

KOMBINOVANÉ ÚČINKY ZATÍŽENÍ POŽÁREM A NÁSLEDNÝM VÝBUchem NA BETONOVÉ KONSTRUKCE – I. ČÁST

Kateřina Horníková, Marek Foglar, Radek Štefan, Radek Hájek

Kombinované účinky extrémních zatížení jsou velmi málo studované jevy především kvůli své složitosti a komplexnosti. Kombinovaný účinek požáru a výbuchu na betonové konstrukce je však jev, který začíná být stále častějším, a proto je studium tohoto fenoménu velice podstatné. Tento článek prezentuje experimentální program, který byl vytvořen s cílem základního porozumění zmiňovaného fenoménu. Provedená měření změn několika materiálových vlastností v závislosti na teplotě (I. část) byla následována samotným experimentem (II. část), při němž byly betonové prvky vystaveny působení vysoké teploty a následně výbuchu. Provedené experimenty byly doplněny o numerickou simulaci. Z uvedeného vyplývá velký vliv tahové pevnosti materiálu na odezvu prvku.

COMBINED EFFECTS OF FIRE AND BLAST LOADING ON CONCRETE STRUCTURES – PART I

Combined effects of extreme loadings are poorly studied phenomena, primarily because of their complexity. However, the combined effect of fire and blast loadings on concrete structures is a phenomenon that is becoming more common and its study has become very relevant. This paper presents an experimental program which is a first step towards a better understanding this phenomenon. Temperature-dependent changes in several selected material properties were measured (part I). The next stage of the experiment included concrete elements which were subjected to a high temperature followed by a blast (part II). The experiments were accompanied by a numerical simulation. This showed how great was the influence of the tensile strength of the material on the behaviour of the element tested.

Konstrukce jsou standardně navrhovány na vliv statických a běžných dynamických zatížení, jako je vítr nebo v některých oblastech zemětřesení. Konstrukce, které jsou součástí kritické infrastruktury, však začínají být posuzovány také z hlediska působících extrémních zatížení, jakými jsou nárazy velkých břemen, požár, ale také výbuch. Problém ovšem nastává v situaci, kdy tato extrémní zatížení působí současně. Studium účinků kombinovaných zatížení je poměrně složité a v současné době není mnoho pracovišť, která se této oblasti věnují.

V předkládaném článku je prezentován provedený experimentální program, který se zaměřuje na vliv kombinovaného účinku požáru a výbuchu na betonové konstrukce. Program byl zahájen studiem vlivu působící teploty na materiálové vlastnosti, kdy bylo testováno celkem pět různých materiálů. Na základě výsledků byly vybrány tři materiály, ze kterých byly vyrobeny zkušební vzorky pro druhou část experimentu, v níž byly vzorky vystaveny požáru (vysoké působící teplotě) a následně blízkému výbuchu, přičemž byla pozorována velikost a míra poškození a také rychlost odletujících částic. Provedené experimenty byly posléze doplněny o numerickou simulaci.

Díky experimentům a numerické simulaci bylo možné kvantifikovat vliv účinku kombinovaného zatížení na betonové prvky. Cílem však nebylo hodnocení samotných materiálů, resp. zjištění, který z nich je odolnější. K takovému hodnocení by bylo potřeba znát účel, jakému by měl betonový prvek sloužit. Pokud bude součástí nosné konstrukce, je nutné zohlednit jiné parametry, než pokud se bude jednat o výplňovou konstrukci, jejímž úkolem je pohlcení účinků výbuchu a ochrana lidí nebo konstrukcí.

Jak již bylo zmíněno, vzhledem ke složitosti a komplexnosti problému není fenomén kombinovaného účinku požáru a výbuchu příliš studován. Např. Kakogiannis a kol. [1] prezentuje výsledky experimentálního programu provedeného v plném měřítku, tj. v měřítku 1 : 1, přičemž program se zabýval vlivem požáru a následného výbuchu na únosnost železobetonových dutinových desek (panelů). V článku je rovněž představena zjednodušená numerická simulace tohoto experimentu v softwaru LS-DYNA. Největším problémem se jeví spojení pomalého jevu (požár postupně mění vlastnosti prvku) a extrémně rychlého jevu (výbuch mění prvek a jeho vlastnosti v řádu mikrosekund). Kromě poruchovosti a únosnosti se článek zabývá také vlivem vysokých teplot na dynamické chování prvků. Zhai a kol. [2] prezentuje výsledky experimentu v plném měřítku týkajícího se železobetonových nosníků. Oproti předchozímu experimentu nebyly nosníky vystaveny požáru přímo, ale byly zahřívány v peci podle teplotní křivky ISO834 po dobu 90 a 120 min. Experiment je rovněž podpořen numerickým ověřením.

Ruan a kol. [3] a Fang a kol. [4] se věnují numerickým simulacím vlivu požáru a výbuchu na konstrukce obecně. Oba články se zabývají validací experimentálních dat a zaměřují se především na účinky přenosu tepla přes prvky. Štefan a kol. [5] prezentuje údaje z experimentu, při kterém byly železobetonové panely nejprve vystaveny blízkému výbuchu a poté jednostrannému působení vysoké teploty po dobu 135 min. V [6] navazuje Štefan a kol. na výše uvedený experiment nástrojem pro numerické vyhodnocení poškození použitých prvků.

Stanovení materiálových vlastností

V první části experimentálního programu bylo v závislosti na působící teplotě stanoveno šest materiálových vlastností pěti typů betonu. Zvoleny byly vlastnosti, které nejvíce ovlivňují odolnost prvků vůči extrémním zatížením.

Materiály

K pěti typům zkoumaných materiálů patřil:

- běžný beton C30/37 (označení RC), který byl vybrán jako referenční materiál,
- provzdušněný beton (označený AC),
- beton s polypropylenovými vlákny (označený PC),
- vysokopevnostní beton s ocelovými vlákny – UHPFRC (označený U),
- beton s příměsí drti z minerálních vláken – Isoverbeton (označený S).

Receptura betonů AC a PC vycházela z receptury betonu RC, do kterého byla přidána provzdušňovací přísada (beton AC), příp. polypropylenová vlákna (beton PC). V tab. 1 je uvedeno složení jednotlivých směsí.

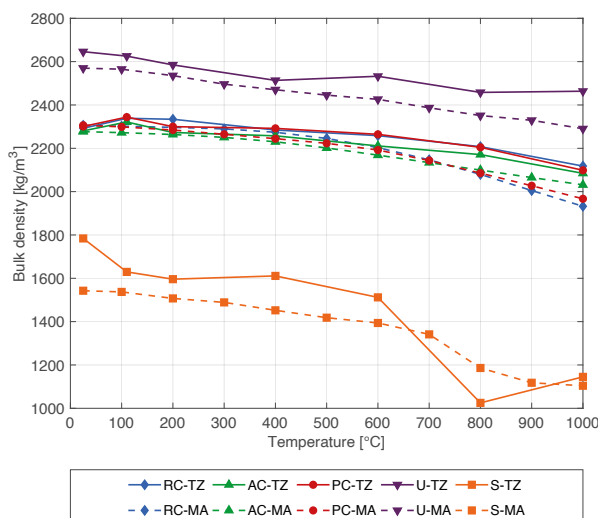
Materiálové vlastnosti – popis experimentů a jejich výsledky

Jak bylo již zmíněno, bylo měřeno šest materiálových vlastností – objemová hmotnost, porozita, tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, permeabilita a tlaková pevnost. U všech těchto vlastností byla stanovována jejich změna v závislosti na působící teplotě až do 1 000 °C.

Výsledky měření jsou zaznamenány v grafech na obr. 1 až 6. Získaná data jsou také porovnávána s daty z dostupné literatury nebo platných norem.

Objemová hmotnost

Změna objemové hmotnosti v závislosti na teplotě byla měřena dvěma metodami. Nejprve byla použita hydrostatická metoda podle normy EN 993-1 [7]. Pro tato měření byly použity vzorky o rozměrech 50 × 50 × 50 mm (výsledky jsou označeny jako TZ). Při druhém typu měření (výsledky označeny jako MA) byla použita složitější metoda. Objemová hmotnost byla měřena pomocí heliové pyknomet-



1 Průběh změny objemové hmotnosti v závislosti na působící teplotě
1 Changes in the bulk density in relation to the applied heat (temperature)

rie (přístroj Pycnomatic ATC) v kombinaci s gravimetrickou metodou. Pro měření byly použity vzorky o rozměrech 50 × 50 × 100 mm a 100 × 100 × 50 mm. Podrobnější popis metody je uveden v Horníková a kol. [8]. Výsledky obou měření jsou znázorněny v grafu na obr. 1.

Obr. 1 ukazuje, že objemová hmotnost se s rostoucí teplotou mírně snižuje u všech materiálů, což lze očekávat v souvislosti s rostoucí pórovitostí struktury betonu. Výsledky pro materiály RC, AC, PC a U jsou u obou typů měření velmi podobné. Pouze u materiálu S má graf závislosti objemové hmotnosti na teplotě jiný tvar. To může být způsobeno výrazně vyššími výsledky pórovitosti (bude uvedeno dále), nedokonalou soudržností materiálu, nepravidelným rozložením minerálních izolačních střepek, tendencí k segregaci nebo obecně tím, že tento typ lehkého pórovitého materiálu je ve srovnání s hutnějšími typy cementových kompozitů vysokými teplotami ovlivněn výrazněji, viz také Štefan a kol. [9].

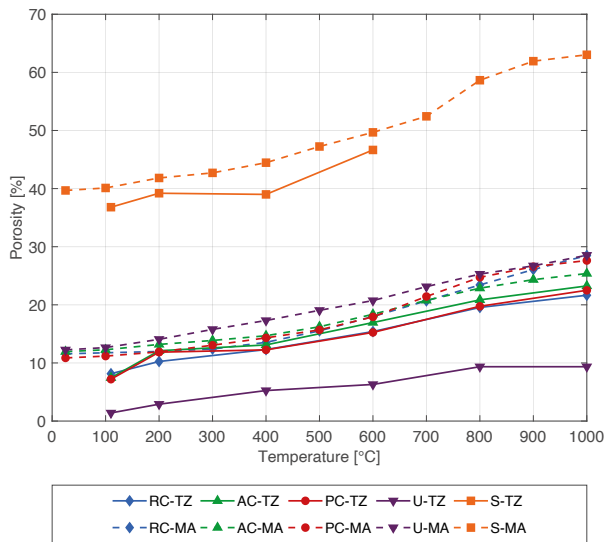
Porozita

Porozita a její závislost na působící teplotě byla měřena dvěma metodami. V prvním případě (označeno TZ) byla pórovitost vypočtena z poměru hmotností vysušených vzorků a nasycených vzorků podle normy EN 993-1 [7]. Ve druhém případě (označeno MA) byla otevřená pórovitost ψ [%] materiálů vypočtena pomocí hustoty matrice a objemové hmotnosti, viz Pavlíková a kol. [10]. Všechny výsledky jsou uvedeny na obr. 2.

Porozita všech materiálů se podle očekávání s rostoucí teplotou zvyšuje. Srovnání obou typů měření ukazuje, že největší rozdíl mezi počáteční a konečnou porozitou vykazuje materiál U. Výsledky porozity materiálů RC, AC a PC při nejvyšší teplotě jsou u obou typů měření téměř stejné. Porozita při nejvyšší teplotě u materiálů RC, AC, PC a U vykazuje nárůst přibližně o 10 % a u materiálu S dochází k nárůstu porozity přibližně o 20 %.

Tab. 1 Směsi použitých materiálů Tab. 1 Materials mixtures

Složky betonu		Materiál [kg/m ³]				
		RC	AC	PC	U	S
cement		370	370	370	650	875
voda		135	135	135	172	437
kamenivo	8–16 mm	755	755	755	300	-
	4–8 mm	195	195	195	460	285
	0–4 mm	863	863	863	880	-
plastifikátor		2,6	2,6	2,6	29	-
provzdušňovací přísada		-	0,4	-	-	-
polypropylen. vlákna		-	-	1,5	-	-
mikrosilika		-	-	-	80	-
ocelová vlákna 13 mm		-	-	-	120	-
minerální drť		-	-	-	-	190



2 Průběh změny porozity v závislosti na působící teplotě
2 Effects of the temperature on porosity

Tepelná vodivost

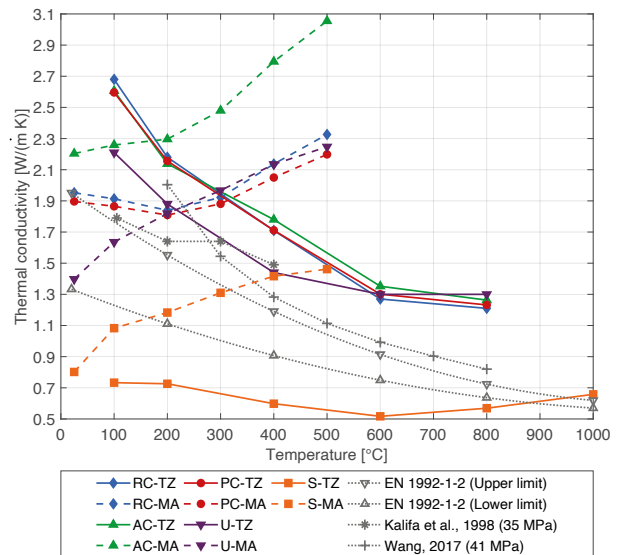
Tepelná vodivost byla v závislosti na působící teplotě měřena dvěma metodami. Získané údaje lze použít pro různé přístupy k modelování přenosu tepla – klasický přístup využívá standardní tepelnou vodivost a modifikovaný přístup využívá tzv. zdánlivou tepelnou vodivost.

První použitá metoda je popsána v EN 993-15 [11] (označeno TZ) a využívá topný drát a dvojici termočlánků, jež jsou vloženy mezi dva betonové bloky ve známé vzdálenosti. Tepelná vodivost se následně stanoví na základě hodnot získaných z termočlánků (podle změny teploty v určité oblasti).

Druhá metoda (označeno MA) je založena na přístupu, který zohledňuje transport vlhkosti, konvektivní a radiační způsoby transportu tepla, procesy fázových změn a chemické reakce, jak je podrobněji popsáno v Černý a Vejmelková [12]. Pro experimenty byly tři vzorky opatřeny sadou šesti teplotních čidel instalovaných podél jejich podélné osy ve vzdálenosti 10 až 15 mm od sebe. Vzorky byly vystaveny jednostrannému ohřevu v peci, kde byla udržována konstantní teplota 1 000 °C. S využitím těchto hodnot byla následně dopočtena hodnota tepelné vodivosti materiálů.

Výsledky obou typů měření jsou uvedeny na obr. 3, kde jsou rovněž porovnány s údaji uvedenými v platných normách a literatuře. Konkrétně jsou použity vzorce navržené pro horní a dolní mez tepelné vodivosti betonu v normě EN 1992-1-2 [13] a údaje uvedené v Kalifa a kol. [14] a Wang [15].

Obr. 3 jasně ilustruje, že oba typy použitého měření nejsou snadno srovnatelné. Tepelná vodivost všech materiálů měřených metodou TZ s rostoucí zvýšenou teplotou klesá. Tento trend odpovídá údajům uvedeným v normě EN 1992-1-2 [13]. Poněkud odlišný průběh má pouze materiál S, u kterého tepelná vodivost klesá až do 600 °C a poté opět narůstá. Výsledky z měření MA jsou zcela odlišné, neboť ve většině případů se tepelná vodivost se zvýšenou teplotou vždy zvyšuje. Nesrovnatelnost metod mohla být způ-



3 Průběh změny tepelné vodivosti v závislosti na působící teplotě
3 Changes in the thermal conductivity in relation to temperature

sobena různými příčinami: jedním z možných vysvětlení je, že výsledky jsou ovlivněny nějakou další částí přenosu tepla z měřicího zařízení. Obecně lze však říci, že výsledky ukazují nejnižší tepelnou vodivost pro materiál S a nejvyšší pro beton AC.

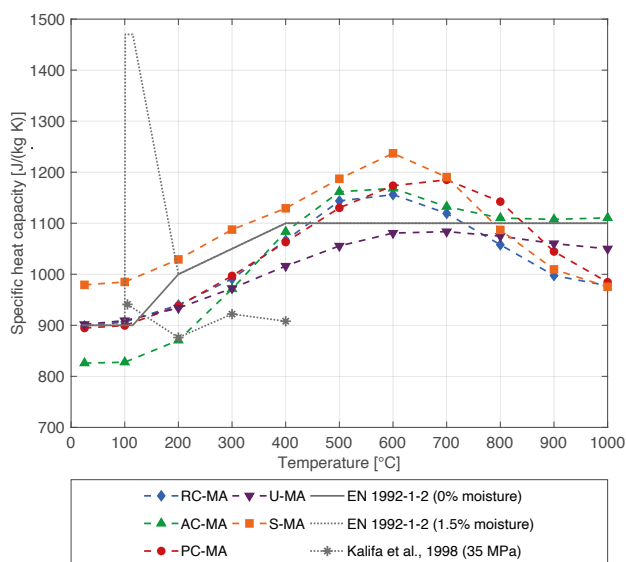
Měrná tepelná kapacita

Měrná tepelná kapacita v závislosti na působící teplotě byla stanovena pomocí neadiabatické metody prezentované v Toman a Černý [16]. Měřicí aparatura se skládala z míchací nádoby o objemu 2,5 l, která byla umístěna na třepačce pracující při 60 ot./min. Přístroj byl připojen k monitorovacímu systému, který umožňoval nepřetržitě sledování tepelných změn. Naměřené výsledky jsou společně s údaji uvedenými v normě EN 1992-1-2 [13] a Kalifa a kol. [14] shrnuty na obr. 4.

Výsledky se téměř shodují s měrnou tepelnou kapacitou definovanou normou [13] pro běžný beton. Průběh normy pro suchý materiál předpokládá zvyšující se měrnou tepelnou kapacitu až do 400 °C, poté pokračuje s konstantní hodnotou. Naměřené hodnoty pro všechny materiály rostou do 500 až 700 °C a poté začínají klesat. Konečná měrná tepelná kapacita při 1 000 °C je téměř shodná s hodnotou uvedenou v normě.

Permeabilita

Permeabilita, resp. propustnost daného materiálu pro plyny, a její závislost na teplotě byla měřena podle normy EN 993-4 [17] na třech tlakových úrovních. Propustnost materiálu S byla měřena při tlaku 0,6 kPa, 0,8 kPa a 1 kPa. Propustnost ostatních materiálů byla měřena při tlaku 5 kPa, 10 kPa a 15 kPa. Během zkoušky se množství plynu procházejícího zkušebními vzorky měřilo pomocí zkušebního zařízení popsaného v normě EN 993-4 [17]. Výsledky této zkoušky jsou společně s údaji uvedenými v literatuře, konkrétně pak v Kalifa a kol. [14] a Mindeguia [18], uvedeny na obr. 5.

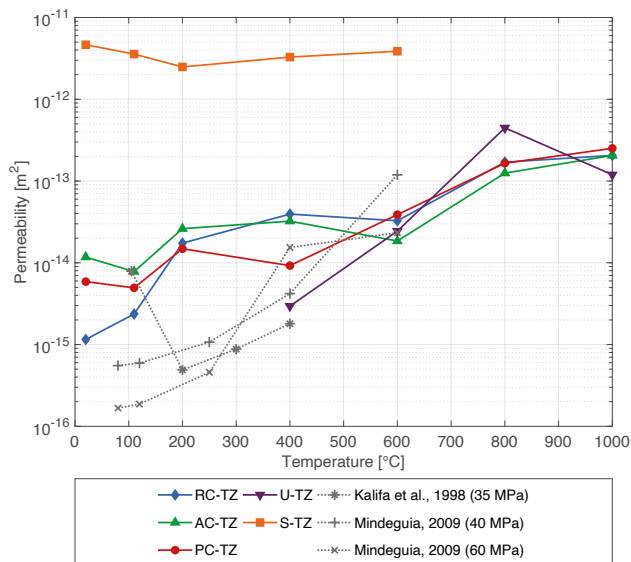


4 Průběh změny měrné tepelné kapacity v závislosti na působící teplotě
4 Specific heat capacity in relation to temperature

Výsledky pro materiály RC, AC, PC a U vykazují pomalu rostoucí permeabilitu až do teploty 600 °C, poté se permeabilita zvyšuje výrazně rychleji. Nejnižší hodnota byla naměřena u materiálu U, u něhož byla až do teploty 400 °C naměřena nulová propustnost pro plyny. Při teplotě 800 °C došlo k poškození materiálu. Změna permeability materiálu S v závislosti na zvyšující se teplotě je proměnlivá. Hlavním důvodem je pravděpodobně vysoká poréznost, heterogenita a množství minerálních izolačních stěpů (rovněž porézných).

Tlaková pevnost

Jakožto zástupce mechanických charakteristik materiálu byla pro měření zvolena tlaková pevnost betonu. Pro je-

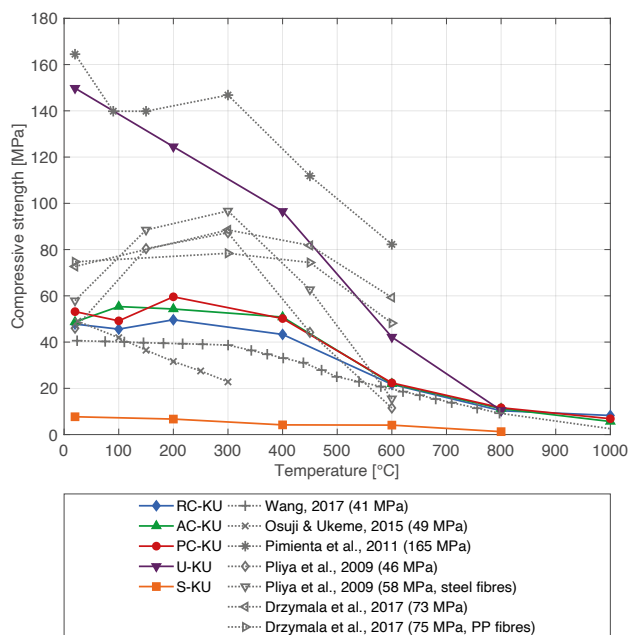


5 Průběh změny permeability v závislosti na působící teplotě
5 Changes in permeability in relation to temperature

jí měření při vystavení betonu vysokým teplotám lze použít několik metod. První možností je měření pevnosti v tlaku při dané teplotě, druhou možností je měření pevnosti v tlaku po ochlazení vzorku – při použití tohoto způsobu se měří zbytková pevnost. V rámci experimentálního programu byla zvolena první možnost, měření bylo provedeno v souladu s RILEM [19]. Zkušební tělesa byla umístěna do elektrické pece, jež byla připevněna k hydraulickému lisu tak, aby bylo možné provést zkoušku na tělese přímo v peci. Elektrická pec pak funguje standardním způsobem, přičemž je v peci řízeně zvyšována teplota až na požadovanou hodnotu. Po jejím dosažení se teplota udržuje po dobu 100 min. Tím je zajištěno kom-

Reference:

- [1] KAKOGIANNIS, D., PASCUALENA, F., REYEM, B., PYL, L., NDAMBI, J. M., SEGERS, E., LECOMPTE, D., VANTOMME, J., KRAUTHAMMER, T. Blast performance of reinforced concrete hollow core slabs in combination with fire: Numerical and experimental assessment. *Fire Safety Journal*. 2013, Vol. 57, pp. 69–82. DOI: 10.1016/j.firesaf.2012.10.027.
- [2] ZHAI, C., CHEN, L., XIANG, H., FANG, Q. Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire. *International Journal of Impact Engineering*. 2016, Vol. 97, pp. 29–45. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.06.004.
- [3] RUAN, Z., CHEN, L., FANG, Q. Numerical investigation into dynamic responses of RC columns subjected for fire and blast. *Journal of Loss Prevention In The Process Industries*. 2015, Vol. 34, pp. 10–21. DOI: 10.1016/j.jlp.2015.01.009.
- [4] FANG, Q., ZHAO, J., CHEN, L., LI, D. Numerical prediction of fire resistance of RC beam subjected to blast and fire. *Journal of Tianjin Univ. Science and Technology*. 2015, pp. 873–880.
- [5] ŠTEFAN, R., FOGLAR, M., HÁJEK, R., FLÁDR, J. Experimental analysis of floor panels made of various types of concrete exposed to blast and subsequent fire. *Beton TKS*. 2016, Vol. 16, No. 1, pp. 42–48. [in Czech].
- [6] ŠTEFAN, R., FOGLAR, M. Visualization and analysis of concrete specimens damage after fire and blast experiments. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019, Vol. 596. DOI: 10.1088/1757-899X/596/1/012040.
- [7] EN 993-1. *Methods of test for dense shaped refractory products – Part 1: Determination of bulk density, apparent porosity and true porosity*.
- [8] HORNIKOVÁ, K., SCHEINHERROVÁ, L., ŠTEFAN, R., FOGLAR, M. Experimental investigation of physical, thermal, hygral and mechanical properties of cementitious composites at high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020, Vol. 255. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119244.
- [9] ŠTEFAN, R., FOGLAR, M., FLÁDR, J. Experimental investigation of behaviour of various types of cementitious composites exposed to fire. *Beton TKS*. 2015, Vol. 15, No. 6, pp. 56–61. [in Czech].
- [10] PAVLÍKOVÁ, M., PAVLÍK, Z., KEPPERT, M., ČERNÝ, R. Salt transport and storage parameters of renovation plasters and their possible effects on restored buildings' walls. *Construction And Building Materials*. 2011, 25(3): 1205–1212. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.034.
- [11] EN 993-15. *Methods of test for dense shaped refractory products – Part 15: Determination of thermal conductivity by the hot-wire (Parallel) method*. 2005.
- [12] ČERNÝ, R., VEJMELKOVÁ, E. Apparent Thermal Conductivity Approach at High-Temperature Measurements of Porous Materials. *Measurement*. 2011, 44(7): 1220–1228. DOI: 10.1016/j.measurement.2011.04.002.
- [13] EN 1992-1-2. *Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1-2. General rules – Structural fire design*. 2006.
- [14] KALIFA, P., TSIMBROVSKA, M., BAROGHEL-BOUNY, V. High-performance concrete at elevated temperatures - an extensive experimental investigation of thermal and hygral properties and microstructure. In: *International symposium on high-performance and reactive powder concretes*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 1998, pp. 259–279.
- [15] WANG, W.-C. Compressive Strength and Thermal Conductivity Of Concrete With Nanoclay Under Various High-Temperatures [online]. *Construction and Building Materials*. 2017, 147: 305–311. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.141.
- [16] TOMAN, J., ČERNÝ, R. Calorimetry of Building Materials [online]. *Journal Of Thermal Analysis*. 1995, 43(2): 489–496. DOI: 10.1007/BF02546837.
- [17] EN 993-4. *Methods of test for dense shaped refractory products – Part 4: Determination of permeability gases*. 1996.
- [18] MINDEGUIA, J.-C. *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons*. Bordeaux, 2009. PhD thesis. The University of Pau and the Adour Region.
- [19] Compressive Strength for Service and Accident Conditions [online]. *Materials and Structures*. 1995, 28(7): 410–414. DOI: 10.1007/BF02473077.
- [20] EN 12390-3. *Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens*.
- [21] OSUJI, S. O., UKEME, U. Effects of Elevated Temperature On Compressive Strength Of Concrete: A Case Study Of Grade 40 Concrete. *Nigerian Journal of Technology*. 2015, 34(3): 472–477. DOI: 10.4314/njt.v34i3.7.
- [22] PIMENTA, P., MINDEGUIA, J.-C., SIMON, A., BEHLOUL, M. Behavior of UHPFRC at High Temperatures. In: *Designing and Building with UHPFRC*. 2011, pp. 579–600. Hoboken, NJ USA: John Wiley. DOI: 10.1002/9781118557839.ch40.
- [23] PLYA, P., BEAUCOUR, A.-L., NOUMOWÉ, A. (2009) Strength and porosity of concrete incorporating polypropylene and steel fibres subjected to high temperature. In: *20th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMIRT 20)*. Espoo (Helsinki), Finland, 2009, pp. 1–10.
- [24] DRZYMAŁA, T., JACKIEWICZ-REK, W., TOMASZEWSKI, M., KUŚ, A., GAŁAJ, J., SUKYS, R. Effects of High Temperature on the Properties of High-Performance Concrete (HPC). *Procedia Engineering*. 2017, 172: 256–263. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.108.
- [25] HORNIKOVÁ, K. *Performance of cementitious composites subjected to combined fire and blast loading*. Prague, 2023. PhD thesis.
- [26] LS-DYNA. *Keyword User's Manual: Volume II: Material Models*. Revision 5442. LSTC, 2014.



6 Průběh změny tlakové pevnosti v závislosti na působící teplotě
6 Compressive strength in relation to temperature

pletní prohřátí vzorku. Po této době se provede běžná zkouška pevnosti v tlaku, tak jak je uvedeno v EN 12390-3 [20]. Naměřené pevnosti v tlaku jsou uvedeny na obr. 6. Výsledky všech materiálů jsou porovnány s daty z dostupné literatury, konkrétně pak Wang [15], Osuji a Ukeme [21], Pimenta a kol. [22], Pliya a kol. [23], Drzymala a kol. [24].

Nejnižší pevnosti v tlaku bylo dosaženo u materiálu s minerální drtí (S) – maximální hodnota při pokojové teplotě byla téměř 10 MPa. Maximální hodnota tlakové pevnosti byla naměřena u vysokopevnostního betonu UHPFRC (U), a to 158 MPa. U všech materiálů pevnost v tlaku s rostoucí teplotou klesá, s výjimkou mírného nárůstu při teplotách mezi 100 a 300 °C u některých materiálech, což lze přičíst rehydrataci zbytkových a nehydratovaných cementových materiálů aktivovaných vyššími teplotami.

Shrnutí

Článek (včetně navazující II. části) popisuje a shrnuje dlouhodobý výzkum autorů, jenž byl v průběhu let prezentován na několika vědeckých konferencích a také publikován např. v Horníková a kol. [8] nebo Horníková [25].

Zde byla v I. části prezentována měření materiálových vlastností, včetně použitých metod. Materiálové charakteristiky, které klesají se zvyšující se působící teplotou, jsou objemová hmotnost, tepelná vodivost a pevnost v tlaku. Naopak rostoucí hodnoty je možné se zvyšující se teplotou pozorovat u porozity, měrné tepelné kapacity a permeability všech materiálů. Všechny tyto vlastnosti jsou principiálně založeny na transportu a odpařování vody z materiálu. Pevnost v tlaku se zvyšující se teplotou u všech materiálů klesala, resp. při nejvyšší teplotě dosahovala přibližně 20% hodnoty naměřené při pokojové teplotě a tato hodnota byla téměř stejná pro všechny studované materiály. Při teplotě přibližně 200 °C se pevnost v tlaku mírně zvýšila. To je obvyklé u mnoha druhů betonu, ale tento jev je většinou opomíjen.

II. část článku věnovaná samotnému účinku kombinovaného zatížení (požár a výbuch) bude publikována v č. 4/2023.

Příspěvek vznikl za finanční podpory projektu č. 22-33039S GAČR.



Ing. Kateřina Horníková, Ph.D.
katerina.hornikova@fsv.cvut.cz



doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.
marek.foglar@fsv.cvut.cz



Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.
radek.stefan@fsv.cvut.cz



Ing. Radek Hájek, Ph.D.
radek.hajek@fsv.cvut.cz

všichni: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových a zděných konstrukcí

inzerce

Svět betonu

PROSTOR, KDE MŮŽETE ČESKÉ A SLOVENSKÉ ODBORNÉ VEŘEJNOSTI PREZENTOVAT VÝSLEDKY SVÉHO VÝZKUMU

BETON

odborný časopis

- vychází již od roku 2001 (u odborné veřejnosti známý pod názvem Beton TKS)
- díky **podpoře svazů** časopis není závislý na konkrétní soukromé společnosti
- vybrané **příspěvky jsou lektorovány**
- **zvýhodněné předplatné** pro studenty a inženýry do 30 let

BETON

odborný web

- jediný a **největší specializovaný web** svého druhu v České a Slovenské republice
- více než **3100 dostupných článků** online
- **vyhledávání** v databázi článků časopisu Beton a odborných pojmech
- Štěrbov betonářský překladový **slovník**

NOVINKA
elektronické
předplatné