národní
úložiště
šedé
literatury

Účinky vodního paprsku na tepelně ovlivněných betonech - laboratorní zkoušky

Klich, Jiří
2013

Dostupný z http://www.nusl.cz/ntk/nusl-154884

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 28.04.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .

ÚČINKY VODNÍHO PAPRSKU NA TEPELNĚ OVLIVNĚNÝCH BETONECH – LABORATORNÍ ZKOUŠKY

EFFECTS OF WATER JET ON HEAT-AFFECTED CONCRETES – LABORATORY TESTS

Ing. Jiří Klich (1)
Ing. Libor Sitek, Ph.D. (2)
Ing. Michal Zeleňák, Ph.D. (3)
Ing. Petr Hlaváček, Ph.D. (4)
Ing. Josef Foldyna, CSc. (5)
Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D. (6)
Ing. Jaroslav Válek (7)

(1) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 312, fax: 596 919 452, e-mail: jiri.klich@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz

(2) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 323, fax: 596 919 452, e-mail: libor.sitek@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz

(3) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 312, fax: 596 919 452, e-mail: michal.zelenak@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz

(4) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 312, fax: 596 919 452, e-mail: petr.hlavacek@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz

(5) Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 00 Ostrava – Poruba, tel.: 596 979 328, fax: 596 919 452, e-mail: josef.foldyna@ugn.cas.cz, www.ugn.cas.cz

(6) VUT Brno, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: 541 147 511, fax: 549 245 147, e-mail: bodnarova.l@fce.vutbr.cz, www.fce.vutbr.cz

(7) VUT Brno, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců, Veveří 95, 662 37 Brno, tel.: 541 147 468, fax 549 245 147, e-mail: valek.j@fce.vutbr.cz, www.fce.vutbr.cz

---

Klíčová slova: vysokorychlostní vodní paprsek, plochý paprsek, odstraňování povrchových vrstev betonu, žáruvzdorné betony

Key words: high-speed water jet, flat (fan) jet, removal of concrete surface layers, fireproof concretes

Anotace:

Článek se zabývá účinky plochého vysokorychlostního paprsku na betonech ovlivněných vysokou teplotou. Výzkum je zaměřen na vhodné použití technologie vodních paprsků při odstraňování poškozených vrstev a předúpravě povrchů během sanačních prací na betonových konstrukcích vystavených enormnímu tepelnému namáhání (požáry v tunelech, podzemních garážích apod.).

Annotation:

The paper is dealing with the effects of flat high-speed water jet on concretes affected by high temperature. Research should help to correct use of water jet technology in repair works on concrete structures especially after wildfires in tunnels, underground garages, etc., which are exposed to enormous thermal stress.

1 ÚVOD

Použití vysokorychlostních vodních paprsků při odstraňování porušených či degradovaných vrstev betonu při sanačních pracích na betonových konstrukcích je již značně rozšířeno. V mnoha zemích je tato technologie pro operace odstranění povrchových vrstev a úpravy povrchu betonu před vlastním sanačním zásahem doporučena. Očekává se, že zejména pro své unikátní vlastnosti se použití technologie bude dále rozšiřovat.

Náš výzkumný tým se účinky vodních paprsků na betonu zabývá již několik desetiletí. Při odstraňování povrchových vrstev betonu jsme zkoumali nejen různé typy paprsků, jako jsou paprsky válcové s kruhovým průměrem, paprsky rotační s více tryskami, paprsky ploché (vějířovité) a kmitavé, ale také různé způsoby generování paprsků: kontinuální se stálým průtokem vody tryskou a pulzující s měnícím se průtokem způsobeným tlakovými pulzacemi uvnitř vysokotlakého systému. Při svém výzkumu jsme se zabývali odstraňováním povrchových vrstev nepoškozeného (zdravého) betonu, betonu poškozeného technologickou nekázní a betonu poškozeného různými degradačními účinky prostředí [1]. Naše současná aktivita je zaměřena na odstraňování vrstev betonu poškozených vysokou teplotou nebo ohněm. Právě probíhající výzkum by mohl napomoci správnému použití technologie vodního paprsku při sanacích betonových konstrukcí po požárech zejména v tunelech, podzemních garážích apod., které bývají vystaveny enormnímu tepelnému namáhání.

2 VYUŽITÍ VODNÍCH PAPRSKŮ PŘI SANACÍCH BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

Vysokorychlostní vodní paprsky jsou při sanačních pracích obvykle využívány k odstranění poškozeného betonu a přípravě povrchů pro následné nanesení sanačních nátěrů, povlaků či malt (tzv. hydrodemolice). Rostoucí obliba této technologie ve stavebnictví je dána jejími jedinečnými vlastnostmi, jimiž se odlišuje od ostatních technologií. Vzhledem k vysoké koncentraci energie na velmi malé ploše je vodní paprsek schopen porušit i velmi tvrdé materiály. Nedochází k mechanické interakci paprsku s materiálem. Paprsek je schopen selektivně odstranit pouze porušené či degradované vrstvy, v betonu přítomná ocelová výztuž nebývá po aplikaci paprsku nijak poškozena. Tepelné ovlivnění povrchu ošetřeného vodním paprskem je nulové. Metoda je bezprašná a nevytváří žádné vibrace; na rozdíl od mechanických způsobů odstraňování porušeného betonu tak v konstrukci nevznikají druhotné trhliny nebo praskliny. Potřebná zařízení ke generování vodního paprsku jsou lehká (kromě vysokotlakého čerpadla) a celý proces hydrodemolice může být snadno automatizován. Pracovní médium (voda) je snadno dostupné, odpadní produkty minimálně zatěžují životní prostředí. Vzhledem ke zjevným výhodám dochází postupně k vytlačování tradičních mechanických metod odstraňování porušeného betonu, jako jsou odřezávání, rozrušování pneumatickým kladivem, suché a mokré otryskávání a frézování [2].

Na rozdíl od jednoduchého vysokorychlostního vodního paprsku generovaného jedinou tryskou, který je po přidání abraziva používán především k řezání, při odstraňování defektních povrchových vrstev betonu se v praxi nejčastěji využijí hlavice s více tryskami, které vytvářejí několikanásobné paprsky. Důvodem je rozložení energie paprsku na větší plochu. Hlavice konají nejčastěji rotační, kmitavé nebo vibrační pohyby. Stopy, které zanechávají pohybující se paprsky na povrchu porušovaného materiálu, jsou pak většinou složeny z několika jednoduchých pohybů [3]. Abrazivní materiál se v těchto případech většinou nepoužívá a zvýšeného účinku paprsku na materiál je dosahováno zvýšením tlaku vody nebo snížením rychlosti pohybu řezné hlavice nad materiálem a tudíž delšího působení paprsku na element plochy. Existuje spousta studií, které se snaží optimalizovat umístění a pohyby trysek tak, aby desintegrační paprsky pokud možno ideálně „pokryly“ odstraňovanou plochu (např. [4], [5], [6], [7], [8] a [9]).

Další způsob, jak rozprostřít energii paprsku do větší šířky, je reprezentován tzv. plochým paprskem (vzhledem ke svému tvaru bývá v literatuře také někdy nazýván vějířovitým), který je generován jedinou tryskou speciálního tvaru. Původně byl vyvinut pro speciální aplikace, jako jsou čištění povrchů od tenkých vrstev nánosů nebo nečistot, odstraňování horkých železných okují apod. Literatura uvádí, že tloušťka odstraňovaného materiálu není při použití relativně nízkého tlaku vody (do 100 MPa) větší než 1 mm [10]. Pokud se však použijí větší tlaky (až 300 MPa),

pak je plochý paprsek schopen odstranit tepelně nanesené povlaky mnohem efektivněji a šetrněji k životnímu prostředí, než např. konvenční otryskávání nebo chemické čištění [11]. Při použití standardních vysokotlakých čistících systémů za standardních pracovních podmínek není plochý paprsek schopen rychle a v potřebném množství a kvalitě odstranit beton. Je to nicméně vhodná testovací metoda pro povrchové odstraňování betonu v laboratorních podmínkách, kvůli jeho pravidelnému rozložení energie v linii a tím schopnosti plošného ošetření betonu. Pro současné zkoušky byl tento typ vodního paprsku vybrán záměrně vzhledem k možnosti porovnání výsledků s našimi dřívějšími zkouškami interakce téhož paprsku s betony.

Mechanismus porušování betonu působením vodního paprsku je poměrně komplikovaný. Např. Momber [2] uvádí, že odstranění křehkého, tahem změkčeného materiálu vysokorychlostním vodním paprskem je především procesem lomové mechaniky. To platí zejména pro kompozitní materiály na bázi cementu a pak také pro horniny. Momber [4] v této oblasti shrnul poznatky různých autorů a doplnil je o svá vlastní pozorování: dopadne-li paprsek na pevný povrch, na povrchu se vytváří profil stagnačního tlaku. Rozdíl mezi stagnačním tlakem na povrchu a tlakem uvnitř dopadového materiálu donutí určitý objem vody proniknout do struktury materiálu. Předpokládejme, že část vody do materiálu pronikne. Pak mohou nastat tři případy: (i) voda teče do trhliny a na jejím čele vytvoří odpovídající napětí. Porušení začíná v mezipovrchové oblasti mezi cementovou matricí a kamenivem, která je, jak známo, nejslabším článkem běžného betonu. Další šíření trhliny je pak ovlivněno zejména velikostí kameniva a jeho distribucí, (ii) voda vteče do uzavřené kapiláry, kde způsobí zesílení tlaku. Paprsek, který narazí na vstupní otvor kapiláry, pak do této kapiláry přepravuje vodu a vytěsňuje vzduch, (iii) voda teče přes otevřený systém pórů a vytváří třecí sílu na strukturní elementy (např. zrna kameniva). Pokud třecí síla působící na konkrétní zrno překročí jeho kohezní síly k sousedním zrnům, zmíněné zrno bude odstraněno.

3 POŠKOZENÍ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ VYSOKÝMI TEPLOTAMI

Je známo, že při namáhání betonové konstrukce vysokou teplotou dochází ke ztrátě její únosnosti zejména v povrchových, nejvíce namáhaných vrstvách. Poškození může být tak velké, že dojde k destrukci celé konstrukce. Teplota během požáru, který poškodí betonovou konstrukci např. v silničním tunelu, může dosáhnout hodnoty až 1200°C. Při této teplotě již dochází k degradaci celé struktury cementového kamene a únosnost konstrukce rapidně klesá. Rychlost a způsob degradace betonu a destrukce celé konstrukce závisí na typu požáru, rychlosti nárůstu teploty a době trvání požáru. Mnoho tragických nehod způsobených požárem v silničních či železničních tunelech po celém světě (např. v podmořském Eurotunelu pod Lamanšským průlivem v letech 1996, 2006 a 2008, v tunelu Summit ve Velké Británii v roce 1984, v podmořském tunelu pod Velkým Beltem v Dánsku v roce 1994, v Teguském metru v Jižní Korei v roce 2003, v tunelu podzemní lanové dráhy v Kaprunu v Rakousku v roce 2000, v tunelu pod Mont Blankem v roce 1999, v Tauernském silničním tunelu v roce 1999, v Gotthardském silničním tunelu v roce 2001 atd.) naznačují, že je nutné se touto problematikou zabývat.

Určité řešení představuje použití vhodných komponentů do betonu (druh cementu, kameniva, užití rozptýlené výztuže apod.), které jsou ve vzájemné součinnosti schopny eliminovat nežádoucí účinky tepelného namáhání nebo ohně. Takový přístup byl či stále je předmětem výzkumu na mnoha světových pracovištích s různými výsledky. Náš výzkum z těchto výsledků vychází a snaží se nalézt řešení, které by ve velké míře využilo základní suroviny běžně dostupné v České republice.

4 PROCEDURA A NASTAVENÍ PARAMETRŮ EXPERIMENTU

Hlavním cílem experimentů popsaných v tomto příspěvku bylo posoudit, jak by se testované betony po tepelném namáhání mohly chovat při aplikaci vodních paprsků, pokud se v budoucnu při sanačních pracích využije tato technologie pro odstraňování teplem poškozených vrstev.

Pro první zkoušky odolnosti různých betonů (vystavených tepelnému namáhání) proti průniku vysokorychlostních vodních paprsků byly připraveny čtyři série kubických betonových vzorků 100x100x100 mm. Při výrobě všech vzorků byl použit stejný druh cementu; jednotlivé betonové

směsi se lišily různým kamenivem a přítomností polypropylenových vláken. Při výrobě některých směsí byly použity dva druhy polypropylenových vláken. Vlákna typu I (průměr vlákna 15 μm a délka 3 mm) byla použita u receptury III, zatímco vlákna typu II (průměr 28 μm a délka 12 mm) u receptury IV. Detailní složení každé testované směsi betonu, připravených dle jednotlivých receptur, a jejich vlastnosti po 28 dnech zrání uvádí tabulka 1. Všechny uvedené parametry testovaných betonů byly ověřeny vždy na 3 vzorcích. Poté byly všechny vzorky uloženy ve stejném normalizovaném prostředí.

Následně byla část vzorků zahřáta na teplotu 200°C, další část na teplotu 600°C a zbytek vzorků byl ponechán bez tepelného namáhání jako referenční vzorky k porovnání změn vlastností. Růst teploty byl nastaven na 10°C.min^{-1}, vzorky byly ponechány na odpovídající teplotě po dobu 24 hodin (u vzorků zahřívaných na 200°C) nebo 60 min. (u vzorků zahřívaných na 600°C). Pak byly vzorky pozvolně ochlazeny na laboratorní teplotu.

Tabulka 1. Složení zkušebních betonových vzorků

receptura	složení (na 1 m^3 čerstvého betonu)	množství [kg]
REC I	cement CEM II/B-M 32,5 (S-LL) 32,5 R	320
	kamenivo 0-4 mm pískovec (psamit) Náklo	953
	kamenivo 4-8 mm granodiorit Olbramovice	363
	kamenivo 8-16 mm granodiorit Olbramovice	531
	voda	174
	plastifikátor Chrysofluid Optima 208 1,8 % mc	5,76
REC II	cement CEM II/B-M 32,5 (S-LL) 32,5 R	300
	kamenivo 0-4 mm čedič Bílčice	1162
	kamenivo 4-8 mm čedič Bílčice	340
	kamenivo 8-16 mm čedič Bílčice	497
	voda	163
	plastifikátor Chrysofluid Optima 208 1,8 % mc	5,4
REC III	cement CEM II/B-M 32,5 (S-LL) 32,5 R	300
	kamenivo 0-4 mm čedič Bílčice	1162
	kamenivo 4-8 mm čedič Bílčice	340
	kamenivo 8-16 mm čedič Bílčice	497
	voda	163
	plastifikátor Chrysofluid Optima 208 1,8 % mc	5,4
	Polypropylenová vlákna – typ I	1,0
REC IV	cement CEM II/B-M 32,5 (S-LL) 32,5 R	300
	kamenivo 0-4 mm čedič Bílčice	1162
	kamenivo 4-8 mm čedič Bílčice	340
	kamenivo 8-16 mm čedič Bílčice	497
	voda	163
	plastifikátor Chrysofluid Optima 208 1,8 % mc	5,4
	Polypropylenová vlákna – typ II	0,6

Do všech betonových vzorků byly vyřezány drážky pomocí plochého vysokorychlostního kontinuálního vodního paprsku. Řezy byly provedeny při tlacích 30 a 70 MPa. Vzdálenost povrchu betonového vzorku od trysky byla 40 mm, což je vzdálenost používaná při našich dřívějších zkouškách pro testování účinků plochých paprsků. Rychlost pohybu paprsku nad zkušebními vzorky byla 0,2 m.min^{-1}, případně 1 m.min^{-1}. Objem betonu odstraněného z jednotlivých drážek sloužil jako míra výkonnosti paprsku. Pro porovnání jsme provedli také několik řezů pomocí tzv. pulzujícího plochého vodního paprsku, který při dopadu způsobuje cyklické namáhání porušovaného materiálu tlakovými rázy a jehož vyšší účinnost v porovnání s kontinuálním paprskem byla prokázána [1]. Pokud se při řezání použil pulzující paprsek, ultrazvukový výkon generátoru pulzací dosahoval maximálně 800 W a předřazený akustický budič vytvářel ultrazvukové vlny o frekvenci 20 kHz.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ

Experimentální zařízení sestávalo ze zdroje vysokotlaké vody a robotu k pohybu vodní trysky nad testovanými betonovými vzorky. Vysokotlaká voda byla dodávána do trysky prostřednictvím plunžrového čerpadla schopného dodat až 67 litrů vody za minutu při tlaku vody až 160 MPa. Ke generování plochého paprsku byla použita plochá tryska s ekvivalentním průměrem 2,05 mm a úhlem rozstřiku 15°.

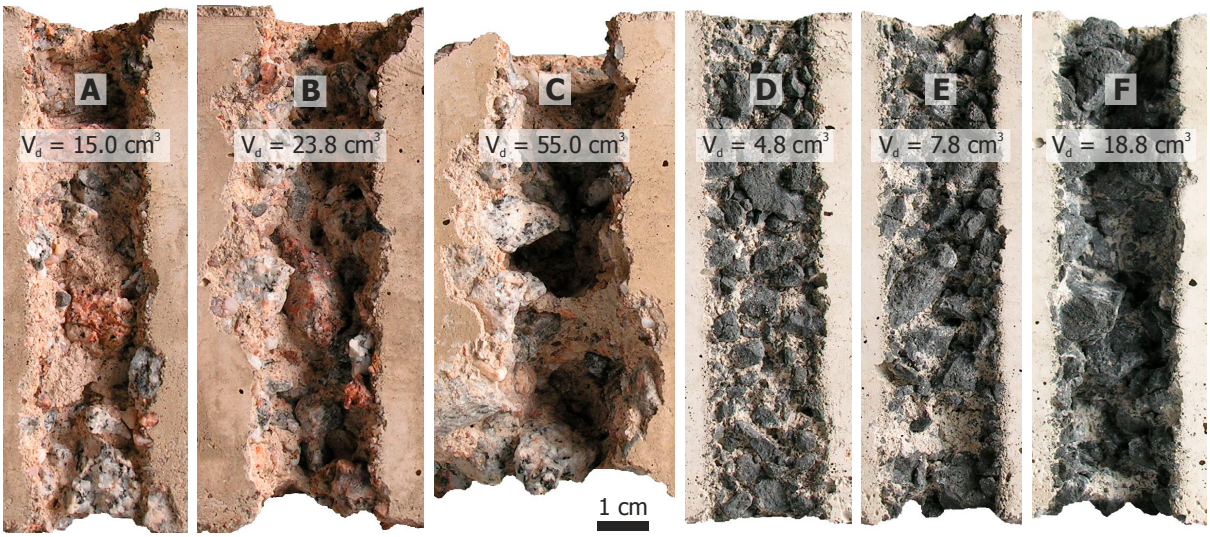
6 VÝSLEDKY A DISKUSE

Vybrané vlastnosti vzorků betonů připravených podle jednotlivých receptur před a po tepelném namáhání obsahuje tabulka 2. Ukázky vytvořených drážek i s údajem o objemu odstraněného (desintegrovaného) betonu V_d jsou uvedeny na obr. 1 pro betonové vzorky vyrobené dle receptur REC I a REC IV, které byly zahřáty na 600°C. Porovnání účinnosti plochých paprsků na vzorcích vystavených vysokým teplotám a referenčních vzorků při různých řezných rychlostech a tlacích vody je ilustrováno na obr. 2 a 3.

Tabulka 2. Vlastnosti betonových směsí před a po tepelném namáhání

receptura	po 28 dnech	200°C	600°C
objemová hmotnost [kg.m-3]			
REC I	2350	2260	2210
REC II	2470	2410	2320
REC III	2510	2450	2380
REC IV	2470	2410	2360
pevnost v tlaku [N.mm-2]			
REC I	41,8	40,2	35,6
REC II	34,3	33,4	24,4
REC III	38,0	35,4	31,7
REC IV	36,4	32,9	28,9
pevnost v tahu za ohybu [N.mm-2]			
REC I	5,5	5,3	N/A
REC II	5,5	5,2	
REC III	5,9	5,6	
REC IV	5,9	5,8	
pevnost v tahu povrchových vrstev [N.mm-2]			
REC I	2,7	1,8	0,9
REC II	3,6	3,2	2,7
REC III	3,2	3,1	2,5
REC IV	2,9	2,8	2,0

Z výsledků všech dostupných testů při daných parametrech vysokorychlostního vodního paprsku je zřejmé, že tlak vody i rychlost řezání mají podstatný vliv na množství odstraněného betonu při jeho interakci s paprskem. Při vyšší rychlosti řezání (1 $m.min^{-1}$) se v porovnání s nižší rychlostí (0,2 $m.min^{-1}$) množství odstraněného betonu snižuje (až 2,3 krát u betonu dle REC II neovlivněného teplotou až po 2,5 krát u betonu dle REC III po zahřátí na 600°C). Podobně se zvyšuje množství odstraněného betonu při vyšším tlaku vody (70 MPa) v porovnání s tlakem 30 MPa a to až 6,1 krát u neohřátého betonu dle REC IV a až 5,7 krát u betonu tepelně ovlivněného dle REC III.

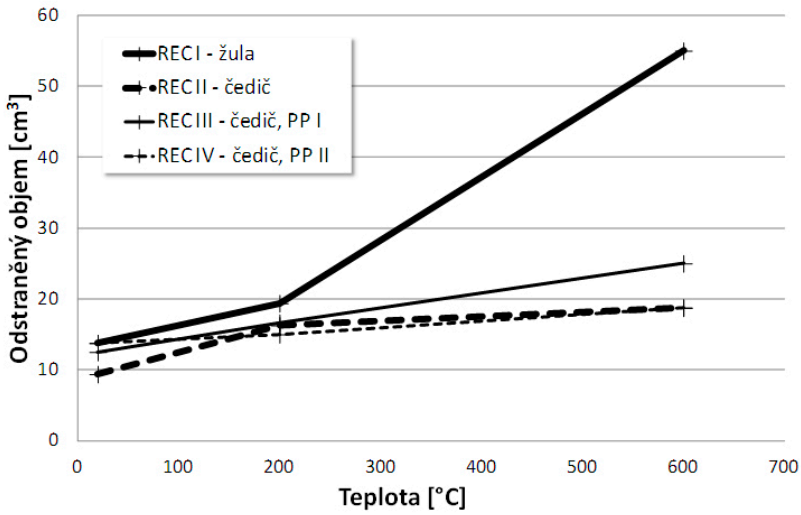


Obr. 1.: Vybrané drážky vytvořené kontinuálním plochým vodním paprskem v betonech vyrobených dle receptur REC I (drážky A-C) a REC IV (drážky D-F) po tepelném zatížení na 600°C. V_d – odstraněný objem, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody: 30 MPa (drážky A, B, D, E) a 70 MPa (drážky C, F), rychlost řezání: 0,2 m.min^{-1} (drážky B, E) a 1 m.min^{-1} (drážky A, C, D, F)

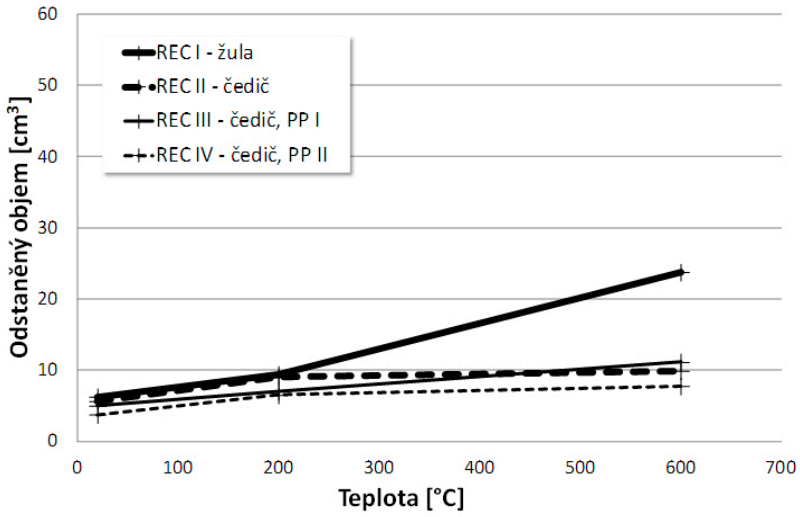
Z výsledků lze dále zjistit, že beton připravený dle receptury REC I (beton s běžným žulovým kamenivem) odolává paprsku nejméně ze všech zkoumaných betonů. Tento rozdíl se výrazně zvětšuje po zahřátí vzorků na 600°C (viz obr. 1 drážka C). Při této teplotě dojde u betonu k destrukci cementové matrice mimo jiné v důsledku různé tepelné roztažnosti cementové matrice a kameniva. Kamenivo expanduje (transformace α-křemene na β-křemen, kterou provází rozvoj štěpnosti v živcích) a ve struktuře betonu dojde ke vzniku druhotných trhlin. Vodní paprsek pak snadno do těchto trhlin proniká a způsobuje destrukci betonu v povrchových vrstvách. K tomu přispívá i snižující se pevnost betonu po zahřátí (při vyšší teplotě již v betonu dochází k minerálním transformacím a změně pórového prostoru). Rozdíl v odolnosti proti průniku paprsku u betonu nezahřívaného a betonu po zahřátí na 600°C je markantnější při použití nižší rychlosti řezání (0,2 m.min^{-1}), kdy paprsek působí na plochu povrchu delší dobu, nebo naopak při vyšším tlaku vody (70 MPa), kdy má paprsek větší průraznost.

Naproti tomu čedičové kamenivo jako vyvřelá hornina má velmi malou tepelnou roztažnost a struktura betonu je tudíž po zahřátí málo narušená vznikem druhotných trhlin (receptury REC II až REC IV). I když je pevnost v tlaku těchto betonů (REC II, III a IV) nižší než u betonu s žulovým kamenivem (REC I), přesto průniku paprsku lépe odolává. To lze vysvětlit vyššími pevnostmi v tahu těchto betonů (pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tahu povrchových vrstev), neboť při působení vodního paprsku jsou křehké materiály porušovány především tahovým namáháním. Proto je možné, že i beton, který po zahřátí na 600°C vykazuje vyšší pevnost v tlaku (v tomto případě beton s žulovým kamenivem), se při interakci s vodním paprskem snadno poruší. Podobné výsledky jsme pozorovali již dříve také u betonů podrobených 100 cyklům zmrazování. I když byla výsledná pevnost v tlaku po zmrazování téměř 85 % původní pevnosti, zkoumané vzorky se po interakci s vodním paprskem zcela rozpadly [12].

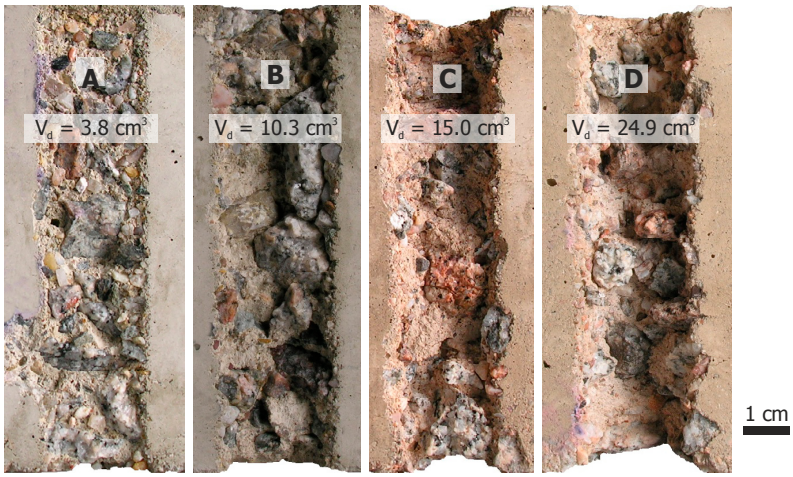
Přítomnost polypropylenových vláken ve struktuře betonu má na odolnost proti průniku vodního paprsku pouze malý vliv, přesto se zdá, že receptura REC II s čedičovým kamenivem bez polypropylenových vláken před zahříváním odolává paprsku o něco lépe. Možné vysvětlení je následující: polypropylenová vlákna vytvářejí ve struktuře betonu umělé kanálky, do kterých paprsek snadno proniká a dle výše uvedeného mechanismu beton poruší. U betonu bez vláken se tlaková voda dostane pouze do povrchových vrstev a poruší především cementový kámen. Tato skutečnost je patrná hlavně při vyšší rychlosti řezání. Polypropylenová vlákna však mají pozitivní vliv na výslednou pevnost betonu, která se i po zahřátí na 600°C nesnižuje v takové míře, jako u receptur bez polypropylenových vláken.



Obr. 2.: Účinnost plochého vodního paprsku v závislosti na teplotě a receptuře betonu. Ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa, rychlost řezání 0,2 m.min^{-1}



Obr. 3.: Účinnost plochého vodního paprsku v závislosti na teplotě a receptuře betonu. Ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 70 MPa, rychlost řezání 1 m.min^{-1}



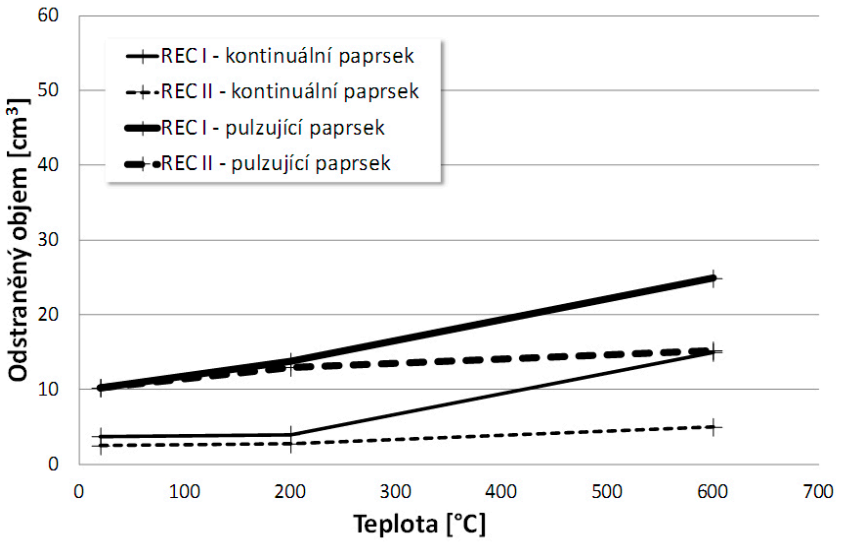
Obr. 4.: Porovnání drážek vytvořených plochým vodním paprskem kontinuálním (drážky A, C) a pulzujícím (drážky B, D) v betonu vyrobeného dle receptury REC I před (drážky A, B) a po tepelném zatížení na 600°C (drážky C, D). V_d – odstraněný objem, ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa, rychlost řezání 1 m.min^{-1}

Porovnáváme-li mezi sebou betony s oběma typy polypropylenových vláken, pak zvláště při vyšším tlaku vody odolává paprsku o něco lépe beton připravený dle receptury REC IV (vlákna typu II - delší vlákna s větším průměrem) než dle receptury REC III (vlákna typu I - 4x kratší vlákna se zhruba polovičním průměrem oproti typu II). Potvrzení, případně vysvětlení této skutečnosti, bude vyžadovat podrobnější zkoušky porušování betonů paprskem a zvláště pak detailnější makro a mikroskopické analýzy vzorků před a po působení paprsku.

Výhody akustických pulzací ve vysokotlakém hydraulickém systému, které umožňují vytváření pulzujícího vodního paprsku, nejlépe ilustruje obr. 4. Rozdíl v množství odstraněného betonu u drážek vytvořených kontinuálním a pulzujícím paprskem za identických podmínek je patrný na první pohled. Větších rozdílů v účinnosti obou paprsků je dosahováno u betonů bez tepelné expozice, jejichž struktura tudíž není nijak narušena (obr. 4, drážky A a B). Poměr mezi množstvím betonu odstraněného oběma typy paprsků vyznívá ve prospěch pulzujícího paprsku (2,7x účinnější). U betonů, které byly zahřívány na 600°C (obr. 4, drážky C a D) se pak tento poměr snižuje na 1,7. Snížení poměru lze vysvětlit dostatečným narušením struktury betonu vysokou teplotou, že i kontinuální paprsek je schopen proniknout do větších hloubek. Použití pulzujících paprsků je nejefektivnější u nenarušeného „zdravého“ betonu, ovšem i u tepelně ovlivněných betonů si pulzující paprsky zachovávají náskok před paprsky kontinuálními (obr. 5). Z obrázku je také patrný rozdíl v odolnosti betonů rozdílných receptur proti průniku paprsků (srovnej REC I s REC II) především po zahřátí na 600°C. Z grafu na obr. 5 je zřejmé, že u konkrétní receptury je podobný trend křivek zachován pro oba typy paprsku.

7 ZÁVĚRY

Z výsledků porušování tepelně ovlivněných betonů vysokorychlostním vodním paprskem vyplývá, že vyšší pracovní tlak vody a pomalejší rychlost pohybu trysky nad ošetřovaným povrchem způsobují odstranění většího množství betonu, ať už jde o beton ovlivněný vyšší teplotou či beton tepelně neovlivněný. Čím vyšší teplotou je beton ovlivněn, tím lépe použitý plochý paprsek rozpojuje povrchové vrstvy a proniká do větších hloubek z důvodu narušené struktury betonu a jeho nižší pevnosti. Beton s čedičovým kamenivem lépe odolává působení paprsku než beton s běžným žulovým kamenivem. Přítomnost polypropylenových vláken má příznivý vliv zejména na pevnost betonů, rozdíl v odolnosti takových betonů proti průniku paprsku je však více méně zanedbatelná. Zásadní roli na odolnost betonů proti průniku paprsku tak hraje především typ použitého kameniva.



Obr. 5.: Porovnání účinků plochého vodního paprsku kontinuálního a pulzujícího na betonech vyrobených dle vybraných receptur po rozdílné tepelné expozici. Ekvivalentní průměr trysky 2,05 mm, vzdálenost od trysky 40 mm, tlak vody 30 MPa, rychlost řezání 1 m.min^{-1}

Účinnost vodních paprsků při odstraňování vrstev betonů narušených vysokou teplotou lze podstatně zvýšit zavedením vysokofrekvenčních pulzací do paprsku. Pulzující paprsek proniká do větších hloubek a při vhodném nastavení parametrů je schopen odstranit větší množství betonu.

PODĚKOVÁNÍ

Článek byl vypracován v rámci projektu Institut čistých technologií těžby a užití energetických surovin, reg. č. CZ.1.05/2.1.00/03.0082 podporovaného Operačním programem Výzkum a vývoj pro Inovace, financovaného ze strukturálních fondů EU a ze státního rozpočtu ČR. Práce byla podpořena rovněž Grantovou agenturou České republiky, projektem č. P104/12/1988. Autoři děkují za podporu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Sitek, L., Foldyna, J., Klich, J., Bodnárová, L., Wolf, I. 2012. Využití oscilujících vodních paprsků při odstraňování povrchových vrstev degradovaného betonu in situ (Application of oscilating waterjets to in situ removing of decomposed surface layers of concrete). *Tunel*, 21. ročník, č. 2/2012, pp. 16 – 26, ISSN 1211-0728.

[2] Momber, A.W., 2001. Fluid jet erosion as a non-linear fracture process: a discussion. *Wear* 250(2001), pp. 100-106.

[3] Hlaváč L. M., Sitek L., Vašek J. 1994. Using of the Physical Model to the Evaluation of an Efficiency of the Tools Creating Multiple-Motions of the Nozzles, in *Proc. of the 12th Int. Conf. on Jet Cutting Technology*, Mech. Eng. Public. Ltd., London, pp. 255-264.

[4] Momber, A.W. 2005. *Hydrodemolition of Concrete Surfaces and Reinforced Concrete*. Elsevier Ltd., Oxford, 2005. 269 p.

[5] Blades, B., 1994. Energy distribution and computer modeled nozzle design in high pressure water jet coating removal, in *Proc. of the 7th National Thermal Spray Conf.*, 1994, Boston, USA, pp. 421-424.

[6] Wright, D., Wolgamott, J., Zink, G. 1997. A study of rotary jets for material removal, in *Proc. of the 9th American Waterjet Conference*, August 23-26, 1997, Dearborn, Michigan, paper 38.

[7] Wolgamott, J., House, M., Wright, D. 2001. Advanced Waterblast Tools Pay for Themselves, in *Proc. of the 2001 WJTA American Waterjet Conference*, August 18-21, 2001, Minneapolis, Minnesota, paper 55.

[8] Yan, W., Bai, C., Tieu, A., Vijay, M.M. 2001. Development and Design of Self-rotating Forced Pulsed Waterjet: Basic Study and Applications, in *Proc. of the 2001 WJTA American Waterjet Conference*, August 18-21, 2001, Minneapolis, Minnesota, paper 36.

[9] Schmid, R.F. 1999. Ultra High Pressure Waterjetting for Coating Removal, in *Proc. of the 10th American Waterjet Conference*, August 14-17, 1999, Houston, Texas, paper 71.

[10] Xu, J., Summers, D.A., 1994. Experimental Evaluation of the Performance of Fan Jet Systems, in *Proceedings of the 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Applications and Opportunities*, October 25-27, 1994, Rouen, France, pp. 37-46.

[11] Shimizu, S. 2006. Structure and erosive characteristics of water jet issuing from fan jet nozzle, in *Proceedings of the 18th International Conference on Water Jetting*, September 2006: Gdansk, Poland, pp.337-345.

[12] Sitek, L., Foldyna, J., Ščučka, J., Martinec, P., Bodnárová, L., Hela, R. 2009. Utilization of Potential of Pulsating Jets for Removal of Concrete Layers, in *9th Pacific Rim Int. Conf. on Water Jetting Technology*, 20. - 23. 11. 2009, Koriyama, Japan, IAP, Ltd., pp.181-187.