

VLIV KOMBINOVANÉHO ÚČINKU PŮSOBNÍ VYSOKÉ TEPLoty A VÝBUCHU NA BETONOVÉ PRVKY

Kateřina Horniková, *

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

Tento článek se zabývá vlivem kombinovaného účinku působení vysoké teploty a výbuchu na betonové konstrukce (cementové kompozity obecně). Volně navazuje na již dříve prezentované experimenty. Článek prezentuje proběhlý experiment a data jím získaná. V rámci experimentu byly zkušební vzorky tří typů materiálu zatíženy působením vysoké teploty (ohřáty v peci na předem danou teplotu) a poté vystaveny blízkému výbuchu. Data získaná z působení vysoké teploty jsou především grafy nárůstu teplot v daných materiálech. Maximální dosažené teploty jsou důležité pro stanovení teplotního pole v prvku, přičemž dané teploty ovlivňují materiálové vlastnosti materiálu. Data získaná po vystavení vzorků výbuchu jsou rychlost odletujících částic z hrany odvrácené výbuchu a rozsah poškození. Na závěr článku jsou uvedena data shrnutá a připravena pro další aplikaci do numerických simulací a vyhodnocení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Požár • Výbuch • Vysoké teploty • Cementové kompozity

ABSTRACT

This article deals with the influence of the combined effect of high temperature and blast on concrete structures (cement composites in general). It follows on previously presented experiments. The article presents the experimental measurement and the data obtained by it. In the experiment, test specimens of three types of concrete material were exposed to high temperature (heated in a furnace to a predetermined temperature) and then exposed to a near blast. The data obtained from the action of high temperature are mainly graphs of temperature increase in the specimens. The maximum temperatures reached are important for determining the temperature field in the element, which temperatures affect the material properties of the material. The data obtained after exposure of the blast are the velocity of the particles flying off the edge of the explosion and the extent of the damage. At the end of the article, the data are summarized and prepared for further application in numerical simulations and evaluations.

KEYWORDS

Fire • Blast • High temperature • Cementitious composites

1. ÚVOD

Kombinovaný účinek extrémních zatížení na konstrukce je v reálném životě velice častý. Účinek požáru a výbuchu je možné si představit například v situaci, kdy v budově dojde k požáru a následně k výbuchu tlakových lahví. Opačným případem může být výbuch trhaviny a vzniklá ohnivá koule zapříčiní požár okolních věcí. Jeho studium je tedy důležité a v praxi využitelné.

Kakogiannis et al. (Kakogiannis et al. 2013) prezentuje výsledky analýzy vlivu požáru a následného výbuchu na únosnost železobetonové desky. Jedná se o experimentální program v plném měřítku. Článek se zabývá také zjednodušenou numerickou simulací tohoto experimentu v LS-DYNA, přičemž jako nejsložitější se ukazuje propojení pomalého jevu (oheň postupně mění vlastnosti daného prvku) a jevu extrémně rychlého (výbuch mění prvek a jeho vlastnosti v řádu milisekund). Výsledným řešením tohoto problému je nutná předchozí analýza změny materiálových vlastností při vystavení vysoké teplotě. Zhai et al. (Zhai et al. 2016) prezentuje výsledky experimentu v plném měřítku při kterém byly železobetonové nosníky vystaveny požáru a následnému výbuchu. Oproti výše uvedenému experimentu nebyly nosníky vystaveny přímo působícímu požáru, ale byly ohřáty v peci dle teplotní křivky ISO834 po dobu 90 a 120 minut Ruan et al. (Ruan et al. 2015) a Fang et al. (Fang et al. 2015) se zabývají numerickými simulacemi vlivu požáru a výbuchu na konstrukce. Články se zabývají validací dat z proběhlých experimentů, přičemž se zaměřuje především na účinky prostupu tepla daným prvkem. Štefan et al. (Štefan et al. 2016) prezentuje data z experimentu, při kterém byly železobetonové panely nejprve vystaveny blízkému výbuchu a poté jednostrannému působení vysoké teploty po dobu 135 minut. Štefan et al. (Štefan et al. 2019) navazuje na uvedený experiment nástrojem pro numerické vyhodnocení poškození daného prvku.

Studium vlivu kombinovaného účinku požáru a výbuchu na betonové konstrukce zatím není příliš rozšířené a to především s ohledem na použitý materiál, jehož vlastnosti

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

se mohou velice lišit. Tento problém není takový u ocelových konstrukcí. Nejspíše také proto, proběhlo daleko více experimentů právě na ocelových konstrukcích.

Liew (Liew 2008) se se zaměřil na odolnost ocelových rámových konstrukcí již před více než dvanácti lety. Prezentuje výsledky různých numerických přístupů přičemž motivací pro tyto studie byly události spojené s 11. zářím a zřícením ocelobetonové konstrukce World Trade Center. Forni et al. (Forni et al. 2017) a Vasilchenko et al. (Vasilchenko et al. 2019) se zabývají vlivem požáru a výbuchu na ocelové sloupy.

2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Cílem experimentu bylo stanovit odezvu cementových kompozitů vůči kombinovanému účinku zatížení požárem (simulovaného působením vysoké teploty) a následným výbuchem. To vše s ohledem na použitý materiál.

V rámci experimentálního měření, byly zkušební vzorky vystaveny působení vysokých teplot a následnému výbuchu. Pro možnost porovnání vlivu požáru na daný prvek / materiál, byla jedna sada vystavena pouze výbuchu a jedna sada vysoké teplotě a následnému výbuchu.

Použité materiály a velikosti zkušebních vzorků jsou popsány v následujících kapitolách. Stejně tak tomu je s popisem konkrétních experimentů.

2.1. Testované materiály

V rámci experimentu byly testovány následující materiály:

- Běžný beton C30/37 – označení C
- UHPFRC – označení U
- Isover beton – označení S (beton s příměsí drti z minerálních vláken)

2.2. Zkušební vzorky

Pro každý materiál bylo vyrobeno 11 zkušebních vzorků. O rozměrech 300 x 300 x 60 mm (dále jen dlaždice) byly rozděleny do tří skupin. První skupina, vždy 3 kusy ze sady, nebyly vystaveny vysoké teplotě. Druhá skupina, vždy 4 kusy ze sady, byly vystaveny vysoké teplotě ze všech stran (byly umístěny přímo do zkušební pece). Poslední skupina, vždy čtyři kusy ze sady, byly vystaveny vysoké teplotě pouze z jedné straně (vzorky byly umístěny ve stěně zkušební pece), přičemž do jednoho vzorku od každého materiálu byly při výrobě zabetonovány termočlánky tak, aby bylo možné zaznamenávat nárůst teploty prvku v průběhu ohřevu.

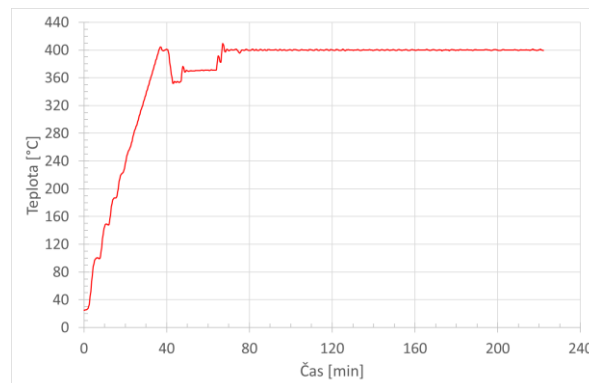
3. VYSTAVENÍ VYSOKÝM TEPLOTÁM

3.1. Průběh zkoušky

V srpnu 2019 proběhla zkouška, při které byla vybraná zkušební tělesa vystavena působením vysoké teploty. Pro tento experiment byla využita certifikovaná plynová pec zkušební Avaps. Jedná se o zařízení s možností nastavení libovolné teplotní křivky. Zkušební pec je ohřívána osmi plynovými

hořáky a teplota v ní je monitorována pomocí dvanácti termočlánků.

V tomto případě bylo ideální zatěžování nastaveno na rychlost ohřevu 10°C / min až po dosažení teploty 400°C. Poté byla tato teplota v peci udržována po dobu 3 hodin. Skutečná teplotní křivka je znázorněna na Obrázek 1.



Obrázek 1 Skutečná teplotní křivka experimentu

Pro tuto zkoušku byly voleny dva typy umístění zkušebních vzorků. Do stěny zkušební pece byly osazeny vždy 4 vzorky 300x300x60 mm (dlaždice) z každé sady. Stěna byla vyzděna ze standardních zdících prvků Ytong a vzorky byly upevněny za pomoci požárně odolné pěny. Vždy v jednom vzorku z každé sady materiálů bylo umístěno pět termočlánků. Ty byly ve vzdálenost 0, 10, 20, 30 a 50 mm od ohřívané hrany vzorku. Tyto termočlánky zaznamenávaly rychlost prohřátí vzorku. Z neohřívané strany byly vzorky zaizolovány dvěma vrstvami minerální vaty tloušťky 30 mm.

Zbýlé vzorky byly umístěny přímo do zkušební pece. Vždy do jednoho vzorku od každého materiálu, byl umístěn do středu izolovaný termočlánek. Ten zaznamenával průběh nárůstu teploty v tělese, které bylo ohříváno ze všech stran. Pohled na rozmístění vzorky a kušební pec je znázorněn na Obrázek 3 a Obrázek 2.

Všechny zkušební vzorky byly před i po zkoušce zváženy a změřeny aby bylo možné zjistit rozsah změn a poškození daných vzorků. Po úplném vychladnutí byly vzorky zabaleny do folie, aby neabsorbovaly vzdušnou vlhkost.



Obrázek 2 Pohled na uzavřenou pec a zkušební vzorky

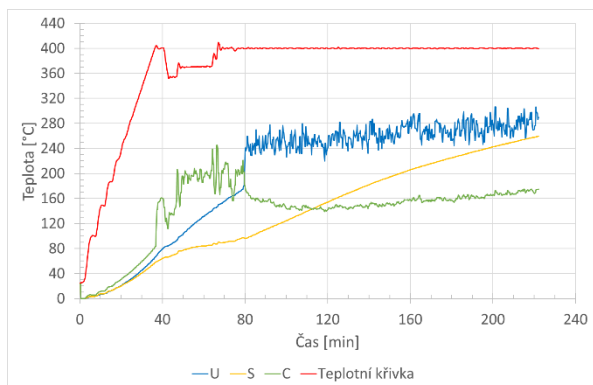


Obrázek 3 Rozmístění vzorků ve zkušební peci

V průběhu zkoušky byly některé vzorky poškozeny. Konkrétně 3ks dlaždic z materiálu U, 1ks dlaždic z materiálu S, 2ks dlaždic materiálu C.

3.2. Výsledky

Na Obrázek 4 je znázorněn průběh teplot ve zkušebních vzorcích, umístěných v peci. Výsledná data jsou vždy hodnoty získané přímo z daného termočláčku. Na grafu je patrná skoková změna teploty v čase 79,5 min. V tomto okamžiku došlo k poškození zkušebního vzorku z materiálu U. Ten zároveň ovlivnil sousední vzorky (materiál S a materiál C). Oba vzorky převrhl a zkušební vzorek z materiálu C rovněž porušil. Zároveň došlo k pohybu termočlámků a tím i k znehodnocení dalších výsledků. Nárůst teploty do tohoto času je tedy relevantní a lze výsledné hodnoty dále využít. Další teploty se jeví jako orientační. Maximální teploty vzorků před poškozením ($t=79,5$ min) jsou uvedeny v Tabulka 1.

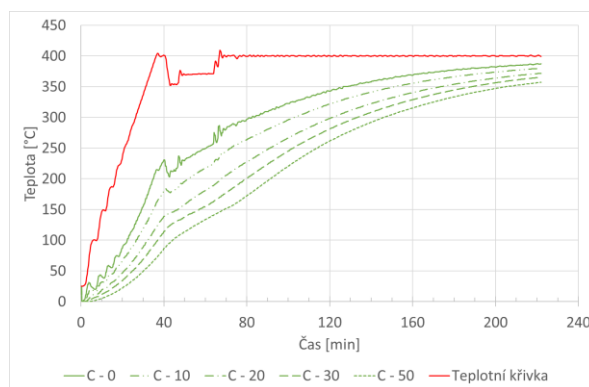


Obrázek 4 Změna teploty ve vzorcích umístěných uvnitř pece

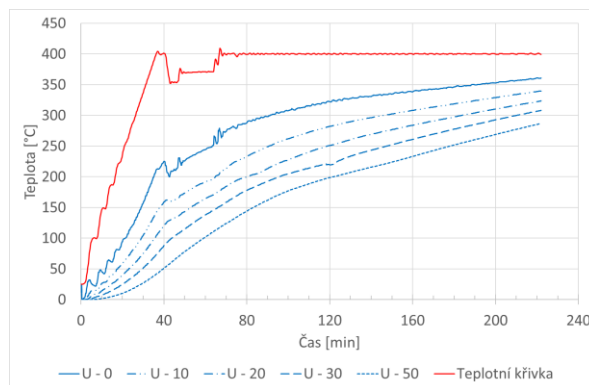
Tabulka 1 Maximální teplota ve vzorcích před poškozením

	U	S	C
teplota [°]	179,7	97,0	202,7

Na Obrázek 5 - Obrázek 7 jsou znázorněny průběhy teplot v prvcích ze všech tří zkoumaných materiálů. Vzorky byly vystaveny působící teplotě pouze z jedné strany a teplota byla měřena v pěti úrovních. Uvedené grafy znázorňují teploty a je tak možné porovnat, nárůsty teplot v různých vzdálenostech od ohřívajícího povrchu. Zároveň je určena maximální teplota, které vzorek v dané vzdálenosti dosáhl. To ovlivňuje mimo jiné také jeho materiálové vlastnosti.

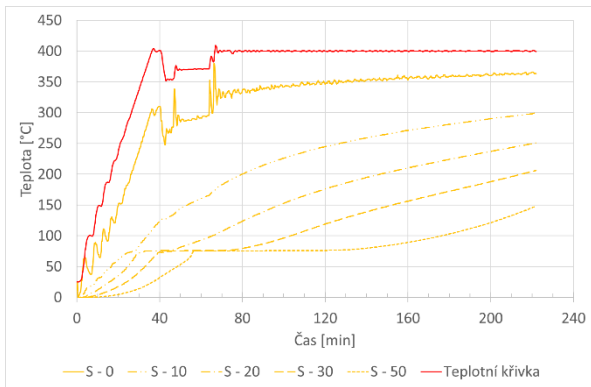


Obrázek 5 Změna teploty ve vzorku ve stěně pece – materiál C, číslo za označením čáry značí vzdálenost termočláčku od ohřívajícího povrchu

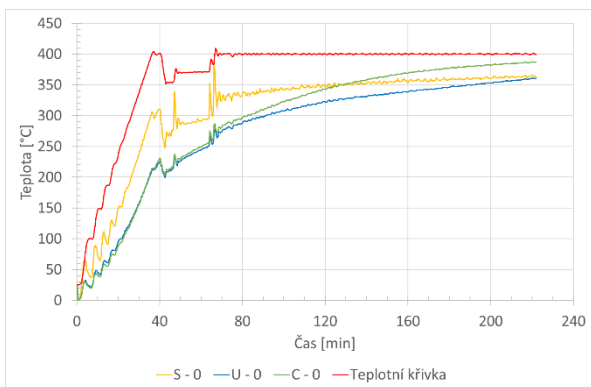


Obrázek 6 Změna teploty ve vzorku ve stěně pece – materiál U, číslo za označením čáry značí vzdálenost termočláčku od ohřívajícího povrchu

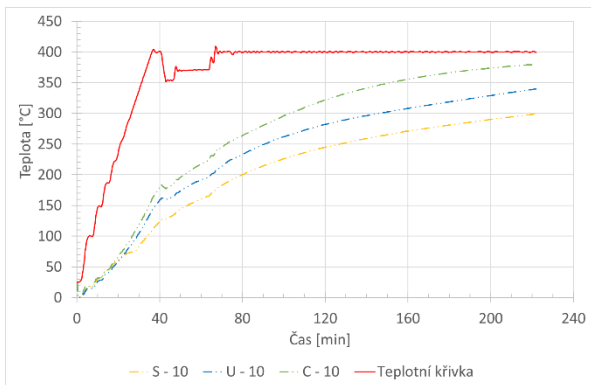
Na Obrázek 8 – Obrázek 12 jsou uvedeny průběhy teplot v jednotlivých vzorcích (materiálech) pro danou vzdálenost od ohřívajícího povrchu. Z grafů je možné vyčíst maximální teplotu, které zkušební tělesa dosáhla v jednotlivých vrstvách. Tyto teploty jsou také uvedeny v Tabulka 2. Ve všech případech bylo dosaženo nejvyšší teploty ve vzorku z materiálu C. Přímou na ohřívající povrchu byla nejnižší teplota změřena na vzorku materiálu U. V ostatních případech pak nejnižší teplota byla změřena na vzorcích materiálu S.



Obrázek 7 Změna teploty ve vzorku ve stěně pece – materiál S, číslo za označením čáry značí vzdálenost termočlánku od ohřívajícího povrchu



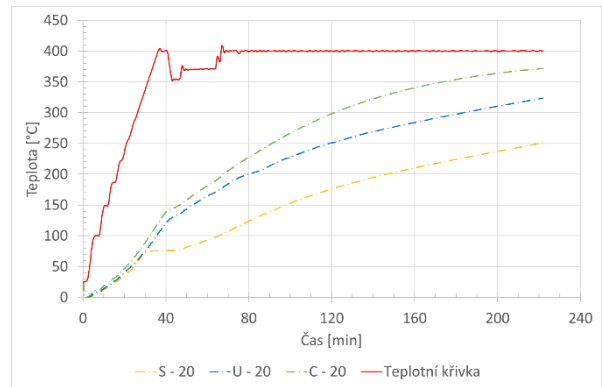
Obrázek 8 Změna teploty ve vzorku – ohřívající povrch



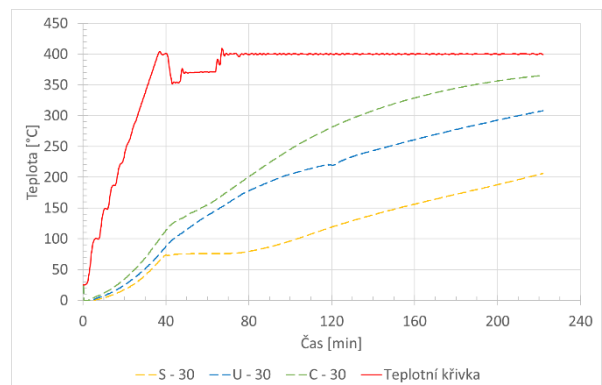
Obrázek 9 Změna teploty ve vzorku - 10 mm od ohřívajícího povrchu

Tabulka 2 Maximální dosažená teplota ve vzorcích v daných vzdálenostech

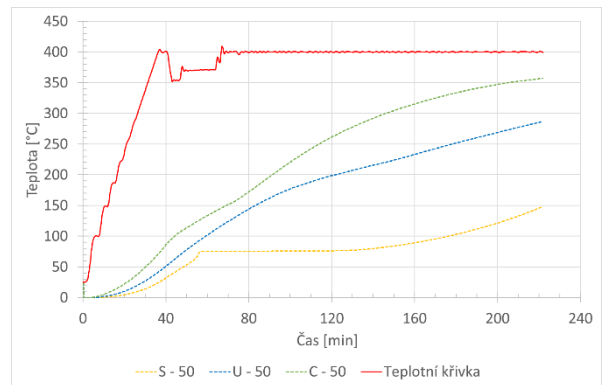
	0 mm	10 mm	20 mm	30 mm	50 mm
C	387°C	380°C	372°C	365°C	357°C
S	380°C	299°C	251°C	206°C	149°C
U	361°C	340°C	324°C	308°C	287°C



Obrázek 10 Změna teploty ve vzorku - 20 mm od ohřívajícího povrchu



Obrázek 11 Změna teploty ve vzorku - 30 mm od ohřívajícího povrchu



Obrázek 12 Změna teploty ve vzorku - 50 mm od ohřívajícího povrchu

4. VYSTAVENÍ VÝBUCHU

4.1. Průběh zkoušky

Zkoušky byly provedeny na třech skupinách vzorků – vzorky, které nebyly vystaveny vysoké teplotě, vzorky vystavené působení teploty z jedné strany a vzorky vystavené působení teploty ze všech stran.

Uspořádání experimentu je znázorněno na Obrázek 13. Zkoušený vzorek byl připevněn k ocelové konstrukci tak, aby bylo zabráněno jeho pohybu. Na něj byla umístěna nálož

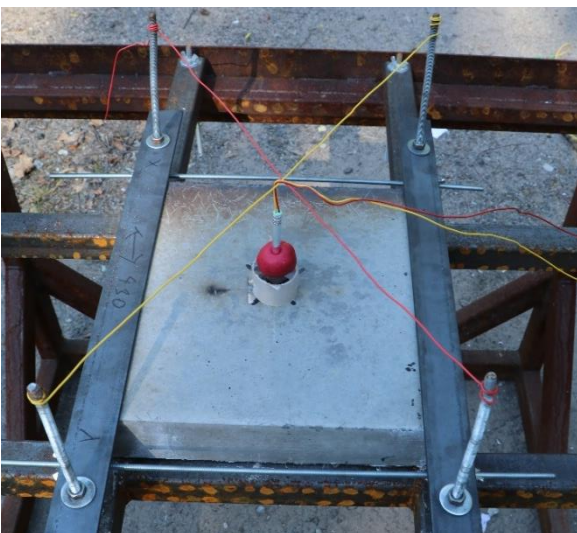
o hmotnosti 40 g (průměr 37 mm) a vzdálenosti 30 mm od spodního okraje nálože. Umístění výbušniny znázorňuje Obrázek 14. Distanc výbušniny byl zajištěn díky papírové ruliče s tenkou plastovou destičkou.

Zkušební tělesa, která byla vystavena požáru pouze z jedné strany, byla vystavena výbuchu z té stejné strany. U ostatních vzorků nehrála strana, na kterou byla nálož umístěna, žádnou roli.

V průběhu výbuchu byla měřena rychlost pohybu spodního povrchu vzorku (respektive odletujících částic). Toto měření bylo zajištěno díky měření Photonic doppler velocimetry.



Obrázek 13 Uspořádání zkoušky - umístění vzorku

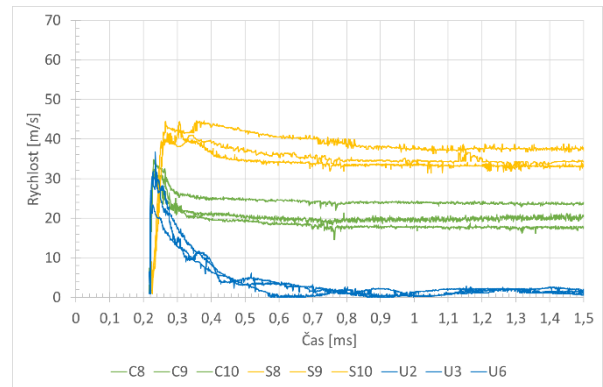


Obrázek 14 Uspořádání zkoušky - umístění nálože

Výsledky získané touto zkouškou jsou rychlosti odletujících částic na straně odvrácené výbuchu.

4.2. Výsledky

Na Obrázek 15 jsou uvedeny všechny hodnoty průběhu rychlostí odvráceného povrchu, které byly změřeny na vzorcích, které nebyly vystaveny působení vysoké teploty.



Obrázek 15 Rychlost odvráceného povrchu vzorku – vzorky bez ohřevu

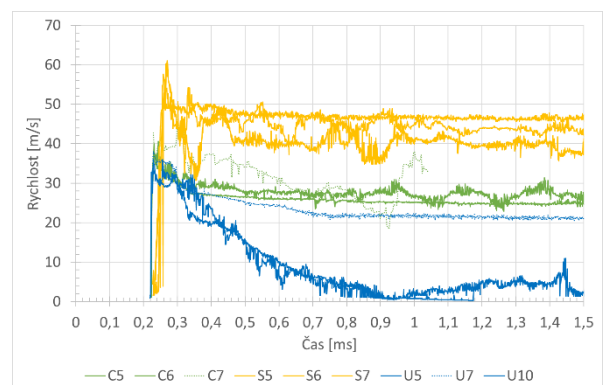
Z uvedených výsledků vyplývá, že nejvyšší rychlost odletujících částic byla změřena pro vzorky materiálu S. Naopak nejnižší rychlost úlomků byla změřena na zkušebních vzorcích materiálu U.

Hodnoty maximálních průměrných rychlostí pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v Tabulka 3. Je zde také uveden čas, ve kterém bylo této rychlosti dosaženo a rozdíl časů mezi počátkem pohybu a maximální rychlostí.

Tabulka 3 Maximální rychlost odvráceného povrchu - vzorky bez ohřevu

Vzorky bez ohřevu			
	rychlost [m/s]	čas [ms]	Δt [ms]
C	32,63	0,2307	0,0131
S	41,39	0,2687	0,0459
U	28,33	0,2291	0,0115

Na Obrázek 16 jsou uvedeny všechny hodnoty průběhu rychlostí odvráceného povrchu, které byly změřeny na prvcích, které byly vystaveny působící teplotě z jedné strany.



Obrázek 16 Rychlost odvráceného povrchu vzorku – vzorky ve stěně

Z uvedených výsledků tedy vyplývá, že nejvyšší rychlost odletujících částic byla změřena pro vzorky materiálu S.

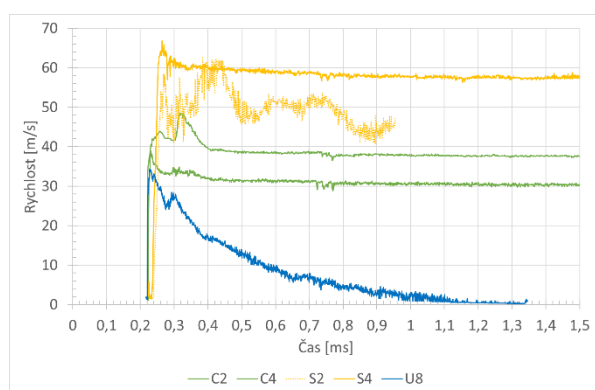
Naopak nejnižší rychlost úlomků byla změřena na zkušebních vzorcích materiálu U.

Hodnoty maximálních průměrných rychlostí pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v Tabulka 4. Je zde také uveden čas, ve kterém bylo této rychlosti dosaženo a rozdíl časů mezi počátkem pohybu a maximální rychlostí.

Tabulka 4 Maximální rychlost odvráceného povrchu - vzorky ve stěně

	Vzorky ve stěně		
	rychlost [m/s]	čas [ms]	Δt [ms]
C	38,00	0,2306	0,0098
S	55,48	0,2649	0,0352
U	34,33	0,2290	0,0098

Na Obrázek 17 jsou uvedeny všechny hodnoty průběhu rychlostí odvráceného povrchu, které byly změřeny na prvcích, které byly vystaveny působící teplotě ze všech stran.



Obrázek 17 Rychlost odvráceného povrchu vzorku – vzorky v peci

Z uvedených výsledků tedy vyplývá, že nejvyšší rychlost spodního povrchu (potažmo odletujících částic) byla změřena pro vzorky materiálu S. Naopak nejnižší rychlost úlomků byla změřena na zkušebních vzorcích materiálu U.

Hodnoty maximálních průměrných rychlostí pro jednotlivé materiály jsou uvedeny v Tabulka 5. Je zde také uveden čas, ve kterém bylo této rychlosti dosaženo a rozdíl časů mezi počátkem pohybu a maximální rychlostí.

Tabulka 5 Maximální rychlost odvráceného povrchu - vzorky v peci

	Vzorky v peci		
	rychlost [m/s]	čas [ms]	Δt [ms]
C	39,36	0,2339	0,0139
S	66,76	0,2646	0,0426
U	34,33	0,2277	0,0107

5. SHRNU TÍ

Článek prezentuje proběhlý experimentální program zaměřený na stanovení vlivu kombinovaného účinku požáru a výbuchu na betonové prvky. V rámci experimentu byly zkušební vzorky vystaveny působení vysoké teploty a následně blízkému výbuchu. Výše jsou prezentovány výsledné grafy nárůstu teplot v daných materiálech a rychlost odletujících částic ze strany odvrácené výbuchu. Pro stanovení přesných závěrů je nutný experimentální program dále doplnit o numerické simulace a další studování dat jakými jsou úbytky hmotnosti, změny materiálových vlastností při daných teplotách a rozsah porušení vzorků po výbuchu.

PODĚKOVÁNÍ

Príspevek vznikl za finanční podpory SGS20/040/OHK1/1T/11, Českého Vysokého učení technického v Praze.

Reference

- Kakogiannis, D., Pascualena, F., Reymen, B., Pyl, L., Ndambi, J. M., Segers, E., ... & Krauthammer, T. (2013). Blast performance of reinforced concrete hollow core slabs in combination with fire: Numerical and experimental assessment. *Fire Safety Journal*, 57, 69-82.
- Zhai, C., Chen, L., Xiang, H., & Fang, Q. (2016). Experimental and numerical investigation into RC beams subjected to blast after exposure to fire. *International Journal of Impact Engineering*, 97, 29-45.
- Ruan, Z., Chen, L., & Fang, Q. (2015). Numerical investigation into dynamic responses of RC columns subjected for fire and blast. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 10-21.
- Fang, Q., Zhao, J., Chen, L., & Li, D. (2015). Numerical prediction of fire resistance of RC beam subjected to blast and fire. *J. Tianjin Univ.(Science and Technology)*, 21, 1-7.
- Štefan, R., & Foglar, M. (2019, August). Visualization and analysis of concrete specimens damage after fire and blast experiments. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 596, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.
- Štefan, R., Foglar, M. & Hájek, R. (2016). Experimentální analýzy strpných panelů z různých druhů betonu vystavených výbuchu a následnému požáru. In *Beton TKS*.
- Liew, J. R. (2008). Survivability of steel frame structures subject to blast and fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(7-8), 854-866.
- Forni, D., Chiaia, B., & Cadoni, E. (2017). Blast effects on steel columns under fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, 136, 1-10.
- Vasilchenko, A., Doronin, E., Ivanov, B., & Konoval, V. (2019). Effect of residual deformation of a steel column on its fire resistance under combined exposure" explosion-fire". In *Materials Science Forum* (Vol. 968, pp. 288-293). Trans Tech Publications Ltd.