

VLASTNOSTI BETONU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ A JEJICH VLIV NA ODOLNOST VŮČI POŽÁRU A VÝBUCHU

Kateřina Horníková, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
katerina.hornikova@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Požár a výbuch se řadí mezi extrémní zatížení, kterým mohou být vystaveny všechny typy konstrukcí. Extrémní zatížení budov je aktuální a stále diskutované téma vzhledem ke zhoršující se bezpečnostní situaci. V souvislosti s tím, je nutné navrhovat konstrukce tak, aby odolaly právě i těmto extrémním zatížením.

V současné době probíhá rozsáhlý experimentální program, zaměřený na odolnost betonových konstrukcí vůči požáru a následnému výbuchu. Součástí tohoto programu bylo stanovení materiálových vlastností několika druhů betonu v závislosti na působící teplotě a jsou prezentovány prostřednictvím tohoto příspěvku. Tyto materiálové vlastnosti budou dále použity jako vstupní hodnoty výpočetních modelů ať už pro simulaci vlivu požárního tak výbuchového zatížení konstrukce. Další část experimentálního programu, která je právě připravována, bude zaměřena na stanovení výbuchové odolnosti požárem poškozených prvků.

KLÍČOVÁ SLOVA

Materiálové vlastnosti • Požár • Výbuch • Extrémní zatížení

ABSTRACT

Fire and blast are one of extreme loading which all types of structures can be exposed. Extreme loading of structures is very actual topic because fire and blast near to structures are more common than before. Therefore, there is important design of structures resistant of extreme loading.

In this time, comprehensive experimental program is making. This program is focused on fire and subsequent blast resistance of concrete structures. One part of this program is determination of material properties several types of concrete depending on temperature. Results of this experiment are presented in this paper. These material properties will be use like base parameters of numerical simulations of influence of fire and blast loading on structures. Next part of this experimental program which is focused on blast resistant of structures is being prepared.

KEYWORDS

Material properties of concrete • Fire • Blast • Extreme loading

1. ÚVOD

Vzhledem ke zvyšujícímu se počtu útoků na obyvatelstvo se odolnost konstrukcí vůči extrémním zatížením stává aktuálním a diskutovaným tématem. Betonové konstrukce již není dostatečně navrhnut pouze s ohledem na běžné zatížení, ale i tak, aby odolaly případným explozím, požárům, nárazům letadel či automobilů apod.

Všechna tato extrémní zatížení jsou již několik let bedlivě zkoumána a výsledky výzkumu jsou postupně uplatňovány do aktualizací norem. Ve většině dostupných zdrojů jsou však tyto jevy studovány odděleně, tedy vždy pouze jeden typ zatížení, což je pochopitelný přístup vzhledem ke složitosti všech jevů. V praxi však většina těchto extrémních zatížení působí v kombinaci. I proto byl sestaven experimentální program zabývající se kombinovaným účinkem požáru a následného výbuchu. Tato kombinace je ve skutečnosti zcela běžná.

Tento článek se zabývá stanovením materiálových charakteristik vybraných druhů betonu v závislosti na zvyšující se teplotě. Konkrétně pak stanovení objemové hmotnosti, pevnosti v tlaku, tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity, porozity a permeability materiálů v závislosti na působící teplotě. Materiálové charakteristiky hrají významnou roli pro popis chování prvku vystavených tomuto kombinovanému účinku. Požár (nebo tepelné zatížení obecně) v materiálu způsobuje změny. Tyto změny jsou popsány právě změnou materiálových charakteristik, která definuje odolnost prvku. V takovém případě je výbuchu vystaven již oslabený prvek, jehož vlastnosti je pak možné definovat.

Cílem tohoto experimentálního programu je porovnat nejen samotné materiálové charakteristiky daných materiálů, ale také jejich změnu (zda bude některý materiál vykazovat významnější nárůst či pokles dané vlastnosti než ostatní materiály) a také podat ucelený pohled na materiálové vlastnosti potřebné ke správnému stanovení požární a výbuchové odolnosti. Zároveň dle získaných výsledků budou dále definovány další navazující experimenty a data

* Školitel: doc. Ing. Marek Foglar, Ph.D.

budou využita pro numerické simulace požáru, výbuchu i kombinovanému zatížení.

I přes složitost a komplexnost popsaného problému se některá pracoviště začínají zabývat kombinovaným účinkem požáru a výbuchu. Experimentální program zaměřený na účinky požáru a výbuchu prezentuje (Kakoginnis 2013, Ruan 2015 a Zhai 2015) s následným numerickým ověřením. Další experiment kombinovaného účinku byl proveden na předpjatém stropním panelu a výsledky jsou prezentovány v (Choi 2017).

2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Na odolnost betonových konstrukcí vůči požáru a výbuchu mají mimo jiné vliv vlastnosti použitých materiálů. V tomto případě se jedná především o vliv teploty na změnu materiálových charakteristik. Z toho důvodu byl experimentální program zahájen stanovením materiálových charakteristik pro vybrané typy betonu. Tyto materiály budou dále použity pro další experimenty.

Materiálové charakteristiky byly měřeny pro teploty 25 °C (pokojová teplota bez předchozího vysušení vzorku), 100 °C, 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C a 1 000 °C. U některých materiálů byla vynechána nejvyšší teplota.

Ve většině případů byly materiálové charakteristiky pro možnost porovnání měřeny dvěma a více metodami. Použité materiály a vyšetřované charakteristiky jsou popsány v následujících kapitolách.

2.1. Testované materiály

Materiálové charakteristiky byly měřeny pro tyto druhy betonu:

- Běžný beton C30/37 (ozn. C)
- Provdzdušněný beton (ozn. V)
- Beton s polypropylenovými vlákny (ozn. P)
- Vysokopevnostní beton s ocelovými drátky (ozn. U)
- Isoverbeton – beton s příměsí drti skelné vaty (ozn. S)

Běžný beton byl zvolen jako referenční materiál, který bude použit i pro další porovnávání. Tento běžný beton byl dále doplněn o provzdušňovací přísadu, případně o polypropylenová vlákna. Zbylé dva materiály byly od těchto zcela odlišné.

2.2. Materiálové vlastnosti a způsob jejich měření

Většina materiálových vlastností byla měřena více způsoby na několika pracovištích z důvodů porovnatelnosti výsledných hodnot. Měření všech vlastností bylo provedeno na třech sadách vzorků pro každý materiál. Tím byl v rozumné míře eliminován vliv ovlivnění výsledků nepřesným měřením, či výrobní chybou.

2.2.1. Objemová hmotnost v závislosti na teplotě

První měřenou charakteristikou byla objemová hmotnost v závislosti na rostoucí teplotě. Objemová hmotnost byla

měřena dvěma metodami. První měření proběhlo dle ČSN EN 993-1 (ozn. TZ). Druhým způsobem bylo měření za použití héliového pyknometru (ozn. MA).

2.2.2. Tlaková pevnost v závislosti na teplotě

Tlaková pevnost betonu v závislosti na zvyšující se teplotě byla měřena za použití klasického hydraulického lisu. K tomuto zařízení byla instalována elektrická pec, do které byl umístěn zkušební vzorek, následně byl zahřán na požadovanou teplotu. Po jejím dosažení byla přímo v peci provedena klasická tlaková zkouška.

2.2.3. Tepelná vodivost v závislosti na teplotě

Tepelná vodivost v závislosti na teplotě byla měřena dvěma metodami. První metodou byla metoda topného drátu popsaná v ČSN EN 993-15 (ozn. TZ). Druhá metoda, při které byl pomocí termočlánků zaznamenáván nárůst teploty v prvku, je popsána v (Černý 2011). Z naměřených hodnot pak byla spočtena tepelná vodivost použitých materiálů (ozn. MA).

2.2.4. Měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě

Měrná tepelná kapacita byla stanovena za pomoci vodního kalorimetru. Použitá metoda je popsána v (Poděbradská 2003 a Toman 1995).

2.2.5. Porozita v závislosti na teplotě

Porozita byla měřena metodou uvedenou v ČSN EN 993-1 s využitím změřené objemové hmotnosti (v závislosti na použitém měření objemové hmotnosti použito označení TZ a MA).

2.2.6. Permeabilita v závislosti na teplotě

Permeabilita, konkrétně plynopropustnost, byla měřena dle ČSN EN 993-4 při třech úrovních přetlaku, kdy při zkoušce je zaznamenáváno množství plynu, které projde zkušebním tělesem.

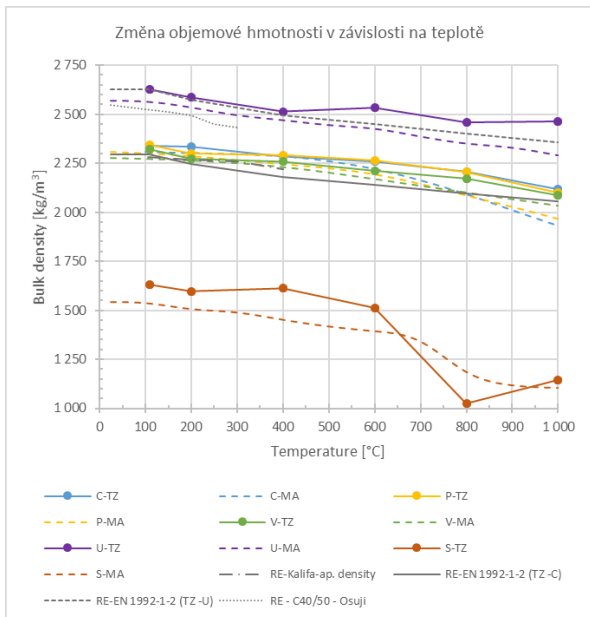
3. VÝSLEDKY TESTŮ

Všechna získaná data z proběhlých testů byla vzájemně porovnána. Pro další porovnání sloužila také dostupná literatura, která prezentovala materiálové charakteristiky podobných materiálů v závislosti na teplotě, případně hodnoty uvedené v normách. Výsledky jednotlivých testů jsou shrnuty níže.

3.1.1. Objemová hmotnost v závislosti na teplotě

Objemová hmotnost byla měřena dvěma metodami. Výsledky obou měření jsou uvedeny na Obrázku 1. Hodnoty byly dále porovnány s předpokládaným průběhem na základě normou definovaných parametrů.

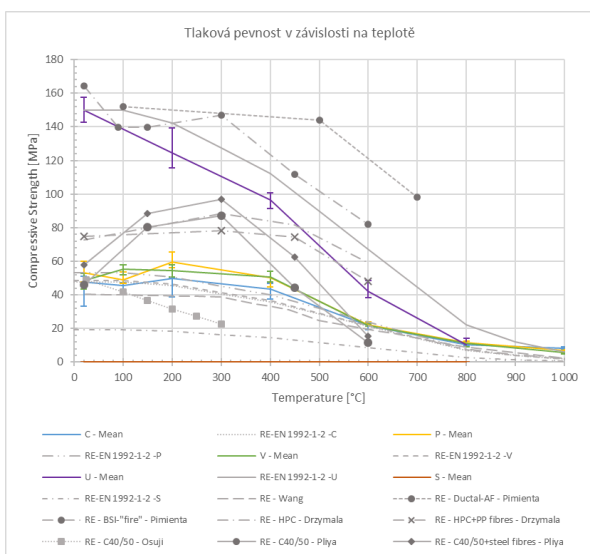
Dle předpokladů objemová hmotnost všech materiálů klesá se zvyšující se teplotou materiálu. Průběhy z obou měření jsou porovnatelné a žádný materiál se významněji neodlišuje od ostatních. Při teplotě 1 000 °C je objemová hmotnost materiálů přibližně o čtvrtinu nižší než počáteční.



Obrázek 1: Změna objemové hmotnosti betonu v závislosti na teplotě.

3.1.2. Tlaková pevnost v závislosti na teplotě

Tlaková pevnost betonu byla měřena pouze jedním způsobem. Výsledky jsou uvedeny na Obrázku 2. Zároveň jsou porovnány s předpokládaným průběhem dle normových parametrů a hodnotami z dostupné literatury. Výsledný průběh s normovou křivkou koresponduje, až na oblast mezi 100 °C až 200 °C, kde jsou hodnoty odlišné. To je dáno tím, že uvedená norma konzervativně zanedbává nárůst pevnosti při nižších teplotách. Výsledné pevnosti při vyšších teplotách však dosáhly předpokládaných hodnot. Výjimkou je pouze vysokohodnotný beton s vlákny (ozn. U), kde skutečná tlaková pevnost ve všech případech nižší než předpokládaná. Výsledná tlaková pevnost všech použitých betonů klesla přibližně na 20 % z počáteční tlakové pevnosti.



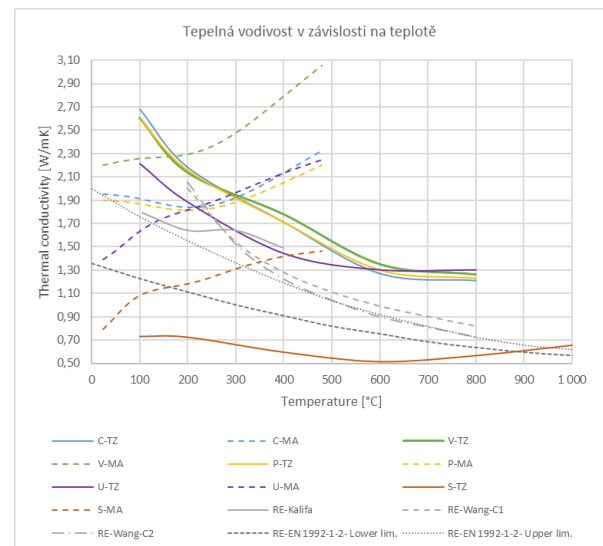
Obrázek 2: Změna tlakové pevnosti betonu v závislosti na teplotě.

Výsledné pevnosti betonu se skelnou drtí (ozn. S) nejsou uvedeny, jelikož v současné době nejsou zkoušky dokončeny.

3.1.3. Tepelná vodivost v závislosti na teplotě

Tepelná vodivost byla měřena dvěma různými metodami avšak se zcela neporovnatelným výsledkem znázorněným na Obrázku 3.

Tepelná vodivost stanovená dle metody uvedené v normě (křivky označné TZ) koresponduje s předpokládaným průběhem dle normy a dat získaných z další literatury. Tedy tepelná vodivost klesá s rostoucí působící teplotou. Avšak hodnoty získané druhým způsobem měření (označených MA) jsou zcela odlišné. Po překročení působící teploty kolem 250 °C přestává tepelná vodivost klesat, ale naopak začíná růst. U některých materiálů pak roste ve všech měřených bodech. Výsledná tepelná vodivost při nejvyšších teplotách tedy významně přesahuje tepelnou vodivost materiálu při pokojové teplotě. Jelikož se výsledky velice liší, je nutné zvážit vhodnost použití této metody.

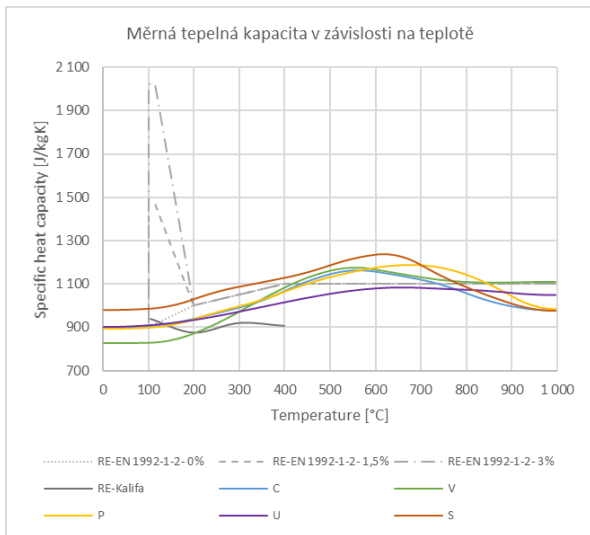


Obrázek 3: Změna tepelné vodivosti betonu v závislosti na teplotě.

3.1.4. Měrná tepelná kapacita v závislosti na teplotě

Měrná tepelná kapacita je další významnou materiálovou charakteristikou. Byla měřena jednou metodou a výsledné hodnoty jsou uvedeny na Obrázku 4. Hodnoty byly porovnány s předpokládaným normovým průběhem. Výsledky jsou srovnatelné s referenční křivkou pro 0% vlhkost, jelikož zkušební vzorky byly před samotnou zkouškou vysušeny.

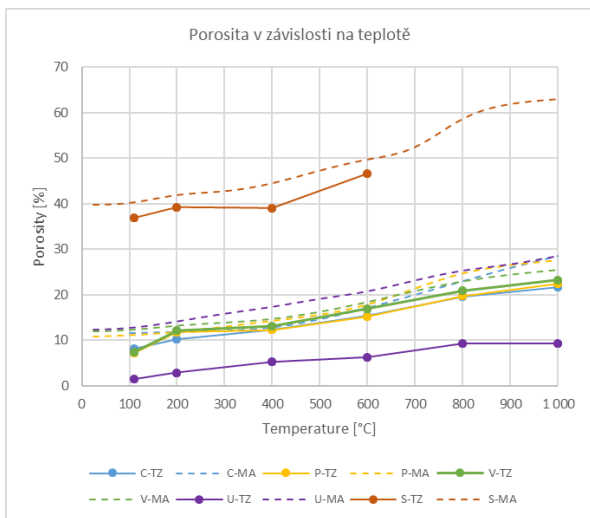
Měrná tepelná kapacita u všech použitých materiálů roste přibližně do teploty 600 °C a poté znovu klesá. Konečná měrná tepelná kapacita je však vyšší než její počáteční hodnoty. Měrná tepelná kapacita je ovlivněna vlhkostí materiálu a to ve všech jejích podobách. To se odráží na jejím výsledném průběhu.



Obrázek 4: Změna měrné tepelné kapacity betonu v závislosti na teplotě.

3.1.5. Porozita v závislosti na teplotě

Porozita byla měřena dvěma různými metodami a výsledky jsou uvedeny na Obrázku 5. Výsledky obou měření jsou srovnatelné a dosahují přibližně stejných hodnot. Výjimkou je pouze vysokohodnotný beton s drátky (ozn. U), kde jedno měření vykazuje téměř dvojnásobnou porozitu než druhé. Porozita materiálu se stoupající působící teplotou roste a při nejvyšší teplotě je více než 2x vyšší než při počátečních pokojových podmínkách.



Obrázek 5: Změna porozity betonu v závislosti na teplotě.

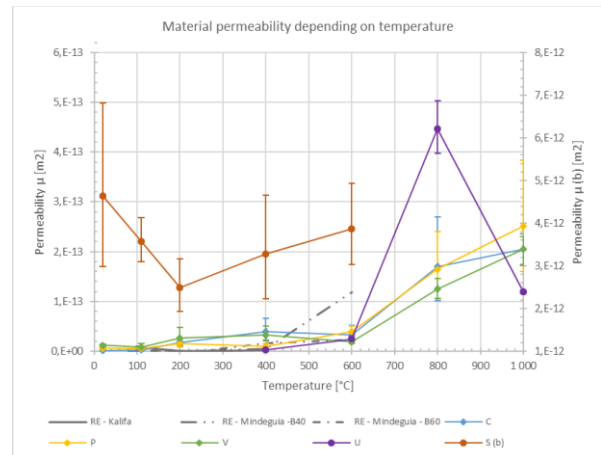
3.1.6. Permeabilita v závislosti na teplotě

Permeabilita je s porozitou úzce spjata. S rostoucí porozitou roste také množství otevřených pórů, což způsobuje zvýšení permeability. V tomto případě byla permeabilita měřena jakožto plynopropustnost. Výsledné hodnoty jsou uvedeny na Obrázku 6.

Výsledné hodnoty byly porovnány s průběhy získanými z literatury a odpovídají předpokladu. Permeabilita pozvolna roste se zvyšující se teplotou a nejvíce roste při vysokých

teplotách nad 600 °C. Výsledná permeabilita mnohonásobně převyšuje počáteční hodnoty, což svědčí o významném poškození prvku během ohřevu zkušebního tělesa.

Nejvyšší hodnoty permeability byly stanoveny pro isoverbeton (ozn. S), naopak nejnižší pro vysokopevnostní beton s drátky (ozn. U). Ten při teplotách do 400 °C vykazoval nulovou permeabilitu.



Obrázek 6: Změna permeability betonu v závislosti na teplotě.

4. ZÁVĚR

V současné době je ve výzkumné oblasti ve většině případů k extrémním zatížení konstrukcí přistupováno jednotlivě. Existuje mnoho pracovišť zabývajících se zatížením konstrukcí požárem, výbuchem, nárazy do budov a důležitých částí infrastruktury. Velice málo výzkumných týmů přistupuje k problémům komplexně s přihlédnutím k tomu, že tyto extrémní jevy na konstrukci často působí současně či bezprostředně po sobě. Proto je snaha o propojení těchto jevů, v tomto případě propojení výbuchu a požáru.

Propojení těchto jevů je velice náročné. Prvním krokem pro popsání kombinovaného efektu je práce popis změn materiálových vlastností. Výsledky těchto měření jsou uvedeny v tomto článku. Dalšími kroky budou experimenty zaměřené na odolnost těchto materiálů vůči výbuchu.

Proběhlými zkouškami byla stanovena změna objemové hmotnosti v závislosti na teplotě, kdy objemová hmotnost klesá se zvyšující se teplotou. Nejnižší objemová hmotnost byla naměřena pro Isoverbeton (ozn. S), nejvyšší pak pro vysokopevnostní beton s drátky (ozn. U). Tlaková pevnost v závislosti na teplotě klesá s rostoucí teplotou. Nejvyšší hodnoty tlakové pevnosti byly naměřeny pro vysokopevnostní beton s drátky (ozn. U) a nejnižších hodnot dosáhl běžný beton C30/37 (ozn. C). Změna tepelné vodivosti v závislosti na teplotě byla závislá na použitém způsobu měření. Nejnižší tepelnou vodivost vykazoval isoverbeton (ozn. S), naopak nejvyšší provzdušněný beton (V). Změna měrné tepelné kapacity koresponduje s normovým průběhem a hodnoty všech materiálů jsou téměř srovnatelné. Porozita a permeabilita roste s působící teplotou, nejvyšší hodnoty permeability a porozity byly naměřeny pro isoverbeton

(ozn. S) a nejnižší pro vysokohodnotný beton s drátky (ozn. U).

V tento moment jsou připravovány experimenty, kdy zkušební vzorky budou vystaveny vysokým teplotám a následně výbuchu. Zkušební vzorky budou vyrobeny z materiálů, pro které byly měřeny materiálové vlastnosti. U vzorků vystavených požáru bude zaznamenán jejich stav, míra poškození (odštěpení) a průběh nárůstu teploty v prvku. Poté budou vzorky vystaveny výbuchu, kdy bude měřeno způsob a míra poškození a rychlost odletujících částí.

Poslední částí experimentálního programu je numerické ověření proběhlých experimentů.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory SGS19/035/OHK1/1T/11, Českého Vysokého učení technického v Praze.

Reference

- Neville, A. M. (1995), *Properties of concrete*.
- Kalifa, P., Tsimbrovska, M., & Baroghel-Bouny, V. (1998), High performance concrete at elevated temperatures—an extensive experimental investigation on thermal, hygral and microstructure properties, in 'Proceedings of the International Symposium on High-Performance and Reactive Powder Concretes', pp. 259-279.
- Wang, W. C. (2017), Compressive strength and thermal conductivity of concrete with nanoclay under Various High-Temperatures, in 'Construction and Building Materials', Vol. 147, pp. 305-311.
- Gawin, D., Majorana, C. E., & Schrefler, B. A. (1999), Numerical analysis of hygro-thermal behaviour and damage of concrete at high temperature, in 'Mechanics of Cohesive-frictional Materials', Vol. 4, 37-74.
- Mindeguia, J. C. (2009), *Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons* (Doctoral dissertation, Université de Pau et des Pays de l'Adour).
- Černý, R., & Vejmelková, E. (2011), Apparent thermal conductivity approach at high-temperature measurements of porous materials, in 'Measurement', Vol. 44, pp. 1220-1228.
- Poděbradská, J., Pavlík, J., Toman, J., & Černý, R. (2003), Specific heat capacity of cementitious composites in high-temperature range, in 'Proceedings of the Thermophysics 2003 meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society', pp. 18-23.
- Toman, J., & Černý, R. (1995), Calorimetry of building materials, in 'Journal of Thermal Analysis and Calorimetry', Vol. 43, pp. 489-496.
- Kakogiannis, D., Pascualena, F., Reymen, B., Pyl, L., Ndambi, J. M., Segers, E., Lecompte, D., Vantomme, J., & Krauthammer, T. (2013), Blast performance of reinforced concrete hollow core slabs in combination with fire: Numerical and experimental assessment, in 'Fire Safety Journal', Vol. 57, pp. 69-82.
- Ruan, Z., Chen, L., & Fang, Q. (2015), Numerical investigation into dynamic responses of RC columns subjected for fire and blast, in 'Journal of Loss Prevention in the Process Industries', Vol. 34, pp. 10-21.
- Zhai, C., Chen, L., Xiang, H., & Fang, Q. (2016), Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire, in 'International Journal of Impact Engineering', Vol. 97, pp. 29-45.
- Choi, S. J., Lee, S. W., & Kim, J. H. J. (2017), Impact or blast induced fire simulation of bi-directional PSC panel considering concrete confinement and spalling effect, in 'Engineering Structures', Vol. 149, pp. 113-130.
- Osuji, S. O., & Ukeme, U. (2015), Effects of Elevated Temperature on Compressive Strength Of Concrete: A Case Study of Grade 40 Concrete, in 'Nigerian Journal of Technology', Vol. 34, pp. 472-477.
- Drzymała, T., Jackiewicz-Rek, W., Tomaszewski, M., Kuś, A., Gałaj, J., & Śukys, R. (2017), Effects of high temperature on the properties of high performance concrete (HPC), in 'Procedia Engineering', Vol. 172, pp. 256-263.
- Pimienta, P., Mindeguia, J. C., Simon, A., & Behloul, M. (2011), Behavior of UHPFRC at high temperatures, in 'Designing and Building with UHPFRC', pp. 579-600.
- Pliya, P., Beaucour, A. L., & Noumowé, A. (2009), *Strength and porosity of concrete incorporating polypropylene and steel fibres subjected to high temperature* (No. VTT-SYMP--256).
- ČSN, EN. "993-1 (72 6020)." Praha: Český normalizační institut, c1996 9.
- ČSN, EN. "993-4 (72 6020)." Praha: Český normalizační institut, c1997 1.
- ČSN, EN. "993-15 (72 6020)." Praha: Český normalizační institut, c1999 8.
- EN 1992-1-2. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures-Part 1-2: General rules-structural fire design. European Committee for Standardization.