Korózia betonárskej ocele v prostredí vysokopecnej a oceliarskej trosky

Corrosion of reinforced steel in the environment of blast furnace slag and steelmaking slag

Rodziňák D., Halama M., Čerňan J., Kovalčíková M.

Technická Univerzita Košice

E-mail: dusan.rodzinak@tuke.sk

Článok sa zameriava na vplyv korózie na oceľovú betónovú výstuž v prípade, ak sa k výrobe betónu ako jeden z komponentov použije vysokopecná alebo demetalizovaná oceliarska troska. V rámci experimentov boli použité trosky z výroby železa a ocele z produkcie U.S. Steel Košice. Oceľovú výstuž predstavovala oceľ typu S 235 (STN 11 375) ťahaná za studena. Chemické zloženie trosky v práškovej forme, ako aj kvapalných výluhov z trosky bolo analyzované pomocou röntgenovej fluorescenčnej spektrometrie. Korózne skúšky boli uskutočnené meraním polarizačných kriviek metódou potenciodynamickej polarizácie na základnej oceli exponovanej vo výluhoch, ako aj metódou polarizačného odporu priamo na oceli zaliatej v betóne a exponovanej v atmosférických zrážkach. Výsledky poukázali na rozdiely v rýchlosti korózie v závislosti od druhu trosky, čo úzko súvisí s jej chemickým zložením.

This article focuses on corrosion of the steel reinforcement in the concrete where the blast or demetalized steelmaking slag as one of the components for fabrication was used. The slag from iron and steel production from U.S. Steel Kosice was used in the experiment. Steel reinforcement type S 235 (STN 11 375) were made by cold drawing. Chemical composition of slag in form of powder and slag leachates was analysed using X-ray fluorescence spectrometry. Corrosion tests were carried out by measuring the polarization curves based on potentiodynamic polarization of steel samples exposed in leachate and also by polarization resistance method directly on the steel embedded in concrete and exposed in atmospheric precipitation. The results revealed differences in the corrosion rate, depending on chemical composition of the slag, which is closely related to its metallic and sulphur content.

ÚVOD

Odpadové materiály používané ako druhotné suroviny sú prínosom z technologického, environmentálneho aj ekonomického hľadiska. Používajú sa jednak ako náhrada klasickej (primárnej) suroviny, alebo sa vnášajú do technológie cielené, a to pre svoje mimoriadne vlastnosti, ktoré môžu zlepšiť parametre výslednej stavebnej hmoty oproti použitiu primárnej suroviny. Využitie odpadných materiálov v stavebnej výrobe však vyžaduje vyriešenie celého radu problémov. Ich odlišný charakter ovplyvňuje predovšetkým široké spektrum rôznych vlastností, ktoré môžu mať vplyv na charakter budúcej stavebnej hmoty [1].

Vysokopecná troska je vedľajší produkt, ktorý vzniká súbežne počas výroby surového železa a ocele, a preto ju aj rozdeľujeme na vysokopecnú a oceliarsku. Zásadný rozdiel je len vo vyššom podiele vápna v oceliarskej troske a v obsahu železa. Vysokopecná forma je stála a vzniká pri odpichu železa. Pre spracovanie a využitie vysokopecnej trosky je rozhodujúce chemické a mineralogické zloženie, najmä charakter hlavných mineralogických komponentov, rýchlosť kryštalizácie, rozmer a forma kryštálov, výskyt sklovitej fázy, špeciálne rozloženie kryštalickej a sklovitej fázy. Podľa toho môžu byť metódy na spracovanie

vysokopecnej trosky rozdelené do troch skupín: 1. vzduchom chladená troska, 2. granulovaná troska, 3. a ďalšie procesy spracovania.

Pre stavebné účely sa používa vzduchom chladená troska. Po finálnom stuhnutí a chladení je troska drvená a triedená podľa rôznej veľkosti. Takto upravená troska je potom používaná v stavebníctve na výrobu ciest a diaľnic (v malých vrstvách), v staviteľstve, na konštrukcie železničných tratí, v oblasti rekultivácie atď. Granulovaná troska sa väčšinou používa na výrobu cementu [2].

Chemické zloženie vysokopecnej trosky (z výroby U.S. Steel Košice) je nasledovné: $\text{CaO} = \text{max. } 40 \%$, $\text{MgO} = \text{max. } 16 \%$, $\text{SiO}_2 = \text{min. } 35 \%$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{min. } 6 \%$, $\text{FeO} = \text{max. } 3 \%$, $\text{S}_{\text{spolu}} = \text{max. } 1 \%$.

Oceliarská troska z rafinačného procesu v kyslíkovom konvertore alebo v elektrickej oblúkovej peci obsahuje veľkú časť rafinovaného kovového železa – surovej ocele. Veľmi dôležitým procesom využitia oceliarskej trosky je delenie trosky do dvoch častí: kovová časť (oceľový šrot) a demetalizovaná troska. Používajú sa pri tom viacstupňové procesy drvenia, mletia a elektromagnetickej separácie. Demetalizovanú časť oceliarskej trosky je možné využiť v stavebníctve na zhotovenie ciest, priehrad, prístavných mól atď. Hlavná prekážka pre efektívne využitie oceliarskej trosky

na konštrukcie ciest a pod., je prítomnosť voľného vápna a jeho následná hydratačná schopnosť, sprevádzaná objemovými zmenami. Metódou prekonania prekážky je prirodzené starnutie demetalizovanej trosky na uzavretom dvore. Proces trvá 6 až 9 mesiacov pričom metódy na skrátenie času starnutia boli vyvíjané najmä v Japonsku, Nemecku a Brazílii [3].

Použitie vysokopecných trosiek v stavebníctve podlieha prísny predpisom, najmä z pohľadu možnej degradácie iniciovanej prítomnosťou znečistených atmosférických zrážok, resp. vodných roztokov solí z posypov v zimnom období. Touto problematikou sa zaoberajú viaceré spoločnosti jednak v rámci svojich výskumných riešiteľských kapacít, jednak je tento problém rozoberaný teoreticky a zaoberajú sa ním ako na univerzitách, tak aj v priemyselných výskumných centrách [4,5,6,7].

Tento článok má v tomto kontexte konkrétnu úlohu. Je zameraný na preskúmanie vplyvu samotných trosiek na degradáciu (koróziu) ďalšej zložky vyskytujúcej sa v betóne, a to oceleovej výstuže. Táto tzv. betonárska oceľ sa používa ako pri klasických stavbách, tak aj pri stavbách ciest/diaľnic, či už vo forme tyčovej ocele – tzv. roxoru alebo vo forme oceleových sietí.

Zmena životnosti železobetónovej konštrukcie v čase je závislá na viacerých faktoroch, z ktorých medzi najvýznamnejšie patria rôzne typy degradácie. Najčastejšie sa vyskytujúcim spôsobom degradácie železobetónových konštrukcií je karbonatizácia betónu a následná korózia oceleovej výstuže. Pôsobením karbonatizácie dochádza k znižovaniu pH a depasivácii vrstvy medzi betónom a výstužou. Proces karbonatizáciou indukovanej korózie pozostáva z dvoch fáz [4]. Prvá fáza reprezentuje pasívne štádium, kedy je výstuž chránená pasívačnou vrstvou. Počas druhej fázy dochádza k narušeniu pasívačnej vrstvy a k urýchleniu korózie. Ďalším často sa vyskytujúcim degradačným činiteľom je pôsobenie chloridových iónov Cl^- a ich prienik cez kryciu vrstvu až k výstuži, pričom už samotné chloridy spôsobujú intenzívnu koróziu výstuže. Limitná hodnota pre obsah chloridov v kamenive je 0,05 % [8]. Rýchlosť karbonatizácie závisí predovšetkým od porozity cementového kameňa a vlhkosti betónu. Najvýznamnejším faktorom je vlhkosť, pretože proces karbonatizácie prebieha len pri relatívnej vlhkosti v intervale 40-90 %. Ak relatívna vlhkosť vzrastie nad 90 %, CO_2 nedokáže preniknúť cez zaplnené póry betónu, keďže difúzia je v týchto podmienkach veľmi pomalá. V prípade, ak relatívna vlhkosť poklesne pod 40 %, CO_2 sa nedokáže rozpúšťať vo vode obsiahnutej v póroch. Ďalším významným faktorom je porozita betónu. V zásade platí, že nízka porozita a hydraulická vodivosť betónu efektívne limituje rýchlosť karbonatizácie.

V súčasnej dobe sú známe všetky aspekty, ktoré vplyvajú na koróziu železa v betóne, najmä z kvalitatívneho hľadiska. Kvantita, ktorá rozhoduje o životnosti celého systému je daná najmä zmenou niektorých

faktorov pri jeho tvorbe. Preto sme pristúpili k sledovaniu základných zmien, ktoré vznikajú, keď sa namiesto klasického kameniva do betónu použije kamenivo v podobe vysokopecnej/oceliarenskej trosky. Preto sme predmetnú oceleovú materiál podrobili skúškam korózie v aplikačných prostrediach, ktorá vzniká ako následok prítomnosti zrážkovej vody resp. vody s obsahom posypovej technickej soli. Sledovaný bol aj vplyv priamo na oceleovú výstuž resp. na koróziu ocele ponorenej do výluhov z použitých troskových zmesí, ako aj priebeh aktuálnej rýchlosti korózie na oceli zaliatej v betóne.

EXPERIMENTY

K skúškam boli poskytnuté dva druhy základných hmôt z produkcie U.S. Steel Košice. Jednou je vysokopecná troska (označená ako VPT), ktorá pozostávala z rôznych frakcií – od prachového podielu až do veľkosti jednotlivých častí cca 30 mm – Obr. 1. Druhá hmota bola oceliarská demetalizovaná troska (označená ako DOT) pozostávajúca z tých istých frakcií ako v prvom prípade – Obr. 2.

Chemické zloženie obidvoch trosiek bolo zistené za použitia röntgenového fluorescenčného spektrometra typu SPECTRO iQ II (Amatek, GER) a to ako vo forme obsahu prvkov, tak aj v oxidickej forme existujúcich chemických zlúčenín. Takisto bola uskutočnená chemická analýza výluhov z obidvoch materiálov. Na výluh sa použilo 250 gramov trosky a 500 ml destilovanej vody, po dobu 24 h. Sumárne výsledky analýzy sú uvedené v Tab.1 – z ktorej zároveň vyplýva, aké sú základné rozdiely v chemickom zložení obidvoch trosiek u vybraných prvkov (označené sivou farbou). V tabuľke sú uvedené len vybrané prvky. Komplexná analýza trosiek sa týkala celkovo 44 prvkov, pričom z kvantitatívneho pohľadu a s prihliadnutím na možný vplyv na korózný proces je významné len zníženie obsahu síry v DOT troske.

Okrem toho bola poskytnutá aj betónová zmes pozostávajúca z vysokopecnej trosky (0-16 mm) zmiešanej s odpovedajúcim podielom cementu (cca 17,5 %). Táto zmes po pridaní vody (cca 0,2 l na 0,5 kg zmesi) bola použitá na výrobu betónovej vzorky, pričom vzorky betonárskej ocele boli umiestnené vo vnútri tak, aby mohli byť prevedené experimenty využívajúce techniku polarizačného odporu pre dlhodobý korózný monitoring – Obr. 3. Samotná betónová vzorka bola umiestnená tak, aby počas meraní obsahovala 100% vlhkosť, t.j. bola ponorená do definovanej výšky zrážkovou vodou (atmosférické zrážky o $\text{pH}=8,5$; vodivosti 109 μS a celkovom množstve solí TDS 59ppm). Exponovaná plocha oceleovej výstuže o priemere 6 mm v betóne predstavovala 12 cm^2 (započítané aj vztlínanie zrážok na oceleovom roxore ako za reálnych stavebných podmienok). Pevnosť takéhoto betónu sme nemerali, ale podľa údajov pracovníkov USS Košice je možné tento betón zaradiť do skupiny pevnosti C 30.

Obr. 1. Vysokopecná troska – VPT
Fig. 1. Blast furnace slag

Obr. 2. Demetalizovaná troska – DOT
Fig. 2. Demetalized steelmaking slag

Tab. 1. Chemické zloženie trosiek v pevnom stave a vo výluhu
/ The chemical composition of the slags in the solid state and the leachate

	VPT			DOT		
	prvky	oxidy	výluh	prvky	oxidy	výluh
	%	%	%	%	%	%
Mg	5,25	8,69	0,966	4,68	7,76	0,525
Al	2,59	4,89	0,543	2,96	5,59	0,313
Si	15,51	33,18	3,843	5,93	12,68	0,927
P	0,01	0,02	0,005	0,24	0,54	0,045
S	0,54	1,36	0,079	0,11	0,27	0,023
Cl	0,05	0,046	0,014	0,04	0,001	0,037
K	0,35	0,42	0,083	0	0	0
Ca	21,84	30,56	4,326	32,31	45,20	5,567
Ti	0,15	0,26	0,032	0,20	0,33	0,033
Mn	0,47	0,60	0,042	3,01	3,88	0,222
Fe	0,28	0,40	0,037	14,15	20,23	1,166

Obr. 3. Oceľová výstuž v betóne
Fig. 3. Steel reinforcement in concrete

Materiál použitý ku koróznym skúškam bola klasická ryhovaná oceľ typu S 235 (STN 11375) o priemere 6 mm, používaná na výrobu oceľových sietí. Tento typ ocele bol technologicky v konečnej fáze výroby ťahaný za studena, o čom svedčia jej mechanické vlastnosti, ako aj mikroskopická analýza metalografických výbrusov.

Na základe uskutočnenej statickej skúšky v ťahu boli zistené tieto základné vlastnosti danej ocele: $R_{p0,2}$ – cca 500 MPa, R_m – 700 MPa, A_{10} – 25 %. Pevnostné vlastnosti boli overené aj príslušnými skúškami tvrdosti a to ako skúškou podľa Brinella resp. Vickersa. Dosiahnuté hodnoty tvrdosti v rozsahu 200 jednotiek, odpovedajú podľa všeobecne platných prevodových stupníc v obidvoch prípadoch pevnosti cca 700 MPa. Metalografický rozbor potvrdil, že tento druh ocele je v súlade s obsahom uhlíka, ktorý udáva príslušná norma a vykazuje štruktúru feriticko-perlitickú s odpovedajúcim podielom perlitu Obr. 4. Vyššie hodnoty medze sklzu vyjadrené hodnotou $R_{p0,2}$ a pevnosťou R_m sú dané ťahaním za studena, kde dochádza k deformačnému spevneniu, a tiež ku vzniku deformačnej textúry prejavujúcej sa pretiahlymi zrnami v smere ťahania – Obr. 4.

Základné korózne vlastnosti použitej ocele boli skúmané vo výluhoch z obidvoch troskových materiálov, čím sme simulovali dlhodobý vplyv chemického zloženia výluhov v prítomnosti vlhkosti. Okrem toho sme použili referenčné a porovnávacie elektrolyty ako destilovanú vodu, atmosférickú zrážkovú vodu, 3% roztok NaCl a výluhy trosky s prídavkom 3 % NaCl.

Destilovaná voda pri skúškach bola vybraná ako referenčný elektrolyt, ktorý nevnaša vplyv chemického zloženia, ako je to napr. pri atmosférických zrážkach. Roztok 3% NaCl bol zvolený z dôvodu simulácie extrémneho korózne agresívneho prostredia, v prípade, že betón sa použije ako podklad pri stavbe ciest (použitie technickej soli v zimnom období).

Obr. 4. Ferriticko-perlitická štruktúra ocele typu S 235 (STN 11375) v priečnom (vľavo) a pozdĺžnom (vpravo) smere
Fig. 4. Ferrite-pearlite structure of the S235 steel type (STN 11375) in the transverse (left) and longitudinal (right) direction

Meranie korózných parametrov prebiehalo metódou lineárnej potenciodynamickej polarizácie zaznamenaním polarizačných kriviek na základnej oceli exponovanej v príslušných prostrediach (vzorka pre tieto skúšky mala kruhovú plochu 10 mm² a bola zaliata v dentakryle s oceľovým vývodom, ktorý bol odizolovaný v mieste ponoru. Povrch vzorky bol po každom meraní prebrúsený brúsnymi papiermi o zrnitosti 400 a 800). Na oceli zaliatej v DOT betóne vid' Obr. 4 a exponovanej v zrážkach bol uskutočnený dlhodobý korózný monitoring meraním polarizačného odporu. Boli stanovené základné korózne parametre, ako samovoľný korózný potenciál

E_{ocp} (mV), korózný potenciál E_k [mV], prúdová hustota j_{kor} ($\mu A cm^{-2}$), polarizačný odpor R_p [Ωm^2] a korózna rýchlosť v_k ($\mu m/rok$). Elektrochemické merania boli realizované na prístroji Voltalab PGP201 s trojelektrodovým usporiadaním, s pracovnou vzorkou ocele S235, referenčnou nasýtenou kalomelovou elektródou a pomocnou platínovou elektródou pri rýchlosti scanu 2 mV s⁻¹, v rozsahu potenciálov – 250 až 1000 mV vs. E_{ocp} , t.j. aj v silne oxidačnej oblasti. E_{ocp} (mV) sa sledoval pred samotným meraním potenciodynamických kriviek do ustáleného stavu (quasy steady state) a E_k (mV) bol aproximovaný s logaritmickeho hodnotenia potenciodynamických polarizačných kriviek pri tej istej rýchlosti scanu. Pri hodnotení polarizačného odporu sa využila Sternova metóda – rýchlosť polarizácie 1 mV s⁻¹ v rozsahu ± 30 mV v okolí E_{ocp} .

Tab. 2. Parametre meracích elektrolytov ako prostredí pre korózne merania / Parameters of measuring electrolytes as environments for corrosion measurement

Elektrolyt	pH	Vodivosť' (μS)	TDS (ppm)
destilovaná voda	7,0	< 1	–
atmosférické zrážky*	8,5	109	59
výluh VPT	8,8	1300	675
výluh DOT	14	>4000	>2000
VPT + 3% NaCl	10,4	>4000	>2000
DOT + 3% NaCl	14	>4000	>2000

* odchytené v lokalite Košice a okolie v blízkosti priemyselného podniku U.S. Steel

VÝSLEDKY MERANÍ

Parametre meracích elektrolytov, t.j. výluhov z trosky a atmosférických zrážok sú v Tab. 2. Výsledky meraní korózných parametrov zistených metódou polarizačných kriviek pomocou potenciodynamickej polarizácie na základnej oceli exponovanej v referenčných (destilovaná voda, 3% NaCl) a porovnávaných výluhoch (výluh VPT, DOT + soľ) sú uvedené v Tab. 3.

Tab. 3. Zistené korózne parametre pre oceľ S235 v rôznom aplikačnom prostredí / Identified corrosion parameters for the S235 steel in various application environments

Oceľ STN 11 375 (S 235)	E_{ocp} (mV/SCE)	E_k (mV/SCE)	j_{kor} ($\mu A cm^{-2}$)	R_p (Ωm^2)	v_k ($\mu m/rok$)
destilovaná voda	-350	-409	1.57	0,223	14
zrážková voda	-389	-416	2.61	0,0671	31
3% roztok NaCl	-650	-750	41,8	0,0104	324
výluh VPT	-638	-802	39	0,009	304
výluh DOT	-531	-670	25,3	0,0175	197
výluh VPT + 3% NaCl	-669	-821	21,5	0,0039	167
výluh DOT + 3% NaCl	-524	-658	32,3	0,0098	251

Ako vyplýva z tabuliek, merané výluhy, až na silne zásaditý výluh DOT + 3% NaCl, majú vo svojich všetkých stavoch hodnotu pH v oblasti mierne zásaditej, čo je z hľadiska Pourbaix diagramov pozitívny jav. V prípade výluhu VPT, prídavok 3% NaCl zvýši hodnotu pH z 8,8 na 10,4, v prípade výluhu DOT je zásaditosť maximálna, t.j. 14. Ako vidieť na Obr. 5, vplyv prídavku technickej posypovej soli sa prejavuje na vzraсте koróznej aktivity, a to hlavne v silne oxidačnej oblasti (zelená a fialová krivka).

Obr. 5. Logaritmicke priebiehy polarizačných kriviek pre betónarsku oceľ vo výluhoch VPT a DOT v destilovanej vode a s prídavkom 3% NaCl

Fig. 5. The logarithmic characteristics of the polarization curves for steel rods in leachate of VPT and DOT in distilled water with addition of 3% NaCl

Polarizačné krivky poukazujú na priebeh prúdovej hustoty v závislosti na potenciáli. Ako je vidieť z uvedených grafov, pasívna prúdová hustota v čistých výluhoch (čierna a červená krivka) je pomerne nízka, ale na aktuálnej rýchlosti určenej z Tafelovho hodnotenia sa to neprejavuje. Avšak o samovoľnej pasivácii možno hovoriť len u červenej krivky na základe hodnotenia prúdovej hustoty v pasívnej oblasti, nie z hodnoty j_{kor} určenej z Tafelovho hodnotenia. Prídavok 3% NaCl, najmä však v prípade výluhu z vysokopecnej trosky má v celom rozsahu koróznej prúdovej hustoty stúpajúcu tendenciu, bez akéhokoľvek náznaku prechodu do pasívneho stavu. U výluhu z demetalizovanej trosky je prechod do aktívneho stavu posunutý o cca 500 mV a jednak pri silnom oxidačnom prostredí dochádza k útlmu koróznej aktivity.

Ak použijeme výsledky v logaritmickej priebiehu kriviek (viď Obr. 5), je možné konštatovať posun v koróznom potenciáli u betónárskej akosti ocele v DOT výluhoch v rozsahoch +130 až +160 mV vs. SCE. Rádovo rozdielne korózne rýchlosti ocele v DOT betóne od koróznych rýchlostí samotnej ocele dosahovanej meraniami vo výluhoch DOT/VPT je spôsobená tým, že oceľ bola exponovaná v menej agresívnych atmosférických zrážkach a vplyv pomerne agresívnych zložiek trosky bol minimalizovaný zakomponovaním do kompozitu celistvej štruktúry vytvrdenej betónovej zmesi.

Výsledky korózneho monitoringu (ustálenej rýchlosti korózie) zisteného metódou polarizačného odporu ocele v DOT betóne exponovanej v atmosférických zrážkach sa v priebehu cca. 2200 h. pohybovali v rozsahu 3 až 8 $\mu\text{m rok}^{-1}$ (viď Obr. 6). Po počiatočnom poklese nastáva zhruba po 900 h. opäť mierny nárast. Hodnoty koróznych rýchlostí sú v tomto type prostredia v tolerancii.

Obr. 6. Priebeh koróznych rýchlostí stanovených pomocou metódy polarizačného odporu v priebehu korózneho monitoringu ocele v DOT betóne počas 2200 h expozície v atmosférických zrážkach

Fig. 6. Corrosion rate behavior established by the methods of resistance polarization during corrosion monitoring of steel in DOT concrete during 2200 h of exposure in atmospheric precipitation

ZÁVERY

Z uskutočnených chemických analýz a koróznych testov možno vyvodit' nasledovné závery:

Z meraní polarizačných kriviek je zrejmé, že použitie troskových materiálov, hlavne vo forme vysokopecnej trosky (nedemetalizovanej) má zásadný vplyv na rýchlosť korózie ocele vo výstuže a dosahuje hodnoty agresívneho testovacieho prostredia 3% NaCl. Dochádza ku rovnomernej korózii s kyslíkovou depolarizáciou v zásaditom prostredí, vzhľadom na merané hodnoty pH výluhov. K zásadnej zmene priebehu korózie nedochádza ani pri použití demetalizovanej trosky.

Z kvantitatívneho hľadiska namerané elektrochemické parametre poukazujúce na rozdiel v hodnotách koróznych rýchlostí ocele vo výluhu VPT a DOT súvisia s chemickým zložením obidvoch troskových komponentov. V prvom rade hrá významnú rolu znížený obsah síry v DOT výluhoch.

Z hľadiska samotnej korózie je nutné konštatovať, že určenie absolútnej hodnoty veľkosti korózie z Tafelových polarizačných kriviek je simuláciou extrémneho aplikačného prostredia, t.j. vo výluhoch jednej alebo druhej trosky. Prepočtom by sa tak dala zistiť tzv. minimálna životnosť oceľového materiálu.

Merania ustálenej rýchlosti korózie z určenia polarizačného odporu pri koróznom monitoringu ocele

v DOT betóne počas cca 2200 h expozície v atmosférických zrážkach sú aplikačne reálnejšie. Hodnota rýchlosti korózie bola po tejto dobe max. 7,6 µm/rok. Ak by sme túto hodnotu použili pre výpočet rovnomerného napadnutia oceľovej výstuže (bez vplyvu bludných prúdov, iných kontaminantov prostredia atď.), tak za 10 rokov by došlo k strate hrúbky materiálu o hodnotu cca 76 µm, čo odpovedá strate na priereze cca. 2,5 %. Na mechanické vlastnosti betónu by to nemalo prakticky žiadny dosah. To je prepočet na hrúbku materiálu 6 mm. Pri hrúbkach rozorov 10, 12, 14 mm by to bola zanedbateľná strata.

Skutočné posúdenie životnosti nie je však možné hodnotiť len na základe úbytku prierezu materiálu. Je nutné vziať do úvahy aj mechanizmus korózie vzhľadom na aplikačné prostredie a mechanické namáhanie, kde môže dochádzať ku praskaniu a odpadávaniu vrstvy spôsobenej tvorbou objemných korózných produktov.

PodĎakovanie

Táto práca vznikla za podpory Operačného programu ERDF: "Výskumné centrum pre pokročilé materiály a technológie pre súčasné a budúce aplikácie – PROMATECH", projekt ITMS: 26220220186.

LITERATÚRA

1. Janotka I, Krajčí L., Špaček A. Karbonatácia betónu železobetónových konštrukcií – časť I: základné poznatky, *Beton TKS* **2011**, 3, 72-79.
2. Janotka I, Krajčí L., Špaček A. Karbonatácia betónu železobetónových konštrukcií – časť II: stanovenie etapy karbonatácie a elektro-chemického stavu ocele, *Beton TKS* **2012**, 4, 58-61.
3. Ściślewski Z. *Korozja i ochrona zbrojenia*. Arkady: Warszawa, 1972.
4. Bilčík J. *Predpovedanie životnosti železobetónových konštrukcií*, STU: Bratislava, 1997.
5. Gonen T., Yazicioglu S. The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete, *Construction and Building Materials* **2007**, 21, 1040–1045.
6. Matoušek M., Drochytka R. *Atmosférická korózie betonu*, IKAS: Praha, 1998.
7. Oliveira da Silveira N. et al. ACERITA - Steel slag with reduced expansion potential, *La revue de Métallurgie* **2004**, 779-785.
8. Živica V. Corrosion of reinforcement induced by environment containing chloride and carbon dioxide, In: Proc. of the 3rd Czech/Slovak Symp. on Theoretical and Experimental Research in Structural Engineering, Černice Castle 2004, pp.161–165.
9. Leemann A., Lothenbach B., Hoffmann C. Biologically induced concrete deterioration in a wastewater treatment plant assessed by combining microstructural analysis with thermodynamic modeling, *Cement and Concrete Research* **2010**, 40 (8), 1157-1164.
10. Kovalčíková M., Eštoková A., Luptáková A. Durability Performance of Cement Composites Containing Ground Granulated Blast Furnace Slag, *Advanced Materials Research* **2015**, 1105, 26-30.
11. Ai-Otaibi S. Investigating some durability related properties of alkali-activated slag concrete. 29th Conference on Our World in Concrete and Structures, 25 - 26 August 2004, Singapore.
12. Teng S., Lim T. Y. D., Divsholi B.S.: Durability and mechanical properties of high strength concrete in incorporating ultrafine ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials* **2013**, 40, 875-881.