

STANOVENÍ RELATIVNÍ ODOLNOSTI BETONŮ VŮČI MODELOVÝM AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍM ■ DETERMINATION OF RELATIVE RESISTANCE OF CONCRETE TO MODEL AGGRESSIVE ENVIRONMENT

Ivailo Terzijski, Dalibor Kocáb,
Jiří Strnad, Đorđe Čairović

V příspěvku je představen experiment, jehož cílem bylo porovnat trvanlivost různých betonů při působení síranů a demineralizované vody syčené oxidem uhličitým. Ataku byly vystaveny od betonů odvozené modelové malty. Použita byla dvojnásobně komparativní metoda. Je popsána použitá metoda, odvození modelových malt, volba zkušebních těles a zkušebních parametrů i dosažené výsledky. ■ The article compares the durability of different concretes under impact of sulphates solution and low mineralised water solution of carbon dioxide. Concrete-derived model mortars were exposed to these attacks. A two-fold comparative method was used. We describe the method used, the derivation of model mortars, the choice of specimen's shape and the test parameters as well as the obtained results.

Nedostatečná trvanlivost betonu (či životnost betonových konstrukcí) v neustále se zhoršujícím životním prostředí je jedním z velkých problémů současného stavitelství. Základním aspektem trvanlivosti betonových konstrukcí je odolnost stavebního materiálu vůči působení vnějšího prostředí, tedy vůči působení nejrůznějších chemických látek, a to jak jednoduchých, tak i složitých či kombinovaných. V naší zájmové oblasti jde zejména o odolnost betonu, případně obecněji silikátových kompozitů. Z velkého množství možností byl pro účely popisovaného experimentu jako náporové (agresivní) prostředí zvolen vodný roztok Na_2SO_4 s definovaným obsahem síranových iontů a demineralizovaná (pro popis koroze lze nazvat „hladová“) voda syčená plynným oxidem uhličitým (CO_2).

Vzhledem k zaměření článku jsme v jeho úvodu chtěli původně detailněji popsat chemické procesy, které v betonu při náporu výše uvedených prostředí probíhají (resp. mohou za jistých podmínek probíhat) a představují onu korozi betonu. Při interních diskuzích jsme ovšem dospěli k závěru, že jsou tyto procesy již dobře známé a informace o nich dostupné prakticky komukoli. Pěkné je např. přehledné shrnutí problematiky koroze betonu zpracované právě pro časopis Beton TKS (ke sta-

žení na webu v archivu časopisu) [1]. Podobně velmi pěkné a technicky srozumitelné, i když v jazyce anglickém, jsou webové stránky [2]. Detailním způsobem je problematika popsána také v „State of the Art Reportu“ [3]. Pro zájemce uvádíme ještě literaturu na téma koroze vlivem působení síranů [4], [5], [6] a literaturu na téma koroze vlivem oxidu uhličitého [7] až [12].

CÍL EXPERIMENTŮ

V článku prezentované výsledky byly získány v rámci v současnosti řešeného projektu aplikovaného výzkumu MPO. Jedním z cílů tohoto projektu je navržení vysokohodnotných samozhutnitelných betonů (SCC) pro souběžně vyvíjené prefabrikované tenkostěnné 3D konstrukce, resp. pro některé složitější konstrukční prvky. Součástí vývojových prací bylo (a stále je) ověření vlastností nově vyvinutých betonů, včetně porovnání jejich odolnosti vůči agresivnímu působení. Vzhledem k tomuto cíli byly navrženy obsah a metodika prováděných zkoušek trvanlivosti.

METODIKA EXPERIMENTŮ

U korozních zkoušek obecně jde zejména o dosažení jasných a reprezentativních výsledků v přijatelném časovém období a za přijatelných nákladů. Podle toho se také volí velikost a charakter zkoušených vzorků, parametry modelového (agresivního) prostředí a další parametry zkoušení. Za přijatelné časové období je obvykle považován 1 rok, tedy 365 dní. Vzhledem k uvedenému jsme souvisejícím postupům věnovali značnou pozornost.

V našem případě byla zkouška odolnosti zvolena jako dvojnásobně komparativní, tj. zjišťované parametry jednotlivých zkoušených materiálů v jednotlivých agresivních prostředích byly porovnávány jak mezi sebou, tak i vůči odpovídajícím parametrům stejného materiálu uloženého v referenčním prostředí.

Modelová agresivní prostředí

V návaznosti na cíle nadřazeného projektu byla vybrána dvě základní agresivní působení:

- vodný roztok síranů (ionty SO_4^{2-}),

- hladová voda syčená oxidem uhličitým.

Z množiny reálně se nejčastěji vyskytujících agresivních prostředí byla záměrně vybrána tato dvě, neboť fyzikálně-mechanický projev jejich působení (koroze) je zcela rozdílný.

Při působení síranů na beton se v jeho matici tvoří produkty s vyšším molárním objemem v porovnání s objemem sloučenin do korozního procesu vstupujících. Dokud je v pórové matici betonu dostatek prostoru k ukládání novotvarů, korozní proces betonu zdánlivě (v tomto období i reálně) prospívá, neboť snižuje jeho pórozitu, tj. zlepšuje vlastnosti na ní závislé, např. zvyšuje pevnost betonu v tlaku.

Po úplném zaplnění pórové struktury betonu způsobuje i nadále rostoucí objem produktů korozní reakce vzrůst napjatosti a postupně vznik trhlin v napačeném materiálu (betonu). Dále dochází k rozšiřování trhlin a posléze k úplnému rozrušení materiálu. Kdy k onomu zlomu dojde, nelze jednoznačně říci. Záleží na koncentraci síranových iontů, na kationtu nosiče síranů, na pórové struktuře betonu a na přítomnosti dalších chemických látek, teplotě, tlaku atd. Může to být za půl roku, za rok, při reálné korozi i později.

Naproti tomu **koroze hladovou vodou**, příp. zesílená přítomností útočného CO_2 , je druh koroze škodící atakovanému betonu od samého počátku. Je tomu tak zejména u těch konstrukcí, které jsou vystaveny omývání nebo přímo tlakovému působení povrchových či podzemních vod s touto charakteristikou. Při působení tzv. hladových vod s CO_2 je silikátové pojivo betonu rozkládáno, převedeno do lépe rozpustné formy a následně odstraňováno (vy-mýváno) z matrice betonu. Beton bez pojiva ztrácí soudržnost a rozpadá se. Typické pro toto korozní působení je, že postupuje agresivně směrem od povrchu konstrukce či vzorku dovnitř.

Při tlakovém působení na konstrukci (např. podzemní stěnu) se koroze tohoto typu přednostně koncentruje do oslabených oblastí konstrukce (místa s nejvyšší propustností), kde vytváří komunikační kanálky. Může tak zcela znehodnotit

např. funkčnost těsnicího prvku, aniž by byla většina jeho hmoty zkorodována.

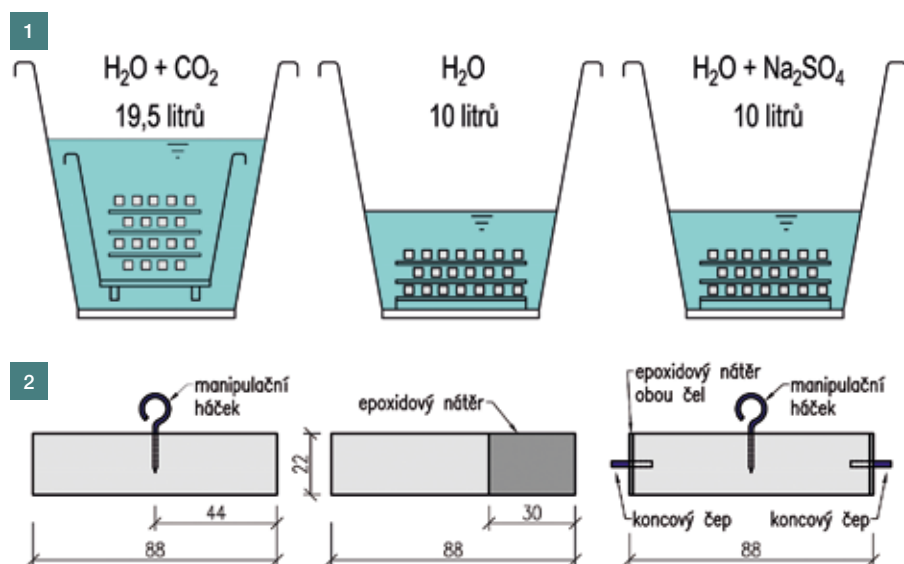
Při popisovaných experimentech byla konkrétně použita následující modelová agresivní prostředí:

- **sírany:** použit byl 5% roztok Na_2SO_4 , který se používá pro tyto účely běžně [3], [13], [14]. V našem případě šlo o roztok v demineralizované vodě. To odpovídá koncentraci síranových iontů cca 33 500 mg/l roztoku,
- **hladová voda s CO_2 :** při experimentu bylo připraveno agresivní prostředí (médium s nejvyšší reálně dosažitelnou koncentrací agresivního CO_2), které bylo představováno demineralizovanou vodou syčenou plynným CO_2 . Syčení se provádělo z tlakové lahve opatřené redukčním ventilem. Přívod CO_2 na dno nádoby byl zajištěn pomocí akvarijní soupravy s difuzním kamínkem. Zkušební tělesa byla umístěna ve dvou nádobách vložených do sebe tak, aby při syčení nedošlo k nahodilému mechanickému poškození vzorků stoupajícími bublinkami CO_2 (obr. 1).

Použitý materiál

V reálném prostředí probíhají korozní procesy často velmi pomalu, a proto je při laboratorních zkouškách nutné proces koroze výrazně urychlit. Nejčastěji se významně zvyšuje koncentrace korozního prostředí, příp. intenzita jeho přísunu k atakované hmotě a/nebo se zmenší zkušební tělesa tak, aby se zvýšil poměr jejich povrchu k jejich objemu.

1 Schéma použitých lázní 2 Výrobní rozměry a vystrojení zkušebních těles 1 Submersion setup 2 Dimensions and outfitting of the specimens



Tab. 1 Složení modelových malt použitých pro experiment | Tab. 1 Composition of the model mortars used for the experiment

Složka modelové malty	[kg / 1 m ³ čerstvé malty]		
	MM1	MM2	MM3
CEM I 42,5	570	780	500
vápenec JMV 8	300	410	-
struska SMŠ 400	-	-	500
polyfunkční přísada	11	14	10
voda	245	249,5	248
křemenný písek 0,1-1 mm	877	870	749
písek 0-0,5 mm	292	-	316

Účelné může být i zjednodušení složení zkoumaného materiálu vypuštěním některých inertních látek.

Pro potřeby představeného experimentu byla použita nestandardní minimalizovaná zkušební tělesa nikoli z primárních vyvinutých betonů, ale z odpovídajících tzv. modelových malt. Modelová malta (MM) je odvozena od modelovaného betonu tak, že si zachová složení cementového tmele (CT) příslušného modelovaného betonu a současně se originální kamenivo nahradí vhodným jemným kamenivem (k) podle velikosti zkušebních těles. Pokud chceme zachovat stabilitu a srovnatelnou zpracovatelnost MM s výchozím betonem (což je vhodné), musí se obvykle zvýšit poměr CT/k.

V našem případě byla celkem odvozena a vyrobena tělesa ze tří modelových malt. Malta MM1 nahradila, resp. reprezentovala v Prefě Brno reálně používaný beton a MM2 reprezentovala vylepšenou výchozí variantu betonu pro MM1 (stejně vstupní suroviny, ale snížený vodní součinitel a zvýšená dávka cementu). Beton, z něhož vycházela MM3, byl navržen tak, aby byl pokud možno co nejvíce trvanlivý – odpovídající mode-

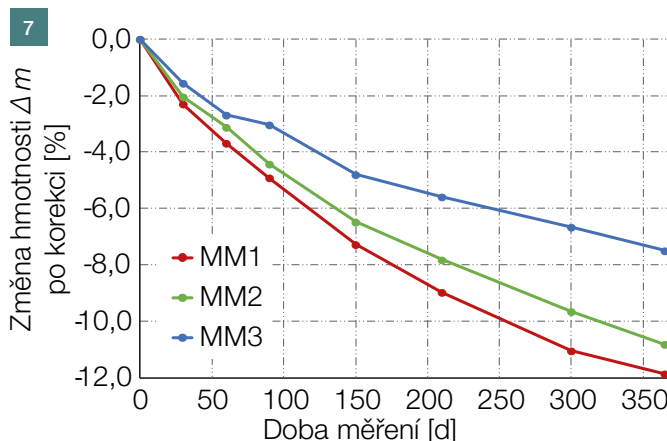
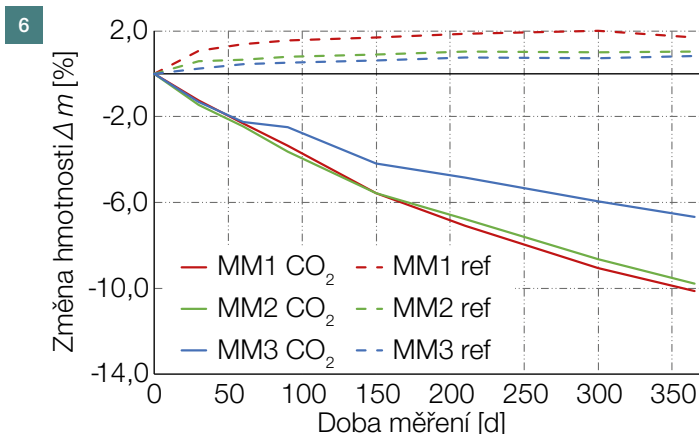
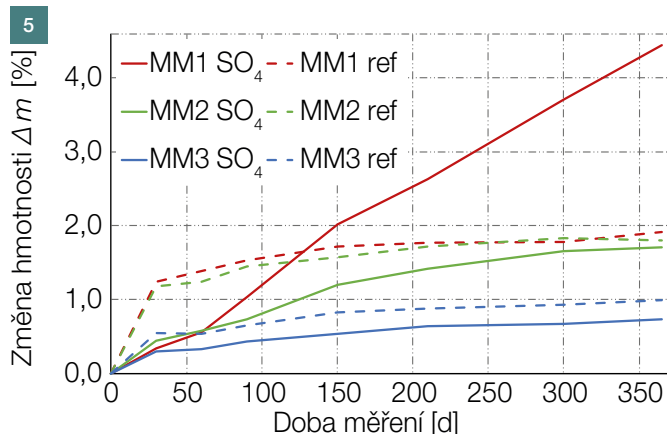
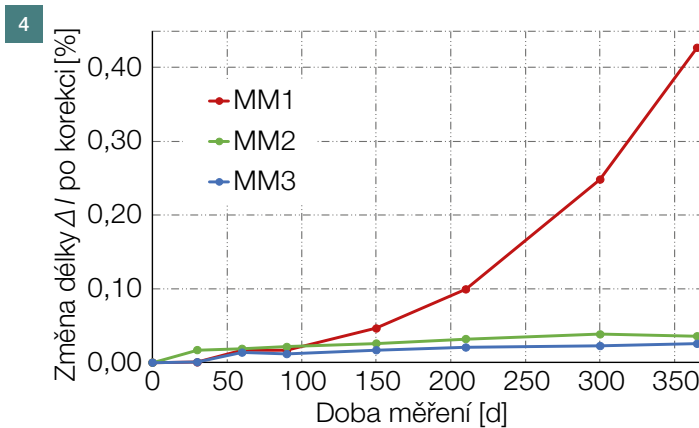
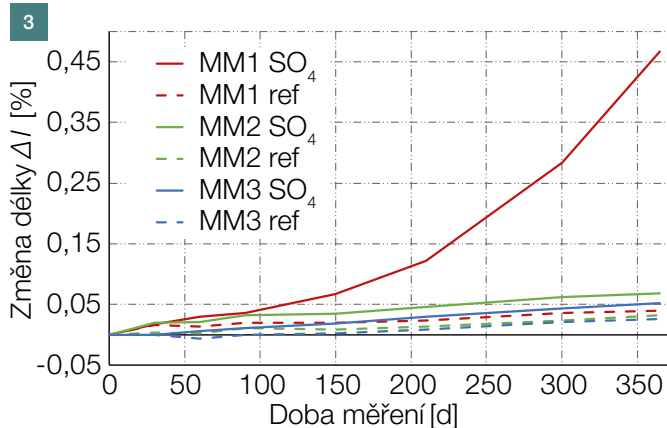
lová malta MM3 proto obsahovala navíc jemně mletou strusku a jinou polyfunkční přísadu, naopak byl vypuštěn jemně mletý vápenec JMV 8. Jako základní kamenivo pro MM byl použit křemenný písek v zrnitosti 0,1 až 1 mm a pro zvýšení stability čerstvé malty byl ještě u MM1 a MM3 použit jemný písek v zrnitosti 0 až 0,5 mm. Složení všech tří MM je uvedeno v tab. 1.

Sledované parametry

Jednou z nejdůležitějších voleb při návrhu metodiky korozních zkoušek je volba vhodných sledovaných parametrů, viz např. [15], [16]. S tím pochopitelně úzce souvisí i volba tvaru a velikosti zkušebních těles. Často se považuje za samozřejmé, že musí být sledována pevnost materiálu (nejlépe v tlaku). To ale v případě působení síranů na beton neplatí! Vzhledem k průběhu koroze (viz odstavec Modelová agresivní prostředí) může být sledování pevnosti v mnoha případech zavádějící. To platí zejména tehdy, není-li dodržena potřebná doba zkoušky. V případě působení demineralizované vody s CO_2 je sledování pevnosti v tlaku (vzhledem k nerovnoměrnému rozložení míry napadení atakované hmoty po průřezu zkušebních těles) rovněž problematické, a proto jsme sledování změn pevnosti testovaných MM záměrně vynechali. Pevnost v tlaku, jako destruktivní zkouška, navíc vyžaduje i neúměrně svému přínosu velký počet vyrobených těles.

V případě působení síranů jsme zvolili dvě základní a dvě doplňkové zkoušky, které jednoznačně indikují průběh koroze:

- sledování lineární expanze zkušebních těles,
 - sledování změn hmotnosti zkušebních těles,
- a doplnili je dvěma pomocnými kritérii:
- vizuální sledování postupu korozní fronty na řezu,
 - sledování procesu vzniku trhlin ve zkušebních tělesech.



3 Vývoj průměrných změn délky zkušebních těles modelových malt v korozi (SO₄) i referenčním prostředí **4** Vývoj změn délky zkušebních těles modelových malt v korozi (SO₄) po korekci o změnu délky těles uložených v referenčním prostředí **5** Vývoj průměrných změn hmotnosti zkušebních těles modelových malt v korozi (SO₄) i referenčním prostředí **6** Vývoj průměrných změn hmotnosti zkušebních těles modelových malt v korozi (CO₂) i referenčním prostředí **7** Vývoj změn hmotnosti zkušebních těles modelových malt v korozi (CO₂) po korekci o změnu hmotnosti těles uložených v referenčním prostředí

V případě působení demineralizované vody s CO₂ bylo možné sledovat pouze:

- změny hmotnosti těles,
- postup korozi fronty na příčném řezu těles.

Sledování změn délky zkušebních těles ani vznik trhlin zde vzhledem k charakteru koroze nemá smysl.

Zkušební tělesa a jejich uložení

Použitá zkušební tělesa rozměrově odpovídala zkoušeným hmotám a byla vystrojena podle parametrů, které na nich byly sledovány. Základním tělesem byl trámeček o rozměrech 22 x 22 x 88 mm. Od každé MM byly tři kusy zkušebních těles natřeny na přibližně 1/3 délky epoxidovým nátěrem,

čímž byl vytvořen úchop pro postupné odřezávání plátků. Všechny ostatní trámečky byly opatřeny manipulačním háčkem a vybrané trámečky pro sledování lineární expanze pak navíc i měřicími trny v čelech tělesa. Vystrojení zkušebních těles a jejich uplatnění je přehledně znázorněno na obr. 2.

Parametry náporových prostředí

Sírany: jako náporové prostředí pro síranovou agresi byl použit 5% roztok Na₂SO₄ v demineralizované vodě. To odpovídá koncentraci přibližně 33 500 mg iontů SO₄/l roztoku. Teoretická koncentrace byla ověřena analýzou vzorku provedenou ve specializo-

vané laboratoři. V polovině doby trvání experimentu byla nádoba pro síranovou korozi lázeň vyčištěna a lázeň o objemu 10 l obnovena. Do roztoku Na₂SO₄ byla od každé MM uložena čtyři tělesa pro sledování zvolených parametrů (lineární expanze, změna hmotnosti, vznik trhlin) a jedno těleso pro sledování změn materiálu v řezu tělesa.

Hladová voda s CO₂: agresivní prostředí bylo modelováno demineralizovanou vodou syčenou plynným oxidem uhličitým. Syčení se provádělo z tlakové lahve CO₂, opatřené redukčním ventilem. Zkušební tělesa byla umístěna ve speciální nádobě, která byla vložena do větší nádoby tak, aby při syčení nedošlo k nahodilému me-

chanickému poškození těles stoupajícími bublinkami CO₂. Reakcí agresivního CO₂ se zkušebními tělesy v lázni postupně stoupá podíl vázaného CO₂ ve vodě a odpovídajícím způsobem klesá podíl agresivního CO₂. Proto byla demineralizovaná voda korozní lázně pravidelně (až na výjimky) 1x týdně měněna a průběžně sycena (minimálně každý pracovní den) plynným CO₂.

Obsah agresivního CO₂ na vápenec se v průběhu testu pohyboval v rozmezí 483 mg/l (počátek cyklu) do 120 mg/l (konec cyklu). Objem lázně byl 19,5 l a od každé MM v ní byla uložena čtyři tělesa pro sledování změn hmotnosti a dvě tělesa pro sledování postupu korozní fronty na příčném řezu.

Kromě agresivních lázní byla připravena také referenční lázeň, kterou představovalo 10 l pitné vody z městského (brněnského) vodovodního řádu. Do referenční lázně byla od každé MM uložena čtyři tělesa pro sledování hmotnosti, čtyři tělesa pro sledování lineární roztažnosti a jedno těleso pro sledování změn v řezu. Použité zkušební lázně jsou schematicky zobrazeny na obr. 1.

PRŮBĚH EXPERIMENTU

Všechny modelové malty a tělesa z nich byly vyrobeny v jeden den, aby bylo možné provádět komparativní měření bez vlivu časového posunu. Po vlastním zamíchání byly malty nality (malty měly rovněž konzistenci modelovaných SCC) do lukoprenových forem s předem vloženou výstrojí (obr. 2). Následně byly naplněné formy 1 h ponechány na vzduchu, překryté byly pouze PE fólií. Na dalších 24 h pak byly formy se zkušebními tělesy uloženy v prostředí se 100% vlhkostí. Po 24 h byla zkušební tělesa z forem vyjmuta a část z nich (opět obr. 2) opatřena epoxidovým nátěrem. Následně byla zkušební tělesa opět vložena na dalších 24 h do prostředí se 100% vlhkostí. Po této době byla všechna zkušební tělesa přemístěna do vodovodní vody, kde setrvala až do stáří 7 dní. Teprve takto ošetřená zkušební tělesa byla připravena pro vložení do korozních a referenčního prostředí.

Po 7 dnech od zhotovení, těsně před vložení do příslušných prostředí, byla provedena výchozí (nultá) měření základních sledovaných parametrů, tedy hmotnosti a výchozí délky zkušebních těles. Tělesa byla rovněž vyšetřena z hlediska výskytu trhlin s negativním výsledkem. Další měření ve stejném rozsahu proběhla po 30, 60, 90, 150, 210, 300, 330 a 365 dnech od uložení

těles do jednotlivých prostředí. Stáří zkušebních těles tedy bylo vždy o 7 dní větší. Po 365 dnech od výchozího měření byla zkouška ukončena.

DISKUZE VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU

Naměřená data a jejich vzájemné relace jsou zachyceny grafickou formou na obr. 3 až 7. V prezentovaných grafech jsou vždy vyneseny průměrné hodnoty získané z měření na čtyřech zkušebních tělesech. Ve vyhodnocení byly vždy uvažovány čistá hmotnost a čistá délka těles, tj. bez případné výstroje. Pro všechny grafy společně platí, že jednotlivé MM jsou v grafech odlišeny barevně, přičemž plná čára znázorňuje parametry příslušné MM u vzorků uložených v agresivním prostředí a přerušovaná čára znázorňuje odpovídající hodnoty stejného parametru u vzorků uložených v referenčním prostředí.

Síranová agresivita: zjištěná data dokládají, že v odolnosti jednotlivých MM existují značné rozdíly. Jednoznačně nejhorší je podle očekávání malta MM1 reprezentující dosud standardně používaný SCC. Odstup od MM odvozených od alternativních betonů je až nečekaně velký. Přírůstek hmotnosti na konci zkoušky u MM1 byl 4,44 %, což je zdaleka největší hodnota (u MM2 byl tentýž přírůstek 1,71 %, u MM3 jen 0,73 %). Přírůstek délky 0,427 % byl u MM1 řádově větší než u MM2 (0,036 %) a u MM3 (jen 0,026 %).

Zajímavý pohled na trvanlivost testovaných materiálů dalo sledování vzniku trhlin. Ukázalo se, že i toto sledování/měření, jež jsme původně považovali spíše za doplňkové, může poskytnout zajímavé i přesvědčivé výsledky. Poznátky z experimentu ukázaly, že u zkušebních těles v aktuálním korozním prostředí lze v průběhu koroze definovat tři výrazná stadia/body:

- stadium 1: okamžik vzniku trhlin – objevují se první lokálně situované vlásové trhlinky,
- stadium 2: okamžik plného rozvoje trhlin – trhliny jsou na povrchu rozvinuty podél všech hran zkušebních těles a dosahují přitom šířky přibližně 0,1 až 0,2 mm,
- stadium 3: okamžik destrukce materiálu – trhliny povrchové šířky přibližně 1 mm (mluvíme o trhlínách na zkušebním tělese s příčnými rozměry 22 x 22 mm) již prostupují do větší hloubky materiálu tělesa, které se postupně rozpadá.

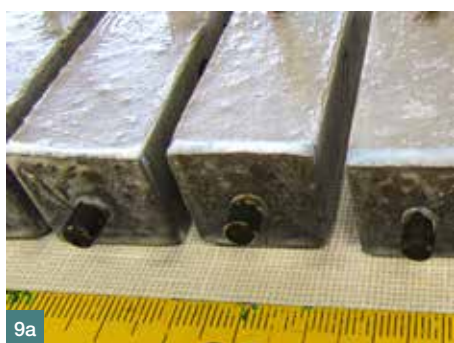
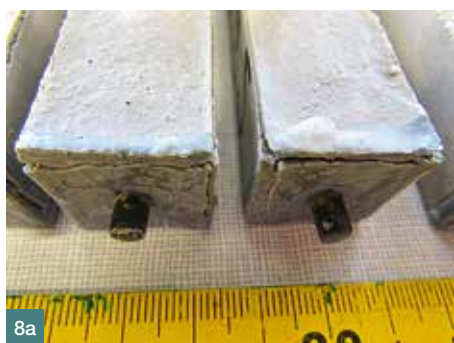
Promítneme-li tuto klasifikaci na náš

soubor výsledků, pak jsme u MM1 zaznamenali první trhlinky po 90 dnech a stadia 3 bylo dosaženo po 330 dnech (obr. 8). U vzorků MM2 se první trhlinky objevily po 150 dnech, na konci zkoušky (po 365 dnech) se materiál nacházel přibližně ve stadiu 2 (obr. 9). U zkušebních těles MM3 jsme našli první vlásové trhlinky až po ukončení zkoušky, a to jen na dvou ze čtyř zkušebních těles (obr. 10). Větší přehlednost výsledků poskytuje vždy jejich grafické vyjádření. Za tímto účelem jsme pro proces porušování trhlínkami definovali tzv. trojúhelník porušení. Ten si lze představit jako rovnoramenný trojúhelník se základnou odpovídající typické šířce trhlín stadia 3 (tzn. 1 mm), příp. 0,1 až 0,2 mm). Výška trojúhelníku pak odpovídá časové diferencii mezi stadii 1 a 3 (nebo 2 v závislosti na rozvoji trhlín během zkoušky). Pro plnou vypovídací schopnost je třeba trojúhelník ukotvit na časovou osu, což je pro sledované MM znázorněno na obr. 11.

Grafické znázornění procesu vzniku trhlín jednoznačně koreluje s ostatními výsledky a potvrzuje nadřazenost MM3 a odpovídajícího betonu. Jednoznačně nejhorší je MM1. Toto hodnocení platí jen pro případ síranové koroze obdoby parametrů.

Působení hladové vody s agresivním CO₂: z grafu na obr. 6 je patrné, že zatímco všechna tělesa uložena v referenčním prostředí nabývají na hmotnosti, hmotnost těles uložených v korozním prostředí se naopak výrazně zmenšuje. Pro lepší názornost, jakým způsobem jednotlivé MM koroznímu prostředí odolávají, byl zpracován druhý graf (obr. 7), na němž jsou hodnoty úbytků hmotnosti těles v agresivním prostředí korigovány o změnu hmotnosti odpovídajících těles uložených v referenčním prostředí.

Ze získaných výsledků vyplývá, že nejnižší odolnost vůči prostředí demineralizované vody s agresivním CO₂ vykazuje hmota MM1 (průměrný úbytek hmotnosti po 365 dnech činil téměř 12 %). Nejlepší odolnost vykazuje MM3 (průměrný úbytek hmotnosti po 365 dnech činil 7,5 %). Rozdíly mezi testovanými MM, zejména mezi MM3 a MM2, jsou však mnohem menší než v případě působení síranů. Na obr. 12 jsou fotograficky zachyceny řezy zkušebními tělesy jednotlivých MM po ukončení zkoušky. Lze konstatovat, že takto zachycené údaje (např. vizuálně určená tloušťka napadené vrstvy hmoty) nijak zřetelně nekoreluje se zjištěnými úbytky hmotnosti.



ZÁVĚR

Na základě průběhu a výsledků popsaného experimentu lze konstatovat, že takto provedená zkouška odolnosti vůči agresivnímu působení se osvědčila a splnila svůj účel, tj. jednoduše a průkazně porovnat odolnost sledovaných variant betonů vůči zvoleným typům koroze. V návaznosti na to můžeme konstatovat, že se osvědčila jak koncepce modelových malt, tak i pojetí zkoušky jako dvojnásobně komparativní. To např. umožnilo odfiltrovat dopady rozdílné „přirozené“ nasákavosti jednotlivých malt. Osvědčilo se i sledování vzniku a rozvoje trhlin a navazující koncepce trojúhelníku porušení.

Z hlediska testovaných malt můžeme konstatovat, že nejmenší odolnost vůči oběma agresivním prostředím vykazala podle očekávání MM1, která reprezentovala stávající nevylepšený beton.

U malty MM2 byla snaha vyšší korozní odolnosti dosáhnout zejména zvýšením hutnosti pojivového tmele beze změny komponent. V případě

síranové koroze bylo toto opatření až překvapivě účinné jak z hlediska změny hmotnosti zkušebních těles, tak i z hlediska zjišťovaného relativního roztažení. Zde byla odolnost MM2 téměř srovnatelná s odolností MM3. Z hlediska rozvoje trhlin však již dominovala MM3, u níž byla vedle zvýšené hutnosti pojivového tmele uplatněna i změna jejího složení. Díky vysokému obsahu strusky SMŠ 400 byl výrazně snížen absolutní i relativní obsah C_3A v pojivu, který je nutný pro vytvoření podmínek pro nejčastější formu síranové koroze za vzniku minerálu ettringit.

V případě koroze vyluhováním byly při stejném pořadí malt rozdíly v jejich odolnosti mnohem menší. To bylo zřejmě dáno především rozdílem v hutnosti pojivového tmele jednotlivých sledovaných modelových malt. Chemická podstata korozní reakce se nezměnila, změnila se jen rychlost přísunu agresivního prostředí do procesní zóny koroze. Odolnost MM3 mohla zvýšit i nepřítomnost jemně mletého vápence, který je

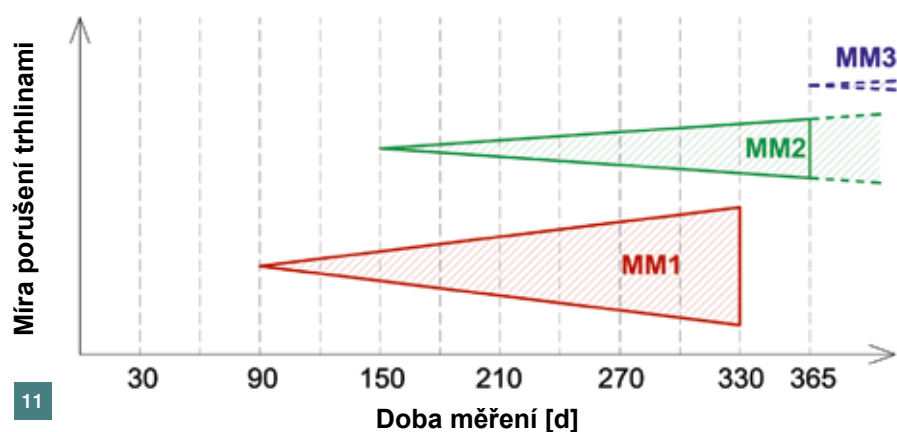
8 a), b) Zkušební tělesa z MM1 po ukončení korozních testů (SO_4), **c)** detail typického porušení (stadium 3) **9 a), b)** Zkušební tělesa z MM2 po ukončení korozních testů (SO_4), **c)** detail typického porušení (stadium 2) **10 a), b)** Zkušební tělesa z MM3 po ukončení korozních testů (SO_4), **c)** detail největšího porušení (vlasové trhlínky – stadium 1)

11 Časově ukotvené trojúhelníky porušení trhlínkami u modelových malt **12** Řezy zkušebních těles po zkoušce korozní odolnosti proti působení CO_2 (zleva doprava MM1 až MM3)

■ **8 a), b)** MM1 specimens at the end of the corrosion tests (SO_4), **c)** detail of typical damage (stage 3) **9 a), b)** MM2 specimens at the end of the corrosion tests (SO_4), **c)** detail of typical damage (stage 2)

10 a), b) MM3 specimens at the end of the corrosion tests (SO_4), **c)** detail of the most extensive damage (hair cracks – stage 1) **11** Time-anchored triangles of crack failures in model mortars **12** Cross sections of the specimens after the CO_2 -corrosion test (left to right MM1 through MM3)

někdy považován za snáze napadnutelný vyluhující korozí než kalcium-hydrosilikáty a jim podobné (Fe a Al) komplexy, vznikající při reakci portlandského cementu s vodou.



Článek byl vytvořen v rámci řešení projektu č. LO1408 „AdMaS UP – Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie“ podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu Národní program udržitelnosti I a projektu MPO FV10588 „Nová generace prostorových prefabrikátů z vysokohodnotných betonů se zvýšenou mechanickou odolností a trvanlivostí“ podporovaného Ministerstvem průmyslu a obchodu.

prof. Ing. Ivailo Terzijski, CSc.

Fakulta stavební VUT

Ústav betonových a zděných konstrukcí
terzijski.i@fce.vutbr.cz



Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.

Fakulta stavební VUT

Ústav stavebního zkušebnictví
dalibor.kocab@vutbr.cz



Ing. Jiří Strnad, Ph.D.

Fakulta stavební VUT

Ústav betonových a zděných konstrukcí
strnad.j@fce.vutbr.cz



Ing. Đorđe Čairović

Fakulta stavební VUT

Ústav betonových a zděných konstrukcí
dorđe.cairovic@vut.cz



Článek byl posouzen odborným lektorem.

The article was reviewed.

Literatura:

- [1] ROVNANÍKOVÁ, P. Vlivy prostředí na korozi betonu z pohledu chemických reakcí. *Beton TKS*. 2017, roč. 17, č. 2, s. 3–8.
- [2] *Understanding Cement* [online]. © 2005–2019 WHD Microanalysis Consultants Ltd. [cit. 2018-10-01]. Dostupné z: www.understanding-cement.com
- [3] ALEXANDER, M., BERTRON, A., DE BELIE, N. (Eds.) *Performance of Cement Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, State-of-art-report RILEM TC211 PAE*. Dordrecht: Springer Science + Business Media, 2013.
- [4] SKALNY, J., MARCHAND, J., ODLER, I. *Sulphates Attack on Concrete*. New York: Taylor & Francis e-Library, Spon Press, 2003.
- [5] ALAM, B., ASHRAF, M., SHAHZADA, K., AFZAL, S., KHAN, K. Sulphate Attack in High-Performance Concrete-A Review. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*. July 2012, Vol. 01, No. 01, pp. 15–18.
- [6] HANIFI, B., ORHAN, A. Sulfate resistance of plain and blended cement. *Cement and Concrete Composites*. January 2006, Vol. 28, Issue 1, pp. 39–46.
- [7] KELEŞTEMUR, O., DEMIREL, B. Effect of metakaolin on the corrosion resistance of structural lightweight concrete. *Construction and Building Materials*. April 2015, Vol. 81, pp. 172–178.
- [8] MARCOS-MESON, V., MICHEL, A., SOLGAARD, A., FISCHER, G., EDVARSDEN, C., SKOVHUS, T. L. Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete – A literature review. *Cement and Concrete Research*. January 2018, Vol. 103, pp. 1–20.
- [9] DEHWAH, H. A. F. Corrosion resistance of self-compacting concrete incorporating quarry dust powder, silica fume and fly ash. *Construction and Building Materials*. December 2012, Vol. 37, pp. 277–282.
- [10] ABD ELMOATY, A. E. M. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. *Construction and Building Materials*. October 2013, Vol. 47, pp. 743–752.
- [11] MORANVILLE, M., KAMALI, S., GUILLON, E. Physicochemical equilibria of cement-based materials in aggressive environments - experiment and modelling. *Cement and Concrete Research*. September 2004, Vol. 34, Issue 9, pp. 1569–1578.
- [12] MALTAIS, Y., SAMSON, E., MARCHAND, J. Predicting the durability of Portland cement systems in aggressive environments - Laboratory validation. *Cement and Concrete Research*. September 2004, Vol. 34, Issue 9, pp. 1579–1589.
- [13] BELLMANN, F., MOSER, B., STARK, J. Influence of sulphate concentration on the formation of gypsum in sulphate resistance test specimen. *Cement and Concrete Research*. February 2006, Vol. 36, Issue 2, pp. 358–363.
- [14] MONTEIRO, P. J. M., ROESLER, J., KURTIS, K. E., HARVEY, J. *Accelerated Test for Measuring Sulfate Resistance of Hydraulic Cements for Caltrans LLPRS Program*. Berkeley: University of California, 2000.
- [15] COLLEPARDI, M. Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete. *Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology*. 2001, Vol. 200, pp. 21–38.
- [16] ASTM C1012 / C1012M - 18a. *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018.