

VPLYV VYSOKÝCH TEPLŔT NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETÓNU Z RŔZNYCH KAMENÍV

INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURES ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE OF VARIOUS GRAVELS

TOMÁŠ VARGA

Príspevok sa zaoberá zmenami niektorých mechanických vlastností betónov po ochladnutí z vysokých teplôt. Skúmané betóny boli vyrobené podľa rovnakej receptúry, menilo sa iba mineralogické zloženie kameniva, ktoré bolo andezitové, dolomitické alebo riečne. Porovnaním mechanických vlastností sa sledovala vhodnosť jednotlivých druhov kameniva na použitie v betónoch.

Changes of some mechanical properties of concrete after cooling off are compared in the report. Tested concrete was prepared according to same composition, while only the mineral composition of gravel was changed, which was andesite, dolomitic or river gravel. Availability by various kinds of gravel was purposed by comparison of mechanical properties of concrete.

Problematika vplyvu vysokých teplôt na vlastnosti betónu sa v súčasnosti javí ako aktuálna. Utvrdzuje nás v tom neutíchajúca diskusia o bezpečnosti tunelov, predovšetkým cestných, jadrových elektrární a všeobecne objektov s nosným systémom z betónu.

Tab. 1 Zloženie betonovej zmesi B40

Tab. 1 Mixture proportion of concrete B40

Komponent	Množstvo	
portlandský cement triedy 47,5 (podľa starého značenia) - výrobca Cementáreň Turňa nad Bodvou	425 kg/m ³	
kamenivo	frakcia 0 – 4 mm	865 kg/m ³
	frakcia 4 – 8 mm	393 kg/m ³
	frakcia 8 – 16 mm	593 kg/m ³
sioxid – výrobca OFZ Istebné	32 kg/m ³	
superplastifikátor Melmet 40	5,6 l/m ³	
voda	176 l/m ³	

Tab. 2 Vlastnosti čerstvej betónovej zmesi

Tab. 2 Properties of fresh concrete mixture

Vlastnosť	Hodnota
objemová hmotnosť [kg/m ³]	2420 až 2518
sadnutie kužela [mm]	80
vodný súčiniteľ w/c	0,414

Dôležitý je aj možný vplyv vysokých teplôt na betón pri niektorých špeciálnych výrobných technológiách (teplárne, spaľovne odpadu apod.).

Vo všetkých uvedených prípadoch vplyvajú vysoké teploty na betón namáhaný tlakom. Tlak v betóne vyvoláva spravidla vlastná tiaž betónovej konštrukcie, úžitkové a iné zaťaženia na betónovú konštrukciu. Už v projektovej fáze je potrebné poznať vlastnosti betónových konštrukcií, ktoré by postihol prípadný požiar. Po požiaroch, resp. po dobe vystavenia konštrukcie vplyvu vysokých teplôt, nastáva potreba zhodnotiť poškodenú konštrukciu a následne navrhnúť spôsob jej sanácie a rekonštrukcie. Neodmysliteľným vstupom pri vypracovaní projektu sanácie a rekonštrukcie musia byť mechanické charakteristiky betónu ovplyvneného účinkami vysokých teplôt.

CIELE EXPERIMENTU

Cieľom experimentu bolo nájsť závislosť mechanických vlastností betónu od vplyvu teplôt do 800 °C. Mechanické vlastnosti boli skúmané po ochladnutí z vysokých teplôt na izbovú (20 °C), išlo teda o zostatkové mechanické vlastnosti.

Mechanické vlastností betónu boli posudzované aj z hľadiska mineralogického zloženia kameniva. Preto vzorky betónu boli vyrobené podľa rovnakej receptúry, menilo sa iba kamenivo, ktoré bolo andezitové (lokalita Vecheč), dolomitické (lokalita Sedlice) a riečne (lokalita Plaveč). Všetky lokality sú na Slovensku.

Tab. 3 Serie vzoriek

Tab. 3 Series of concrete specimens

Typ kameniva	Označenie sérií	Počet hranolov	Počet kociek	Ohrev na teploty [°C]
andezitové	Andezit 1	30	16	60, 100, 200, 400, 600, 800
	Andezit 2	20	10	200, 400, 600, (800)
dolomitické	Dolomit 1	32	14	60, 200, 400, 600, 800
riečne	Riečne 1	35	16	60, 100, 200, 400, 600, 800
	Riečne 2	29	4	60, 100, 200, 400, 600, 800

(800 °C) – od ohrievania na túto teplotu sa upustilo z dôvodu rozpadnutia vzoriek, resp. ich nemerateľnosti po ochladnutí z teploty 600 °C.

Skúmaný bol:

- vplyv kameniva na zmršťovanie betónu $\varepsilon_{bk}(t)$ počas dozrievania,
 - vplyv vysokých teplôt na zmršťovanie – napučívanie betónu $\varepsilon_b(T)$,
 - vplyv vysokých teplôt na zmeny modulu pružnosti betónu $E_b(T)$,
 - vplyv vysokých teplôt na zmeny kockovej pevnosti betónu v tlaku $R_{bk}(T)$.
- Rôznym mineralogickým zložením kameniva sa sledovala ich vhodnosť na použitie v betónoch, ktoré potenciálne môžu byť vystavené vysokým teplotám.

EXPERIMENTÁLNY PROGRAM

Zloženie použitej betónovej zmesi

Pre vzorky bola použitá betónová zmes z betónu triedy B40 podľa tab. 1.

Rozmery, počty a použitie vzoriek

Na meranie mechanických vlastností betónu boli použité hranoly s rozmermi 100 x 100 x 400 mm a kocky s rozmermi 150 x 150 x 150 mm.

Vzorky z andezitového a riečného kameniva boli vyrobené v dvoch sériách, vzorky z dolomitického kameniva v jednej sérii. Každá séria vzoriek predstavovala 20 až 35 hranolov a 4 až 16 kociek (tab. 3).

Postup pri výrobe, ošetrovaní a meraní vzoriek

Na 2., resp. 3. deň po betonáži boli vzorky odformované a následne prebehlo prvé meranie zmršťovania vzoriek $\varepsilon_b(t)$ deformetrom.

Po odformovaní a prvom meraní boli vzorky uložené do klimatizačnej miestnosti nastavenej na teplotu 20 °C a relatívnu vlhkosť vzduchu 80 %. Zmršťova-



Obr. 1 Meranie zmršťovania elektronickým deformetrom Huggenberger

Fig. 1 Shrinkage measurement by electronic deformeter Huggenberger

nie vzoriek $\varepsilon_b(t)$ počas dozrievania betónu v klimatizačnej miestnosti bolo priebežne merané v časových intervaloch jedného až troch dní, v neskoršej fáze sa časové intervaly predĺžili na štyri až sedem dní.

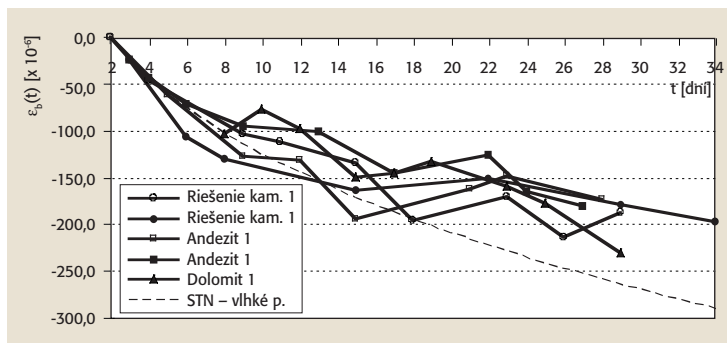
Po 28 dňoch mali byť vzorky vybraté z klimatizačnej miestnosti, avšak skutočná doba vybratia vzoriek bola z technických dôvodov rôzna: od 28 po 34 dní. Po vybratí prebehlo prvé kompletne meranie, t.j. okrem merania zmršťovania – napučievania vzoriek sa na štyroch hranoloch zistoval modul pružnosti a na dvoch až piatich kockách kocková pevnosť.

Následne boli vzorky vložené do elektrických pecí na 48-hodinový ohrev s nábehom teploty 20 °C/h.

Teploty ohrevu, ktorými prešli jednotlivé série vzoriek, sú v tabuľke 3. Po každom 48-hodinovom ohreve poklesla teplota rýchlosťou 20 °C/h opäť na teplotu 20 °C, pri ktorej prebehlo ďalšie kompletne meranie (obr. 2). Počet vzoriek pred každým ďalším ohrevom sa znižoval, nakoľko časť vzoriek sa zničila pri deštruktívnych skúškach.

Obr. 3 Zmršťovanie vzoriek $\varepsilon_b(t)$

Fig. 3 Shrinkage of concrete specimens $\varepsilon_b(t)$



Postup pri spracovaní nameraných hodnôt

Vzorky všetkých druhov betónov boli vystavené rovnakému nárastu a poklesu teploty 20 °C/h a dobe ohrievania 48 h. Dĺžka ohrevu 48 h bola stanovená s ohľadom na modelové situácie pri haváriách v atómových elektrárnach a niektorých výrobných technológiách. Skôr by sa mohlo jednať o širšie okolie požiaru. Mechanické vlastnosti betónov počas ohrievania neboli sledované. Z tohto dôvodu časový faktor v uvádzaných grafoch nevstupuje. Výjimkou je zmršťovanie počas dozrievania betónu $\varepsilon_b(t)$, ktoré sa mení v čase t .

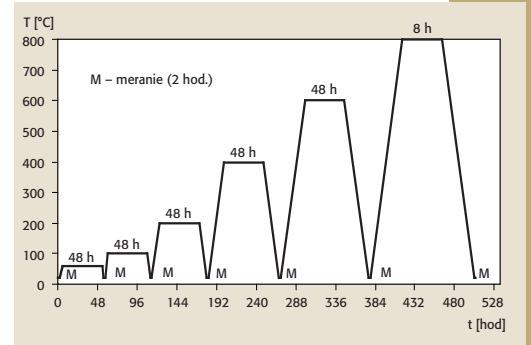
VÝSLEDKY MERANÍ

Zmršťovanie betónu počas dozrievania vzoriek

Priebehy zmršťovania vzoriek jednak podľa druhu kameniva, ale aj podľa sériei vykazujú vzájomne značné rozdiely (obr. 3). Rozdiely sú aj od priebehu vypočítaného podľa STN 73 1201. Tieto rozdiely možno vysvetliť rôznym kamenivom s odlišnou pórovitosťou. V STN a vo väčšine literatúr sa vplyv kameniva na relatívne pretvorenie neuvažuje, pretože sa predpokladá takmer dokonalá hutnosť kameniva prírodného pôvodu.

Vplyv vysokých teplôt na zmršťovanie – napučievanie betónu

Pretvorenia vzoriek z betónových hranolov po ochladnutí z vysokých teplôt $\varepsilon_b(T)$ boli porovnávané s referenčným meraním pri teplote pri 20 °C po 28 dňoch dozrievania betónu. Skutočná doba referenčného merania bola pri niektorých sériách odlišná (obr. 3). Vplyv dĺžky dozrievania betónov na referenčné merania bol zanedbaný, pretože dĺžkové zmršťovania betónov po 28 dňoch dozrievania sú zanedbateľné voči zmršťovaniu – napučievaniu betónov v dôsledku ohriatia na vysoké teploty.



Obr. 2 Časový priebeh merania vzoriek po ochladnutí

Fig. 2 Time behaviour measurement of concrete specimens after heating

Medzi jednotlivými druhmi betónu sú značné rozdiely v zmršťovaní – napučívaní vzoriek po ochladnutí. Tie sa výrazne prejavujú najmä pri najvyšších teplotách 600 a 800 °C. Napriek tomu v priebehu zmršťovania – napučievania jednotlivých druhov betónov sú zhodné tendencie.

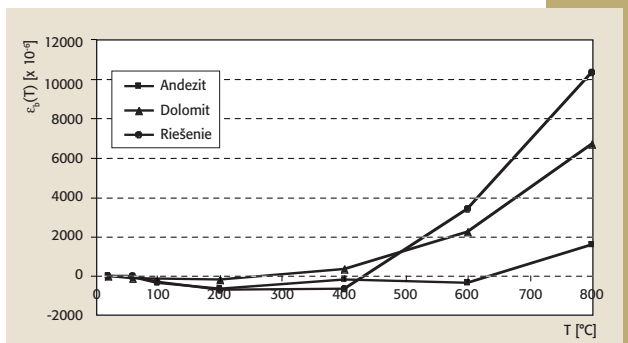
Pri teplotách do 400 °C prevláda zmršťovanie. Pri teplotách nad 400 °C dochádza k napučievaniu, a teda aj predlžovaniu vzoriek. Rozdiely vo veľkosti napučievania medzi jednotlivými druhmi betónu sa so zvyšujúcou teplotou zväčšujú. Vzorky, ktoré prešli ohrevom na 800 °C mali zmenenú farbu na svetlosivú, zníženú hmotnosť, na povrchu trhliny. Ich materiál iba vzdialene pripomínal betón. Vzorky z riečneho a dolomitického kameniva oboch sérii sa po niekoľkých hodinách po ochladnutí samovoľne rozpadli.

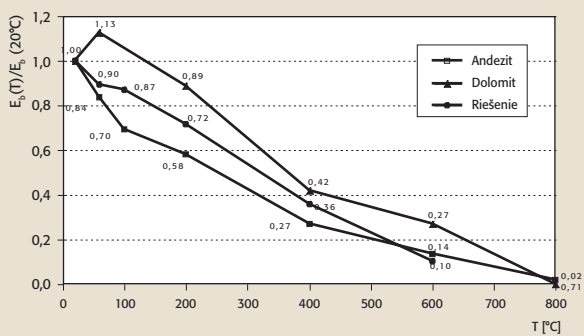
Vplyv vysokých teplôt na zmeny modulu pružnosti betónu

Referenčná hodnota modulu pružnosti betónu z andezitového kameni-

Obr. 4 Zmršťovanie – napučievanie vzoriek po ochladnutí $\varepsilon_b(T)$

Fig. 4 Shrinkage-swelling of concrete specimens after heating $\varepsilon_b(T)$





Obr. 5 Pomerný modul pružnosti vzoriek po ochladnutí $E_b(T)/E_b(20^\circ\text{C})$

Fig. 5 Relative elasticity modulus of concrete specimens after heating $E_b(T)/E_b(20^\circ\text{C})$

va je 34,3 GPa, z dolomitického kameniva 42,7 GPa a riečného kameniva 31,2 GPa.

Modul pružnosti vzoriek po ochladnutí z vysokých teplôt je všeobecne klesajúci, avšak rozdiely v poklese svedčia o významnom vplyve kameniva (obr. 5).

Rozdiely vznikajú už po ochladnutí z teploty 60 °C. Pri betóne z dolomitického kameniva dochádza k ďalšiemu zvýšeniu hodnoty modulu pružnosti, avšak pri betóne z riečného a andezitového kameniva hodnota modulu pružnosti klesá.

Po teplotách ohrevu 100 °C a vyšších už modul pružnosti pri všetkých druhoch betónu klesá, pričom v priebehu poklesu jednotlivých druhov betónov sú výrazné zhodné tendencie. Pri skúmaných druhoch betónu klesol modul pružnosti na takmer nulovú hodnotu až po teplote 800 °C. Rozdiely vo veľkosti pomerneho modulu pružnosti medzi jednotlivými druhmi betónu sa so zvyšujúcou teplotou znižujú.

Vplyv vysokých teplôt na zmenu kockovej pevnosti betónu

Referenčná hodnota kockovej pevnosti betónu z andezitového kameniva je 46,6 MPa, z dolomitického kameniva 57,1 MPa a riečného kameniva 39,8 MPa.

Rozdiely v priebehu kockovej pevnosti nastávajú už po ohreve na teplotu 60 a 100 °C. Pri betónoch z andezitového a dolomitického kameniva dochádza k zmenšeniu kockových pevností oproti pevnostiam pred ohrevom.

Maximálna kocková pevnosť pri všet-

kých druhoch betónov bola po ohreve z teploty 200 °C. Po ohreve na 400 °C dochádza k zníženiu kockovej pevnosti všetkých druhov betónov. K ďalšiemu znižovaniu kockovej pevnosti dochádza po ohreve z teploty 600 °C. K prudkému zníženiu kockovej pevnosti dochádza po ohreve na teplotu 800 °C.

FYZIKÁLNO-CHEMICKÁ ANALÝZA BETÓNU

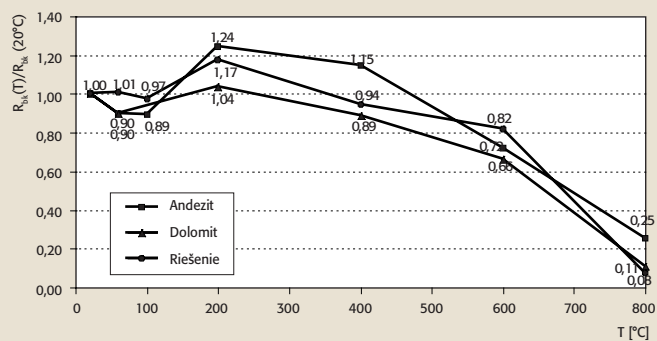
Chemické zloženie kameniva posudzovaných betónov podľa röntgenovej analýzy [4] je uvedené v tab. 4.

Termický rozklad identifikovaných mineralogických zložiek kameniva podľa [8] uvadá tab. 5.

Z tabuľky 5 vyplýva, že prevažná časť prítomných mineralogických zložiek je pri vysokých teplotách termicky stabilná. V teplotnom rozmedzí ohrevu vzoriek do 800 °C je významná iba fyzikálna premena kremeňa SiO_2 z kryštalografickej modifikácie α na kryštalografickú modifikáciu β . Kremeň je však prítomný vo všetkých kamenivách skúmaných betónov, z toho v betóne z riečného kameniva ako hlavná zložka.

Z termického rozkladu teda vyplýva, že základné identifikované zložky kameniva iba v malej miere ovplyvňujú fyzikálno-mechanické parametre betónových vzoriek pri teplote do 800 °C, nakoľko sa rozkladajú až pri vyšších teplotách.

Východiskové hodnoty skúmaných mechanických vlastností všetkých posudzovaných druhov betónu vystavených vysokým teplotám však napriek tomu klesajú. Súvisiace štúdie [11], [12] ukazujú, že rozhodujúcu úlohu v zhoršení kvality betónu po zahriatí zohráva zatvrdnutá cementová zložka. Podľa [1], dôležité činitele, ktoré ovplyvňujú správanie betónu pri vysokých teplotách sú: rýchlosť ohrevu, druh spojiva a kameniva, strata hmotnosti v dôsledku uvoľňovania viazanej vody,



Obr. 6 Pomerná kocková pevnosť vzoriek v tlaku po ochladnutí $R_{bk}(T)/R_{bk}(20^\circ\text{C})$

Fig. 6 Relative cubic compressive strength of concrete specimens after heating $R_{bk}(T)/R_{bk}(20^\circ\text{C})$

tvorba pórov a trhlín, zmena štruktúry, redukcia pevnosti a modulu pružnosti.

Na mechanické parametre betónových vzoriek podstatnou mierou vplyva fyzikálno-chemická zmena hydratačných produktov. Pri termickom rozklade sa postupne uvoľňujú rôzne viazané formy vody:

- pri teplote od 105 do 110 °C sa v prvom rade uvoľňuje fyzikálne viazaná voda,
 - pri vyšších teplotách dochádza k postupnému uvoľňovaniu aj chemicky viazanej vody, resp. samotných hydratovaných zložiek spojív.
- Vysoké teploty sú príčinou zväčšenia pórovej štruktúry betónu s následnými zmenami fyzikálno-mechanických parametrov. Podľa [8], termickou analýzou bola preukázaná zjavná závislosť medzi úbytkom gelovitých hydratačných produktov a teplotou v teplotnom intervale medzi 20 až 200 °C.

Pokles pevnosti betónu v tlaku závisí:

- od uvoľňovania vody viazanej v gelovitých hydratačných produktoch v teplotnom intervale 60 až 400 °C,
 - od uvoľňovania vody viazanej vo voľnom $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v teplotnom intervale 400 až 600 °C.
- Degradácia štruktúry betónu je výrazne ovplyvnená:
- pri teplotách nad 600 °C rozkladom CaCO_3 a MgCO_3 ,
 - pri teplotách nad 800 °C tiež rekryštalizáciou nových neväzných fáz vznikajúcich z hydratovaných cementových minerálov pri opakovanom výpale. Namiesto stálej pevnej fázy sa v betó-

Kamenivo	Hlavné zložky kameniva	Dalšie zložky kameniva
andezit	živce – (K, Na-Ca)AlSiO ₃ O ₈	kremeň – SiO ₂
dolomit	dolomit – MgCO ₃ , CaCO ₃ kalcit – CaCO ₃	kremeň – SiO ₂ živce – (K, Na-Ca)AlSiO ₃ O ₈
riečne kamenivo	kremeň – SiO ₂ živce – (K, Na-Ca)AlSiO ₃ O ₈ kalcit – CaCO ₃ dolomit – MgCO ₃ , CaCO ₃	

Tab. 4 Chemické zloženie kameniva betónov podľa röntgenovej analýzy [4]

Tab. 4 Chemical composition of gravel aggregate according to X-ray analysis [4]

Zložky kameniva	Teplota vrcholu [°C]	Teplota počiatku [°C]	Efekt exo-endo pik	Reakcia
kremeň SiO ₂	573	550	endo malý	$\alpha \rightarrow \beta$ – premena
kalcit CaCO ₃	830 až 940	830 až 920	endo veľký	$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
dolomit MgCO ₃ , CaCO ₃	790 až 950	745 až 870	exo veľký dvojitý	$\text{MgCO}_3 \rightarrow \text{MgO} + \text{CO}_2$ $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
živce (K, Na-Ca)AlSiO ₃ O ₈	710	700		

Tab. 5 Termický rozklad identifikovaných mineralogických zložiek kameniva podľa [8]

Tab. 5 Thermal decomposition identified mineral components according to [8]

novej štruktúre objavujú vzduchové dutiny. Sprievodným javom je súčasne zväčšenie polomeru pórov a hodnôt celkovej pórozity spôsobené zvýšením teploty. Čím väčšia je strata viazanej vody a obsahu CO₂, tým intenzívnejšie je zhrubnutie štruktúry pórov a tým zrejmejšia je strata pevnosti v tlaku. Na druhej strane, betón sa stáva priepustnejší, čo možno preukázať rastom koeficientu priepustnosti pri zvýšených teplotách.

Poškodený betón po vystavení vysokým teplotám je náchylný k zníženiu trvanlivosti dokonca aj pri bežnej teplote a vlhkom prostredí. Zvýšená priepustnosť prispieva k zvýšenej vlhkosti a pohyblivosti atmosférického CO₂ vnútri betónového prvku, vyvoláva rýchlejšiu karbonatáciu a pri vystuženom betóne rýchlejšiu koróziu ocelevej výstuže v porovnaní s betónom neovplyvneným vysokými teplotami.

ZÁVER

Výskum potvrdil, že druh kameniva podstatne ovplyvňuje mechanické vlastnosti betónu po ochladnutí z vysokých teplôt. Ukázalo sa, že napriek rozdielnym kamenivám sú v zmenách mechanických vlastností skúmaných druhoch betónov zhodné tendencie.

Najvhodnejšie betóny sú tie, pri ktorých po ohreve dochádza k najmenej zmene východiskových mechanických vlastností, a teda sú teplotne najstabilnejšie.

Po teplotách ohrevu do 200 °C sú v zmrašťovaní betónov len minimálne rozdiely. Nad touto teplotou je napučovanie najmenšie pri betóne z andezitového kameniva, väčšie pri betóne z dolomitického a výrazne najväčšie pri betóne z riečného kameniva.

Modul pružnosti, pevnosť v tlaku pri betónoch zo všetkých druhov kameniva klesá a po ohreve 800 °C sú tieto mechanické vlastnosti prakticky nulové.

Zistené zmeny mechanických vlastností betónu od ochladnutí z vysokých teplôt by po spresnení a doplnení mohli byť podkladom, ktorý by umožňoval už v projektovej fáze predvídať zostatkové mechanické vlastnosti betónov po prípadnom poškodení vysokými teplotami a určiť vhodné kamenivo. To by umožnilo navrhnúť optimálnejšie konštrukcie objektov poškodených vysokými teplotami.

Ing. Tomáš Varga, PhD.

Stavebná fakulta TU v Košiciach
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Vysokoškolská 4, 042 01 Košice, Slovensko
tel.: +421 556 024 251,
fax: +421 556 221 661
e-mail: tomas.varga@tuke.sk

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

Literatúra:

- [1] Al-Gahtani H. J., Abbasi A.-G. F., Al-Amoudi O. S. B.: Concrete Mixture Design for Hot Weather: Experimental and Statistical Analyses, Magazine of Concrete Research, Vol. 50, No. 2, 1998, 95–105
- [2] Chan Z. N., Luo X., Sun W.: Compressive Strength and Pore Structure of High-performance Concrete after Exposure to High Temperature up to 800 °C. Cement and Concrete Research, Vol. 30, No. 2, 2000, 247–251
- [3] Felicetti R., Gambarova P. G.: Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concrete. ACI Materials Journal, Vol. 95, No. 4, July–August 1998, 395–406
- [4] Jávora T.: Diagnosis, Safety and Aging of Concrete Structures in NPPs – Conclusion Report with Main Results Obtained During the Period of 5.4.94–5.4.96. CEC/PECO 93 Cooperation Programme Nuclear Safety, Košice, April 1996
- [6] Majorana C. E., Salomoni U., Schrefler B. A.: Hygrothermal and Mechanical Model of Concrete at High Temperature. Material and Structures, Vol. 31, No. 210, July 1998, 378–386
- [7] Phan L. T., Lawson J. R., Davis F. L.: Effects of Elevated Temperature Exposure on Heating Characteristics, Spalling and Residual Properties of High Performance Concrete. Materials and Structures, Vol. 34, No. 236, March 2001, 83–91
- [8] Blažek A.: Termická analýza. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1972
- [9] Schneider U.: Test Methods for Mechanical Properties of Concrete at High Temperatures. Materials and Structures, Vol. 33, No. 225, 2000, 6–13
- [10] Varga T.: Vplyv vysokých teplôt na betón pri namáhaní tlakom. Dizertačná práca, Košice, 2002
- [11] Escalante-García J. I., Sharp J. H.: Effect of Temperature on the Hydration of the Main Clinker Phases in Portland Cements, Part I: Neat Cements, Part II: Blended cements. Cement and Concrete Research, Vol. 28, No. 9, 1998, 1245–1274
- [12] Kjellsen K. O., Fjallberg L., Wallevik O. H.: Microstructure and Micro-chemistry of the Paste-aggregate Interfacial Transition Zone of High Performance Concrete. Advances in Cement Research, Vol. 10, No. 1, 1998, 33–40