

# VYŠETŘOVÁNÍ MATERIÁLOVÝCH PARAMETRŮ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ PO POŽÁRU

*Petr Müller\**

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
petr.muller.1@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Příspěvek se věnuje problematice železobetonových konstrukcí vystavených požáru. V rámci postupu po skončení požáru je obvykle nutné konstrukci zhodnotit, zda je dostatečně spolehlivá a bezpečná pro další užívání, a dále provést výpočet reziduální únosnosti prokazující stav nosných konstrukcí.

Pro posouzení ŽB konstrukcí po požáru je zapotřebí získat vstupní údaje charakterizující materiálové vlastnosti betonu a výztuže a kvantifikovat tak míru poškození obou materiálů vlivem vysokých teplot. V příspěvku jsou popsány vybrané destruktivní a nedestruktivní zkušební metody s důrazem na jejich praktickou využitelnost a jednoduchost provedení. Pozornost je věnována pouze metodám zkoušení betonu. Dále jsou uvedeny výsledky provedeného experimentu srovnávajícího destruktivní a nedestruktivní tvrdoměrnou zkoušku. V závěru je nastiněn záměr provedení dalších experimentů pro ověření a srovnání většího množství zkušebních metod.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Beton • Vysoké teploty • Reziduální parametry • Pevnost v tlaku • Destruktivní a nedestruktivní zkušební metody

## ABSTRACT

The paper focuses on reinforced concrete (RC) structures exposed to fire. In the post-fire process, it is usually necessary to evaluate the structure to see if it is sufficiently reliable and safe for further use, and to calculate the residual load carrying capacity. For the assessment of RC structures after fire, it is necessary to obtain input data characterizing the material properties of concrete and reinforcement and to quantify the degree of damage to both materials due to high temperatures.

The paper describes selected destructive and non-destructive test methods with emphasis on their practical usability and simplicity of execution. Attention is paid only to concrete testing methods. Next, the results of an experiment comparing a destructive and non-destructive hardness test are presented. The conclusion outlines the intention to conduct further experiments to verify and compare a number of test methods.

## KEYWORDS

Concrete • High temperatures • Residual parameters • Compressive strength • Destructive and non-destructive testing methods

## 1. ÚVOD

Problematika železobetonových (ŽB) konstrukcí zasažených požárem je intenzivně studována od poloviny minulého století. Konstrukce ze železobetonu vykazují poměrně dobrou požární odolnost především díky teplotní setrvačnosti betonu a masivnímu charakteru prvků, obzvlášť při porovnání s ocelovými konstrukcemi.

Navzdory tomu způsobuje vystavení betonu a výztuže vysokým teplotám (při požáru dosahují teploty až 1000 °C) poškození obou materiálů, které přímo snižuje únosnost konstrukce. Velká část z těchto poškození je nevratná. Pokud tedy konstrukce nezkolabuje během požáru, její zbytková únosnost bývá často více či méně redukována, což přímo ovlivňuje budoucí využitelnost budovy, resp. potřebu její sanace či zesílení.

Tento příspěvek se zabývá možnostmi zjišťování zbytkových materiálových parametrů ŽB konstrukcí po požáru pro potřeby klasifikace poškození prvků a dále pro možnost provedení výpočtu zbytkové únosnosti. Představeny jsou vybrané destruktivní a nedestruktivní zkušební metody.

## 2. ZJIŠŤOVÁNÍ REZIDUÁLNÍCH PARAMETRŮ ŽB KONSTRUKCÍ PO POŽÁRU

Pokud dojde k požární události v budově, je obvykle na místo přivolán statik specialista. Po několika dnech po požáru se provádí předběžné prohlídky objektu (s důrazem na bezpečnost). V rámci předběžné prohlídky se určí rozsah požáru, identifikují se zasažené konstrukce a vytipují ty nejvíce poškozené. Mohou se také provést první informativní nedestruktivní zkoušky.

Dále se obvykle přistupuje k podrobné prohlídce objektu, během které se klasifikují nosné konstrukce dle míry poškození (na základě vizuálních znaků – např. stav omítky, odštěpení krycí vrstvy, obnažení výztuže, trhliny, apod.). Během této fáze se dále provádí nedestruktivní in-situ zkoušky

---

\* Školitel: prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.; školitel specialista: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

na vytípaných prvcích a z těchto prvků jsou také odebrány jádrové vývrty pro laboratorní zkoušky.

Existuje celá řada zkušebních metod pro zjišťování míry poškození betonu vlivem vysokých teplot. Tyto metody jsou založeny na různých fyzikálních principech a většina z nich je nepřímých – měří se pomocný parametr, který určitým způsobem souvisí s hledaným parametrem, nejčastěji tlakovou pevností betonu. Jednotlivé metody jsou různě složité na provedení, časově a finančně náročné a je k nim často zapotřebí sofistikovaného vybavení.

Pokud se na problém nahlédne z pohledu zásad diagnostiky konstrukcí, pro získání věrohodného a statisticky vyhodnoceného parametru betonu je zapotřebí relativně velké množství provedených zkoušek, nejčastěji kombinace destruktivních a nedestruktivních. V případě náročnějších zkušebních metod je ovšem jejich násobné opakování často nereálné. Z tohoto důvodu jsou dále uvedeny jen ty metody, které jsou dostatečně jednoduché a nenáročné na provedení, ale zároveň především ve vzájemné kombinaci mohou poskytnout dostatek informací o betonu poškozeném požárem. Tyto metody jsou uvedeny v Tab. 1. Obecně se doporučuje provést zkoušky i na nepoškozené části konstrukce pro možnost srovnání výsledků.

Tabulka 1: Vybrané zkušební metody betonu po požáru.

metoda	in-situ/ laboratorní	zkoušený parametr	sledovaný parametr
tlaková zkouška v hydraulickém lisu	laboratorní na vývrtnu	tlaková pevnost	$f_c$
Schmidtovo kladívko	in-situ na konstrukci	tvrdost povrchových vrstev	$f_c$
ultrazvuková impulzová metoda	obojí	kompaktnost struktury	$f_c, E_{dyn}$
metoda odporového vrtání	in-situ na konstrukci	tvrdost povrchových vrstev	hloubka poškození
kolorimetrie	laboratorní na vývrtnu	barevný odstín	rozložení teplot po průřezu

### 3. MATERIÁLOVÉ ZKOUŠKY

#### 3.1. Destruktivní tlaková zkouška v hydraulickém lisu

Destruktivní tlakovou zkoušku je možné chápat jako tradiční a referenční metodu pro nedestruktivní metody. Měří se přímo pevnost betonu v tlaku na jádrovém vývrtnu. Při odebrání vývrtnu musí být vzato v potaz předpokládané největší zrno kameniva v betonové směsi a dle toho zvolit průměr vývrtnu. Místo vývrtnu musí být vybráno pečlivě s ohledem na poškození, které se konstrukci odebráním vzorku způsobuje, a dále hustotu vyztužení daného místa – ideálně by ve vývrtnu neměl být žádný kus vyztuže. Pokud je ve vzorku obsažena vyztuž rovnoběžně s jeho podélnou osou, je tento vzorek klasifikován jako nevyhovující pro zkoušení a musí se vyloučit. Jádrový vývrt dále musí splňovat požadavky na štíhlostní poměr dle vztahu (1), který je pro normová zkušební tělesa roven 1,0 (odpovídá krychelné pevnosti) nebo 2,0 (odpovídá válcové pevnosti). Pokud se štíhlost vzorku

pohybuje mezi těmito hodnotami, uvádí dnes již neplatná norma ČSN 73 1317 opravné součinitele. Štíhlostní poměry  $\lambda < 1,0$  a  $\lambda > 2,0$  norma nepřipouští z důvodu ovlivnění výsledku trojosou napjatostí, resp. štíhlostí.

$$\lambda = l/a, \quad (1)$$

kde  $\lambda$  označuje štíhlostní poměr,

$l$  označuje délku vzorku,

$a$  označuje průměr, resp. délku strany vzorku.

Další specifikum destruktivního zkoušení betonu poškozeného vysokými teplotami je skutečnost, že rozložení maximálně dosažené teploty po průřezu během požáru většinou není stejnoměrné (kromě velmi dlouhých požárů) a tudíž i poškození betonu se s hloubkou liší. To je potřeba zohlednit a v případě velkého rozdílu teplot (k odhadu může sloužit kolorimetrie) např. vzorek rozdělit na více částí.

#### 3.2. Tvrdoměrná zkouška Schmidtovým kladívkem

Tvrdoměrná metoda je tradičně používána pro orientační zkoušení pevnosti betonu novostaveb (např. kontrola nárůstu pevnosti) či starších konstrukcí (např. ověření pevnostní třídy použitého betonu) a je dlouhodobě velmi oblíbená vzhledem k jednoduchosti a nenáročnosti. K jejímu provedení se používá tzv. Schmidtovo kladívko a funguje na principu měření tvrdosti povrchové vrstvy betonu (čím vyšší tvrdost, tím výše se odrazí úderník a tím vyšší hodnota odskoku je zaznamenána – ta se následně pomocí diagramu od výrobce převede na pevnost v tlaku).

Zkušební metodu lze použít i pro orientační stanovení tlakové pevnosti betonu poškozeného vysokými teplotami (fib 2008), protože v důsledku vysokých teplot dochází k redukcí nejen pevnosti, ale i tvrdosti betonu. Jednotlivé výsledky zkoušky na jednom prvku se mohou vzhledem k charakteru metody a heterogenitě betonu relativně hodně lišit, pro získání statisticky věrohodných dat je tedy třeba zkoušku vícekrát opakovat. Na základě provedeného experimentu (Müller 2019) a výsledků publikovaných v literatuře (Albrektsson 2011) lze konstatovat, že metoda je dostatečně výstižná pro teploty do cca 600 °C. U vyšších teplot jsou již povrchové vrstvy natolik poškozené a nesoudržné, že kladívko není dostatečně citlivé pro zaznamenání malých (ale nenulových) pevností. Dále je třeba mít na paměti, že se zkouší tvrdost, resp. pevnost pouze povrchové vrstvy a že pevnost vnitřní části betonu může být násobně vyšší. Zkouší se převážně in-situ přímo na konstrukci.

Z výše uvedeného vyplývá, že se tato metoda hodí pro předběžné orientační stanovení pevnosti, resp. jejího poklesu vzhledem k nezasažené části konstrukce, k vytípaní výrazně poškozených konstrukcí a jejich klasifikaci.



Obrázek 1: Provádění tvrdoměrné zkoušky Schmidtovým kladívkem.

### 3.3. Ultrazuková impulsová metoda

Ultrazuková impulsová metoda se stejně jako tvrdoměrná metoda Schmidovým kladívkem běžně používá k diagnostice betonových konstrukcí. Je založena na prozvučování konstrukce ultrazukovými vlnami (UV) a měřením rychlosti a časů jejich průchodu materiálem mezi sondami. Z naměřených dat lze pomocí převodních vztahů stanovit předpokládanou tlakovou pevnost betonu a dynamický modul pružnosti.

Průchod UV betonem ovlivňuje jeho objemová hmotnost, vlhkost, kompaktnost struktury, přítomnost kaveren a výztuže. UV se nejrychleji šíří pevnými látkami, vzduchem se šíří řádově pomaleji. Proto pokud je prozvučován materiál s trhlinami či kavernami, vlny dané místo „obchází“ (je to rychlejší než šíření vzduchem) a tím roste čas zaznamenaný přijímačem. Přítomnost betonářské výztuže měření ruší.

Těchto charakteristik lze využít i při prozvučování betonu poškozeného vysokými teplotami. S rostoucími teplotami je struktura betonu méně kompaktní. Z důvodu teplotní nekompatibility cementové pasty a kameniva vznikají ve struktuře mikrotrhliny, což se projeví v naměřených časech impulsů.

Pro použití metody je vhodné provést destruktivní zkoušku vývrtů z nepoškozené části konstrukce, stejně tak provést ultrazukovou zkoušku na stejné nepoškozené části. Z výsledků následně vytvořit korelační křivku pro UV metodu – tím se získá referenční výsledek, ke kterému je možné vztáhnout výsledky UV zkoušky na poškozené konstrukci.

Z výše uvedeného vyplývá, že se tato metoda hodí jako doplňková k destruktivní zkoušce tlakové pevnosti, díky níž lze získat představu o poškození konstrukce a dále orientační hodnoty tlakové pevnosti a modulu pružnosti poškozeného betonu, aniž by bylo nutné provádět v takovém počtu destruktivní zkoušku.



Obrázek 2: Provádění ultrazukové zkoušky na vzorcích z výškové budovy Windsor (Madrid) zasažené požárem (Calavera 2005).

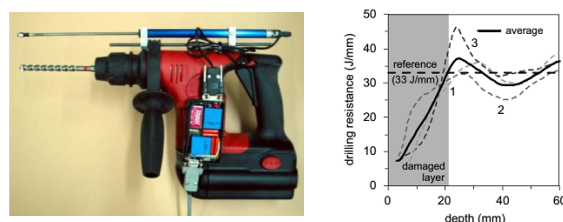
### 3.4. Tvrdoměrná metoda odporového vrtání

Metoda odporového vrtání podobně jako tvrdoměrná metoda Schmidovým kladívkem pracuje s tvrdostí betonu. Na rozdíl od ní nesleduje přímo souvislost mezi tvrdostí a tlakovou pevností betonu, ale porovnává energii potřebnou k vyvrtání jednotky hloubky v nepoškozeném betonu a betonu poškozeném vysokými teplotami. Poškozený beton vykazuje menší tvrdost a tudíž vrtání do něj vyžaduje méně energie.

Metoda byla vyvinuta na polytechnické univerzitě v Miláně v Itálii (Felicetti 2006) a jedná se v podstatě o variaci na tvrdoměrnou metodu zjišťování pevnosti zdiva Kučerovou

vrtačkou. Používá se upravená elektrická vrtačka (Obr. 3), na které je instalováno zařízení zaznamenávající spotřebu elektřiny a zároveň hloubku vrtání. Oba signály jsou zpracovány do diagramu, viz Obr. 3. Hledanou hodnotou je hloubka, ve které se rovná energie potřebná k vrtání v referenčním nepoškozeném betonu a betonu poškozeném vysokými teplotami. To lze interpretovat jako přibližnou hloubku poškození betonu vysokými teplotami.

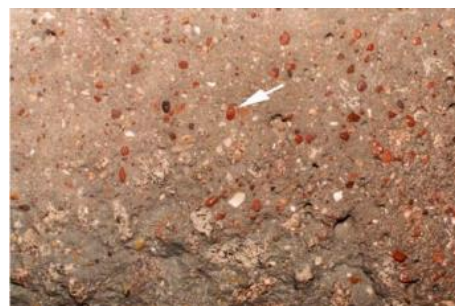
Z výše uvedeného vyplývá, že se tato metoda hodí k rychlým odhadům hloubky poškození zasažených ŽB konstrukcí a společně se zkouškou Schmidovým kladívkem může dobře sloužit k in-situ vytipování nejvíce poškozených prvků, na kterých je vhodné provést zkoušky UV a odebrat vývrty pro destruktivní zkoušky. U této metody je nutné srovnání s referenčním vrtem do nepoškozené části konstrukce.



Obrázek 3: Upravená vrtačka pro metodu odporového vrtání, příklad vyhodnocení zkoušky (Felicetti 2006).

### 3.5. Kolorimetrie

Kolorimetrická metoda využívá vizuální vlastnosti betonu, resp. kameniva v něm obsažené. Kamenivo v sobě často obsahuje určité množství železa, které na zvyšující se teploty reaguje změnou barvy. Tato změna je pak v celkové struktuře betonu poměrně dobře patrná, viz Obr. 4. Pro různé rozmezí teplot je změna barvy odlišná. S rostoucí teplotou se postupně mění barva do růžových, oranžových, červených, šedobílých a žlutohnědých odstínů. Změnu barvy tak lze orientačně přisoudit určitému rozmezí teplot, který také souvisí se stavem betonu z hlediska pevnosti a soudržnosti, viz Tab. 2.



Obrázek 4: Charakteristické zbarvení kameniva vlivem vysokých teplot (Felicetti 2004).

Změny barvy mohou být hodnoceny zrakovým vjemem, případně laboratorně kolorimetrem. Zrakový vjem je nejjednodušší a nejrychlejší, ale také silně subjektivní. Hodnocení odstínu barvy lidským zrakem také závisí na světelných podmínkách v daném prostoru. Oproti tomu je vyhodnocení kolorimetrem zbaveno subjektivního faktoru. Jedná se o sofistikovaný laboratorní přístroj, který barevný

odstín určuje na základě optických vlastností a chromaticity. Ke kolorimetru existuje podobná, ale méně náročná alternativa – digitální analýza obrazu. Pracuje na podobném principu, ale k analýze postačí digitální fotografie (Felicetti 2004).

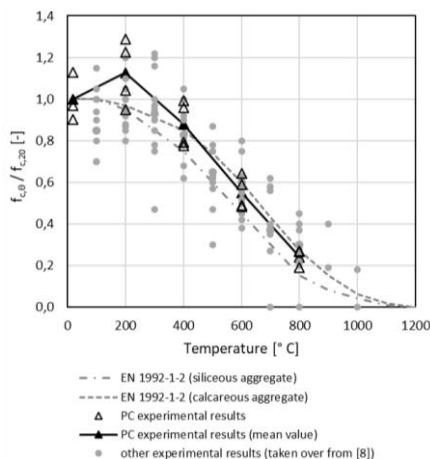
Tabulka 2: *Vyhodnocení kolorimetrie* (Albrektsson 2011).

teplota [° C]	barevné změny	stav betonu
0-300	žádná	téměř bez poškození
300-600	růžová až červená	značný pokles pevnosti
600-950	šedobílá	neúnosný
950+	žlutohnědá	neúnosný a drobný

Z výše uvedeného vyplývá, že tato metoda je vhodná k orientačnímu určení dosažených teplot na povrchu konstrukce (především s odštěpeným povrchem a tudíž odhaleným kamenivem) a také k získání představy o rozložení teplot v průřezu z jádrových vývrtů. Vzhledem k orientačnímu charakteru metody a různým reakcím jednotlivých typů kameniva na vysoké teploty je často možné spokojit se s vizuálním vyhodnocením barevných změn.

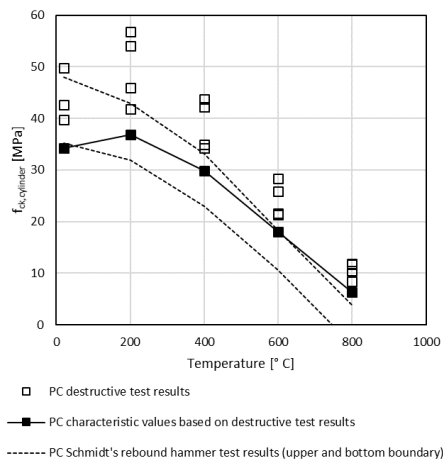
#### 4. VÝSLEDKY PROVEDENÉHO EXPERIMENTU

V květnu 2018 bylo provedeno experimentální měření pevnosti betonu za vysokých teplot (až do 800 °C). Výsledky experimentu jsou publikovány v článku (Müller 2019). Pevnost byla měřena destruktivní zkouškou tlakové pevnosti v hydraulickém lisu a dále tvrdoměrnou zkouškou Schmidovým kladívkem. Na Obr. 5 jsou uvedeny relativní pevnosti betonu v tlaku v závislosti na teplotě, dále výsledky zkoušek z jiných experimentů a také křivky poklesu pevnosti betonu doporučené v ČSN EN 1992-1-2. Z výsledků je patrné, že sklony křivek poklesu pevnosti s rostoucí teplotou z provedeného experimentu a doporučení v normě si odpovídají. Všechny hodnoty získané z experimentu jsou vyšší než hodnoty uvedené v normě, nejvíce potom pevnost při 200 °C. To je zřejmě dáno sekundární hydratací cementových zrn, která nezhydratovala při první hydrataci, a která byla indukována a urychlena vysokými teplotami. Při 200 °C zároveň beton ještě není vlivem teploty poškozen.



Obrázek 5: *Relativní tlakové pevnosti betonu z destruktivní zkoušky v závislosti na teplotě* (Müller 2019).

V rámci experimentu se dále vzorky testovaly pomocí Schmidova kladívka. Po provedení dostatečného počtu měření a statistickém vyhodnocení byly hodnoty odrazu převedeny na tlakovou pevnost betonu pomocí diagramu od výrobce přístroje. Získané hodnoty s odečtenými, resp. přičtenými doporučenými odchylkami byly vyneseny do grafu (Obr. 6), kam byly zároveň vyneseny charakteristické hodnoty tlakové pevnosti získané z destruktivní tlakové zkoušky. Z obrázku je patrné, že křivka „skutečné“ pevnosti z destruktivní zkoušky leží do cca 600 °C uvnitř prostoru vymezeného křivkami tvrdoměrné zkoušky, což odpovídá závěrům publikovaným v literatuře (Albrektsson 2011).



Obrázek 6: *Porovnání tlakové pevnosti betonu z destruktivní a nedestruktivní tvrdoměrné zkoušky při vysokých teplotách* (Müller 2019).

#### 5. GLOBÁLNÍ ANALÝZA

V příspěvku byly představeny a popsány vybrané destruktivní a nedestruktivní zkušební metody, které jsou vhodné k vyšetřování materiálových parametrů betonu zasaženého požárem. Získané reziduální parametry betonu společně s reziduálními parametry výztuže slouží jako vstupní údaje do výpočtu zbytkové únosnosti konstrukce. Tu je třeba stanovit nejen s ohledem na snížené mechanické parametry obou materiálů, ale také s přihlédnutím k nesilovým účinkům teploty na konstrukce (především staticky neurčité).

Během požáru mají konstrukce vlivem vysokých teplot tendenci zvětšovat svůj objem a zakřivovat se. Pokud je těmto deformacím bráněno, vznikají přídatné vnitřní síly, které tak během požáru mění průběh vnitřních sil po délce prvku. Vlivem toho mohou být některé průřezy přetížené. V případě dostatečné rotační kapacity těchto průřezů a dostatečné únosnosti přilehlých průřezů se vnitřní síly přerozdělí a konstrukce může nadále fungovat, ale za cenu trvalé změny statického systému (typicky ze spojitého nosníku se v limitním případě stává soustava prostých nosníků). Tato změna má přímý dopad do statického chování konstrukce v případě dalšího využívání a proto musí být vzata v úvahu v rámci globální analýzy konstrukce a výpočtu reziduální únosnosti.

## 6. ZÁVĚR

Tento článek se zabýval možnostmi vyšetřování materiálových parametrů betonu zasaženého vysokými teplotami. V kapitolách jsou postupně uvedena specifika materiálových zkoušek betonu po požáru a dále jsou vyjmenovány a popsány vybrané zkušební metody. Při jejich výběru byl kladen důraz na jednoduchost a nenáročnost jejich provedení a možnost opakovatelnosti. Výsledkem jednotlivých zkoušek jsou informace o míře poškození betonu, hloubce poškození, rozložení maximálních teplot po průřezu a tlakové pevnosti. Dohromady tyto dílčí informace poskytují poměrně dobrou představu o stavu betonu v daném konstrukčním prvku a dále poskytují vstupní hodnoty pro provedení výpočtu reziduální únosnosti.

V kapitole 4 jsou prezentované výsledky z provedeného experimentu, kde byly použity dvě zkušební metody popisované v tomto článku. Jejich výsledkem je porovnání relativních tlakových pevností s hodnotami, které udává norma, a dále vzájemné porovnání výsledků z obou zkušebních metod. Vyvozený závěr komentuje rozsah použití nedestruktivní metody.

V kapitole 5 je upozorněno na nutnost provedení globální analýzy konstrukce během požáru a zohlednění rizika změny statického systému staticky neurčitých konstrukcí vlivem nesilového zatížení konstrukcí od teploty.

Autor článku má v pokračování doktorského studia v plánu provést navazující experimentální zkoušení betonu vystaveného vysokým teplotám a provést větší množství zkušebních metod, které byly zmíněny v tomto článku. Výsledky jednotlivých metod budou následně porovnány.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci finanční podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS19/034/OHK1/1T/11.

## Reference

- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2002), *EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*, Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (1987), *Stanovení pevnosti betonu v tlaku*. Zrušená norma.
- International Federation for Structural Concrete. (2008), *fib Bulletin 46: Fire design of concrete structures: structural behaviour and assessment*. State-of-the-art report, Lausanne.
- Felicetti, R. (2006), The drilling resistance test for the assessment of fire damaged concrete, in 'Cement and Concrete Composites', Vol. 28, pp. 321-329.
- Felicetti, R. (2004), Digital Camera Colorimetry for the Assessment of Fire Damaged Concrete., in '2nd Fib

Task Group 4.3 Workshop - Fire Design of Concrete Structures: What now? What next?'.  
Albrektsson, J. et al. (2011), *Assessment of concrete structures after fire*. Review. SP Technical Research Institute of Sweden.

Calavera, J. et al. (2005), *Fire in the Windsor building, Madrid: Survey of the fire resistance and residual bearing capacity of the structure after fire*. Madrid: INTEMAC. ISSN 1885-4575.

Müller, P. et al. (2019), Destructive and non-destructive experimental investigation of polypropylene fibre reinforced concrete subjected to high temperature, in 'Journal of Building Engineering', SUBMITTED PAPER.