

RYCHLOST ÚLOMKŮ CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ VYSTAVENÝCH VÝBUCHU

Kateřina Horníková, *

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

ABSTRAKT

Tématem tohoto příspěvku je prezentace dat získaných provedeným experimentem. Experiment byl zaměřen na odolnost různých typů cementových kompozitů vůči působení vysoké teploty a následnému výbuchu. V rámci stanovení výbuchové odolnosti byla měřena rychlost odletujících částic metodou Photonic Doppler Velocimetry (označován jako PDV). Tato rychlost byla měřena vždy na středu povrchu odvráceného od výbuchu. Byla měřena pro všechny zkušební tělesa a to bez ohledu na to, zda a jak byla tato tělesa vystavena působení vysoké teploty. Díky tomu bylo možné pozorovat vliv působení teploty na dané materiály. V rámci tohoto příspěvku jsou prezentována změřená data, vzájemně porovnána a je stanovena dynamická pevnost těchto materiálů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysoké teploty • Výbuch • Rychlost odletujících částic • Photonic Doppler Velocimetry • Pevnost

ABSTRACT

This article deals with the presentation of results obtained by the performed experimental program. This experiment was focused on the resistance of various types of cement composites to exposed high temperature and subsequent near field blast. As a part of the determination of blast resistance, the velocity of flying elements was measured by the Photonic Doppler Velocimetry method (short as PDV). This velocity was measured at the center of the surface on the other side of specimens from the blast. It was measured for all test samples, regardless of whether and how these specimens were exposed to high temperature. This made it possible to observe the effect of high temperature on used materials. In this paper, measured data are presented, compared with each other and the spall strength of these materials is determined.

KEYWORDS

High temperature • Blast • Velocity of flying elements • Photonic Doppler Velocimetry • Spall Strength

1. ÚVOD

Tento příspěvek volně navazuje na příspěvky z předchozích ročníků Workshopu doktorandů (Horníková 2020, Horníková 2021). V těchto příspěvcích byl prezentován experiment, zaměřující se na odolnost betonových prvků vůči požáru a následnému výbuchu. V rámci příspěvků byl prezentován samotný experiment a základní data jím získána.

Aktuální příspěvek se zaměřuje čistě na vyhodnocení měření rychlosti odletujících částic. V rámci stanovování výbuchové odolnosti použitých zkušebních těles byla měřena rychlost odletujících částic při spodním povrchu vzorku. Tato rychlost ukazuje, jak budou odletující částice urychleny, a lze z toho odvodit, jak moc budou nebezpečné pro okolní konstrukce nebo obyvatele. Pokud bude rychlost částic velká, budou působit jako projektil, který může mít fatální následku pro osoby v blízkosti konstrukce. Pokud bude těchto projektilů více (povrch se roztrhne a odlítnou z povrchu tisíce částic) můžou tyto projektily mít negativní dopad nejen na osoby v jejím blízkosti, ale mohou ohrozit také stabilitu a únosnost okolních konstrukcí. Snahou při správné volbě materiálu, odolného vůči výbuchu, je tedy co možná nejvíce snížit rychlost odletujících částic, a to i za cenu rozsáhlejšího poškození konstrukce. V praxi se předpokládá, že bude konstrukce výbuchem poškozena, a v případě kolapsu nebude zvyšovat škody právě svým negativním působením na okolí.

V rámci tohoto příspěvku je tedy uveden stručný popis experimentu, použitých materiálů a zkušebních těles. Dále pak popis měření Photonic Doppler Velocimetry (dále už jen PDV), prezentace dat získaných tímto měřením. Dále je uveden příklad využití získaných dat pro další výpočty a studie.

2. EXPERIMENT

2.1. Koncept experimentu

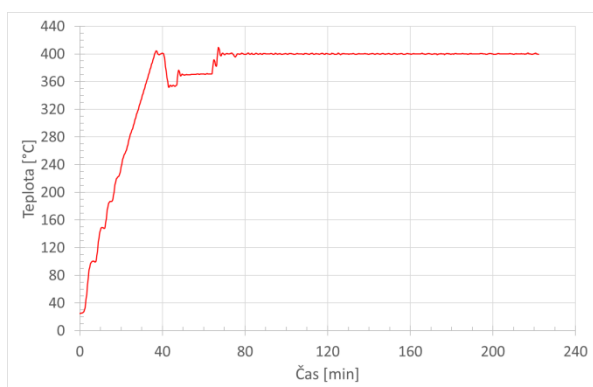
Tento experiment je součástí rozsáhlého experimentálního programu zabývajícího se odolností cementových kompozitů vůči požáru a následnému výbuchu. V rámci tohoto experimentu byly nejprve stanoveny materiálové vlastnosti (mechanické i tepelně technické vlastnosti) vybraných materiálů. Výsledky této části experimentu jsou prezentovány v článku (Horníková et al. 2020). Následovala série experimentů pro stanovení samotné odolnosti vybraných materiálů. Zkušební tělesa byla nejprve vystavena působení

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

vysoké teploty po stanovenou dobu. Po vychladnutí těles byla tělesa neprodyšně zabalena a převezena na další pracoviště, kde byla vystavena blízkému výbuchu. Všechna tělesa byla vystavena stejné teplotě a výbuchu o stejných parametrech (stejná vzdálenost i velikost výbušniny). Podrobný popis samotných zkoušek, použitých materiálů a zkušebních těles je uveden v následujících kapitolách.

2.1.1. Uspořádání požární zkoušky

Při zkoušce požární odolnosti byla zkušební tělesa vystavena působení vysoké teplotě dvěma způsoby. V prvním případě byla zkušební tělesa umístěna dovnitř zkušební pece a byla tak vystavena působení vysoké teploty z obou stran. Ve druhém případě byla zkušební tělesa umístěna do stěny zkušební pece tak, aby byla vystavena působící teplotě pouze z jedné strany. Experiment proběhl najednou, kdy byla všechna tělesa vystavena působení teploty 400 °C po dobu 3 hodin. Skutečná teplotní křivka je uvedena na Obrázek 1.



Obrázek 1 Skutečná teplotní křivka experimentu

Následující Obrázek 2 znázorňuje rozmístění vzorků ve zkušební peci. Na levé straně obrázku jsou vidět také vzorky umístěné ve stěně pece. Ty byly ze zadní strany (venkovní strana pece) zaizolovány izolací z minerální vaty tak, aby průběh teploty ve vzorku byl co možná nejméně ovlivňován působením okolní teploty.

Při tomto experimentu byl měřen průběh (nárůst) teploty ve vzorcích, a byl stanoven hmotnostní úbytek (úbytek volné vody) jednotlivých vzorků. Tyto výsledky jsou prezentovány v předchozím článku.

2.1.2. Uspořádání výbuchové zkoušky

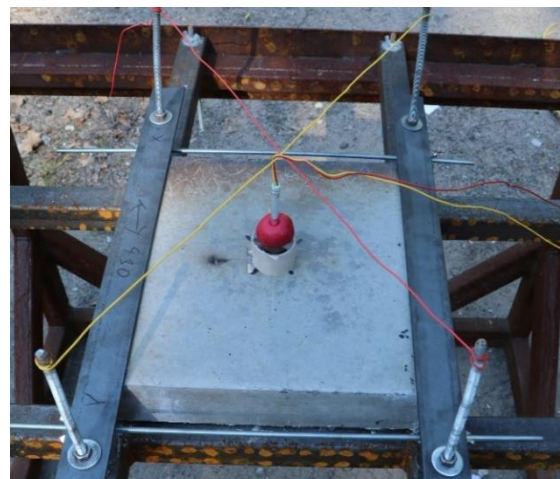
Základní uspořádání zkoušky je znázorněno na Obrázek 3. Betonové vzorky byly upnuty do ocelového rámu, který byl připevněn na ocelový stůl. Toto uspořádání zajišťovalo, že byly zkušební vzorky vždy 0,75m od země. Současně byly vzorky pevně upevněny tak, aby zkušební vzorky nebyly výbuchem odmrštěny mimo testovací oblast. Detailnější znázornění upevnění samotného zkušebního vzorku je na Obrázek 4.



Obrázek 2 Rozmístění vzorků ve zkušební peci



Obrázek 3 Uspořádání zkoušky - umístění vzorku



Obrázek 4 Uspořádání zkoušky - umístění nálože

2.2. Použité materiály a velikost vzorků

V rámci prezentovaného experimentu byly použity následující materiály:

- Běžný beton C30/37 – označení RC
- Vysokopevnostní vláknobeton s ocelovými vlákny UHPFRC – označení U
- Isover beton – označení S (beton s příměsí drti z minerálních vláken)

Běžný beton (označený RC) byl vybrán jako referenční materiál a to především s ohledem na jeho prozkoumanost. K tomuto materiálu je možné najít velké množství informací v odborné literatuře a díky tomu ověřit správnost provedených experimentů.

Vysokopevnostní vláknobeton byl vybrán vzhledem ke své vysoké pevnosti a známé odolnosti vůči blízkému výbuchu.

Isover beton byl vybrán jako zástupce heterogenních materiálů. Vzhledem k tomu, že do tohoto materiálu je přidána drť minerálních vláken, jedná se o velmi heterogenní materiál, avšak s nízkou tlakovou pevností ale díky své heterogenitě s velkým potenciálem k pohlcení rázové vlny.

Pro experiment byly použity zkušební desky o rozměrech 300 x 300 x 60 mm. Ty byly rozděleny do tří skupin po třech vzorcích – skupina vzorků bez ohřevu, skupina s ohřevem z jedné strany a skupina s ohřevem ze všech stran.

2.3. Měřené parametry

V rámci experimentu byly měřeny následující parametry:

- Rychlost ohřevu vzorků ohříváných ze všech stran
- Rychlost ohřevu vzorků ohříváných z jedné strany
- Úbytek hmotnosti vzorků díky ohřevu (úbytek vody)
- Úbytek hmotnosti vzorků po výbuchu (velikost výtrže)
- Rychlost odletujících částic na odvrácené straně od výbuchu

Tento příspěvek se zabývá pouze hodnocením posledního měřeného parametru, a to rychlost odletujících částic, respektive zrychlení povrchu odvráceného výbuchu.

2.4. Stručný popis metody Photonic Doppler Velocimetry (PDV)

Metoda Photonic Doppler Velocimetry (dále jen PDV) je metoda využívající laserový paprsek. Ten je namířen na předem daný bod na prvku, od kterého se odráží zpět do kolimátoru (zařízení, ze kterého je vysílán paprsek a zároveň snímá jeho zpětný odraz). Tato vzdálenost je předem definována. Při měření je tento bod urychlen a při jeho pohybu se zkracuje délka tohoto paprsku. Díky tomu, že měřicí přístroj zaznamenává změnu délky a čas, je možné poté určit rychlost, respektive zrychlení daného bodu v čase. Měření je ukončeno, pokud se daný bod přestane pohybovat, nebo pokud se délka laserového paprsku sníží na 0.

Výstupem z tohoto měření je průběh změny rychlosti v čase. Přesněji pak je z grafu možné odečíst maximální

dosaženou rychlost a čas jejího dosažení a zda se daný element oddělil od zkušebního tělesa či nikoli.

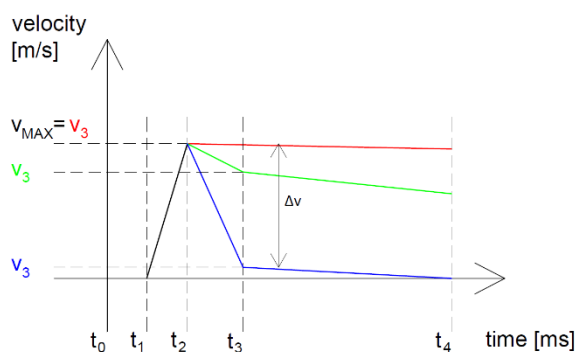
Výstup měření je zobrazen jako graf, jehož idealizovaná podoba je znázorněna na Obrázek 5. Pro lepší pochopení tohoto grafu je celý děj schematicky znázorněn na Obrázek 6. Na uvedeném grafu jsou znázorněny tři ideální případy průběhu a jsou zde vyznačeny důležité body. Čas t_0 udává čas, kdy došlo k sepnutí měřícího zařízení a zároveň aktivace rozbušky. Tento čas lze zjednodušeně považovat za začátek výbuchu. V čase t_1 je měřený povrch (bod) uveden do pohybu. V čase t_2 dosáhne povrch (bod) maximální rychlost. Následuje pokles rychlosti, který je způsobený odolností materiálu. Materiály s nízkou tahovou pevností mají pokles rychlosti minimální, mnohdy žádný (reprezentuje červená čára). Materiály s vysokou tahovou pevností u kterých nedojde k odštěpení materiálu (reprezentuje modrá čára) mají významný pokles rychlosti až do bodu t_3 kdy dochází téměř k zastavení povrchu. Běžné chování (reprezentuje zelená čára) je pak pokles do bodu t_3 a následný odlet vytržených částic. Po překročení času t_3 pak dochází k odštěpení materiálu.

Na schématu na Obrázek 6 je znázorněn první popsany případ (červená čára) s odštěpenou částicí letící směrem ke kolimátoru.

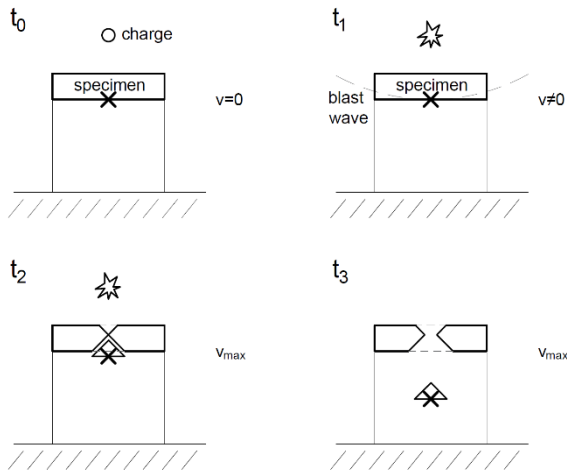
V grafu znázorněná hodnota Δv udává změnu rychlosti mezi časy t_2 a t_3 . Tato rychlost jde zjednodušeně použít pro výpočet pevnosti daného materiálu σ_{spall}

$$\sigma_{spall} = \frac{1}{2} \rho_0 C_B \Delta u_{fs} \quad (1)$$

kde σ_{spall} je pevnost [MPa], ρ_0 [kg/m³] je objemová hmotnost, C_B [m/s] je rychlost zvuku v daném materiálu a $\Delta u_{fs} = \Delta v$ [m/s] je změna rychlosti mezi maximální dosaženou rychlostí a rychlostí v čase t_3 (minimum pullback velocity). Zvolená metodika výpočtu je určena především pro homogenní materiály jako je například kov. V tomto případě je použita pouze pro orientaci a znázornění dalšího způsobu využití získaných dat.



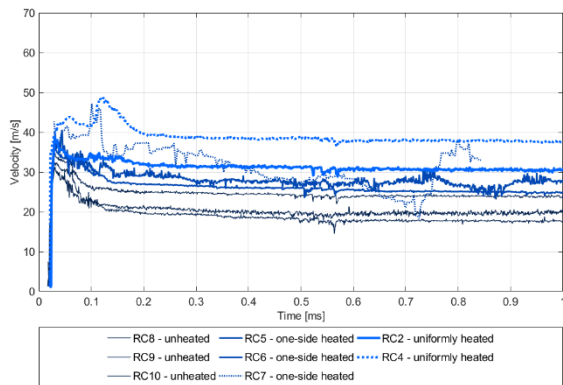
Obrázek 5 Schéma výstupu z měření PDV



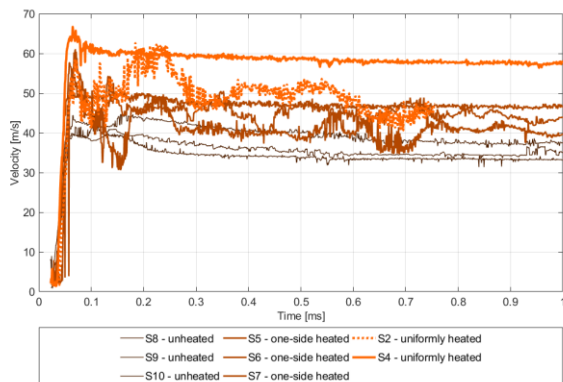
Obrázek 6 Schéma průběhu experimentu v závislosti na čase uvedeném v grafu

3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ – PDV

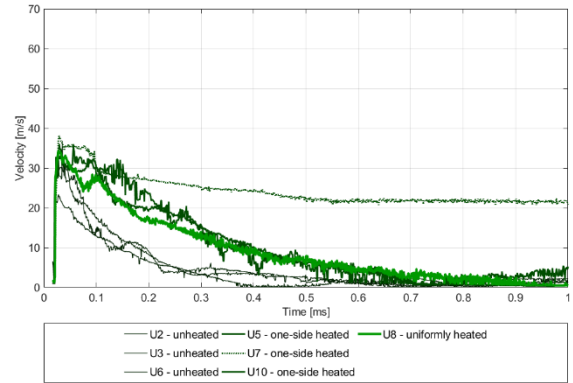
Jak již bylo zmíněno, výsledkem provedeného měření PDV je graf závislosti rychlosti elementu na čase. Tato závislost je znázorněna grafem pro každé jednotlivé měření. Takto získané grafy všech zkušebních těles jsou znázorněny dále.



Obrázek 7 Rychlost odvráceného povrchu – materiál RC

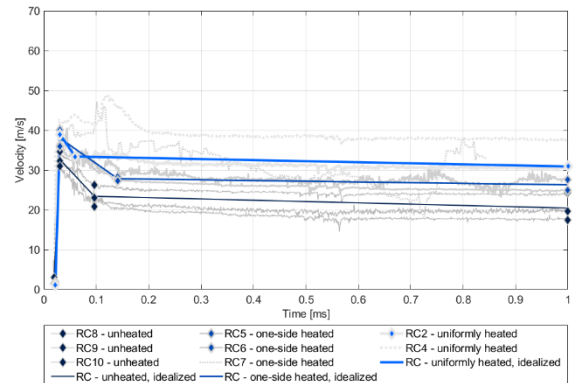


Obrázek 8 Rychlost odvráceného povrchu – materiál S

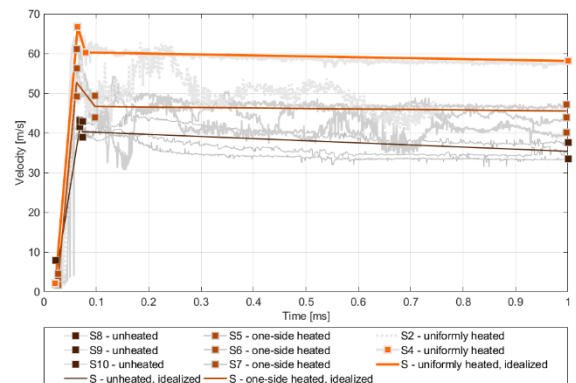


Obrázek 9 Rychlost odvráceného povrchu – materiál U

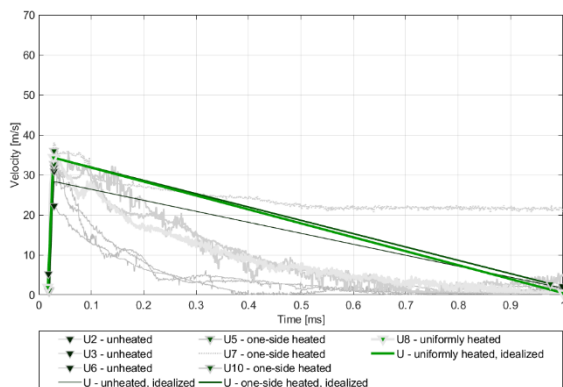
Grafy uvedené na Obrázek 7 – Obrázek 9 znázorňují všechny získané výsledky. Vzhledem k tomu, že jsou hodnoty rychlosti při měření zaznamenávány ve velice krátkých časových intervalech, je v grafu uvedeno velké množství hodnot. Díky tomu jsou důležité hodnoty hůře čitelné. Proto byl zvolen způsob idealizace těchto grafů tak, aby bylo možné z nich získat požadovaná data. Grafy s idealizovaným průběhem jsou znázorněny dále v Obrázek 10 – Obrázek 12.



Obrázek 10 Rychlost odvráceného povrchu – materiál RC – idealizovaný průběh



Obrázek 11 Rychlost odvráceného povrchu – materiál S – idealizovaný průběh



Obrázek 12 Rychlost odvráceného povrchu – materiál U – idealizovaný průběh

V Tabulka 1 jsou uvedeny hodnoty dosažené rychlosti ve studovaných časech (čas t_2 a t_3). Dále je zde uveden rozdíl rychlostí, který je dále využit pro výpočet pevnosti dle vzorce (1). Výsledky tohoto výpočtu jsou uvedeny v Tabulka 2.

Tabulka 1 Hodnoty rychlosti pro všechny materiály

Materiál RC			
	rychlost vmax [m/s]	rychlost v3 [m/s]	Δv [m/s]
Bez ohřevu	32,63	23,40	9,23
Ohřev z jedné strany	38,00	27,82	10,18
Ohřev ze všech stran	38,94	33,38	5,56
Materiál S			
	rychlost vmax [m/s]	rychlost v3 [m/s]	Δv [m/s]
Bez ohřevu	41,39	40,29	1,1
Ohřev z jedné strany	55,48	46,64	8,84
Ohřev ze všech stran	66,76	60,25	6,51
Materiál U			
	rychlost vmax [m/s]	rychlost v3 [m/s]	Δv [m/s]
Bez ohřevu	28,33	0	28,33
Ohřev z jedné strany	34,33	0	34,33
Ohřev ze všech stran	34,33	0	34,33

Pro materiál U byla uvažovaná rychlost v čase $t_3 = 0$, jelikož nedošlo k odštěpení materiálu, pouze k jeho delaminaci (vznik trhliny podélně s plochou odvrácenou povrchu) a lehkému vyboulení.

Hodnoty objemové hmotnosti uvedené v Tabulka 2 jsou hodnoty stanovené v rámci experimentu vždy pro prvky s daným způsobem ohřevu. Hodnoty rychlosti zvuku v materiálu jsou stanoveny na základě předchozích experimentů pracoviště. Pro zjednodušení bylo uvažováno, že hodnota rychlosti zvuku se nemění v závislosti na ohřevu materiálu a zůstává konstantní. Toto zjednodušení lze aplikovat, jelikož právě předchozími měřeními bylo zjištěno, že změna objemové hmotnosti a dalších parametrů má minimální (zanedbatelný) vliv na změnu rychlosti šíření zvuku v daném materiálu.

Tabulka 2 Hodnoty a výpočet pevnosti pro všechny materiály

		ρ [kg/m ³]	C_B [m/s]	Δu_{fs} [m/s]	σ [MPa]
RC	Bez ohřevu	2 449	4 700	9,2	52,9
	Ohřev z jedné strany	2 441	4 700	5,6	32,1
	Ohřev ze všech stran	2 402	4 700	10,2	57,6
U	Bez ohřevu	2 659	5 000	28,3	188,1
	Ohřev z jedné strany	2 478	5 000	34,3	212,5
	Ohřev ze všech stran	2 560	5 000	34,3	219,5
S	Bez ohřevu	1 705	4 000	1,1	3,8
	Ohřev z jedné strany	1 536	4 000	6,5	20,0
	Ohřev ze všech stran	1 601	4 000	9,8	31,4

Z prezentovaných dat je patrné, že výbuch nejvíce urychlil povrch materiálu S, naopak nejméně povrch materiálu U. Co se týče trendu, pak nejvíce urychlen byl povrch u zkušebních vzorků, které byly vystaveny působící teplotě ze všech stran. Naopak nejnižší rychlosti dosahovaly vzorky které nebyly vystavené působící teplotě jelikož nebyly tímto jevem nijak poškozeny. Rychlosti u vzorků vystavených teplotě ze všech stran materiálů RC a U jsou přibližně o 20% vyšší než u těles bez působení teploty. U Materiálu S došlo k navýšení o více než 60%. Z uvedeného vyplývá nejnižší odolnost materiálu S vůči působení kombinovaného účinku zatížení.

Z hlediska pevnosti pak nejvyšších hodnot dosahovaly materiály U a nejnižší naopak materiály S. Zvolená metodika výpočtu je určena především pro homogenní materiály. V případě zda využitých materiálů se jedná o velice heterogenní materiály. S ohledem na toto ve výsledcích není možné zvolit trend a je potřeba je vnímat pouze jako orientační. Vliv na výsledky má také počet a přesnost měření pro danou skupinu, která ne vždy byla zastoupena dostatečně reprezentativním počtem.

4. ZÁVĚREČNÉ SHRUTÍ

Tento příspěvek prezentuje výsledky měření PDV. Jedná se o metodu, která měří rychlost daného povrchu v čase. Čím vyšší je hodnota rychlosti, tím menší množství energie z výbuchu daný prvek pohltil. V případě kdy prvek pohltí většinu energie, nedojde k jeho protržení a vytvoření výtrže. Prezentované výsledky uvádí nejvyšší dosaženou rychlost odletujících částic u vzorků materiálu S, který byl zároveň nejvíce poškozen. Naopak nejnižší rychlosti byly naměřeny u materiálu U, což vypovídá o tom, že prvek pohltil největší množství energie. V případě porovnání rychlosti v závislosti na ohřevu byly naměřeny nejvyšší rychlosti u vzorků ohřátých ze všech stran a naopak nejnižší hodnoty vykazovaly vzorky bez ohřevu. To vypovídá o tom, že působící teplota měla negativní vliv na vlastnosti materiálu. Prvky jím pak byly oslabeny a ty hůře odolávaly působení výbuchu.

Příspěvek dále prezentuje metodiku výpočtu pevnosti materiálu a výsledky tohoto propočtu. Jedná se o orientační hodnotu určenou k dalšímu studování.

Uvedené výsledky lze dále porovnávat z hlediska rozdílů časů mezi uvedením do pohybu a dosažení maximální

rychlosti a podobně. Zároveň je možné k porovnání zahrnout ostatní data získaná experimentem, tedy jak moc úbytek vody při ohřevu ovlivní výbuchovou odolnost, porovnání úbytků hmotností při ohřevu s úbytky hmotností po výbuchu a podobně. Všechna tato porovnání jsou dále nadále studována a zpracovávána.

ACKNOWLEDGEMENTS

Príspevek vznikl za finanční podpory Grantové agentury České republiky projektu č. 22-33039S.

Reference

- Horníková, K. (2020), Vliv kombinovaného účinku působení vysoké teploty a výbuchu na betonové prvky. Proceedings of PhD Workshop,
- Horníková, K. (2021), Vyhodnocení měření rychlosti úlomků cementových kompozitů vystavených výbuchu. Proceedings of PhD Workshop,
- Horníková, K., Scheinherrova, L., Štefan, R., & Foglar, M. (2020). Experimental investigation of physical, thermal, hygral and mechanical properties of cementitious composites at high temperatures. *Construction and Building Materials*, 255, 119244.