

SÍRANOVÉ POŠKODENIE BETÓNOV A MÁLT CONCRETE DETERIORATION BY SULFATE

SVETOZÁR BALKOVIC,
MILAN DRÁBIK

Síranové poškodenie betónov a mált je spojované so vznikom síranových minerálov ako sú sadrovec, ettringit a thaumasit. Kým korózia za vzniku sadrovca a ettringitu sa často nazýva „fyzikálna“, korózia za vzniku thaumazitu sa nazýva „chemická“. Toto delenie je založené na príčinách poškodenia. V prvom prípade sú to objemové zmeny spôsobené vznikom sadrovca a ettringitu, v druhom sa jedná o chemické reakcie síranov, CO₂ a H₂O so spojivovou zložkou betónov – C-S-H, za vzniku neväzobného thaumazitu. Vznik thaumazitu je nízko-teplotná forma síranového napadnutia (korózie), vyskytujúca sa zvyčajne pri teplotách nižších ako 15 °C. Tento príspevok sa zaoberá tiež závermi a dosiahnutými výsledkami jedného a trojročnej činnosti špecializovanej skupiny TEG – Thumasite Expert Group pri Vládnom výbore pre stavebníctvo Spojeného kráľovstva Veľkej Británie.

Sulfate attack on concretes and cement mortars is the phenomenon of occurrence of minerals with relationship to the sulfates, namely gypsum, ettringite and thaumasite. While sulfate attack characterized by formation of gypsum and ettringite is often called as a "physical" sulfate attack, sulfate attack connected with formation of thaumasite is called "chemical". This dividing is based on damage occasion. In the first case there are volume changes caused by gypsum and ettringite formation. Second case is a series of chemical reactions of sulfates, CO₂ a H₂O with bonding C-S-H component resulting in formation of nonbonding thaumasite. Formation of thaumasite is low temperature form of sulfate attack that occurs below ca. 15 °C. This paper concerns with conclusions and results of one- and three- years works of Thumasite Expert Group by Department of Environment, Transport and Regions of UK.

Sírany, v prírode často sa nachádzajúce vo forme síranov Na, K, Ca alebo Mg, sú súčasťou pôdy, povrchových a spodných vôd. Sú intenzívne využívané priemyselne

a vo forme hnojív, ktoré tiež môžu kontaminovať pôdu a vodu. Zdroje síranov môžu byť tiež vnútorného pôvodu a pochádzať zo samotného cementu. Síranové poškodenie tak môže nadobúdať nasledujúce formy:

- fyzikálne poškodenie, spôsobené kryštalizáciou solí,
- vonkajšie chemické síranové napadnutie, spôsobené reakciou síranových iónov z vonkajších zdrojov so zložkami cementov a mált,
- vnútorné chemické napadnutie, spôsobené síranmi v betóne, napr. vznik ettringitu.

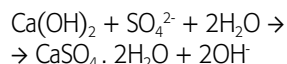
Najnovšie poznatky z tejto oblasti sú zosumarizované v prácach [1–9].

Interakcia síran-betón predstavuje škálu prekrývajúcich sa chemických a fyzikálnych procesov a výsledné poškodenie betónu závisí najmenej od troch druhov komplexných premenných: materiálových charakteristík betónu (zloženia a reaktivity zložiek cementu, obsahu síranov v kamenive, návrhu betónovej zmesi, prísad), spôsobu prípravy betónu (spôsob miešania, podmienky ošetrovania, umiestnenie betónu, zhutňovanie) a prostredia počas výroby betónu a jeho následného používania (atmosferické podmienky ako teplota a vlhkosť, ich zmeny; chemizmus prostredia ako chémia pôdy a vody). V dôsledku tejto komplexnosti je opis skutočného priebehu procesu síranovej korózie veľmi obtiažny.

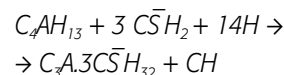
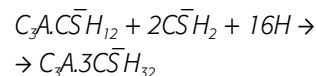
ZÁKLADNÉ POZNATKY

Normálne síranové napadnutie je široko opísané [7] a vyžaduje splnenie nasledovných podmienok vo svojom okolí:

- rozpustný síran (-ny),
 - voda (vlhkosť),
 - trikalcióm aluminát (C₃A) v cemente,
 - priepustnosť betónu alebo malty.
- Možno uvažovať s dvoma základnými chemickými reakciami:
- reakcia síranových iónov s hydroxidom vápenatým za vzniku sadrovca,



- reakcia sadrovca s monosulfátom alebo tuhým roztokom C₄AH₁₃ za vzniku ettringitu

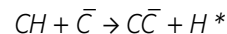
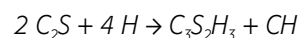
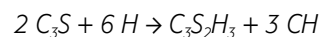


Vznik thaumazitu je nízko-teplotná forma síranového napadnutia, vyskytujúca sa prevažne pri teplotách nižších ako 15 °C, optimálne pri 0 až 5 °C. Napadnutie sa týka v betónoch z portlandského cementu (PC) alitovej fázy (C₃S) a aluminátu (C₃A), nepriamo cez vznik ettringitu.

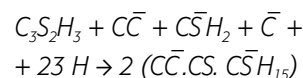
Vznik thaumazitu si vyžaduje splnenie nasledovných podmienok:

- zdroj CaO a SiO₂ (samostatný alebo kombinovaný), taký ako vápno a kremeň (najvhodnejšie jemne dispergované), alit, belit alebo kremičitan sodný Na₂SiO₃ v prítomnosti iónov Ca²⁺,
 - zdroj uhličitanu, taký ako kalcit CaCO₃ alebo atmosferický CO₂ v prítomnosti iónov Ca²⁺,
 - zdroj síranov, napr. sadrovec CaSO₄·2H₂O, polhydrát CaSO₄·0,5H₂O, anhydrit CaSO₄ alebo iné sírany ako Na₂SO₄ alebo K₂SO₄ v prítomnosti iónov Ca²⁺,
 - prebytok vody alebo vlhkosti.
- Chemické reakcie vzniku thaumazitu možno sumarizovať takto:

- silikátové fázy v cemente reakciou vytvárajú spojivo C-S-H

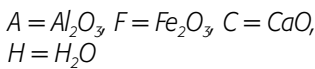


- potom C-S-H reaguje pomaly s kalcitom, síranom vápenatým (obvykle sadrovcom) a atmosferickým CO₂ v prítomnosti prebytku vody, výhodne pri teplote pod 15 °C za normálneho atmosferického tlaku za vzniku thaumazitu:



- táto reakcia môže trvať od 18 mesiacov do 2 rokov alebo dlhšie, pri podmienkach trvalo nízkej teploty.

*) v práci sa používa skrátené označenie $\bar{\text{S}} = \text{SO}_3$, $\bar{\text{C}} = \text{CO}_2$, $\text{S} = \text{SiO}_2$



Deštrukciu betónu zapríčiňujú objemové zmeny spôsobené vznikom sadrovca a ettringitu. Portlandský cement odolný voči síranom odoláva síranovému napadnutiu lepšie než obyčajný cement, pretože obsahuje menej aluminátovej fázy (C_3A) a viac feritickej (C_4AF). Vznik taumazitu môže byť pre betóny a malty nebezpečný a spôsobovať deštrukciu predovšetkým z nasledujúcich dôvodov :

- cementové spojivo – kalciumsilikáthydrát – C-S-H v betónoch a maltách, ktorý vzniká väčšinou z alitu a v menšom stupni z belitu sa premení na nevzobný taumazit,
- betóny a malty z cementu odolného voči síranom môžu byť ohrozené taumazitovým síranovým napadnutím rovnakým spôsobom, ako obyčajný a rýchlo tvrdnuci portlandský cement – premenou väzobného C-S-H.

Taumazitová forma síranového napadnutia betónov a mált sa vo väčšej miere do centra pozornosti dostala koncom uplynulého storočia. Expertná skupina pre taumazit (TEG – Thaumasite Expert Group) zriadená v rámci centra pre betónové konštrukcie Výskumného ústavu stavebného (Building Research Establishment – BRE) v Garstone, Watford (UK) vznikla v roku 1998 za účasti všetkých odvetví priemyslu stavebných hmôt, keď kulminoval problém poškodenia základov viacerých diaľničných mostov. Od roku 2000, keď sa započal výskum síranového napadnutia v laboratórnych a terénnych podmienkach, skúmal BRE vo Veľkej Británii poškodenie betónov a mált síranmi vo viac než 80-tich prípadoch. Väčšina (95 %) bola výsledkom taumazitovej formy síranového napadnutia (Thaumasite form of sulfate attack – TSA).

Výskyt taumazitu v poškodených stavebných materiáloch bol publikovaný tiež v USA, Kanade, JAR, Francúzsku, Nemecku, Nórsku, Dánsku, Švajčiarsku, Taliansku a Slovinsku. Na Slovensku sa štúdiom tejto problematiky len rozbieha, čo však neznamená, že viaceré opísané prípady poškodenia síranmi nemohli byť spôsobené taumazitovou formou síranového napadnutia.

SÍRANOVÉ NAPADNUTIE

Síranové napadnutie z hľadiska spôsobu napadnutia rozdeľujeme na:

- ettringitovú koróziu s oneskoreným vznikom ettringitu
- taumazitovú koróziu

Taumazitová forma síranového napadnutia – TSA

Výskyt taumazitu v poškodenom stavebnom materiáli ešte neznamená, že ide o taumazitovú formu síranového napadnutia. Známe sú dva rozdielne spôsoby kryštalizácie taumazitu v cementovej matrici. Pre rozhodnutie o forme napadnutia je potrebné vziať do úvahy:

- **Taumazitová forma síranového napadnutia (TSA):** je charakterizovaná signifikantným poškodením cementovej matrice, ktorá je čiastočne alebo úplne nahradená taumazitom. Keďže taumazit nemá väzobné vlastnosti, cementový kameň sa mení na nesúdržnú hmotu. Ďalším charakteristickým znakom sú trhliny paralelné s povrchom, vyplnené taumazitom, ktorý obaluje zrná kameniva bielym povlakom. TSA spôsobuje postupné „mäknutie“ cementovej matrice, predovšetkým pri betónoch uložených v zemi, s progresívnym postupom z povrchu (styk zemina – betón) dovnútra.

- **Vznik taumazitu (Thaumasite formation – TF):** taumazit, podobne ako ettringit, môže kryštalizovať v trhlínach a dutinách cementovej matrice, bez toho, aby spôsobil jej poškodenie. Rovnako môže byť identifikovaný v betónoch poškodených iným mechanizmom. Hoci v tomto prípade je jeho prítomnosť neškodná, môže pôsobiť ako prekursor TSA a upozorňovať na budúce možné problémy.

Hoci vznik taumazitu je spojený s nízkymi teplotami, minerál je stabilný až do približne 110 °C, keď sa rozkladá za vzniku neusporiadanej štruktúry známej ako taumazitové sklo pričom nedochádza ku kolapsu kryštálovej mriežky. Táto stabilita je v kontraste so štruktúrne príbuzným ettringitom, v ktorom dochádza ku kolapsu kryštálovej mriežky už pri teplote približne 60 °C a pri približne 90 °C k rozkladu.

Príčinu vzniku taumazitu pri nízkej teplote možno pripísať potrebe vytvoriť prechodný stav a uvoľniť hexagonálne usporiadanie iónov OH^- okolo stredového (centrálneho) Si^{4+} . Táto premena cez východiskové $[Si(OH)_6]^{2-}$ skupiny na stabilné oktaédre $[Si(OH)_6]^{2-}$ je zdĺhavá. Túto skutočnosť jasne potvrdzujú výsled-

ky IČ a Ramanovej spektrálnej analýzy [7].

Röntgenová difrakčná analýza je najpoužívanejšou metódou na identifikáciu taumazitu v cementoch. Keď je taumazit prítomný v malých množstvách pri nízkych uhloch sú difrakcie prekryvané difrakciami iných materiálov, predovšetkým ettringitu, ktoré sú problematicky rozlíšiteľné. Podobne je tomu i pri IČ spektroskopii. Ďalšiu, podľa našich skúseností veľmi efektívnu, možnosť predstavuje termoanalytická metóda stanovenia taumazitu v stavebných konštrukciách.

Taumazitová korózia z hľadiska experimentálnej techniky unikala pozornosti, hoci tento jav bol dávno známy, predovšetkým pri rekonštrukcii historických budov [1–7], kde spôsobuje úplnú stratu pevnosti a premenu spojiva na mazlavú kašu. Prípadov poškodenia betónov síranovou koróziou je viacero. Nedávno bola stavebná verejnosť oboznámená s vynútenou likvidáciou diaľničného mosta v juhozápadnom Anglicku. Ako produkt síranového napadnutia nosných pilierov, ktorých betón úplne stratil pevnosť, bol identifikovaný taumazit [3]. Na mieste výkopových prác sa preukázalo, že oceľová výstuž, ktorá bola úplne skorodovaná, bola pokrytá skorodovaným betónom. Na zhotovenie nosných pilierov bol použitý nielen obyčajný PC, ale aj PC odolný voči síranom.

Netypickým príkladom je deštrukcia pätiiek a nosných základových stĺpov približne tridsaťpäťročnej budovy na okraji Turína (Taliansko) [3]. Na betóne nosných prvkov sa objavilo poškodenie až do úrovne 2 m hĺbky. Okolité pôda neobsahovala sírany. Budova bola umiestnená mimo hranice sídliskovej kanalizácie a nepoužívaná odpadová šachta, ktorá slúžila 15 rokov ako priesaková, umiestnená 9 m od základov v hĺbke 8 m slúžila ako zberač a trvalý zdroj splaškovej vody. V dôsledku známej síranovej korózie zo síranov vznikajúcich cez sírniky v kale a ich oxidáciou na sírany v kyslom prostredí vzniklo nám už známe poškodenie betónu, keď pevnosť betónu v zasiahnutej časti klesla až na 15 až 18 MPa oproti pôvodnej 40 až 45 MPa. V dôsledku opakovaného vlnutia a vysušania betónu sa tiež enormne zvýšila priepustnosť zasiahnutého betónu.

Iným príkladom je poškodenie betónu v Arktíde [7]. Na ďalekom severe

bola v roku 1988 vybudovaná základňa kanadskej federálnej vlády slúžiaca ako základňa pre vedecké expedície do Arktídy. Už za dva roky sa prejavilo vážne poškodenie základových betónov a pilot spôsobené taumazitom. Oprava v roku 1993 bola neúspešná a až následná v roku 1995 za cenu vysokých nákladov na opravu odstránila poškodenie. Teplota miesta bola v zime až $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ a v krátkom severskom lete rozmrzla povrchová vrstva permafrostu len počas dňa. Aj toto minimálne množstvo vlhkosti však spolu so síranni z pôdy stačilo na vážne poškodenie.

Upozorňujeme na tieto skutočnosti z vážneho dôvodu. Úspora energie pri výrobe cementu a limitovanie obsahu emisií CO_2 vedú k zvyšovaniu zmesnosti cementov. Platné normy STN ENV 196-10 a STN EN 197-1 umožňujú prídavok jemne mletého vápenca až do 35 % hm. S ohľadom na vyššie uvedené poznatky pribúda v betónoch takto ďalší priamy zdroj uhličitanov mimo kameniva, ktorý môže v rozhodujúcej miere v „priaznivých“ podmienkach (vlhko, sírany v podzemnej alebo priesakovej vode, nízka teplota) ovplyvniť vznik a priebeh síranového napadnutia, resp. posilniť práve chemické – taumazitové síranové napadnutie. Výskum v tejto oblasti stojí pred úlohou zohľadniť a definovať dve úrovne premien (zrná a ich rozhrania vs. zmeny fázového zloženia) sprevádzajúcich TSA a s tým súvisiacu synergiu premeny mikroštruktúry cementového kameňa tak, ako je podmienená reaktívnosťou zložiek systému na atomárnej úrovni.

Vznik TSA vyžaduje splnenie viacerých podmienok:

- Zdroj SO_4^{2-} : základnými zdrojmi sú podzemné vody v zeminách obsahujúcich sírany a sírniky. Podzemné vody obsahujú CaSO_4 vo vysokej koncentrácii a vodorozpuštné sírany Mg a Na. Mechanickým porušením zemín a ich oxidáciou poveternostnými podmienkami sa zvyšuje obsah síranov. Kyselina sírová vznikajúca v tomto procese tiež prispieva k poškodeniu (kyselinové napadnutie) [8, 9]. Ďalšími zdrojmi môžu byť rozmrazovacie soli, sadra, kontaminované kamenivo a samotný cement.
- Zdroj SiO_2 : hlavný zdroj vo všetkých cementových pastách vyrobených z PC a z cementov odolných voči síranom je CSH. Doplňkovým zdrojom sú nezhyd-

ratované častice cementového slinku – C_3S a C_2S .

- Zdroj CO_3^{2-} : uhličitaný pochádzajú z vápenca použitého ako kamenivo alebo plnivo v cemente alebo betóne/malte samotnej. Môžu byť tiež prítomné vo forme uhličitanových, resp. hydrouhličitanových iónov rozpustených v podzemnej vode. Jemnejšie častice vápenca sú reaktívnejšie. Zdá sa, že dolomitický vápenec ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) je pre vznik TSA vhodnejší než vápenec (CaCO_3) čistý.
- Zdroj vody: všetky formy síranového napadnutia si vyžadujú mobilný vodný zdroj, čo sa často vyskytuje pri podzemných vodách a pri zakladaní stavieb s vysokou úrovňou spodnej vody.
- Nízka teplota: taumazit vzniká prednostne pri teplotách pod $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo je splnené pri podzemných a spodných vodách.

POŠKODENIE KONŠTRUKCIÍ A STAVIEB

Vo Veľkej Británii bolo poškodenie konštrukcií a stavieb pozorované:

- na betónových základoch pädesiatich cestných a diaľničných mostov založených v zeminách obsahujúcich sírany a sírniky,
- na základoch šiestich rodinných domov založených v zeminách obsahujúcich sírany a sírniky,
- najmenej na šiestich základových doskách umiestnených na zeminách obsahujúcich sírany a sírniky,
- vo viac ako dvadcatich prípadoch omietnutého tehlového muriva z tehál obsahujúcich sírany,
- v dvoch prípadoch ostenia tunelov londýnskeho metra (jeden s cementovým pačokom, druhý na tehlovej omietke),
- v jednom prípade poškodenia schodov v prístave morskou vodou.

Podrobnosti sú uvedené v [3, 4]. Väčšina poškodení vznikla v základových betónoch z vápencového kameniva, umiestnených v hlinách obsahujúcich sírany (v západnom Anglicku). Zaujímavá je skutočnosť, že väčšina betónov poškodených TSA pochádzala z hĺbky do 5 m pod povrchom terénu. Je to v rozpore s tradovaným poznatkom, že k síranovému poškodeniu dochádza pri dobre zhrnutých betónoch len čiastočne zapustených do podkladu, kde je možné čiastočné odparovanie napadnutého povrchu.

V ostatnom období narastá počet prí-

padov poškodenia betónov TSA. Podľa záverov BRE nejedná sa o nový fenomén. K týmto prípadom dochádzalo aj v minulosti, neboli však rozpoznané a identifikované. Uvádzame niekoľko dôvodov prečo je tomu tak:

- nedostatok testu odolnosti voči síranom: Podľa [2] je pri testovacích podmienkach taumazit nerozlišiteľný. Iným problémom je odber vzoriek (vývrty, kocky) a ich uloženie ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ je teplota príliš vysoká) a obvykle používané neuhličitanové kamenivo. Dlhý čas štandardných cementových a betónových testov pri izbovej teplote vedie pri vyhodnocovaní k spochybnovaniu možnosti vzniku taumazitu, ktorého vznik sa naviac v terénnych podmienkach nepredpokladá, ako by k jeho vzniku dochádzalo len pri vybraných laboratórnych podmienkach – nízka teplota ($5\text{ až }15\text{ }^{\circ}\text{C}$) spolu s prítomnosťou prímiesí, ktoré sú zdrojom uhličitanových iónov;
- zlepšené analytické metódy: vývoj diagnostických metód v ostatných rokoch podstatne zlepšil možnosti detekcie mineralógie a mikroštruktúry, ale aj hranice citlivosti termogravimetrickej analýzy poškodených betónov. Identifikácia taumazitu je toho dôkazom. V dôsledku veľmi podobnej štruktúry taumazitu a ettringitu až moderné röntgen difrakto-metre umožnili ich spoľahlivú identifikáciu. Keďže metódami chemickej analýzy sú nerozlišiteľné, zistené prípady poškodenia boli označované ako „síranové napadnutie“;
- betóny založené v rôznych podkladoch sú zriedkavo obnažované a kontrolované: identifikované prípady boli zistené pri odokrytí základov z rôznych iných dôvodov;
- dodatočné zvýšenie koncentrácie síranov v podloží: hliny v nezvetranom stave obsahujú nepatrné množstvo síranov, ale značné množstvo pyritu (FeS_2). V minulosti sa takéto hliny označovali ako neškodné. Podľa terajších odporúčaní sa preklasifikovali ako škodlivé, ak sa betón zakladá do porušených alebo spätne použitých hlin (zásyp). V dôsledku mechanického prevzdušnenia, pôsobenia vody a baktérií sírniky v pyrite oxidujú na sírany a zvyšujú úroveň síranov v podloží;
- zmeny v zložení moderných cementov: zvýšený výskyt TSA môže byť výsledkom zvýšeného množstva C_3S a Ca-

$SO_4 \cdot 2H_2O$ v súčasných cementoch. V súčasnosti sa predpokladá, že pre dobrú odolnosť voči síranom by množstvo C_3S nemalo presiahnuť 60 %. Je potrebné poznamenať, že mnohé z nedávno objavených prípadov TSA boli nájdené na tridsaťročných základoch mosta, resp. pädesaťročnej základovej doske, takže zrejme vplyv zloženia cementu nebude rozhodujúci.

Do roku 1998 bolo problematike TSA venovaných len pár odborných článkov. Situácia sa zmenila v marci 1998. Po rozhodnutí o zosilnení mostných pylónov proti nárazu vozidiel na diaľnici M5 v západnom Anglicku sa odokryli základy pylónov tridsaťročného mosta. Boli napadnuté pätky nosných pylónov, pričom povrch betónu do hĺbky 30 až 50 mm sa premenil na bielu pastu [5]. Výstuž bola skorodovaná priesakovou vodou, kontaminovanou chloridmi z rozmrazovacích prostriedkov.

Skupina (TEG) pod vedením prof. Les Clarka z Birminghamskej univerzity, zložená z odborníkov zo všetkých odborov stavebníctva a priemyslu stavebných hmôt, publikovala prvú správu o TSA zaoberajúcu sa rizikom vzniku, diagnostikou, odstraňovaním porúch a doporučeniami pre nové konštrukcie už v januári 1999. Súčasne sa konštatovalo, že riziko s ohľadom na počet stavebných konštrukcií je relatívne malé. Upozornilo sa na problém trvanlivosti a životnosti stavebných konštrukcií a nákladnosť opráv.

BRE publikovala špeciálny súhrn odporúčaní pre výrobcov a užívateľov betónu s vápencovým kamenivom. Vo vzťahu k TSA a jeho riziku bolo uhličitany obsahujúce kamenivo rozdelené na triedy podľa obsahu – A (nepříliš veľký), B (malý obsah) a C (veľmi malý obsah). Pre používanie zmesných cementov s prísadou vápenca ako plniva (6 až 35 %) bolo vydané odporúčanie nepoužívať betóny z nich vyrobené v prostredí spodnej vody s koncentráciou síranov prevyšujúcou 0,4 g/l. Hoci platné normy STN umožňujú prídavok vápenca, ukazuje sa, že tento prídavok zhoršuje významne odolnosť voči síranom zvlášť vo vlhkom a chladnom prostredí. Všetky tieto odporúčania sa týkajú podzemného uloženia betónu.

VÝSLEDKY VÝSKUMU V BRE

BRE po vypracovaní skúšobných laboratórnych metód vykročil z laboratórií

do terénu. Betóny známeho zloženia boli uložené do hliny obsahujúcej síranu v Shipston on Stour (Shipston) v strednom Anglicku. Výsledky získané z pozorovaní boli začlenené do TEG Report a sú zhrnuté nižšie:

Predchádzanie vzniku TSA v betónoch obsahujúcich vápencové kamenivo uložených v zemi

Najjednoduchší spôsob je zabrániť prístupu spodnej vody k betónu, čo však z praktického hľadiska nie je vždy riešením. Ak predpokladáme prístup vody k betónu, sú tri hlavné spôsoby ako zabrániť alebo spomaliť vznik TSA v betónoch s vápencovým kamenivom:

- použitie troskových cementov (70 % mletej granulovanej vysokopecnej trosky + 30 % PC). Podobné výsledky boli dosiahnuté pri použití 50 % hlinitanového cementu + 50 % mletej granulovanej vysokopecnej trosky, tento cement však nie je komerčne vhodný.
- TSA sa obmedzí zvýšením kvality betónu – znížením v/c, zvýšením množstva cementu a lepším zhutnením zmesi.
- počiatočné ošetrovanie betónov – uloženie na vzduchu pri laboratórne pripravených betónoch obmedzuje vznik TSA. V praxi to potvrdzuje správanie sa prefabrikovaných betónových dielcov.

Vplyv ošetrovania betónu

Způsob ošetrovania čerstvého betónu má rozhodujúci vplyv na odolnosť voči TSA. Pozitívny vplyv na odolnosť voči TSA má počiatočné uloženie na vzduchu bez ohľadu na to, či vzorky boli pripravené z PC alebo z cementu odolného voči síranom s použitím vápencového kameniva. Keď boli vzorky ošetrované vo vode, vývoj TSA dosiahol rozhodujúcu úroveň už po dvoch rokoch uloženia vzoriek vo vode pri 5 °C. Najrýchlejší vývoj TSA sa dosiahol pri počiatočnom ošetrovaní vzoriek vystavených síranovej expozícii po dobu 28 dní v uzatvorených nádobách. Výsledky týchto troch spôsobov ošetrovania sú závislé od alkality pórového roztoku. Najvyššia hodnota pH, prevyšujúca 13, sa získa pri treťom spôsobe uloženia. Významne nižšia je pri uložení vo vode a na vzduchu. Vysoká hodnota pH pórového roztoku pri vzorkách vystavených síranovej expozícii podporuje rozvoj TSA. K poškodeniu vzoriek dochádza až po niekoľkých mesiacoch. Dôvod nie dostatočne známy, hoci vysvetľuje výbornú TSA odolnosť betónov

z troskových cementov, ktoré majú nižšiu hodnotu pH pórového roztoku než betóny zhotovené z PC. Pri laboratórnych experimentoch prebieha napadnutie TSA pri teplotách pod 15 °C rýchlejšie. Optimálna teplota je 5 °C.

Vplyv kameniva

Jedným z prvých krokov BRE bolo určenie, či uhličitanové ióny môžu pochádzať z kameniva. Vzorky zhotovené z cementu odolného voči síranom s vápencovým kamenivom boli umiestnené v uzatvorených nádobách v silnom roztoku $MgSO_4$ (1,8 % ako SO_4^{2-}) pri teplote 5 °C. Jediným zdrojom uhličitanových iónov v uzatvorenom systéme bolo vápencové kamenivo. Poškodenie vzoriek začalo už po deviatich mesiacoch. Po osemnástich mesiacoch došlo k degradácii všetkých vzoriek s ich postupným rýchlym rozpadom. Nepreukázal sa zvýšený vplyv akosti kameniva (predpokladalo sa, že prachová zložka bude reagovať prednostne).

Prekvapením bol objav TSA v betónoch vystavených síranovému pôsobeniu zhotovených z kremičitého kameniva, a to v laboratóriu i v betónoch z terénu. V tomto prípade zdrojom uhličitanových iónov v prípade laboratórnych vzoriek bola pitná voda, resp. spodná voda v prípade vzoriek z terénu.

Vplyv vlastností cementov (spojiv)

Výsledky boli získané pri použití rôznych cementov s vápencovým kamenivom (s výnimkou pri PC s vápencom, kde sa použilo kamenivo kremičité). Vzorky boli uložené pri teplotách pod 15 °C.

- Portlandský cement s vápencom – PCV: PCV môže obsahovať 5 až 35 % mletého vápenca. Citlivosť voči TSA vzrastá s obsahom $CaCO_3$.
- PC: PC s obsahom C_3A 7 až 10 % nie je odolný voči TSA ani v laboratórnych ani v terénnych podmienkach.
- Cement odolný voči síranom: preukázal v porovnaní s PC dobrú odolnosť voči síranom pri laboratórnom skúmaní v roztoku síranov počas dvoch rokov. Po 4 až 6 rokoch expozície počet vzoriek poškodených TSA bol porovnateľný so vzorkami zhotovenými s PC. Vzorky zhotovené z cementu odolného voči síranom s vápencovým kamenivom neboli odolné voči TSA po trojročnej expozícii v spodnej vode obsahujúcej síranu na skúšobnom polygóne v Shipstone.

- Spojivá obsahujúce mletý popolček: boli skúmané betóny zhotovené z PC s náhradou 25 až 40 % popolčekom. Získané výsledky boli nekonzistentné – vzorky z terénu mali lepšiu odolnosť voči TSA než pripravené laboratórne.
- Spojivá obsahujúce kremičité úlety a metakaolín: betóny z nich zhotovené preukázali dobrú odolnosť voči TSA v terénnych podmienkach. Zatiaľ neboli študované v laboratórnych podmienkach.
- Spojivá obsahujúce mletú granulovanú vysokopecnú trosku: betóny obsahujúce troskový cement (70 % mletej granulovanej vysokopecnej trosky + 30 % PC) alebo 50 % mletej granulovanej vysokopecnej trosky + 50 % hlinitanového cementu majú výbornú odolnosť voči TSA v laboratórnych i terénnych podmienkach.

MINIMALIZÁCIA SÍRANOVÉHO NAPADNUTIA

Rozhodujúce pre minimalizáciu účinkov síranového napadnutia je pripraviť návrh betónovej zmesi pre konkrétny prípad so zohľadnením všetkých podmienok. Preto je potrebné prijať nasledovné opatrenia:

- znížiť v/c pomer, kolko je prakticky možné, pri zachovaní dobrej spracovateľnosti betónu (malty) s použitím vhodného superplastifikátora v zmesi, s cieľom obmedziť vnútorný transport iónov v tvrdnúcim betóne, predovšetkým vody,
- obmedziť priepustnosť betónu (alebo malty) prídavkom mletých granulovaných vysokopecných trosiek, popolčkov alebo využitím zmesných cementov – ako troskový alebo popolčekový,
- snažiť sa o zníženie obsahu C_3S a C_3A v portlandskom cemente, pokiaľ to technologické a výrobné podmienky dovoľia,
- pozmeniť (opraviť, doplniť) pravidlá pre výrobu betónov (mált), používaných v síranovom prostredí, predovšetkým tam, kde je potrebné pravidelne každoročne počítať s teplotami pod 15 °C alebo nižšími.

ZÁVER

Rozsah poškodenia betónových konštrukcií a stavieb taumazitovou formou síranového napadnutia vo Veľkej Británii nie je dostatočne známy. Súvisí to s obtiažnosťou skúmania poškodení predovšetkým pri betónoch uložených pod zemou. Ich

štúdium je z tohto dôvodu len náhodné. Správa diaľnic vo Veľkej Británii po problémoch v Gloucestershire na diaľnici M5 rozbehla rozsiahly výskumný program s cieľom predísť ohrozeniu TSA v nových stavbách.

Hoci TSA bolo objavené pomerne nedávno, vzhľadom na problémy s identifikáciou taumazitu nemali by sme byť prekvapení jeho vznikom už s ohľadom

na samotný názov – taumazit (z gréčtiny) znamená prekvapenie.

Síranová korózia betónu sa u nás v stavebnej praxi dodnes zlahčuje. Uvedené príklady slúžia na upozornenie, že podobných prípadov bude pribúdať, a preto je potrebné informovať stavbársku verejnosť o možnom nebezpečenstve. Vznik ettringitu v tvrdnúcim cementovom kameňi dnes už berieme akosi „samozrejme“. Jeho vznik významne podporuje nižšia teplota a prítomnosť $CaCO_3$. Pri súčasnej prítomnosti vodorozpuštných solí síranov (Na, K, Mg-sírany) a atmosférického CO_2 sú splnené všetky podmienky na vznik taumazitovej korózie a môže dôjsť k veľmi vážnemu poškodeniu stavebnej konštrukcie až do úplnej straty pevnosti a nosnosti konštrukcie. Hoci tieto procesy sú dlhodobé, z hľadiska životnosti stavebnej konštrukcie sú reálne. Sanácia poškodených konštrukcií je veľmi obtiažna (odstránenie príčin, ktoré ju dlhodobo spôsobovali), ak nie nemožná. Je to potrebné mať na pamäti!

Aj na Slovensku sa tento výskum už tiež rozbehol. V projekte VEGA 2073 bola rozpracovaná metodológia štúdia tejto problematiky a nadväzujúci projekt VEGA 5011 je orientovaný na identifikačné a prognostické aspekty problematiky TSA z hľadiska trvanlivosti betónov. O výsledkoch budeme odbornú verejnosť postupne informovať. Autori by boli povďační stavbárskej verejnosti, keby v prípade vzniku poškodenia betónových konštrukcií a podozrenia na síranové napadnutie boli prizvaní k ich obhliadke. Umožní nám to spoločne rozšíriť poznatky o tomto fenoméne.

Práca bola vypracovaná v rámci programu Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR a SAV VEGA 5011. Autori vyslovujú poďakovanie za poskytnutú podporu.

Ing. Svetozár Balkovic, CSc.

RNDr. Milan Drábik, CSc.

*oba: Ústav anorganickej chémie SAV
Dúbravská cesta 9, 845 36 Bratislava*

Literatúra:

- [1] *Craddock N.J.*: The occurrence of thaumasite in modern construction – a review. *Cem. Concr. Comp.* 24, 393–402, 2002
- [2] Department of Environment, Transport and Regions. The thaumasite form of sulfate attack: Risks, diagnosis, remedial works and guidance on new construction. Report of the Thaumasite Expert Group. DETR, January 1999
- [3] Office of the Deputy Prime Minister, Thaumasite Expert Group one-year review. Publ. on the ODPM internet site at www.safety.odpm.gov.uk/bregs/tegreports/index.htm, 2000
- [4] Office of the Deputy Prime Minister, Thaumasite Expert Group Report: review after three-years Experience. Publ. on the ODPM internet site at www.safety.odpm.gov.uk/bregs/tegreports/index.htm, 2003
- [5] *Hobbs D.W., Taylor M.G.*: Nature of the thaumasite sulfate attack mechanism in field concrete. *Cem. Concr. Res.*, 30, 529–533, 2000
- [6] *Balkovic S., Drábik M.*: Taumazitová forma síranového napadnutia betónov a mált, *Inžinierske stavby*, 52 (3–4), 20–23, 2004
- [7] *Balkovic S., Drábik M.*: Poškodenie betónu síranovou koróziou, *Inžinierske stavby*, 52 (3–4), 24–27, 2004
- [8] *Živica V., Bajza A.*: Acidic attack of cement based materials – a review. Part 1. Principle of acidic attack *Constr. Build. Mat.* 15, 331–340, 2001
- [9] *Živica V., Bajza, A.*: Acidic attack of cement based materials – a review. Part 2. Factors of rate of acidic attack and protective measures, *Constr. Build. Mat.* 16, 215–222, 2002
- [10] *Osborne G.J.*: Determination of the sulfate resistance of blastfurnace slag cements using small-scale accelerated methods of test, *Adv. Cem. Res.* 2(5), 21–27, 1989

„Žádný účinek není v přírodě bez příčiny, pochop příčinu a nepotřebuješ pokus. Příroda svůj zákon neporušuje.“

Leonardo da Vinci