

MOŽNOSTI POČÍTAČOVÉ TOMOGRAFIE PRO NEDESTRUKTIVNÍ ANALYZOVÁNÍ STRUKTURNÍCH ZMĚN MALTY VYSTAVENÉ KOMBINACI NEPŘÍZIVÝCH VLIVŮ ■ POSSIBILITIES OF COMPUTED TOMOGRAPHY FOR NON-DESTRUCTIVE ANALYSING OF STRUCTURAL CHANGES OF MORTAR EXPOSED TO ADVERSE EFFECTS COMBINATION

Tomáš Melichar, Jiří Bydžovský

Článek je zaměřen na využití počítačové tomografie (jako jedné z metod) pro nedestructivní analyzování třídímenzální struktury nově vyvíjené malty vystavené kombinaci nepříznivých vlivů. Konkrétně byl kompozit na bázi směsné polymercementové matrice, pórovitého a hutného kameniva vystaven působení prostředí o zvýšené koncentraci oxidu uhličitého s následným namáháním extrémními teplotami. Vyvíjená hmota byla exponována v plynném prostředí po dobu 3 a také 5 měsíců s následným teplotním šokem až do 1000 °C. Kromě posouzení tomografem byly sledovány a hodnoceny i vybrané fyzikálně-mechanické či chemické charakteristiky včetně mikrostruktury. Nastolené podmínky simulovaly kritický scénář, který se může odehrát na reálné konstrukci. Vyvíjený materiál by mohl nalézt uplatnění v dopravním stavitelství např. při sanaci ostění tunelů. ■ The article is focused on use of computed tomography (as one of methods) for non-destructive analysing of three-dimensional structure of a newly developed mortar exposed to combined adverse effects. This composite based on blended polymer-cement matrix, lightweight and dense aggregate, was exposed to environment of increased concentration of carbon dioxide with subsequent stress by extreme temperatures. The developed material was exposed to gas environment for 3 and also 5 months with further thermal shock up to 1000°C. Except the assessment by tomography, selected physical-mechanical or chemical characteristics including microstructure were monitored and evaluated. Set-up conditions simulated a critical scenario that could take place on a real structure. The developed material could be applied in transport engineering e.g. rehabilitation of tunnel lining.

Trvanlivost patří mezi klíčové vlastnosti stavebních hmot. Při vývoji nových či inovaci a optimalizaci složení stávajících materiálů je nutné soustředit se na jejich chování v různých nepříznivých prostředích. Výsledné vlastnosti a jejich změny ovlivňuje řada faktorů. Běžným jevem, ke kterému dochází při expozici cementových hmot klimatickým podmínkám exteriéru, je karbonatace. Zjednodušeně lze konstatovat, že při karbonataci

reaguje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ obsažený v cementové matrici s CO_2 , pocházejícím z atmosféry, za vzniku CaCO_3 . Komplex reakcí probíhající při karbonataci je však mnohem komplikovanější. Během karbonatace totiž dochází v několika fázích k různým jevům, což ve svém důsledku vede ke zhoršení vlastností výsledného kompozitu na bázi cementové matrice.

Touto problematikou se již zabývalo a stále zabývá mnoho autorů. Odolnost betonu vůči karbonataci podrobně popsal Thomas a kol. [1], Kou a kol. [2], Faella a kol. [3], Sisomphon a Franke [4], Matoušek a Drochytka [5]. Zhoršení vlastností konstrukčního materiálu vlivem karbonatace by mohlo mít zásadní vliv na jeho chování v různých extrémních situacích, např. při působení vysokých teplot při vzniku požáru. Jevy, které nastávají při rostoucí teplotě v kompozitních materiálech na bázi cementové matrice (malty, betony atd.) jsou taktéž poměrně podrobně definovány v mnoha vědeckých publikacích. Byly popsány i např. vlivy různého složení hmot na teplotní odolnost, což uvádí např. Horszczaruk a kol. [7], Wang [8] a Donatello a kol. [6]. Nicméně je patrné, že za reálných podmínek působí běžně více nepříznivých vlivů buď následně za sebou, či v nehorším případě současně. Synergické působení různých činitelů se pak projeví mnohem negativněji na vlastnostech a chování daného materiálu. Působení vysokých teplot s následným posouzením odolnosti vůči karbonataci prezentuje např. Wang a kol. [9]. Autoři tohoto článku se zabývají situací, kdy byl beton vystaven teplotnímu namáhání a následně prostředí o zvýšené koncentraci CO_2 . Zajímavý a neméně podstatný je ovšem i případ, kdy beton či malta odolává dlouhodobému působení CO_2 s následným vznikem požáru, což příliš prozkoumáno není. Wang a kol. poměrně detailně zkoumá vlastnosti dvou typů betonu (typické složení a modifikované pojivo vysokoteplotním popílčkem) při působení maximální teploty 550 °C. Teploty požáru však mohou dle výzkumu, který prezentuje Garlock a kol. [10]

dosahovat běžně i 1200 °C, proto je v tomto článku věnována pozornost právě ověření nově vyvíjené malty s obsahem zvýšeného množství alternativních surovin při synergickém působení několika nepříznivých prostředí. Konkrétně jde o analýzu vlivu karbonatace s následným teplotním zatížením až do 1000 °C. Pro podrobné studium strukturních změn testované hmoty je využito rentgenové tomografie (Computed Tomography, CT), což není pro tento účel příliš rozšířená metoda. Hodnocením pórovité struktury a trhlin v cementové pastě vystavené vysokým teplotám se zabývá např. Kim a kol. [11], jehož výzkum prokázal, že při teplotách nad 900 °C se vytvořila ve zkoumaných vzorcích síť trhlin zapříčiňující explozivní odstřelování. Využití analytické metody CT pro hodnocení struktury stavebních materiálů prezentuje také např. Wang a Dai [12]. Tito autoři posuzovali pórovitý systém vč. molekulární difuze cementových malt.

METODIKA

Při návrhu receptury polymercementové malty byl zohledněn fakt, že by se tato hmota měla vyznačovat jednak odolností vůči extrémním teplotám a současně by měla být i rezistentní vůči klimatickým vlivům (působení oxidu uhličitého). Záměrem bylo rovněž aplikování co možná nejvyššího množství alternativních surovin, jejichž využívání šetří primární zdroje. Jako pojivo byl použit portlandský cement (CEM I 42,5 R), který byl substituován v množství 35 % jemně mletou granulovanou vysokopepnicí struskou. Pro modifikaci pojiva byla využita také polymerní přísada, konkrétně disperzní prášek kopolymeru vinylacetátu a etylenu. Pro dosažení dobré teplotní odolnosti a současně pro zajištění dostatečných parametrů byla použita směs hutného a pórovitého kameniva. Směs kameniva sestávala z popílkového agloporitu o velikosti zrn 0 až 1 mm a amfibolitu o velikosti zrn 1 až 2 mm. Agloporit byl použit s ohledem na jeho schopnost odolávat působení zvýšené teploty, což proká-

Tab. 1 Složení testované receptury pro kombinované působení oxidu uhličitého a vysokých teplot ■ Tab. 1 Composition of tested mixture for combined effect of carbon dioxide and high temperatures

Složka	Množství [kg.m ⁻³]
cement – CEM I 42,5 R	423
jemně mletá granulovaná vysokopepční struska	205
kopolymer vinylacetátu a etylenu	20
mikrosilika	26
agloporit 0-1 mm	621
amfibolit 1-2 mm	497
polypropylenová vlákna	1,2
voda	154

zal např. Černý a kol. [13]. Skutečnost, že lze s využitím agloporitu dosáhnout vysoké pevnosti výsledného kompozitu, prezentuje Černý a kol. [14] možnost výroby lehkého vysokopevnostního betonu. Podstatnou složkou malty byla také polypropylenová vlákna. Dále byla využita také mikrosilika v dávce 4 % (z pojiva). Konzistence byla regulací dávky vody upravována tak, aby bylo docíleno dobré plastičnosti a přilnavosti čerstvé malty. Důvodem dosažení takovéto konzistence je možnost aplikace malty jako např. správkové hmoty pro opravy železobetonových konstrukcí. Pórovité kamenivo bylo předem nasyceno vodou. Nasákavost tohoto kameniva dosahuje cca 39 až 45 % (dle použité frakce). Míra nasycení z maximální nasákavosti činila 78 až 90 %. Nelze exaktně stanovit, kolik vody se uvolnilo během míchání směsí, tj. přesný vodní součinitel. Podrobné složení receptury analyzované malty je uvedeno v tab. 1.

Celkem byly vyrobeny tři sady zkušebních těles o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. První sada těles byla testována po 28 dnech zrání, další dvě sady těles byly určeny pro dlouhodobější testování, tj. po třech a pěti měsících. Pro posouzení odolnosti vůči karbonataci byly malty uloženy v klimatizační komoře obsahující CO₂ o koncentraci 1 % při relativní vlhkosti 60 % tak, aby byla expozice ukončena ve stáří těles tří a pěti měsíců. Pro sledování vlivu extrémního teplotního namáhání byla všechna tělesa exponována při teplotách 22 (referenční), 400, 600 a 1000 °C, a to jak po 28 dnech, tak po třech a pěti měsících. Tímto postupem bylo možné vzájemně komparovat vlastnosti a příp. mikrostrukturu v různém stáří a při působení různých expozičních podmínek.

Teplotní zatěžování probíhalo v elek-

trických pecích s možností nastavení řízeného teplotního režimu. Nárůst byl zvolen cca 10 °C/min vždy na danou maximální teplotu. Izotermní výdrž byla udržována po dobu 90 min. Chlazení probíhalo pozvolně v pecích při poklesu teploty přibližně 1 °C/min. Pro hodnocení vlivu synergického působení expozičních podmínek byly u všech těles stanoveny objemové hmotnosti, změny hmotnosti a pevnostních charakteristik (pevnost v tlaku a tahu za ohybu) vč. vizuálního hodnocení. Využity byly jak fyzikálně-mechanické, tak fyzikálně-chemické (XRD – rentgenová difrakční analýza, DTA – diferenční termická analýza a FFT – fenolftaleinový test), resp. mikrostrukturní analýzy (SEM – elektronová mikroskopie a CT – počítačový tomograf). SEM a CT byly využity pouze pro vybraná zkušební tělesa, jejichž průběh vlastností se jeví jako nejpodstatnější a zajímavý z hlediska probíhajících dějů ve struktuře, resp. mikrostruktuře analyzovaných malt.

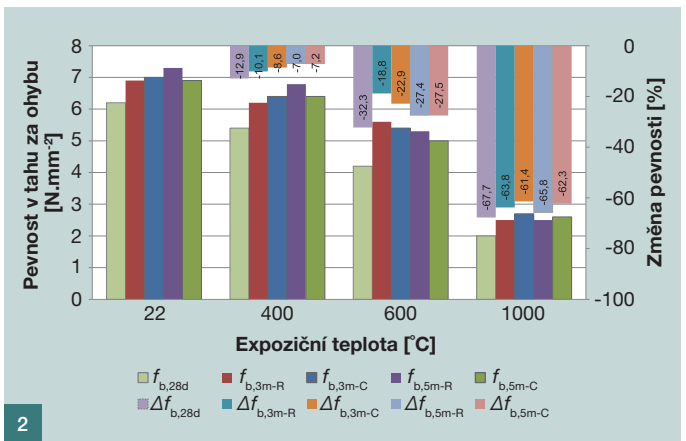
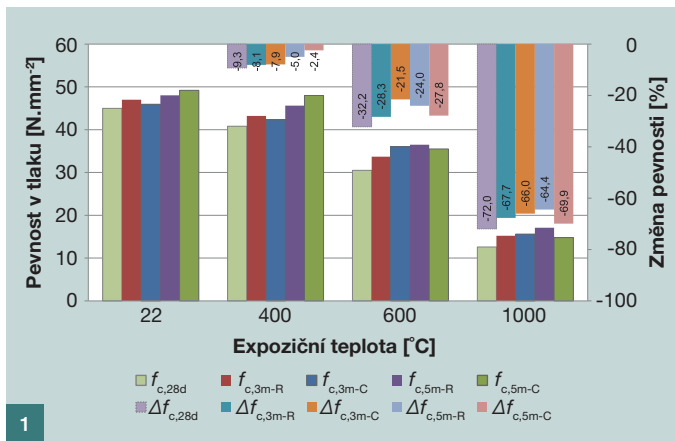
VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

Z hlediska testovaných parametrů byla nejprve stanovena objemová hmotnost a změny hmotnosti. Vzhledem k tomu, že difference mezi maltami různého stáří a uložení byly zanedbatelné, není zde graf uveden. Souhrnně lze s ohledem na změnu hmotnosti konstatovat, že expozicí při 1000 °C docházelo k průměrnému poklesu do 10 %, přičemž teplotně neexponovaná malta vykazovala po 28 dnech 1770 kg.m⁻³, po 3 měsících 1810 kg.m⁻³ a po 5 měsících 1840 kg.m⁻³.

Další hodnocenou charakteristikou byla pevnost v tlaku (obr. 1). Jak je patrné, tlaková pevnost se s rostoucím stářím malty zvyšuje. Průměrné hodnoty pevnosti byly stanoveny v rozmezí cca 45 až 48 N.mm⁻² (bez teplotní expozice). Nepatrný nárůst pevnosti v tlaku se projevilo po pětíměsíční expozici v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂. Jednalo se však pouze o změny v minimální míře. Při průběhu karbonatace jsou zdrojem krystalů kalcitu prekurzory Ca(OH)₂ (portlandit ve zhydratované matici) a CO₂ (z agresivního prostředí). Pro počáteční fázi karbonatace vlivem působení CO₂ je u cementových kompozitů charakteristický nárůst pevností. Zlepšování fyzikálně-mechanických vlastností je způsobeno postupným zaplňováním pórů vzniklými produkty. Problém nastává následně, až poté co dojde k zaplňování pórů a rekrystalizaci uhličitanových novotvarů. Tehdy začíná

postupné narušování struktury vyvolané krystalizačními tlaky. Vzhledem k tomu, že testovaná malta obsahuje pórovité kamenivo, by však mohl být negativní projev případně vzniklých expanzních tlaků vlivem tvorby kalcitu do určité míry eliminován. S ohledem na dosažené pevnosti v tlaku lze usuzovat na velmi mírný až zanedbatelný vliv karbonatace a to pouze pro stáří pět měsíců. Podstatná je také skutečnost, že karbonataci mohly být zasazeny spíše pouze povrchové partie, což by pro exaktní posouzení ovlivnění mechanických vlastností tímto jevem vyžadovalo využití např. metod pro stanovení tvrdosti povrchu. Hloubka karbonatace byla fenolftaleinovým testem hodnocena až v následující fázi výzkumu (obr. 5). Trend mírného zvyšování tlaku vlivem stáří a příp. karbonatace je patrný pouze po teplotní expozici malty do 400 °C. Uvedené skutečnosti naznačují, a tedy potvrzují, že testovaná malta by se mohla nacházet (pokud se nachází) ve velmi raném stadiu karbonatace. Během tohoto stadia ještě nelze zaznamenat chemické, resp. mineralogické změny ve výrazné míře. Jemnozrnný aragonit se rozkládá cca od teploty 700 °C a hrubozrnný vaterit až od přibližně 800 °C. Pokud by byl tedy kalcit obsažen ve zvýšeném množství, rostoucí trend pevnosti zkarbonatované malty by byl s největší pravděpodobností zachován, a to i příp. u malty exponované až do teploty cca 700 °C (při této teplotě se již začíná aragonit rozkládat). Zde by však také mohl hrát nezanedbatelnou roli vliv dekompozice i ostatních hydratačních produktů silikátové matrice, jako např. hojně obsažený portlandit a CSH fáze s amorfni strukturou.

Expoziční teplota 400 °C měla na pevnost v tlaku téměř zanedbatelný vliv, tj. pokles do cca 10 %. Znatelnější difference byly patrné až od zatížení teplotou 600 °C, kdy se poklesy tlakové pevnosti pohybovaly v intervalu 21,5 až 32,2 %. Expoziční teplota 1000 °C se již projevila na pevnosti v tlaku ve větším měřítku. Dosažené hodnoty naznačují mírné zlepšování teplotní odolnosti s rostoucím stářím malty. Jedná se však o difference v řádu několika procent. Byl identifikován mírně negativní vliv CO₂ o zvýšené koncentraci po pětíměsíčním uložení, kdy si referenční malta po teplotním namáhání 1000 °C zachovala 35,6 % pevnosti v tlaku a malta exponovaná CO₂ vykazovala reziduální tlakovou pevnost 30,1 %. Vzhledem



k tomu, že průběh teplotní odolnosti je v případě jednotlivých expozičních teplot variabilní, nelze exaktně a s jistotou na základě pevnosti v tlaku konstatovat, že se jednalo o negativní vliv výhradně způsobený karbonatací.

Ohybové pevnosti malty (obr. 2) se v porovnání s pevností v tlaku vyznačovaly již odlišným trendem. Po pěti měsících byl zaznamenán úbytek pevnosti v méně výrazné míře. Malty v prostředí bez zvýšené teploty vykazovaly pevnosti v tahu za ohybu v intervalu 6,2 až 7,3 N.mm⁻². Mírný nárůst pevnosti v tlaku vlivem expozice v prostředí se zvýšenou koncentrací CO₂ byl zaznamenán pouze v případě malty vystavené tomuto negativnímu vlivu po dobu tří měsíců. Při expozici ve zmíněném prostředí po dobu pěti měsíců se však tento rostoucí trend neprojevil. Na základě průběhů pevnosti v tahu za ohybu včetně vlivu teplotního namáhání nelze jednoznačně usuzovat na negativní vliv karbonatace, a to jak na sledovanou pevnostní charakteristiku, tak na teplotní odolnost. Lze pouze konstatovat, že výsledky poukazují na dosažení velmi dobré teplotní odolnosti. Zbytková pevnost v tahu za ohybu po teplotním namáhání 1000 °C dosahuje v případě malty vystavené působení CO₂ po pěti měsících 2,6 N.mm⁻² (přibližně 38 % referenční hodnoty ohybové pevnosti).

Malty byly hodnoceny také vizuálně, na obrázcích jsou zachycena reprezentativní zkušební tělesa ve stáří pěti měsíců po uložení v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ a i s následným působením extrémní teploty 1000 °C (obr. 3 a 4). Jedná se o tělesa po provedení zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Jak je patrné z pořízených snímků, na lomových plochách nejsou patrné prakticky žádné poruchy. Lze pouze zaznamenat výraznější změnu odstínu zejména polymercementové matrice.

Při vizuálním pozorování trhliny identifikovány nebyly. Struktura hmoty se jeví kompaktní, a to jak na povrchových partiích, tak na lomové ploše reprezentující vnitřní strukturu.

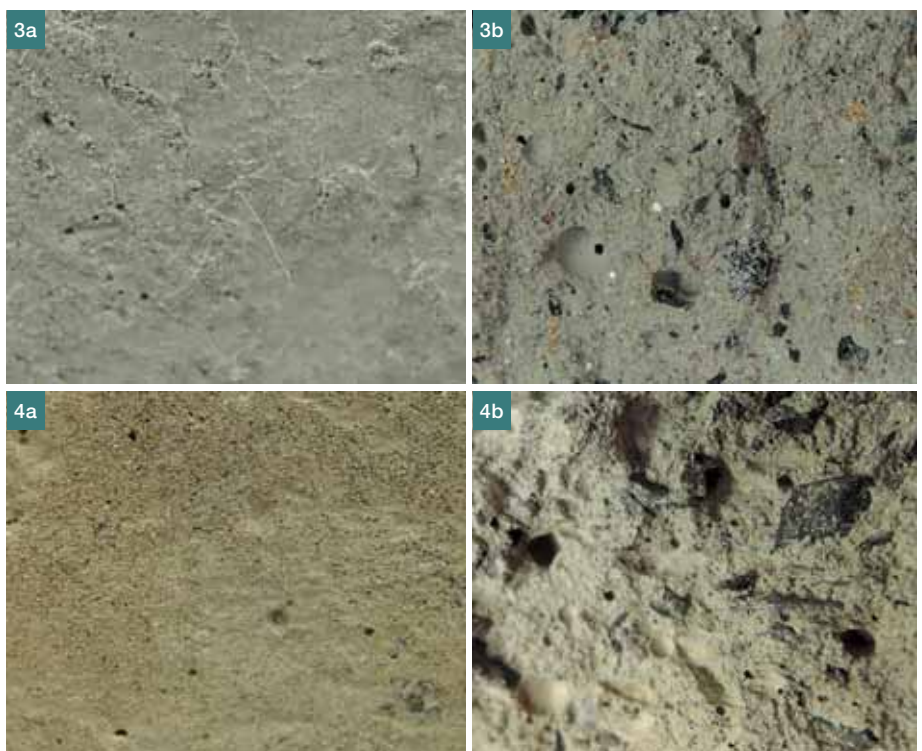
Hloubka karbonatace neboli přesněji změna pH malty, což s průběhem karbonatace souvisí, byla stanovena fenolftaleinovým testem. Pokles pH pod hodnotu 9,5, což fenolftaleinový test prokazuje, je charakteristický pro III. a IV. etapu karbonatace, kdy již dochází ke zhoršování parametrů daného kompozitu s matricí na cementové bázi. Fenolftalein byl aplikován pouze na lomové plochy zkušebních těles teplotně neexponovaných, a to ve stáří tři a pět měsíců. Reprezentativní tělesa jsou zachycena na snímcích na obr. 5. Průměrná hodnota hloubky karbonatace se pohybovala ve stáří tři měsíce na úrovni 0,8 mm a v případě hmot o stáří pět měsíců pak kolem 2,9 mm. Je

Obr. 1 Porovnání pevnosti v tlaku a jejich změn | Fig. 1 Compressive strength and its changes comparison

Obr. 2 Porovnání pevnosti v tahu za ohybu a jejich změn | Fig. 2 Bending tensile strength and its changes comparison

Obr. 3 Vzorek malty exponované v prostředí se zvýšenou koncentrací CO₂ po pěti měsících bez teplotního namáhání (v grafech výše „5m-C“): a) povrch, b) detail lomové plochy | Fig. 3 Sample of mortar exposed to environment with increased concentration of CO₂ after 5 months without thermal stress (in graphs marked as „5m-C“): a) surface, b) detail of fracture area

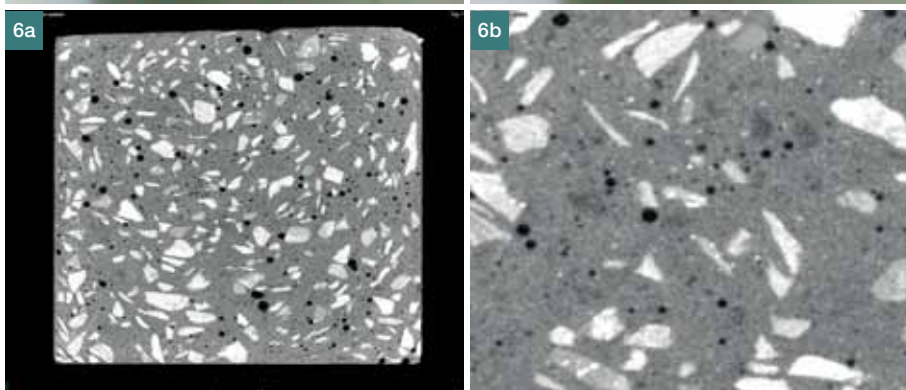
Obr. 4 Vzorek malty exponované v prostředí se zvýšenou koncentrací CO₂ po pěti měsících s následným namáháním teplotní expozicí 1000 °C (v grafech výše „5m-C“): a) povrch, b) detail lomové plochy | Fig. 4 Sample of mortar exposed to environment with increased concentration of CO₂ after 5 months and subsequent exposition to 1000 °C (in graphs marked as „5m-C“): a) surface, b) detail of fracture area



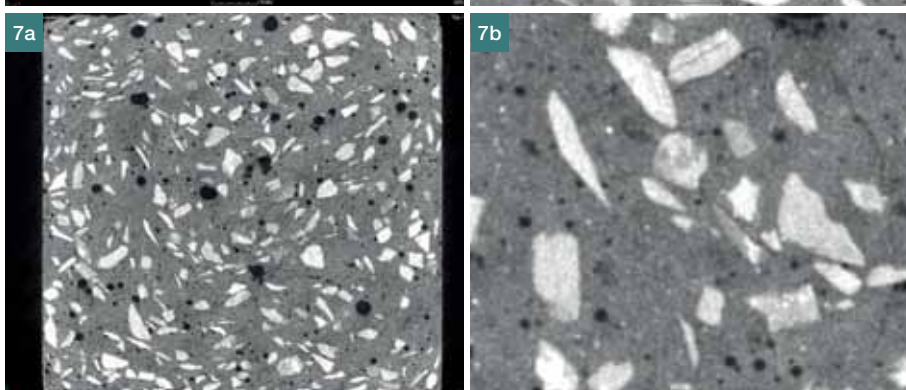
Obr. 5 Lomová plocha zkarbonatované malty: a) tři měsíce, b) pět měsíců bez vysokoteplotní expozice ■ Fig. 5 Fracture area of carbonated mortar: a) 3 months, b) 5 months without high temperature exposition



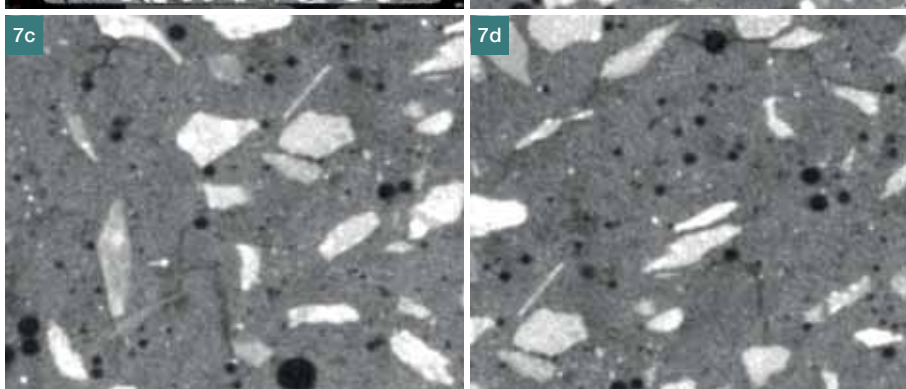
Obr. 6 CT snímek malty exponované po dobu tří měsíců v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ (v grafech značeno „3m-C“) bez následného teplotního namáhání: a) řez, b) detail ■ Fig. 6 CT picture of mortar exposed to environment of increased CO₂ concentration (in graphs marked as “3m-C”) without subsequent thermal stress for 3 months: a) cross section, b) detail



Obr. 7 CT snímek malty exponované po dobu 3 měsíců v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ (v grafech značeno „3m-C“) s následným namáháním teplotou 1000 °C: a) řez, b,c,d) detail ■ Fig. 7 CT picture of mortar exposed to environment of increased CO₂ concentration (in graphs marked as “3m-C”) with subsequent thermal stress 1000 °C for 3 months: a) cross section, b,c,d) detail



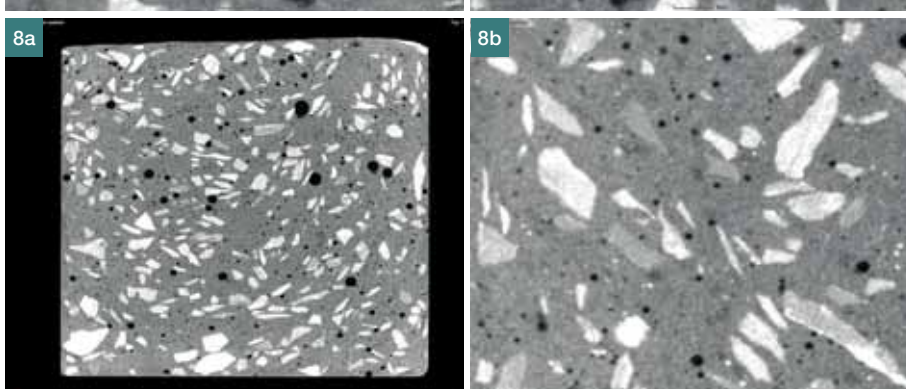
Obr. 8 CT snímek malty exponované po dobu pěti měsíců v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ (v grafech značeno „5m-C“) bez následného teplotního namáhání: a) řez, b) detail ■ Fig. 8 CT picture of mortar exposed to environment of increased CO₂ concentration (in graphs marked as “5m-C”) without subsequent thermal stress for 5 months: a) cross section, b) detail



však nutné brát v potaz, že testovaná malta obsahovala pórovité kamenivo – agloporit – a to o velikosti zrn v rozmezí 0 až 1 mm. Tato skutečnost má zásadní vliv na pórovitou strukturu finálního kompozitního materiálu, a tím i na difuzní vlastnosti kompozitního systému, což ve svém důsledku značně přispívá ke schopnosti lépe absorbovat různé plynné sloučeniny, mimo jiné i CO₂.

Struktura analyzované malty byla posouzena detailně pomocí CT. Ze snímků na obr. 6 a 8 je patrné, že struktura je poměrně kompaktní, kamenivo i pórovitý systém rovnoměrně rozloženy a matrice je bez výraznějších poruch či defektů. Na tělesech bez expozice v nepříznivém prostředí obsahujícím CO₂ včetně teplotního namáhání nebyly identifikovány prakticky žádné poruchy, a to i při detailnějším zkoumání. Dále jsou uvedeny pouze vybrané snímky malty testované po třech a pěti měsících, které zachycují strukturu zasaženou synergickým působením CO₂ a extrémních teplot (obr. 7 a 9). Jak je patrné, na tělesech byly po třech měsících zaznamenány trhliny o šířce v řádu μm, a to velmi ojediněle.

Trhliny vzniklé po teplotní expozici u malty exponované po dobu tří měsíců v prostředí obsahující CO₂ se tvořily jak v matrici, tak v kamenivu (zejména hutném). Při detailnějším pozorování výstupů z CT bylo zjištěno, že identifikov-



Obr. 9 CT snímek malty exponované po dobu pěti měsíců v prostředí o zvýšené koncentraci CO_2 (v grafech značeno „5m-C“) s následným namáháním teplotou $1\,000\text{ °C}$: a,e) řez, b,c,d,f,g,h,i,j) detail

Fig. 9 CT picture of mortar exposed to environment of increased CO_2 concentration (in graphs marked as “5m-C”) with subsequent thermal stress $1\,000\text{ °C}$ for 5 months: a,e) cross section, b,c,d,f,g,h,i,j) detail

vané trhliny se vyznačovaly šířkou v řádu μm (obr. 7b).

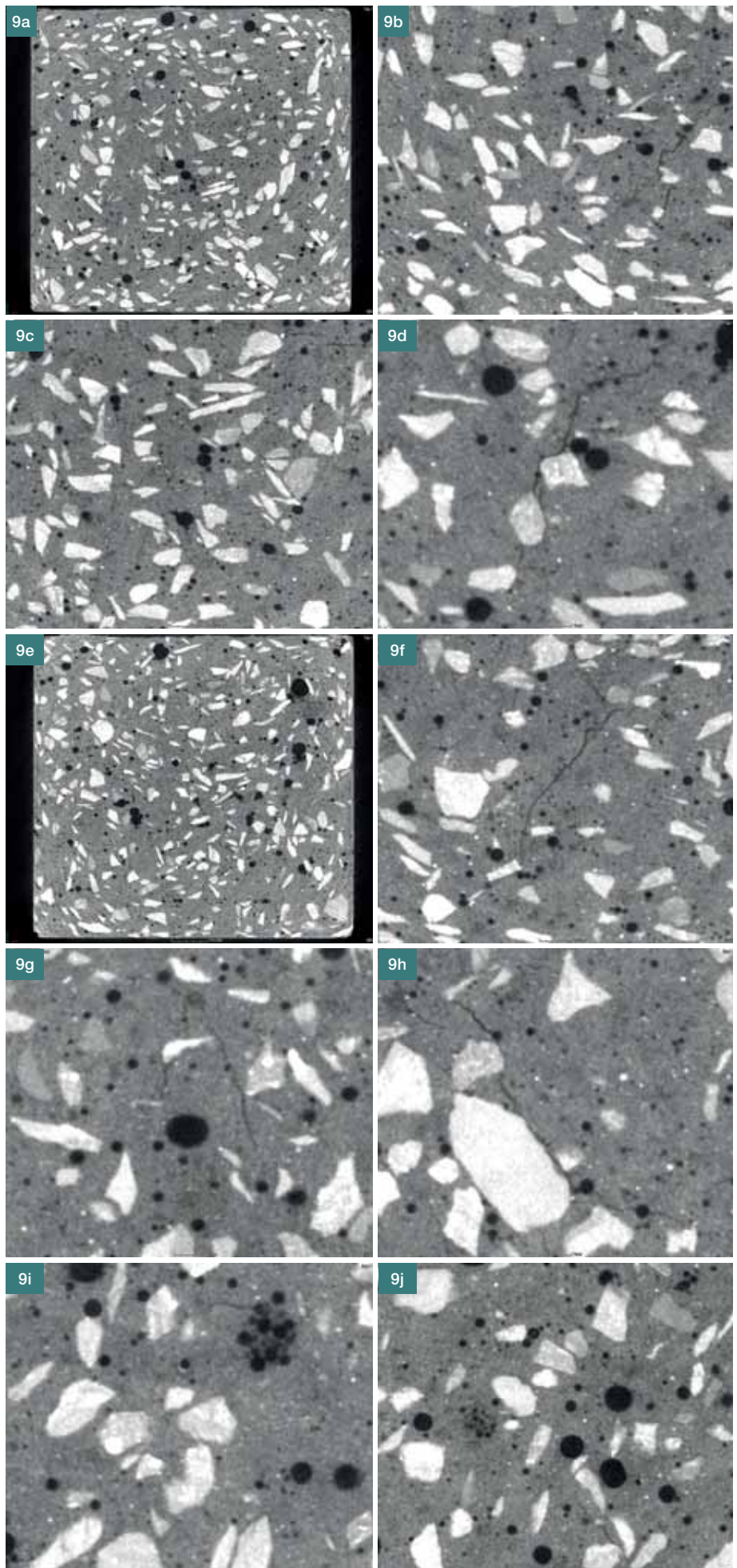
Při detailním pohledu na příčný řez (obr. 7c a 7d) je patrné, že se vlivem teplotního namáhání a působení CO_2 tvořily trhliny odlišného charakteru a délky. Byly zaznamenány jednak trhliny zasahující pouze matici, které byly nepravidelného průběhu, jednak bylo možné zpozorovat trhliny, které měly počátek v pórech, přičemž byly směrem od těchto pórů orientovány paprskovitě (obr. 7d) a nakonec se jednalo o trhliny, jež svým průběhem kopírovaly okraje zrn hutného kameniva, kdy takto orientované trhliny probíhaly kontinuálně i kolem více zrn kameniva současně a zasahovaly také k okraji pórů (obr. 7d).

V případě delší expozice v prostředí o zvýšené koncentraci CO_2 bez namáhání extrémními teplotami nebyly zaznamenány prakticky žádné trhliny či jiné poruchy, a to ani v okrajových partiích, kde byla fenoltaleinovým testem prokázána změna pH související s karbonací (obr. 8).

Snímky na obr. 9 zachycují strukturu malty po pětíměsíčním synergickém působení CO_2 a extrémních teplot. V tomto případě bylo zaznamenáno mírně vyšší množství poruch projevujících se vznikem trhlin. Opět však docházelo pouze k jejich minimálnímu výskytu. Dle výskytu byly zaznamenány převážně dva typy trhlin, a to trhliny tvořící se v oblasti pórů a dále trhliny v kontaktní zóně kameniva a matrice. Podstatné je, že se jednalo o kontaktní zónu hutného kameniva (amfibolitu). Velmi ojediněle byly identifikovány trhliny procházející maticí a pórovitým kamenivem (obr. 9b a 9f). V případě všech identifikovaných trhlin na tělesech ve stáří pěti měsíců byla opět zaznamenána šířka těchto trhlin pouze v řádech μm .

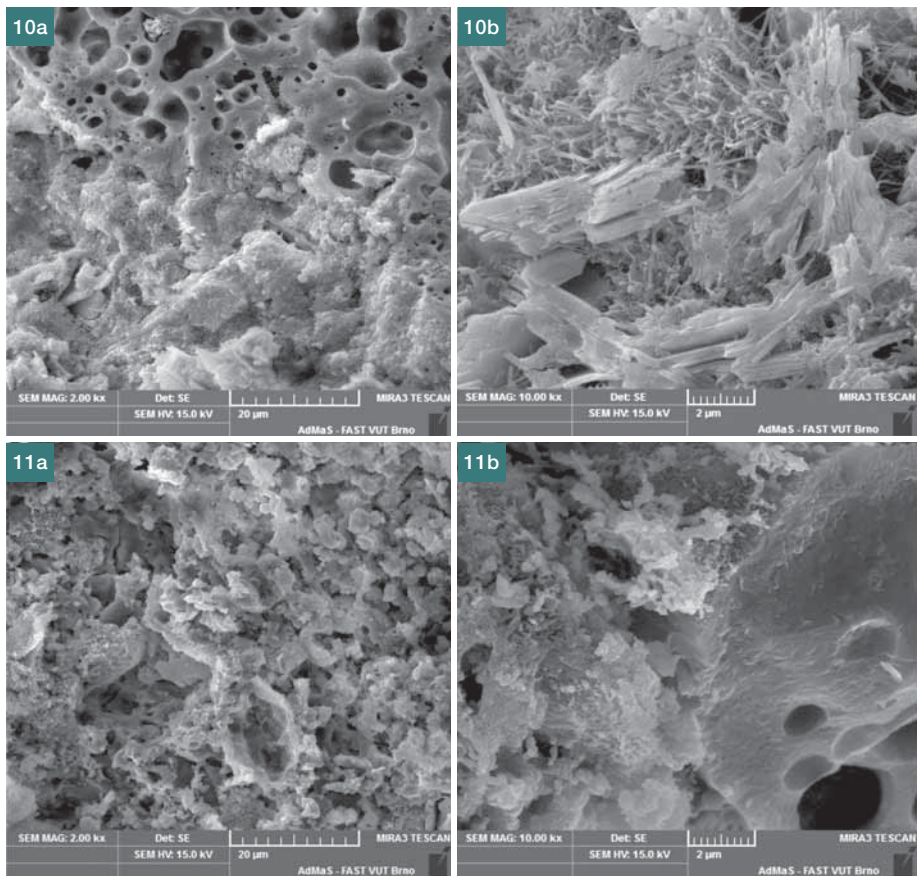
Ve struktuře byly místy patrné také trhliny probíhající kontinuálně na rozhraní matrice a hutného kameniva s návazností průběhu pórovitým kamenivem (obr. 9d).

Ve struktuře testované malty bylo možné místy evidovat zřetelně i větší zrna pórovitého kameniva (agloporitu), kdy bylo možné zpozorovat i drob-



Obr. 10a,b SEM snímek malty exponované v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ po pěti měsících ■ Fig. 10a,b SEM picture of mortar exposed to increased concentration of CO₂ after 5 months

Obr. 11a,b SEM snímek malty exponované v prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ po pěti měsících s následnou expozicí při 1000 °C ■ Fig. 11a,b SEM picture of mortar exposed to increased concentration of CO₂ after 5 months and subsequent exposition to 1000 °C



né trhliny nacházející se v oblasti tohoto kameniva (obr. 9i).

S ohledem na komplexní posouzení analyzované hmoty byly provedeny i další fyzikálně-chemické analýzy, konkrétně DTA a XRD, kterými byl kvantitativně a kvalitativně posouzen průběh karbonatace. Pro tyto analýzy byly odebrány vzorky jednak povrchových partií malty a jednak i z jádra zkušebního tělesa. Výsledky DTA (odebrané z jádra těles) poukazují na skutečnost, že došlo k mírnému zvýšení obsahu kalcitu (převážně ve formě aragonitu) v případě expozice malt prostředí o zvýšené koncentraci CO₂, což potvrdila i mírně zvýšená intenzita píků (XRD) kalcitu u vzorků exponovaných v komoře s obsahem CO₂. Výše uvedené tvrzení je však platné jen pro stáří malty pět měsíců a nárůst množství kalcitu byl stanoven pouze ve stopovém množství. Za dominantní složku matrice testované malty lze označit CSH gely, což se projevilo zejména na výstupech XRD. V případě vzorků odebraných z povrchových par-

tí byl analýzami zaznamenán i vaterit a vyšší intenzita píků kalcitu.

Pomocí elektronového mikroskopu bylo umožněno detailně prozkoumat mikrostrukturu testované malty. Pozornost byla zaměřena na posouzení synergetického působení plynného CO₂ o zvýšené koncentraci a extrémních teplot do 1000 °C. Při hodnocení mikrostruktury byl hodnocen stupeň narušení matrice, příp. kontaktní zóny mat-

rice a kameniva. Vybrané snímky SEM malty (vzorky odebrané z jádra zkušebních těles) ve stáří pěti měsíců jsou uvedeny na obr. 10 a 11.

Na snímcích SEM (obr. 10a) je zřetelně pozorovatelná typická struktura jak matrice, tak pórovitého kameniva včetně jejich kontaktní zóny, kdy se jednalo o maltu tepelně neexponovanou. Jak je patrné, matrice se jeví jako kompaktní s dokonalou návazností na povrch

Zdroje:

- [1] THOMAS, C., SETIEN, J., POLANCO J. A., et al. Durability of recycled aggregate concrete. *Construction Building Materials*. 2013, Vol. 40, p. 1054–1065.
- [2] KOU, S. C., POON, C. S. Long-term mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete prepared with the incorporation of fly ash. *Cement and Concrete Composites*. 2013, Vol. 37, p. 12–19.
- [3] FAELLA, C., LIMA, C., MARTINELLI, E., et al. Mechanical and durability performance of sustainable structural concretes: An experimental study. *Cement and Concrete Composites*. 2016, Vol. 71, p. 85–96.
- [4] SISOMPHON, K., FRANKE, L. Carbonation rates of concretes containing high volume of pozzolanic materials. *Cement and Concrete Research*. 2007, Vol. 37, No. 12, p. 1647–1653.
- [5] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R. *Atmosférická korozie betonů*. Praha: IKAS ČKAIT, 1998. ISBN 80-902558-0-9.
- [6] HORSZCZARUK, E., SIKORA, P., CENDROWSKI, K., MIJOWSKA, E. The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. *Construction and Building Materials*. 2017, Vol. 137, p. 420–431.
- [7] WANG, H. Y. The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. *Cement and Concrete Composites*. 2008, Vol. 30, No. 10, p. 992–999.
- [8] DONATELLO, S., KUENZEL, C., PALOMO, A., FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. High temperature resistance of a very high volume fly ash cement paste. *Cement and Concrete Composites*. 2014, Vol. 45, p. 234–242.
- [9] WANG, W., LU, C., LI, Y., YUAN, G., LI, Q. Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete. *Construction and Building Materials*. 2017, Vol. 138, p. 486–495.
- [10] GARLOCK, M., PAYA-ZAFORTEZA, I., KODUR, V., GU, L. Fire hazard in bridges: Review, assessment and repair strategies. *Engineering Structures*. 2012, Vol. 35, p. 89–98.
- [11] KIM, K. Y., YUN, T. S., PARK, K. P. Evaluation of pore structures and cracking in cement paste exposed to elevated temperatures by X-ray computed tomography. *Cement and Concrete Research*. 2013, Vol. 50, p. 34–40.
- [12] WANG, Y. S., DAI, J. G. X-ray computed tomography for pore-related characterization and simulation of cement mortar matrix. *NDT & E International*. 2017, Vol. 86, p. 28–35.
- [13] ČERNÝ, V. Quality of the structure of ash bodies based on different types of ash. *Materiali in Tehnologije*. 2015, Vol. 49, No. 4, p. 601–605.
- [14] ČERNÝ, V., KOCIÁNOVÁ, M., DROCHYTKA, R. Possibilities of Lightweight High Strength Concrete Production from Sintered Fly Ash Aggregate. *Procedia Engineering*. 2017, Vol. 195, p. 9–16.
- [15] ČSN EN 16016-1. *Nedestruktivní zkoušení – Radiografické metody – Počítačová tomografie – Část 1: Terminologie*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [16] ČSN EN 16016-2. *Nedestruktivní zkoušení – Radiální metody – Počítačová tomografie – Část 2: Princip, zařízení a vzorky*. Praha: ÚNMZ, 2012.
- [17] ČSN EN 16016-3. *Nedestruktivní zkoušení – Radiální metody – Počítačová tomografie – Část 3 Pracovní postup a vyhodnocení*. Praha: ÚNMZ, 2012.

kameniva (agloporitu). Dále byl identifikován karbonátový komplex (obr. 10b). Produkty karbonatace však byly v mikrostruktuře malt nalezeny velmi ojediněle.

Mikroskopem byla analyzována i dlouhodobě exponovaná malta s následným extrémním teplotním zatížením (obr. 11a), přičemž na tomto snímku je zachycena typická reprezentativní struktura testované malty po pěti-měsíční expozici v komoře obsahující CO₂ s následným teplotním šokem 1000 °C. Lze pozorovat degradovanou matici, což je způsobeno extrémní teplotou, a s tím souvisejícím rozkladem zejména hydratačních produktů (portlandit, CSH gely atd.) včetně případných produktů karbonatace, tj. uhličitých sloučenin (aragonit, karbonátový komplex aj.). I přes extrémní namáhání kombinací nepříznivých vlivů je patrné velmi dobré spolupůsobení pórovitého kameniva (agloporitu) s maticí (obr. 11b). Lze rovněž konstatovat, že pomocí SEM nebylo identifikováno větší množství trhlin, což koresponduje s výstupy CT.

ZÁVĚR

S přihlédnutím k dosaženým výsledkům a nabytým zjištěním lze konstatovat, že využitím vyššího množství alternativních surovinových zdrojů lze vyrobit polymercementový kompozit značně odolný vůči synergickému působení nepříznivých vlivů. Je možné usuzovat na velmi příznivé spolupůsobení popílkového agloporitu v polymercementové matici. Dále je evidentní, že vliv působení prostředí o zvýšené koncentraci CO₂ po dobu pěti měsíců nemá téměř žádný vliv na teplotní odolnost zkoumané polymercementové malty. Vhodným složením polymercementových kompozitů lze výrazně regulovat jejich výsledné (požadované) vlastnosti.

Podstatným zjištěním je skutečnost, že lokalita výskytu trhlin identifikovaných pomocí počítačové tomografie nekorespondovala s prokázanou oblastí karbonatace, kdy případné ojedinělé trhliny vznikaly rovnoměrně v celé struktuře zkušebních těles malt, přičemž karbonatace výrazněji probíhala pouze do vzdálenosti 3 mm od povrchu těles. Lze se proto domnívat, že příčinou vzniku trhlin je primárně působení extrémních teplot a vliv karbonatace je s ohledem na identifikované poruchy téměř zanedbatelný.

Počítačová tomografie se pro hodnocení struktury kompozitní hmoty zasa-

žené variací nepříznivých prostředí ukázala jako velmi účinná a efektivní, neboť pomocí této techniky bylo možné jednoznačně nedestruktivně prokázat vznik případných poruch, jejich četnost, charakter, lokalitu a koncentraci výskytu včetně ostatních podstatných faktorů vedoucích k objasnění chování konkrétní hmoty za daných působících podmínek. Pomocí počítačové tomografie lze rovněž posoudit trojrozměrnou strukturu dané hmoty z hlediska rozložení jednotlivých složek, jejich návaznost, homogenitu, příp. anomálie atd. Při vývoji nových progresivních hmot, příp. modifikace stávajících materiálů alternativními surovinami představuje CT zcela nepochybně moderní analytickou techniku, která má zajisté své nezastupitelné místo a uplatní se jako klíčová pro doplnění výstupů z běžně používaných analýz, jako je v tomto případě XRD, DTA, SEM a feroflataleinový test včetně stanovení základních fyzikálně-mechanických charakteristik (objemová hmotnost, pevnost atd.).

Z hlediska navazujícího výzkumu se jako velmi zajímavé jeví testování vyvíjené polymercementové malty v nepříznivém prostředí (obsahujícím CO₂) v řádu několika let a také i výrazněji akcelerovaným testem, např. s nastolením podmínek intenzivnější cirkulace CO₂ přímo skrz testovaný kompozit (zvýšením tlaku plynu apod.) se současným zvýšením koncentrace agresivního média.

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektu GA ČR 15-07657S s názvem Studium kinetiky dějů probíhajících v kompozitním systému při extrémních teplotách a vystavených agresivnímu prostředí. Článek byl dále vytvořen v rámci řešení projektu č. FAST-S-17-3874 s názvem Unikátní analytické metody pro posouzení souvislosti vlastností a struktury stavebních hmot na bázi surovin z alternativních zdrojů.

Ing. Tomáš Melichar, Ph.D.
e-mail: melichar.t@fce.vutbr.cz



doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
e-mail: bydžovskij@fce.vutbr.cz



oba: Fakulta stavební VUT v Brně
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.

INZERCE PRO VÁS!

EDIČNÍ PLÁN BETON TKS NA ROK 2018

Číslo	Hlavní téma	Objednáni inzerce	Dodání inzerce	Datum vydání
1/2018	Pozemní stavby	15. 1. 2018	23. 1. 2018	15. 2. 2018
2/2018	Technologie	15. 3. 2018	23. 3. 2018	17. 4. 2018
3/2018	Sanace a rekonstrukce	15. 5. 2018	23. 5. 2018	14. 6. 2018
4/2018	Mosty	16. 7. 2018	23. 7. 2018	15. 8. 2018
5/2018	Beton a architektura	14. 9. 2018	21. 9. 2018	15. 10. 2018
6/2018	Betonové vozovky	15. 11. 2018	23. 11. 2018	14. 12. 2018

CENÍK

Formát	Umístění	Cena v Kč
A4	4. strana obálky	80 000,-
A4	3. strana obálky	50 000,-
A4	vnitřní strana	35 000,-
1/2 A4	vnitřní půlstrana	20 000,-
1/3 A4	vnitřní třetina strany	15 000,-
1/4 A4	vnitřní čtvrtstrana	12 000,-
1/6 A4	inzerát nebo tisková zpráva	8 000,-
1/8 A4	inzerát nebo tisková zpráva	6 000,-
	propagační článek – za každou celou stranu	30 000,-
	klad vlastních propagačních materiálů	8 000,-

Ceny jsou uvedeny bez DPH.

Způsob placení: inzerce a PR články jsou placeny na základě faktury vystavené po jejich vytištění v časopise. Klient obdrží současně s fakturou dva výtisky časopisu, v případě zájmu lze přibírat větší množství.

SLEVY:

při opakování inzerátů v rámci ročníku - 10 %
pro členy SVC ČR, SVB ČR, ČBS ČSSI a SSBK - 15 %
při objednání inzerce do konce ledna - 10 %
při objednání celoroční inzerce (6 ks) - 5 %
Jiné možnosti či kombinace po dohodě s redakcí.

PŘÍRÁŽKY:

přesné umístění +10 %
grafické zpracování +10 %

TECHNICKÉ ÚDAJE

PRE-PRESS

zlom	InDesign	přibalit použitá písma a obrázky
inzerce	Acrobat	režim CMYK, formát PDF
grafika	Photoshop (bitmapa)	režim CMYK, formát TIFF
		min. rozlišení 300 b/p monochromatický režim, formát TIFF
média	Illustrator (vektory)	min. rozlišení 600 b/p
	CD, DVD, USB flash	režim CMYK, formát AI PC / MAC

TISK

čistý formát (maketa)	210 × 297 mm
barevnost	4 barvy (CMYK)
technologie tisku	plochy ofset
papír obálka	250 g/m ² lesklá křída/lamino
papír vnitřní strany	150 g/m ² matná křída
tiskový rastr / rozlišení	175 lpi / 3810 dpi

Nepoužívejte prosím formát Corel, ale export pro AI (všechny texty v křivkách, obrázky ve CMYK režimu).
Není možné použít inzeráty z PowerPointu a Wordu.

PŘÍJEM INZERCE

Beton TKS, s. r. o.
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4
tel.: 602 839 429, e-mail: redakce@betontks.cz

www.betontks.cz