

PÓROVÝ TLAK A ODŠTĚPOVÁNÍ BETONU VYSTAVENÉHO VYSOKÝM TEPLOTÁM: OD HISTORIE DO SOUČASNOSTI

Roman Chylik, *

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

ABSTRAKT

Následující příspěvek se zabývá odštěpováním betonu a pórovému tlaku v betonu vystaveného vysokým teplotám. Shrnuje historii v oblasti výzkumu odštěpování a stručně představuje existující, do současnosti popsané teorie, jako například teorii teplotního napětí, teorii tlaku vodní páry a výskytu vlhkostní ucpávky, teorii hydraulického tlaku, teorii náhlé expanze vodní páry (The Boiling Liquid Vapour Explosion) a teorii odštěpování při ochlazování. Dále jsou v příspěvku detailně popsány jednotlivé faktory, které odštěpování, respektive pórový tlak ovlivňují. Mezi v příspěvku diskutované faktory patří zejména vliv vlhkosti, rychlost a druh zahřívání a vliv výskytu a obsahu PP vláken. V poslední části příspěvku jsou detailně popsány existující metody měření pórového tlaku a historický vývoj vývoje těchto metod.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pórový tlak • Měření • Vysoké teploty • Odštěpování • Beton • Požár

ABSTRACT

The following post deals with spalling of concrete and pore pressure in concrete exposed to high temperatures. It summarizes the history of spalling research and briefly introduces the existing theories described to date, such as the thermal stress theory, the steam pressure theory and the occurrence of moisture clog, the hydraulic pressure theory, the theory of the sudden expansion of water vapor (The Boiling Liquid Vapor Explosion), and the spalling theory during cooling. Furthermore, the article describes in detail the individual factors that influence spalling and pore pressure. Among the factors discussed in the paper are mainly the influence of humidity, the rate and type of heating and the influence of the occurrence and content of PP fibers. In the last part of the article, the existing methods of measuring pore pressure and the historical development of the development of these methods are described in detail.

KEYWORDS

Pore pressure • Measurement • High temperatures • Spalling • Concrete • Fire

1. ÚVOD

“Thus there are not two concrete pieces that are alike and there is not a single concrete piece that is the same all through. Even if two pieces are identical from the beginning, there are so many factors influencing their condition that they will not be identical in the end”
Helsing Atlasi (1993)

“...in some tests 10 specimens were tested with 5 spalling and 5 non-spalling.”
fib (2007)

“For specimens from the same batch, and under identical conditions, some could spall while others do not.”
Majorana et al. (2009)

I těmito vybranými citáty lze vyjádřit, jak je beton nevyzpytatelný materiál, a to jak za běžných podmínek, tak při podmínkách extrémních. Za jednu z nejextrémnějších podmínek lze zcela jistě považovat účinek požáru, na který je tento příspěvek zaměřen. V příspěvku je stručně popsáno odštěpování betonu vystaveného vysokým teplotám. Důraz je kladen na teorie výskytu odštěpování a faktory, které o případném odštěpování rozhodují. Dále je v článku prezentována obsáhlá srovnávací studie, která dokonale vystihuje platnost a poselství úvodních citátů.

2. TEORIE ODŠTĚPOVÁNÍ BETONU:

Do současnosti bylo popsáno několik modelů, zabývajících se odštěpováním betonu vystaveného vysokým teplotám, avšak názory odborníků na hlavní příčiny odštěpování betonu se stále rozcházejí. Je obecně známo, že odštěpování betonu je způsobeno kombinací několika faktorů (Malhotra 1984):

Tabulka 1: *Faktory způsobující odštěpování betonu - převzato z (Malhorta 1984) a editováno*

1) Vlhkost	1a) Tlak vodní páry
	1b) Zformování vlhkostní ucpávky
2) Napětí	2a) Počáteční stlačení

* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

	2b) Počáteční stlačení + teplotní napětí
	2c) Počáteční stlačení + teplotní napětí + napětí způsobené třecím odporem
3) Vznik trhlin	3a) Roztažnost kameniva
	3b) Vnitřní trhliny v materiálu
	3c) Roztažnost výztuže
4) Změna mechanických vlastností betonu	4a) Snížení pevnosti betonu v tahu vlivem zvýšené teploty

Na základě výše zmíněných jevů byly definovány základní teorie odštěpování betonu:

2.1. Teorie teplotního napětí:

Dle Bažanta (Bažant 2005) může být napětí od nerovnoměrného rozložení teploty v prvku příčina vzniku křehkého porušení a delaminace jednotlivých vrstev betonu. Toto porušení je kombinace dvouosé napjatosti od tlakového napětí a napětí od teplotního namáhání, které je rovnoběžné se zahříváním povrchem. Bažant (Bažant 2005) dále připisuje pórovému tlaku sekundární roli při případném odštěpování, avšak roli hlavní připisuje napětí od teplotního namáhání. Sekundární role pórového tlaku při odštěpování je připsána na základě teorie, která tvrdí, že ihned po vzniku případných trhlin od pórového tlaku dochází k rapidnímu poklesu pórového tlaku vlivem expanze vodní páry do nově se zformované mikrotrhliny. Pórový tlak tak může být iniciátor odštěpování, avšak po vzniku prvotních mikrotrhlin se řídicí role ujímá napětí od nerovnoměrné teploty.

Je obecně známo, že k odštěpování jsou náchylnější vysokopevnostní betony v porovnání s betony běžných pevnostních tříd. Toto lze připisovat schopnosti betonu vyšších pevnostních tříd zachytit větší přetvoření a zachytit více deformační energie, avšak tato skutečnost je spíše důkaz, že za odštěpování je zodpovědná teorie tlaku vodní páry.

2.2. Teorie tlaku vodní páry a výskyt vlhkostní ucpávky:

Teorie tlaku vodní páry je nejstarší z popsaných teorií zodpovědných za výskyt odštěpování. Prvotní pozorování o migraci vody a výskytu vodní páry v betonu vystaveného vysokým teplotám provedl Miller (Miller 1905), který popsal, že expanze vody v betonu může být zodpovědná za odštěpování povrchových vrstev. Následně Shorter a Harmathy (Shorter a Harmathy 1961) popsali model vlhkostní ucpávky, který následně revidoval Harmathy (Harmathy 1965). Model vlhkostní ucpávky lze zjednodušeně popsat jako cyklický proces procesů: 1) nárůst teploty, 2) změna stavu vody z pevného do plynného stavu, 3) transport vodní páry ve směru teplotního gradientu (ve směru k zahřívajícímu povrchu i do chladnějších částí konstrukce), 4) kondenzace vodní páry v oblasti s nižší teplotou. Tento jev je cyklicky opakován až do chvíle, kdy jsou chladnější části konstrukce plně saturovány. Tato plně saturovaná vrstva je nazývána vlhkostní ucpávka (v originále „moisture clog“). Před vznikem vlhkostní ucpávky je transport vodní

páry limitován pouze přirozenou permeabilitou betonu, avšak poté, co je vlhkostní ucpávka zformována, je transport vodní páry skrze tuto ucpávku znemožněn, což má za důsledek rapidní nárůst pórového tlaku. Ve chvíli, kdy pórový tlak přesáhne tahovou pevnost betonu, která je snížena zvýšenou teplotou, nastane odštěpování betonu.

2.3. Teorie hydraulického tlaku:

Teorie hydraulického tlaku je založena na předpokladu částečně či plně saturovaných, uzavřených pórů, ve kterých během zahřívání dochází k nárůstu objemu vody. Plná saturace může být způsobena buďto přirozeně nebo migrací vodní páry při působení vysokých teplot. Změna objemu vody způsobuje hydraulický tlak na stěny uzavřených pórů, který dle Khoylou (1997) a Breunese a Fellinger (2004) je pravděpodobně hlavní příčinou výskytu odštěpování betonu. Fellinger a Breunese (2005) stanovili křivku změny tlaku v závislosti na teplotě. Bylo definována změna tlaku v rozmezí 0,2 – 1,6 MPa/°C v rozmezí od 10°C do 374°C, tedy do kritické teploty pro vodu a vodní páru. Maximální přírůstek tlaku byl pak Fellingerem a Breunese 1,6 MPa/°C byl stanoven při teplotě 150°C. Pokles přírůstu tlaku po teplotě 150°C je připisován nevyhnutelné toku vodní páry skrze vzorek/materiál. Ghabezlo a kol. (2009) rovněž stanovil přírůstek hydrostatického tlaku v plně saturované cementové pastě jako 0,6MPa/°C při teplotě 20°C, což je ve shodě s výše uvedeným intervalem. Důkaz, že hydrostatický tlak má významný vliv při výskytu odštěpování je dle Fellinger a Breunese (2005) zejména významně vyšší teplotní roztažnost vody (70*10⁻⁶ K⁻¹) ve srovnání s okolním betonem (10*10⁻⁶ K⁻¹).

2.4. Teorie náhlé expanze vodní páry:

Teorie náhlé expanze vodní páry, známá též pod zkratkou BLEVE (The Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion) popsaná v (Ichikawa 2000) navazuje na teorii Petrov-Denisov a kol. (1972), kteří popsali teorii zahrnující rychlou expanzi vysoce zahřáté vody na vodní páru při změně objemu. Petrov-Denisov a kol. (1972) dále poznamenali, že prvotní impuls pro výskyt odštěpování je rozdíl tlaků mezi dvěma blízkými póry (zejména mezi uzavřenými póry obsahující kapalinu na vysokou teplotu a otevřenými póry s menším pórovým tlakem), který způsobí kolaps stěny mezi těmito póry. Ichikawa (Ichikawa 2000) tvrdí, že pokud se v cementové matici vyskytuje uzavřený pór obsahující vodu, je tato voda při vystavení požáru zahřáta vysoce nad teploty 100°C, avšak vlivem zvýšeného tlaku v pórové systému zůstává v kapalném stavu (jedná se o Isochorický děj: V = konstantní). Pokud dojde ke změně objemu, například vlivem výskytu mikrotrhliny, dochází k prudké a okamžité expanzi vodní páry, jelikož voda zahřátá na vysoké teploty instantně mění svůj stav z kapalného na plynný. Tento jev je doprovázen uvolněním značného množství energie, který může být iniciátor odštěpování. BLEVE teorie je v současnosti považována za relevantní teorii zejména pro vysokopevnostní betony.

2.5. Odštěpování při ochlazování:

Post-cooling spalling nemůže být přisuzován pórovému tlaku ani napětí od teplotního namáhání, jelikož nastává po vystavení konstrukce/materiálu vysokým teplotám, během chlazení nebo po zchlazení. Detailně je odštěpování po ochlazování popsáno v publikaci (Ghoury 2008). Důvodem pro odštěpování je vystavení konstrukce vlhkosti, která způsobí rehydrataci oxidu vápenatého za současného zvětšení objemu o 44% (Annerel 2009), což může zapříčinit výskyt odštěpování. Aby mohlo odštěpování po ochlazování nastat, měla by být konstrukce vystavena dostatečně vysoké teplotě pro rozklad uhlíčitanu vápenatého. Charakter případného odštěpování může být jak progresivní (vysokorychlostní), tak pomalé odštěpování, v závislosti na množství vlhkosti, které je konstrukce vystavena.

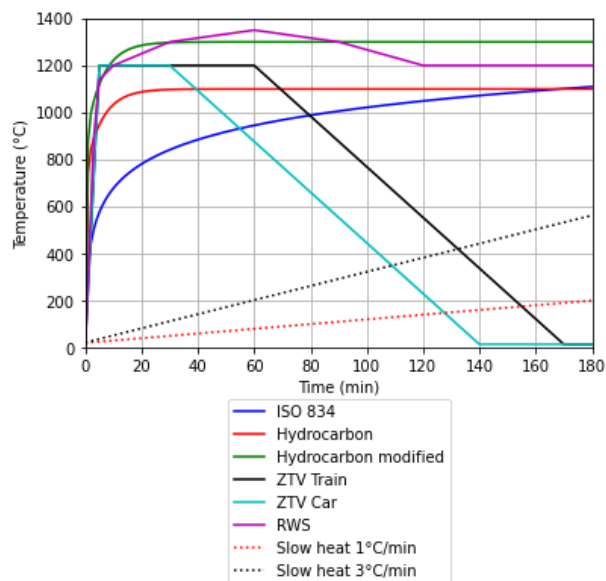
2.6. Shrnutí:

Veškeré teorie výše zmíněné mají silné a slabé stránky. Například Ichikawa (2000) zastává názor, že napětí vyvolané teplotním zatížením nemá zásadní vliv na výskyt odštěpování, jelikož různé betony mají značně rozdílnou náchylnost k odštěpování (NSC, FC, HPC, UHPC), zatímco vykazují srovnatelné mechanické vlastnosti a tepelnou vodivost. Toto tvrzení podporuje pozitivní vliv PP vláken, které prokazatelně redukuje výskyt odštěpování, ale zanedbatelně ovlivní fyzikální a mechanické vlastnosti. Ichikawa (2000) tedy tvrdí, že za výskyt odštěpování je primárně zodpovědný výskyt pórového tlaku. Proti tomuto tvrzení je však názor publikovaný v Bažant (2005) který tvrdí, že přirozeně vznikající mikrotrhliny značně zvyšují expanzní prostor pro vodní páru a pórový tlak je zanedbatelný. Bažantovo tvrzení však platí pro případy, kdy není dosaženo vyšší saturace. Pro případy, že je vzorek plně saturován, je nutné brát do úvah BLEVE teorii.

3. FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ ODŠTĚPOVÁNÍ A PÓROVÝ TLAK

3.1. Rychlost zahřívání:

Do současnosti bylo provedeno několik studií, které potvrzují, že rychlost zahřívání má pro výskyt odštěpování podstatný vliv, zejména v kombinaci s mechanickými vlastnostmi betonu. Obecně lze rychlost ohřevu rozdělit na zahřívání dle předepsaného požárního scénáře (dle předepsaných požárních křivek) a na zahřívání pomalým přírůstkem teploty. Zatímco nejčastěji používané nominální požární (Obr.) předepisují teploty, které během prvních několika málo minut dosahují stovek °C, pomalé zahřívání je definováno přírůstkem teplot nejčastěji v rozmezí 1-3°C/min (max 10°C/min).



Obrázek 1: Nejčastěji využívané teplotní křivky.

Například v Hertz (Hertz 1984) je zmíněno, že vyšší rychlost zahřívání vykazuje vyšší pravděpodobnost výskytu odštěpování. Zároveň je ale publikováno, že betony vyšších pevnostních tříd, které mají hutnou cementovou matici zpravidla obsahující křemičité úlety, vykazovaly odštěpování i při pomalém zahřívání nehlédě na použití PP vláken. Tento efekt potvrdil Phan (Phan 2001), který popsal, že při pomalém zahřívání 5°C/min nenastalo odštěpování pro beton tlakové pevnosti do 70MPa, včetně vzorků, které neobsahovala PP vlákna. Dále prezentoval, že betony o tlakové pevnosti 100MPa vykazovaly vysokou míru odštěpování, zejména výbušného odštěpování nikoliv povrchového. Vliv rychlosti zahřívání na výskyt odštěpování, respektive na zformování vlhkostní ucpávky je publikován v (Gyeongcheol 2018). Celkem 4 skupiny vzorků o pevnostech zhruba 30, 70, 110 a 170 MPa byly vystaveny pomalému zahřívání 1°C/min a rychlému zahřívání dle ISO-834. Pro HSC (110 a 170 MPa) nastalo odštěpování pro obě zvolené rychlosti zahřívání. Beton o pevnosti 70 MPa odštěpil pouze v případě rychlého zahřívání a beton 30 MPa nevykazoval odštěpování ani pro jednu zahřívací rychlost. Rozdíly lze sledovat i v charakteru odštěpování. Zatímco vysoká rychlost ohřevu vedla k zformování vlhkostní ucpávky a povrchovému odštěpování, pomalé teplotní zatížení způsobilo výbušné odštěpování na základě BLEVE teorie. Je však nutné podotknout, že na charakter odštěpování má rovněž vliv i tvar zkušebního tělesa a s tím spojený způsob ohřevu.

Vliv rychlosti zahřívání má dopad i na charakter odštěpování a běžný čas jeho výskytu. Zatímco pomalé zahřívání způsobuje odštěpování betonu o větší šířce a větším objemu, které zpravidla nastává v rozmezí 45-60 minut (v závislosti na pevnosti betonu), při zahřívání pomocí teplotních křivek (ISO 834 nebo uhlovodíková křivka) odštěpování nastává nejčastěji mezi 10 – 25 minutou. Anderberg (Anderberg 1997) uvedl, že odštěpování běžného betonu dosahuje hloubky 20-40 mm, zatímco tloušťka odštěpeného vysokohodnotného betonu je zpravidla v intervalu 5-10mm.

3.2. Permeabilita a přítomnost PP vláken:

Je obecně známo, že permeabilita betonu značně ovlivňuje náchylnost k odštěpování. Čím má beton nižší permeabilitu, tím hůře skrze cementovou matici migruje vlhkost a beton je náchylnější na odštěpování. Více o náchylnosti HPC k odštěpování v porovnání s NSC lze vyčíst například v (Hertz 1984, Kodur 2019, Kodur 2000, Hertz 2003, Kodur 2007, Kushnir 2021). Pistol a kol. (Pistol 2014) stejně jako mnoho dalších (Kalifa 2000, Kalifa 2001), Bentz (Bentz 2000) a Sultangaliyeva (Sultangaliyeva 2019) uvedli, že přidání PP vláken do betonu zvýší permeabilitu a výrazně sníží možnost výskytu nebo následky odštěpování. V současné době existuje několik základních teorií, jakým způsobem PP vlákna zvyšují permeabilitu betonu.

Tabulka 2: Přínosy PP vláken z hlediska redukce odštěpování - převzato z (Jansson 2013) a editováno

Typ:	ref:
Vytvoření propojeného systému kapilárních pórů	(Schneider 2003, Kalifa 2001)
Vytvoření tranzitní zóny na povrchu PP vlákna	(Bentz 2000, Schneider 2003)
Vytvoření dodatečných uzavřených mikro pórů během míchání betonu	
Vytvoření dodatečných mikro trhlín během zahřívání	(Kalifa 2001, Sullivan 2004, Pistol 2011, Larbi 2007)
Snížení permeability a redukce toku vodní páry do chladnějších oblastí	(Persson 2014)

Vytvoření propojeného systému kapilárních pórů je zapříčiněno roztavením PP vláken při působení zvýšené teploty. Teplota tání je nejčastěji 160–170°C. Zatímco Schneider a kol. (Schneider 2003) udává, že vlákno je zplynováno, Kalifa a kol (Kalifa 2001) tvrdí, že vlákno je roztaveno a absorbováno okolní cementovou pastou. Oba názory byly rozporovány viz např. (Khoury 2008, Richardson 2008) a do současnosti není nad tímto jasný konsenzus. Lze usuzovat, že chování PP vláken během vysokých teplot je dáno rychlostí jeho zahřívání. Tranzitní zónu známe především z rozhraní cementové pasty a kameniva. Jedná se o přechodovou vrstvu, která vykazuje lokální zvýšený vodní součinitel, se kterým je spojena i vyšší permeabilita a nižší pevnost (Nežerka 2019). Závislost permeability na vodním součiniteli byla prokázána např v publikaci (Powers 1955) s tím, že od vodního součinitele 0,5 dochází ke strmému nárůstu permeability. Tranzitní zóna však vzniká i na rozhraní cementové pasty a rozptýlené výztuže, včetně PP vláken. Zvýšená lokální pórovitost poskytuje dodatečný prostor pro expanzi vodní páry a zvýšená permeabilita působí nižší odpor při prostupu vodní páry skrze pórový systém. Za výhodnou lze považovat i skutečnost propojení tranzitních zón jednotlivých kameniv pomocí PP vláken, čímž v cementové matici vznikne téměř propojená síť umožňující kontinuální tok vodních par.

Vytvoření dodatečných uzavřených pórů během míchání betonu je způsobeno sníženou zpracovatelností, kterou se betony obsahující PP vlákna vyznačují. Vliv PP vláken na zpracovatelnost je různý a závisí na délce, množství a průměru PP vláken, které jsou do betonu přidána. Jelikož PP vlákna mají velký měrný povrch, při míchání čerstvého betonu se na jejich povrchu vnese do čerstvé betonové směsi více vzduchu, který ne všechen je odstraněn během vibrací kvůli snížené zpracovatelnosti směsi. Jelikož pro redukci odštěpování je hlavní vytvořit propojený systém kapilárních pórů, je vliv uzavřených mikro pórů spíše podpurný.

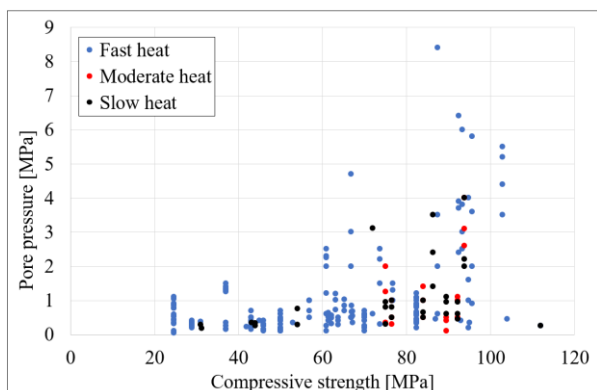
Vytvoření dodatečných mikrotrhlín během zahřívání je dle Khoury a kol (Khoury 2008) způsobeno teplotní roztažností PP vlákna v příčném směru a smrštěním ve směru podélném. Radiální roztažnost PP vlákna může způsobit v přilehlé tranzitní zóně trhliny, které přispívají ke zvýšení permeability. Tento jev je podporován několika publikacemi (Kalifa 2001, Sullivan 2004, Pistol 2011, Larbi 2007).

Snížení permeability a redukce toku vodní páry do chladnější oblasti volně navazuje na předchozí teorii, popisující radiální zvýšení průměru PP vlákna se zvyšující se teplotou. Persson (Persson 2004) prezentoval výsledky měření odolnosti proti průsaku tlakové vody v závislosti na teplotě. Uvedl, že při dávkě PP vláken 2kg/m³ a 4 kg/m³ a teplotě 105°C respektive 200°C byla odolnost proti penetraci vody vyšší, než za srovnatelných teplot bez přidání PP vláken. Tuto skutečnost je připisována právě zvětšením objemu PP vlákna před dosažením bodu tání, jelikož zvětšená vlákna tvoří přirozenou bariéru v migraci vodní páry/vody do oblastí s nižší teplotou (zpravidla vnitřek vzorku/konstrukce). Je však důležité podotknout, že tato teorie je v mírném rozporu s přirozeným zvýšením permeability betonu vlivem přidání PP vláken.

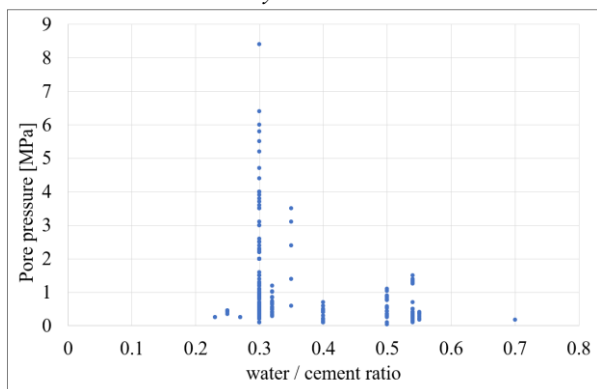
Velké diskuze jsou vedeny s ohledem na dávkování a štíhlostní poměr přidávaných PP vláken. Výchozí dávkování PP vláken jako prostředek redukce pórového tlaku a redukce odštěpování je uvedeno v EC2 a to 2 kg/m³, avšak není specifikována doporučená délka nebo štíhlostní poměr. Dále nejsou EC2 specifikovány pevnostní třídy, pro které je doporučená dávka platná. Khalifa a kol (Khalifa 2001) uvedl, že dávka 2kg/m³ je dostatečná pro uvažování křivky ISO 834 pro betony do pevnosti 100 MPa, při uvažování vláken délky 10–20mm a průměru 50–200 µm. Debicki (Debicki 2012) se zabýval parametrickou studií vlivu množství 6mm PP vláken o tloušťce 15 µm na betonu pevnostní třídy C80/95. Porovnávané množství bylo 0, 0,5, 1 a 2 kg/m³ a rychlost zahřívání byla zvolena na přírůstek 5°C/min. Během studie byl sledován i vliv size efektu na výskyt odštěpování. Výsledkem bylo zjištění, že již dávka 1 kg/m³ je dostatečná pro zabránění výskytu odštěpování, nehledě na velikost vzorku. Pro množství 0,5 kg/m³ byl sledován výskyt odštěpování v závislosti na velikosti zkušebního tělesa. Obdobnou studii provedl Du (Du 2020), který se zaměřil na vliv množství PP vláken (0 až 4,55 kg/m³) v kombinaci s ocelovými drátky (0–78,5 kg/m³) při betonu vysokým teplotám dle ISO834. Pro betony od pevnosti 116 do 142 MPa nebylo sledováno odštěpování při obsahu vláken minimálně 1,365 kg/m³, což odpovídá obsahu 0,15%. Vliv ocelových drátků na odštěpování je stále nejasný z hlediska prevence, ale lze sledovat pozitivní vliv na intenzitu výbušného odštěpování.

4. VYHODNOCENÍ VYBRANÝCH DOPOSUD PROVEDENÝCH MĚŘENÍ

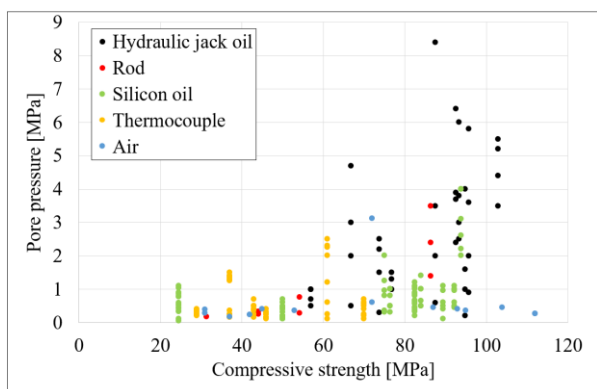
V rámci této kapitoly jsou prezentována vybraná měření pórového tlaku v dobách minulých. Obrázky níže prezentují souhrnnou vizualizaci celkem 11 rozsáhlých experimentů zaměřených na měření pórového tlaku od roku 1989 do roku 2019. Porovnávána byla data z měření (Schneider 1989, Jansson 2009, Bangi 2011, Naguchi 2011, Debicki 2012, Mindeguia 2013, Ozawa 2014, Ding 2016, Gyeongcheol 2018, Ozawa 2018, Guerrieri 2019).



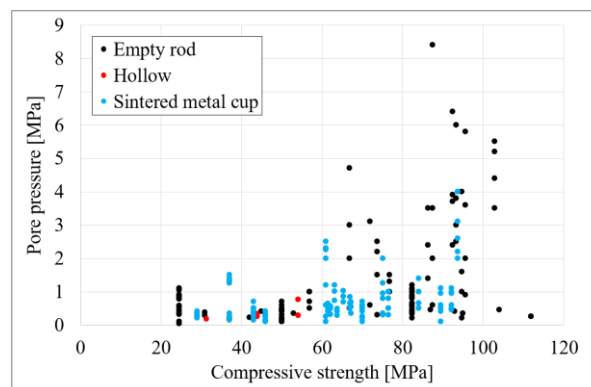
Obrázek 2: Naměřené pórové tlaky v závislosti na pevnosti v tlaku a rychlosti zahřívání.



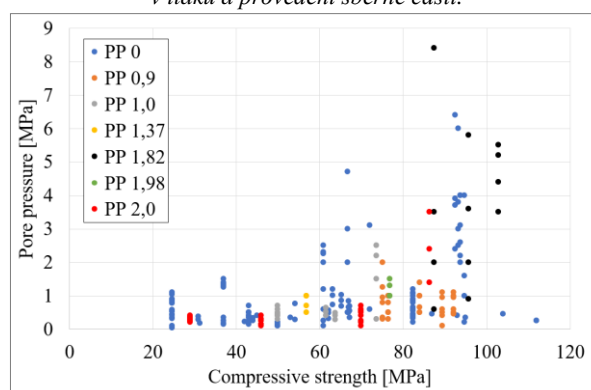
Obrázek 3: Naměřené pórové tlaky v závislosti na vodním součiniteli.



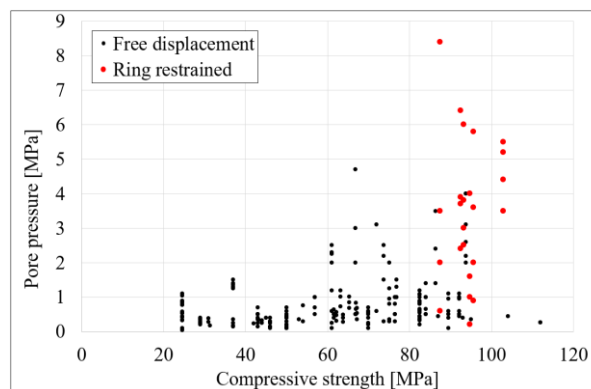
Obrázek 4: Naměřené pórové tlaky v závislosti na pevnosti v tlaku a plnivě v přenosové soustavě.



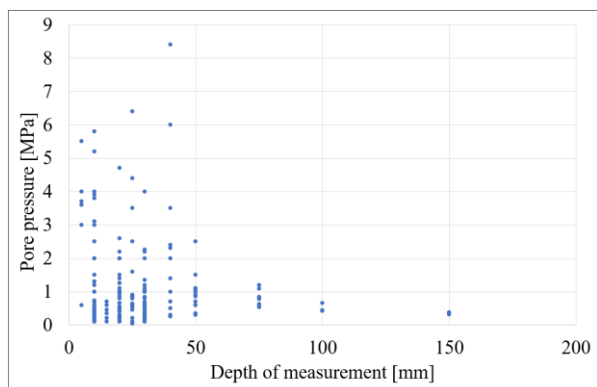
Obrázek 5: Naměřené pórové tlaky v závislosti na pevnosti v tlaku a provedení sběrné části.



Obrázek 6: Naměřené pórové tlaky v závislosti na pevnosti v tlaku a obsahu polypropylenových vláken v kg/m³.



Obrázek 7: Naměřené pórové tlaky v závislosti na pevnosti v tlaku a okrajovým podmínkám zkušebního tělesa z hlediska možnosti teplotní roztažnosti.



Obrázek 8: Naměřené pórové tlaky v závislosti hloubce měření.

Z výše uvedeného lze vyčíst velice cenné údaje, přestože je porovnáváno více než 230 jednotlivých, vzájemně obtížně porovnatelných měření. Výsledky srovnávací studie poukazují na zjevnou závislost mezi tlakovou pevností, respektive kvalitou betonu a výší pórového tlaku (Obrázek 2). Tento jev je obecně znám a předpokládán, jelikož se zvyšující se pevností klesá permeabilita betonu, která je pro vývoj a hodnoty pórového tlaku významný faktor. Toto je dále potvrzeno na obrázku 3, kde je závislost pórového tlaku a vodního součinitele. Vodní součinitel je opět jeden z určujících parametrů pro výhlednou permeabilitu materiálu.

Jelikož v současné době neexistuje standardizovaná metoda měření pórového tlaku, mohou se 4 základní provedení experimentu pomocí dílčích modifikací v jednotlivých krocích rozrůst až na zhruba 25 více či méně odlišných metod. Proto jsou dále na Obrázku 2, Obrázku 4 a Obrázku 5 srovnány naměřené hodnoty pórového tlaku v závislosti na rychlosti teplotního zatížení, plniva v přenosové soustavě a provedení sběrné soustavy. Lze konstatovat, že vliv rychlosti teplotního zatížení je nejednoznačný a tento faktor je nutné uvádět spolu s druhem ohřevu, tj. zdali je prvek vystaven teplotnímu zahřívání celoplošně (2D / 3D vedení tepla), nebo zdali je vzorek zahříván po jedné jeho ploše, přičemž ostatní zůstávají izolované apod. Z hlediska plniva přenosové soustavy, nejvyšší naměřené pórové tlaky jsou v případě použití různých druhů oleje. Při použití oleje jako plniva však vzniká významný problém s jeho teplotní roztažností, kterou je nutno kompenzovat, což je jak při vodorovném i kolmém směru vedení přenosové soustavy obtížné. Nejmenší pórové tlaky jsou naopak měřeny při ponechání vzduchu v přenosové soustavě. Vliv provedení sběrné části nelze dle Obrázku 5 z důvodu pestrého rozptylu relevantně vyhodnotit, případně lze konstatovat, že vliv provedení sběrné části má vliv zanedbatelný, což je však v rozporu s některými publikacemi (Li 2020).

Na obrázku 6 je graficky znázorněna obecně známá skutečnost, která je rovněž popsána v kapitole 3.2, o vlivu polypropylenových (PP) vláken na pórové tlaky v betonu vystaveném vysokým teplotám. Z obrázku zřejmě vyplývá souvislost mezi rostoucím množstvím PP vláken a klesajícím pórovým tlakem. Proti tomuto tvrzení však stojí skutečnost, že maximální pórové tlaky prezentované v této srovnávací studii byly změřeny na materiálu obsahující 1,82 kg/m³ PP vláken. Vysvětlení lze najít na Obrázku 7, kde jsou znázorněny okrajové

podmínky z hlediska omezení či uvolnění teplotní roztažnosti. Dle obrázku 7 jsou nejvyšší pórové tlaky měřeny pro skupinu vzorků, které mají zabráněno deformaci od teplotní změny. Jelikož však skupina vzorků s omezenou deformací od teploty čítala zhruba 10% všech prezentovaných měření, bylo by vhodné navýšit zastoupení této skupiny zejména v oblasti pro betony běžných pevnostních tříd.

Poslední sledovaný parametr byla hloubka měření. Zde byl potvrzen předpoklad, že velikost maximálního pórového tlaku pozvolna roste společně se zvyšující se hloubkou od teplotně exponovaného povrchu. Pokles pórových tlaků v hloubkách 75mm, 100 mm a 150 mm je způsoben nízkými teplotami v době ukončení měření, nejedná se tedy o pórové tlaky maximální.

5. ZÁVĚR

V rešeršní části článku byla detailně popsána teorie vzniku odštěpování betonu vystaveného vysokým teplotám a byl rozebrán jednotlivé faktory, které mají na odštěpování, respektive pórový tlak vliv. V praktické část je poté představena obsáhlá srovnávací studie zaměřena na porovnání vybraných doposud provedených měření pórového tlaku. Jednotlivé studie jsou vzájemně obtížně porovnatelné vzhledem k velice rozdílným metodám měření, avšak pokud jsou data dána do souvislosti, přináší studie pro autora i odbornou veřejnost přínosné informace.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu SGS22/091/OHK1/2T/11 a SGS23/037/OHK1/1T/11

References

- Malhotra, H. L. (1984). "Spalling of concrete in fires." Technical note 118, CIRA, London, UK.
- Bažant, Z. P. (2005). "Concrete Creep at High Temperature and its Interaction with Fracture: Recent Progress." In Concreep-7 Conference: Creep, Shrinkage and Durability of Concrete and Concrete Structures, Nantes, France, pp. 449–460.
- Miller, R. P. (1905). "Contribution to the discussion at the end of the report 'Investigation of the Effect of Heat Upon the Crushing Strength and Elastic Properties of Concrete' by Ira Woolson." Proceedings of the American Society for Testing Materials, Philadelphia, USA.
- Shorter, G. W., & Harmathy, T. Z. (1961). "Discussion on the article 'The fire resistance of concrete beams' by Ashton and Bate." Proceedings, Institute of Civil Engineers, Vol. 20, p. 313.
- Harmathy, T. Z. (1965). "Effect of moisture on the fire endurance of building materials." In Moisture in Materials in Relation to Fire Tests, ASTM Special Technical Publication No. 385, pp. 74-95.
- Khoylou, N. (1997). "Modelling of moisture migration and spalling behaviour in nonuniformly heated concrete." PhD thesis, University of London, London, United Kingdom.

- Breunese, A. J., & Fellingner, J. H. H. (2004). "Spalling of Concrete - An Overview of Ongoing Research in the Netherlands." Workshop - Structures in Fire, Ottawa, Canada.
- Fellinger, J. H. H., & Breunese, A. J. (2005). "Evaluation of the fire test procedure for the spalling behaviour of concrete mixes." TNO Report of NewCon project, Project number 006-47110, Delft, The Netherlands.
- Ghabezloo, S., Sulem, J., & Saint-Marc, J. (2009). "The effect of undrained heating on a fluid-saturated hardened cement paste." *Cement and Concrete Research*, No 39, pp. 54–64.
- Ichikawa, Y. (2000). "Predictions of pressures, heat and moisture transfer leading to spalling of concrete in fire." PhD Thesis, Imperial College, London, Great Britain.
- Petrov-Denisov, V. G., Maslennikov, L. A., & Pitckob, A. M. (1972). "Heat- and moisture transport during drying and first heating of heat resistant concrete." *Concrete and Reinforced Concrete* 1972;2: 17–8 (In Russian).
- Khoury, G. A. (2008). "Passive fire protection of concrete structures." *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 161(3), 135-145.
- Annerel, E., & Taerwe, L. (2009). "Revealing the temperature history in concrete after fire exposure by microscopic analysis." *Cement and Concrete Research*, 39(12), 1239-1249.
- Hertz, K. D. (1984). "Heat Induced Explosion of Dense Concretes." Report 166, CIB W14/84/33(DK) Institute of Building Design (Now Department of Buildings and Energy), Technical University of Denmark, p. 20.
- Phan, L. T., Lawson, J. R., & Davis, F. L. (2001). "Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete." *Materials and Structures*, 34(2), 83–91.
- Choe, G., Kim, G., Yoon, M., Hwang, E., Nam, J., & Guncunski, N. (2019). "Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type." *Cement and Concrete Research*, 116, 1-10.
- Kodur, V. K. R., & Sultan, M. A. (1998). "Structural behaviour of high strength concrete columns exposed to fire." *Advances in Technology of Structural Engineering*, 1–9.
- Kodur, V. (2000). "Spalling in high strength concrete exposed to fire: concerns, causes, critical parameters and cures." *Advances in Technology of Structural Engineering*, 1–9.
- Hertz, K. D. (2003). "Limits of spalling of fire-exposed concrete." *Fire Safety Journal*, 38(2), 103–116.
- Kodur, V., & Phan, L. (2007). "Critical factors governing the fire performance of high strength concrete systems." *Fire Safety Journal*, 42(6–7), 482–488.
- Kushnir, A. R., Heap, M. J., Griffiths, L., Wadsworth, F. B., Langella, A., Baud, P., Reuschl'e, T., Kendrick, J.E., & Utley, J.E.P. (2021). "The fire resistance of high-strength concrete containing natural zeolites." *Cement and Concrete Composites*, 116, 103897.
- Pistol, K., Weise, F., Meng, B., & Diederichs, U. (2014). "Polypropylene fibres and micro cracking in fire exposed concrete." In *Advanced Materials Research*, vol. 897, Trans Tech Publ., pp. 284–289.
- Kalifa, P., Menneteau, F.-D., & Quenard, D. (2000). "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures." *Cement and Concrete Research*, 30(12), 1915–1927.
- Bentz, D. P. (2000). "Fibers, percolation, and spalling of high-performance concrete." *Materials Journal*, 97(3), 351–359.
- Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C. (2001). "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure." *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487–1499.
- Sultangaliyeva, F., Fernandes, B., Carr'e, H., Pimienta, P., Borderie, C., & Roussel, N. (2019). "Experimental contribution to the optimization of the choice of polypropylene fibers in concrete for its thermal stability." In 6th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure.
- Jansson, R. M. (2013). "Fire Spalling of Concrete: Theoretical and Experimental Studies." Doctoral Thesis, Sweden.
- Schneider, U., & Horvath, J. (2003). "Behaviour of ordinary concrete at high temperature." Heft 9, Technical University of Vienna, Austria.
- Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C. (2001). "High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres - From spalling to microstructure." *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487–1499.
- Khoury, G. (2008). "Polypropylene fibres in heated concrete. Part 2: Pressure relief mechanisms and modelling criteria." *Magazine of Concrete Research*, 60(3), 189–204.
- Richardson, A., & Dave, U. V. (2008). "The effect of polypropylene fibres within concrete with regard to fire performance in structures." *Structural Survey*, 26(5), 435-444.
- Powers, T. C., & collective. (1955). "Permeability of Portland Cement Paste." Research and Development Laboratories of Portland Cement Association – Research department – Bulletin 53, Chicago.
- Nežerka, V., Bílý, P., Hrbek, V., & Fládr, J. (2019). "Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete." *Cement and Concrete Composites*, 103, 252-262.
- Khoury, G., & Willoughby, B. (2008). "Polypropylene fibres in heated concrete. Part 1: Molecular structure and materials behaviour." *Magazine of Concrete Research*, 60(2), 125–136.
- Sullivan, P. J. E. (2004). "A probabilistic method of testing for the assessment of deterioration and explosive spalling of high strength concrete beams in flexure at high temperature." *Cement & Concrete Composites*, 26, 155–162.
- Pistol, K., Weise, F., Meng, B., & Schneider, U. (2011). "The mode of action of polypropylene fibres in high performance concrete at high temperature." *Proceedings of the 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, Delft, The Netherlands, October 5–7, 2011.
- Larbi, J. A., & Polder, R. B. (2007). "Effects of polypropylene fibres in concrete: Microstructure after fire testing and chloride migration." *HERON*, 52(4), 289-306.
- Persson, B. (2004). "Fire resistance of self-compacting concrete, SCC." *Materials and Structures*, 37, 575-584.
- Debicki, G., Haniche, R., & Delhomme, F. (2012). "An experimental method for assessing the spalling sensitivity of concrete mixture submitted to high temperature." *Cement & Concrete Composites*, 34(8), 958–963.

- Du, Y., Qi, H.-H., Huang, S.-S., & Liew, J. R. (2020). "Experimental study on the spalling behaviour of ultra-high strength concrete in fire." *Construction and Building Materials*, 258, 120334.
- Anderberg, Y. (1997). "Spalling phenomena of HPC and OC." Proceedings from the International Workshop on Fire Performance of High-Strength Concrete, NIST, February 13-14, 1997, Gaithersburg, USA.
- Schneider, U., & Herbst, H. (1989). "Pressure development in heated concrete members." Transactions of the 10th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology.
- Ko, J., Ryu, D., & Noguchi, T. (2018). "Experimental study on fire spalling of HPC incorporating various types of polypropylene fibers." *Fire Safety Journal*, 101, 132-145.
- Liu, X., Wu, Y., Yu, S., & Zhang, P. (2019). "Fire spalling resistance of carbon fiber-reinforced lightweight aggregate concrete." *Fire and Materials*, 43(3), 239-252.
- Mangual, J., Khoury, G., & Anagnos, T. (2009). "Prediction of the explosive spalling of high strength concrete incorporating polypropylene fibers subjected to standard fire exposure." *Cement and Concrete Research*, 39(8), 662-669.
- Li, Y., Zhang, D., & Tan, K. H., (2020) On measuring techniques of pore pressure in concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, **vol. 114**