

VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ RYCHLOSTI 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 vyhodnocení 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. Příspěvek se zabývá způsobem vyhodnocení těchto měření, idealizací získaných dat a následným vzájemným porovnáním těchto dat.

KLÍČOVÁ SLOVA

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

ABSTRACT

This article deals with the evaluation 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. This paper deals with the method of evaluation of these measurements, idealization of the obtained data and subsequent mutual comparison of these data

KEYWORDS

High temperature • Blast • Velocity of flying elements • Photonic Doppler Velocimetry • PDV

1. ÚVOD

Tento příspěvek volně navazuje na příspěvek z předchozího ročníku Workshopu doktorandů 2020 (Horníková 2020). V tomto příspěvku byl prezentován experiment, zaměřující se na odolnost betonových prvků vůči požáru a následnému výbuchu. V rámci příspěvku 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 roztříští a odlítnou z povrchu tisíce částic) mohou 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 a především způsob jejich vyhodnocení. Získaná data jsou dále porovnána a vzájemně diskutována.

2. EXPERIMENT

2.1. Koncept experimentu

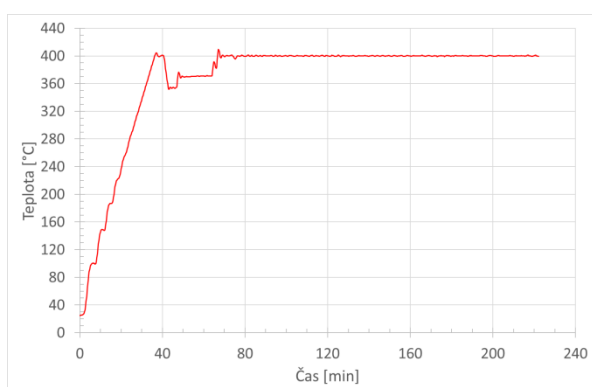
Tento experiment je součástí rozsáhlého experimentálního programu zabývajícího se odolností cementových kompozitů vůči požáru a následnému výbuchu. V rámci tohoto experimentu byly nejprve stanoveny materiálové vlastnosti (mechanické i tepelně technické vlastnosti) vybraných materiálů. Výsledky této části experimentu jsou prezentovány

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

v článku (Horníková et al. 2020). Následovala série experimentů pro stanovení samotné odolnosti vybraných materiálů. Zkušební tělesa byla nejprve vystavena působení 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.



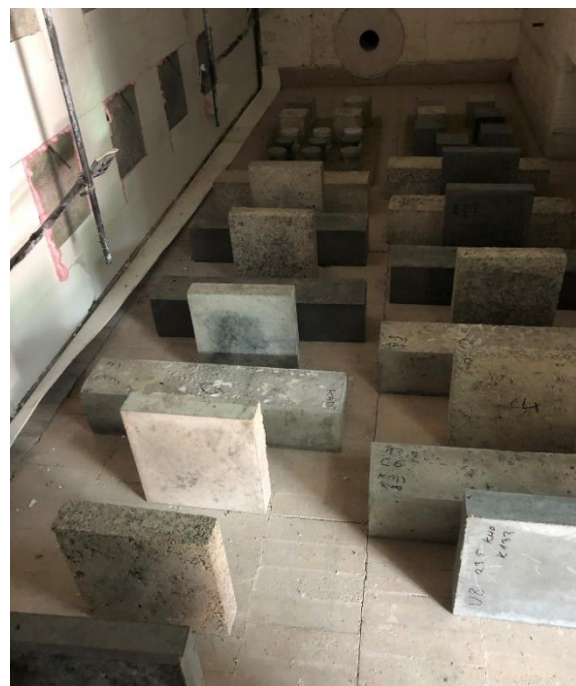
Obrázek 1 Skutečná teplotní křivka experimentu

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

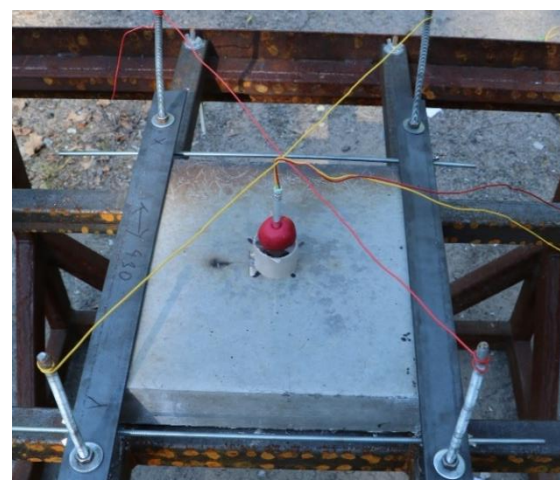
Základní uspořádání zkoušky je znázorněno na Obrázek 3. Betonové vzorky byly upnuty do ocelového rámu, který byl připevněn na ocelový stůl. Toto uspořádání zajišťovalo, že byly zkušební vzorky vždy 0,75m od země. Současně byly vzorky pevně upevněny tak, aby zkušební vzorky nebyly výbuchem odmrštěny mimo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

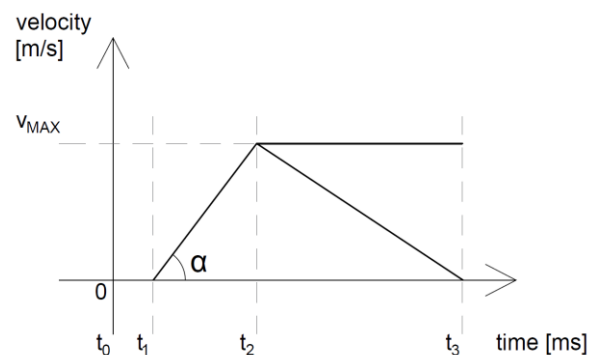
2.4. Stručný popis metody Photonic Doppler Velocimetry (PDV)

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.

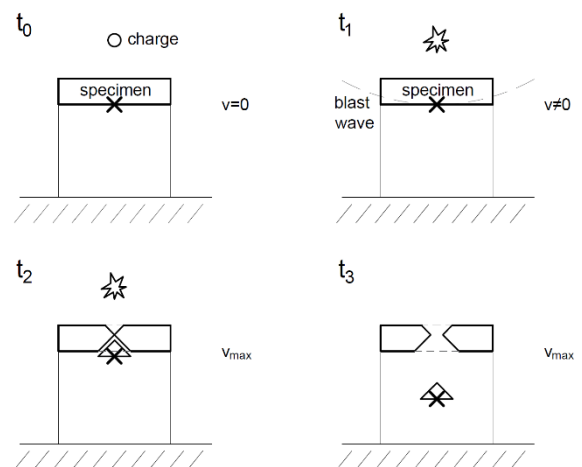
Měření je ukončeno, pokud se daný bod přestane pohybovat, nebo pokud se délka laserového paprsku snížila na 0.

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 dva ideální případy průběhu a jsou zde vyznačeny důležité body. Čas t_0 udává čas, kdy došlo k sepnutí měřicího zařízení a zároveň aktivace rozbušky. Tento čas lze považovat za začátek výbuchu. V čase t_1 je měřený povrch (bod) uveden do pohybu. V čase t_2 dosáhne povrch (bod) maximální rychlost. Pokud se tento bod odštěpí od zkušebního vzorku, zůstane rychlost konstantní (letí směrem k měřicímu zařízení). Měření končí v čase t_3 , kdy je vzdálenost od měřicího zařízení rovna 0. Pokud nedojde k odštěpení materiálu, dojde k jeho zbrzdění až úplnému zastavení, pak je hodnota rychlosti v čase t_3 rovna 0. Na schématu na Obrázek 6 je znázorněn první popsáný případ s odštěpenou částicí letící směrem ke kolimátoru.



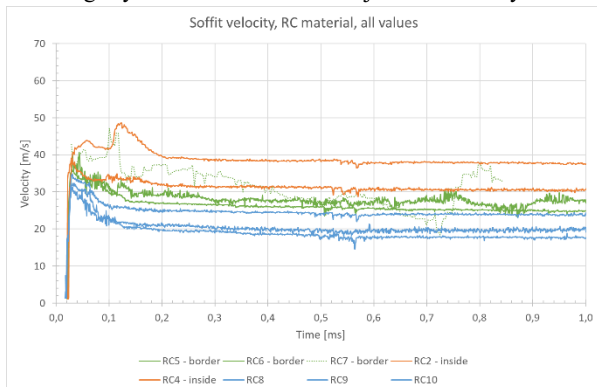
Obrázek 5 Schéma výstupu z měření PDV



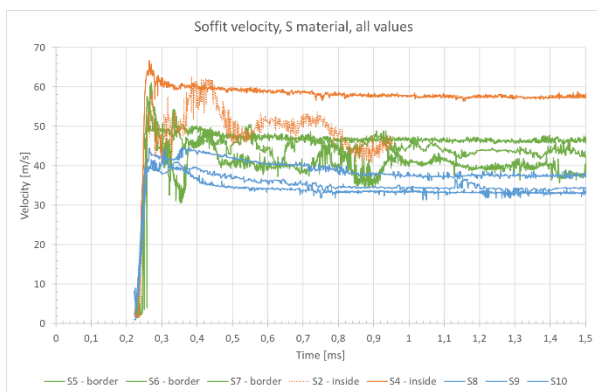
Obrázek 6 Schéma průběhu experimentu v závislosti na čase uvedeném v grafu

3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ – PDV

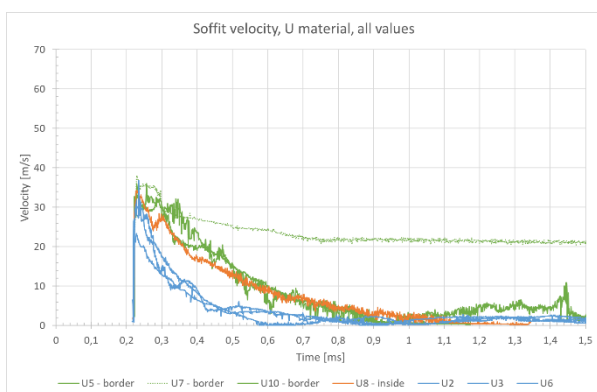
Jak již bylo zmíněno, výsledkem provedeného měření PDV je graf závislosti rychlosti elementu na čase. Tato závislost je znázorněna grafem pro každé jednotlivé měření. Takto získané grafy všech zkušebních těles jsou znázorněny dále.



Obrázek 7 Rychlost odvráceného povrchu – materiál RC



Obrázek 8 Rychlost odvráceného povrchu – materiál S

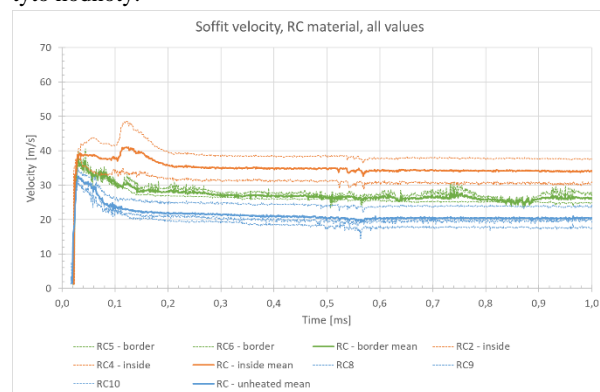


Obrázek 9 Rychlost odvráceného povrchu – materiál U

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 zjednodušení těchto grafů tak, aby bylo možné z nich získat požadovaná data.

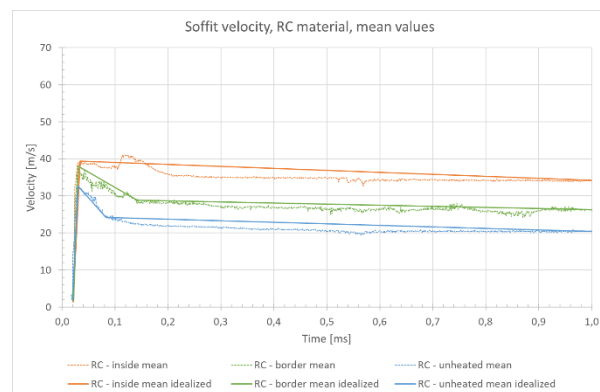
Získané hodnoty u prvků ze stejné skupiny (prvky bez ohřevu, s ohřevem z jedné strany, prvky s ohřevem ze všech stran) byly nejprve zprůměrovány tak, jak je znázorněno na

Obrázek 10. Pro další vyhodnocení pak byly použity pouze tyto hodnoty.



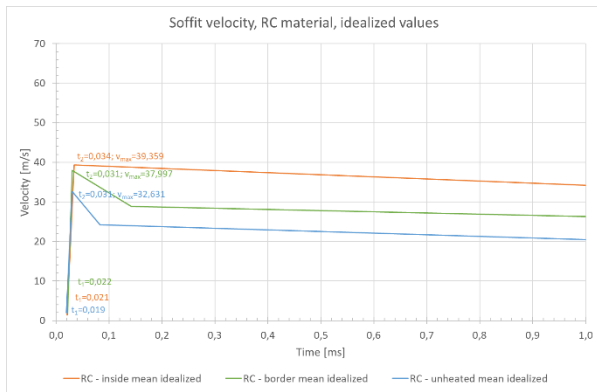
Obrázek 10 Rychlost odvráceného povrchu – materiál RC – s průměrnými hodnotami

Vzhledem k tomu, že pro potřeby vyhodnocení nejsou další hodnoty důležité, až na hodnotu rychlosti na konci měření, byl průměrný průběh idealizován na lineární. Tedy první část od počátku pohybu po maximální rychlost, a druhá část od maximální rychlosti k minimální, respektive k času ukončení měření. Tato idealizace je znázorněna na Obrázek 11.



Obrázek 11 Rychlost odvráceného povrchu – materiál RC – idealizace průměrných hodnot

Výsledkem je tedy idealizovaný průběh uvedený na Obrázek 12.



Obrázek 12 Rychlost odvráceného povrchu – materiál RC – idealizované průměrné hodnoty použité k vyhodnocení

Na takto idealizovaném grafu jsou patrné všechny potřebné parametry, které jsou porovnávány. Těmi jsou počátek pohybu – čas t_1 , maximální rychlost a čas kdy je jí dosaženo – čas t_2 , rychlost v_{max} a v neposlední řadě rychlost a čas na konci měření – čas t_3 . Takto byly zpracovány výsledky pro všechny materiály.

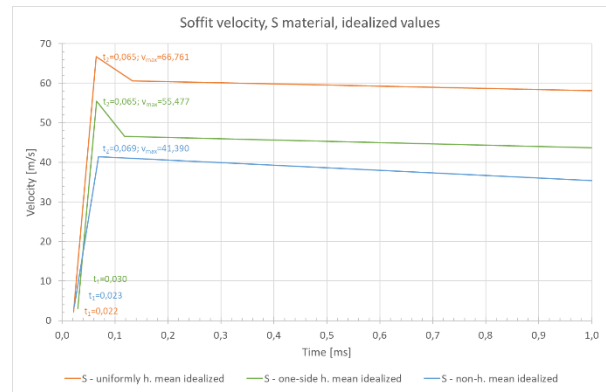
Obrázek 12 znázorňuje výsledné hodnoty materiálu RC. Vzhledem k tomu, že při výbuchu došlo k proražení prvku a vytržení materiálu, výsledný graf neklesá k nule ale při ukončení měření je rychlost nenulová.

V Tabulka 1 jsou uvedené hodnoty změřené pro běžný beton – materiál RC:

Tabulka 1 Maximální hodnoty pro materiál RC

Materiál RC				
	čas t_1 [ms]	čas t_2 [ms]	v_{max} [m/s]	α [°]
Bez ohřevu	0,0193	0,0307	32,63	70,63
Ohřev z jedné strany	0,0216	0,0306	38,00	76,65
Ohřev ze všech stran	0,0208	0,0339	39,36	71,58

Na Obrázek 13 jsou znázorněny výsledné hodnoty idealizovaného průběhu pro vzorky z isover betonu – materiál S. I v tomto případě došlo k proražení prvku, v některých případech k jeho totální destrukci. Proto rychlost spodního povrchu neklesá na nulu a při ukončení měření byla zaznamenaná rychlost nenulová.



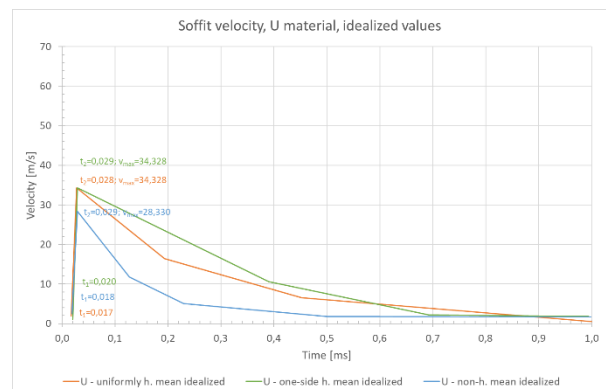
Obrázek 13 Rychlost odvráceného povrchu – materiál S – idealizované průměrné hodnoty použité k vyhodnocení

V Tabulka 2 jsou pak uvedené změřené hodnoty pro isover beton – materiál S.

Tabulka 2 Maximální hodnoty pro materiál S

Materiál S				
	čas t_1 [ms]	čas t_2 [ms]	v_{max} [m/s]	α [°]
Bez ohřevu	0,0228	0,0687	41,39	42,05
Ohřev z jedné strany	0,0297	0,0649	55,48	57,59
Ohřev ze všech stran	0,0220	0,0646	66,76	57,46

Na Obrázek 14 jsou znázorněny výsledné hodnoty idealizovaného průběhu pro vzorky z UHPFRC betonu – materiál U. V tomto případě nedošlo k poškození zkušebního vzorku nebo k vytržení části povrchu. Došlo pouze k lehkému odtržení ale prvek zůstal celistvý. Proto je rychlost při ukončení měření téměř nulová.



Obrázek 14 Rychlost odvráceného povrchu – materiál U – idealizované průměrné hodnoty použité k vyhodnocení

V Tabulka 3 jsou pak uvedené změřené hodnoty pro UHPFRC – materiál U.

Tabulka 3 Maximální hodnoty pro materiál U

Materiál U				
	čas t_1	čas t_2	v_{max}	α

	[ms]	[ms]	[m/s]	[°]
Bez ohřevu	0,0185	0,0291	28,33	69,40
Ohřev z jedné strany	0,0200	0,0290	34,33	75,29
Ohřev ze všech stran	0,0171	0,0277	34,33	72,76

4. ZÁVĚREČNÉ SHRNUÍ

Článek prezentuje výsledky měření PDV. Tato metoda měří rychlost daného povrchu v čase. Čím vyšší je hodnota rychlosti, tím menší množství energie z výbuchu daný prvek pohltí. 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 pohltí 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.

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 momentálně zpracovávána a budou prezentována v další práci.

ACKNOWLEDGEMENTS

Príspevek vznikl za finanční podpory SGS21/042/OHK1/1T/11, Českého Vysokého učení technického v Praze.

Reference

- Horníková, K. (2020), Vliv kombinovaného účinku působení vysoké teploty a výbuchu na betonové prvky. 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.