povrch betónu. Takýmito materiálmi sú napríklad piliny, piesok a rohože (obr. 4). Pretože sú priamo vystavené prostrediu, je potrebné ich udržiavať saturované. Potom obmedzujú stratu vlhkosti do prostredia a prípadne pôsobia ako

zdroj vlhkosti, keby v betóne poklesla relatívna vlhkosť pod 100 %.

Druhou skupinou tradičných metód ošetrovania sú tie, ktoré sú založené na dopĺňaní stratenej vlhkosti z betónu. Najrozšírenejšie je kropenie. Častou chybou je neskorý začiatok kropenia a nerovnomernosť v dopĺňaní vlhkosti, čo je v rozpore s kontinuálnym intenzívnym odparovaním a môže spôsobiť vznik trhlín, ako to demonštrujú obr. 5 a 6.

Dopĺňanie vlhkosti sa môže vykonávať aj technologicky náročnejším, no o to vhodnejším spôsobom – pomocou generátorov hmly (obr. 7).

Medzi tradičné ošetrovanie azda možno zaradiť aj zhotovenie pomocných konštrukcií, ktorých účelom je obmedziť negatívny vplyv podmienok prostredia na priebeh hydratácie. Sú to konštrukcie, ktorých účelom je tieniť pracovisko a zabra-

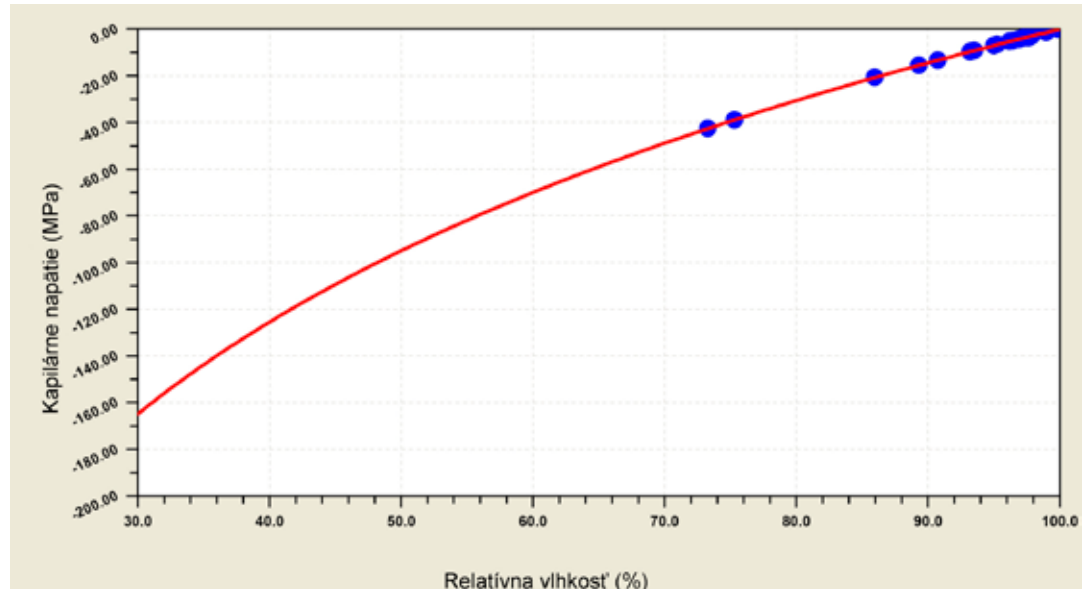
ňovať intenzívnej výmene (prúdeniu) vzduchu nad povrchom betónu.

Progresívne metódy ošetrovania

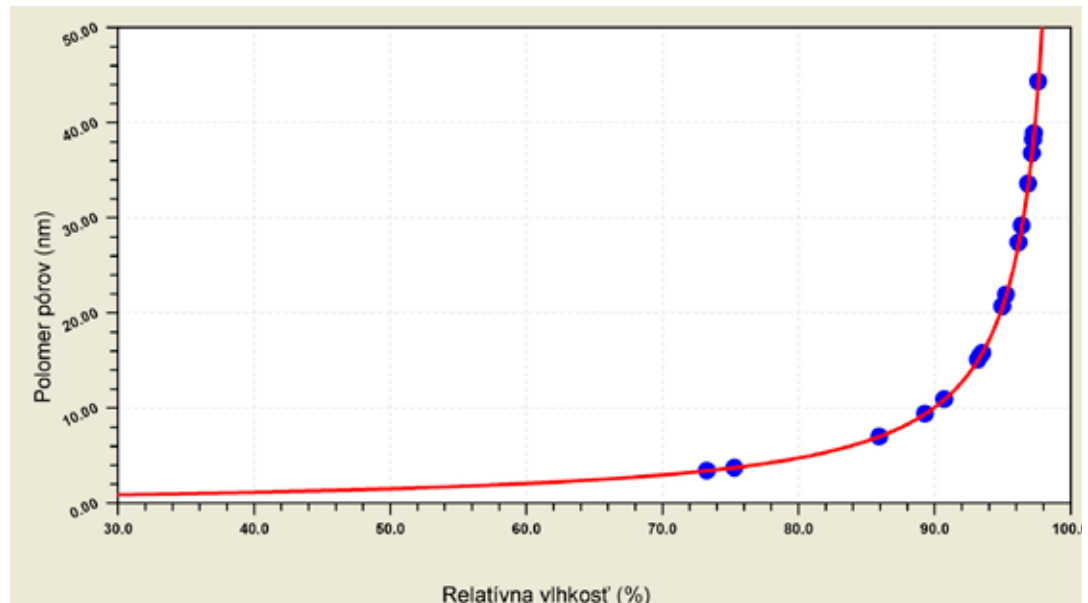
Progresívnymi metódami ošetrovania sa rozumejú také metódy, postupy a techniky ošetrovania, ktoré sú síce laboratórne i prakticky overené, teoreticky vysvetlené a popísané, pričom sa stále spresňuje ich funkčná oblasť, no odbornou verejnosťou nie sú dostatočne osvojené, pochopené alebo jej nie sú vôbec známe. V posledných 20 (intenzívnejšie v posledných 10) rokoch sa pozornosť výskumu a vývoja v oblasti progresívnych metód ošetrovania upriamuje na vnútorné ošetrovanie betónu (*internal curing* – IC). Vnútorné ošetrovanie je metóda, pri ktorej sa ošetrovacia voda zabudováva do betónu už pri jeho miešaní. Nesmie však byť voľná, aby nezvyšovala vodný súčiniteľ. Musí byť viazaná v určitom nosiči. Nosič teda musí byť schopný absorbovať dostatočné množstvo vody ešte pred jeho dávkovaním a následne, po zabudovaní betónu, keď si to štádium hydratácie a vplyv prostredia vyžiada, musí byť schopný dostatočné množstvo vody uvoľniť, a to vo vhodnej distribúcii v betóne. Vnútorné ošetrovanie sa preferuje hlavne vo vysokohodnotných alebo vysokopevnostných betónoch, kde sa konvenčné metódy ošetrovania stávajú neúčinnými z dôvodu rapídneho poklesu permeability betónu. Ošetrovacia voda sa potom nemôže dostať do jadrovej oblasti betónu, kde (vďaka často veľmi nízkemu w/c) dochádza k samovysychaniu betónu a predčasnemu ukončeniu hydratácie ($\alpha_{\max} \leq 1,00$).

Ošetrovacia voda zostáva viazaná v nosiči až do momentu, kým dôjde k zníženiu RH v betóne ako dôsledok straty vlhkosti do okolitého prostredia alebo na vlastnú hydratáciu. Kapiláry v cementovom tmele, pôvodne úplne saturované pórovým roztokom, sa začínajú vyprázdňovať, čím sa vytvárajú kapilárne menisky pórového roztoku pôsobiace na steny kapilár kapilárnym ťahovým napätím P_{CAP} (vzťah 2). Prekročenie určitej úrovne napätia zapríčini vznik trhlín, preto je cieľom zamedziť ďalšiemu vyprázdňovaniu kapilár a tým aj nárastu kapilárnych napätí v cementovom tmeli. Vnútorné ošetrovanie začína účinkovať pri poklese RH v betóne, na ktorý reaguje uvoľnením vody z vodou saturovaných pórov polomeru r_{CAP} (vzťah 3) zodpovedajúceho tejto RH . Vo vzťahu 2 vystupuje univerzálna plynová konštanta R [8,314 J/mol.K], teplota T [K], vnútorná relatívna vlhkosť RH [%] a mólový objem pórového roztoku V_m ($\approx 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{mol}$).

$$P_{CAP} = \frac{R \cdot T \cdot \ln\left(\frac{RH}{100}\right)}{V_m} \text{ [Pa]} \quad (2)$$



Obr. 8: Kapilárne napätie ako funkcia RH [6]



Obr. 9: Polomer kapilár ako funkcia RH [6]

Vo vzťahu 2 vystupuje povrchové napätie pórového roztoku γ ($= 0,07243 \text{ N/m}$ pri 296,5 K) a dotykový uhol pórového roztoku a steny kapiláry θ (uvažuje sa rad).

$$r_{CAP} = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos(\theta)}{P_{CAP}} \text{ [m]} \quad (3)$$

Ako je vidno z predchádzajúcich vzťahov, platí princíp minimálnej energie, tj. že v prvom rade sa vyprázdnia väčšie póry (nosiča) a ku vyprázdňovaniu menších pórov (cementového tmelu) dôjde až potom, keď už nebude viac dostupná ošetrovacia voda v nosiči.

Nosiče ošetrovacej vody

Nosičom môže byť v zásade akýkoľvek materiál, ktorý svojou bázou nezhoršuje úžitkové vlastnosti betónu, prípadne ich zlepšuje priamo svojou

hmotou alebo nepriamo pôsobením IC. Doposiaľ sú rozsiahlymi výskumom overené dva typy nosičov – superabsorpčné polyméry (SAP) a ľahké kamenivo (LWA).

Superabsorpčné polyméry sú materiály na báze napr. sodných solí polyakrylovej kyseliny, polyakryl kopolymérov alebo polyvinyl alkohol kopolymérov. Vyznačujú sa schopnosťou viazať vo svojej štruktúre veľké množstvo vody prostredníctvom vodíkových väzieb. Pre IC sa používa SAP so zrnami tvaru gule priemeru cca 50–200 μm , ktoré sú schopné zväčšiť svoj objem približne desaťkrát (obr. 10). Zrníčka SAP musia byť rovnomerne distribuované v celom objeme betónu (obr. 11). Do betónu (v suchom stave) sa pridávajú spolu s cementom počas miešania, a to v dávkach 0,3–0,6 % hmotnosti cementu. Voda, ktorá má byť viazaná v SAP, sa pridáva do betónu

spolu s bežnou dávkou vody. SAP ju v priebehu niekoľkých minút absorbuje, preto je bezpečne možné zvýšiť dávkou zmesovej vody o množstvo, ktoré sa v prvých minútach naviaže na SAP. Počas tuhnutia a tvrdnutia sa uvoľňuje voda akumulovaná v SAP, pri čom po vyprázdnených zrnčkách SAP vznikajú voľné póry (obr. 12), čo pôsobí veľmi podobne ako póry po prevzdušňovacích prísadách. Prítomnosť pórov nemusí znamenať zníženie pevnosti, pretože správnym návrhom ošetrovania umožňuje dosiahnuť vyšší α_{max} [8].

Lahké kamenivo pre účely vnútorného ošetrovania je kamenivo vyrábané priemyselne – expandovaním (pri teplote cca 1090 °C) hornín s vysokým obsahom ílovitých minerálov (napr. bridlice). V dôsledku vyhorievania organických zložiek sa získava pórovitá štruktúra (obr. 13 a 14), schopná absorbovať vodu. Vôbec prvá zmienka o ľahkom kamenive v spojitosti s uvoľňovaním vody počas hydratácie pochádza z roku 1957, no až do 1991 zostala nepovšimnutá. Vo svete sa používajú (skúmajú) dva druhy LWA. Typické európske LWA má pravidelný guľovitý tvar (obr. 13), zatiaľ čo typické americké LWA je charakteristické nepravidelným tvarom.

Pre zabezpečenie účinnosti LWA je dôležitá rovnomerná distribúcia zrnčiek v celom objeme betónu. Z hľadiska účinnosti, ale aj zachovania mechanických vlastností betónu sa preto preferujú jemnejšie frakcie LWA. V praxi sa teda využíva frakcia max 0/4 mm. Pri návrhu IC použitím LWA sa po výpočte potrebného množstva ošetrovacej vody [9] (na základe nasiakavosti LWA) vypočíta množstvo (hmotnosť) LWA, ktorým sa nahradí príslušná časť hutného kameniva príslušnej frak-

cie. Do LWA sa pred použitím na IC musí dostať potrebné množstvo vody (definované nasiakavosťou LWA), preto sa namočí na dobu zodpovedajúcu skúške nasiakavosti. Namočením LWA sa získa saturované LWA (SLWA), ktoré sa neskôr pridáva ako posledná zložka pri miešaní betónu. SLWA uvoľňuje počas hydratácie absorbovanú vodu vtedy, keď sa na to vytvorí podmienka – tj. keď klesne **RH** pod úroveň zodpovedajúcu kapilárnemu napätiu najväčšieho póru v LWA. Takto bude LWA pôsobiť až do momentu keď sa úplne vyprázdni alebo zaniknú podmienky vyvolávajúce vysychanie betónu [10]. Z veľkosti pórov LWA vyplýva účinnosť tejto metódy vo veľmi skorom veku betónu (americké LWA), preto je najväčší prínos v obmedzení plastického zmršťovania. Výsledky výskumu účinnosti preukázali redukciu vzniku trhlin plastického zmršťovania o 65, 89 a 100 % pri objemových dávkach LWA 6, 10 a 18 %, v tomto poradí [11].

PETER BRIATKA

foto archiv autora

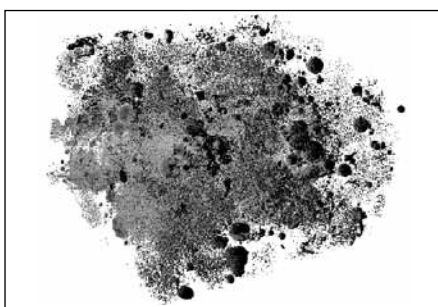
Literatúra a súvisiace odkazy

- 1) Českomoravský beton: Beton – suroviny, výroba, vlastnosti. 2005.
- 2) Schindler, A. K.: Prediction of concrete setting. Department of civil engineering, Auburn university, USA, 2003.
- 3) Lura, P. – Pease, B. – Mazzotta, G. B. – Rajabipour, F. – Weiss, J.: Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks. Material Journal, March–April 2007, American Concrete Institute, USA, 2007.

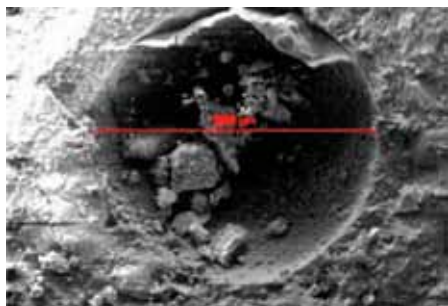
- 4) Wylie, K.: Cold-weather concreting. NMRM-CAA meeting, Albuquerque, USA, 2007.
- 5) Briatka, P. – Makýš, P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 1. strata vody z betónu. Beton TKS, č. 1, Praha, 2010.
- 6) Briatka, P. – Makýš, P.: Možnosti použitia európskeho ľahkého kameniva na vnútorné ošetrovanie betónu. Materiály pro stavbu, č. 7, Praha, 2010.
- 7) Lura, P.: Superabsorbent polymer in concrete. Workshop Reducing Early-Age Cracking in Concrete Today, Purdue University, West Lafayette, 2008.
- 8) Briatka, P. – Makýš, P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 2. superabsorbčné polyméry. Beton TKS, č. 2, Praha, 2010.
- 9) Briatka, P. – Makýš, P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 4. konvenčný návrh ošetrovania pomocou ľahkého kameniva. Beton TKS, č. 6, Praha, 2010.
- 10) Briatka, P. – Makýš, P.: Ošetrovanie čerstvého betónu – 3. nasiaknuté ľahké kamenivo. Beton TKS, č. 3, Praha, 2010.
- 11) Henskensiefken, R. – Briatka, P. – Bentz, D. – Nantung, T. – Weiss, J.: Plastic shrinkage cracking in internally cured mixtures made with pre-wetted lightweight aggregate. Concrete International, No. 2, American Concrete Institute, Farmingtonhills, 2010.
- 12) www.buildipedia.com.
- 13) www.ku.edu.



Obr. 10: SAP pred a po nasiaknutí vodou [7]



Obr. 11: Distribúcia SAP v cementovom tmele získaná mikrotomografiou – upravené z [7]



Obr. 12: Pór vzniknutý vyprázdnením SAP [7]



Obr. 13: Európske LWA guľovitého tvaru



Obr. 14: Americké LWA nepravidelných tvarov