

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra materiálového inženýrství a chemie



Vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení

The influence of different fibers ratio in the cementitious
composite on extreme load resistance

Bakalářská práce

Autor: Michal Poláček

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Fornůsek Ph.D.

Konzultanti: Ing. Michal Mára, Ing. Jan Zatloukal, Ph.D.

Akademický rok: 2016/2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Poláček	Jméno: Michal	Osobní číslo: 380815
Zadávací katedra: Experimentální centrum		
Studijní program: Stavitelství		
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení

Název bakalářské práce anglicky: The influence of different fibers ratio in the cementitious composite on extreme load resistance

Pokyny pro vypracování:
Zpracování rešerše, výroba vzorků, testování vzorků, zpracování výsledků a jejich vyhodnocení.

Seznam doporučené literatury:
T. Vavříník, Experimentální a numerická analýza nárazu projektilu na cementový kompozit, diplomová práce
M. Tvarog, Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů, diplomová práce.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 20.2.2017 Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Prohlašuji, že jsem předloženou práci na téma „Vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení“ vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškerou použitou literaturu.

Praha, 28. května 2017

Michal Poláček

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jindřichu Fornůskovi za odborné vedení a cenné rady. Rovněž velký dík patří Ing. Michalu Márovi a Ing. Janu Zatloukalovi za věcné připomínky, konzultace a pomoc při přípravě a realizaci experimentální části této práce. V neposlední řadě bych rád poděkoval své přítelkyni a rodině za nesmírnou podporu při realizování této práce.

Abstrakt

Cílem této práce bylo zjištění odolnosti betonu vůči extrémnímu zatížení vlivem různého procentuálního zastoupení ocelových vláken v cementovém kompozitu. Extrémní zatížení bylo vyvoláno nárazem projektilu. Odolnost byla vyhodnocována na bázi experimentálního výzkumu, kde bylo zkoumáno lokální poškození na vzorcích z ultra vysokopevnostního betonu s rozptýlenou výztuží ve formě ocelových vláken, vyvozené nárazem projektilu. Použity byly projektily deformovatelné i nedeformovatelné o průměru 7,62 a 5,56 mm a o hmotnosti cirká 8–10 g a rychlosti nárazu okolo 800 m/s. Projektily v experimentu narážely do středu vzorku, popřípadě pro upřesnění zařídění do levé nebo pravé části vzorku. Zaznamenávání výsledků sloužilo pro vyhodnocení odolnosti jednotlivých vzorků, na vznik lokálního poškození. Odolnost ultra vysokopevnostního betonu proti nárazu střely byla vyhodnocena na celkem 15 vzorcích. Výstupem vyhodnocení je nalezení optimálního množství vláken v ultra vysokohodnotném betonu s ohledem na jeho odolnost vůči nárazu střely.

Klíčová slova: UHPFRC, ocelová vlákna, extrémní zatížení, projektily

Abstract

The aim of this work was to determine the resistance of concrete to extreme load due to the different percentages of steel fibers in the cement composite. Extreme load was caused by the impact of the projectile. Resistance was evaluated on the basis of experimental research, where local damage was investigated on samples of ultra-high strength concrete with a dispersed steel fiber reinforcement caused by a projectile impact. The projectiles were deformable and non-deformable with a diameter of 7.62 and 5.56 mm and a circular mass of 8-10 g and an impact velocity of about 800 m/s. The projectiles in the experiment hit the center of the sample, or to specify the classification to the left or right side of the sample. The recording of the results served to evaluate the resistance of the individual samples to the local damage. The resistance of ultra-high strength concrete against missile impact was evaluated on a total of 15 samples. The output of the evaluation is to find the optimal amount of fiber in ultra high-quality concrete with respect to its impact resistance.

Key words: UHPFRC, steel fibers, extreme load, projectiles

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Motivace.....	8
1.2	Dané cíle práce	9
1.3	Rozsah práce	9
2	Cementový kompozit vyztužený vlákny	10
2.1	Ocelová vlákna.....	12
2.1.1	Typy ocelových vláken.....	12
2.1.2	Ocelová vlákna a jejich vlastnosti	14
2.1.3	Jak působí vlákna v betonu.....	17
2.2	Vliv různého zastoupení objemu vláken	19
2.2.1	Procentuální obsah v cementovém kompozitu	19
2.2.2	Vliv různého obsahu vláken na mechanické vlastnosti	20
3	Experimentální část I. – příprava a výroba vzorků.....	23
3.1	Popis použitých pomůcek	24
3.1.1	Prefabrikovaná směs pro přípravu UHPFRC	25
3.1.2	Výroba vzorků ze směsi UHPFRC	26
3.2	Výroba vzorků s různým zastoupením vláken	27
4	Experimentální část II. – posouzení vzorků na extrémní zatížení.....	31
4.1	Popis zkoušky.....	31
4.1.1	Nutné vybavení na střelnici	33
4.1.2	Testovací prostředky (zbraně a střely)	33
5	Výsledky.....	37
5.1	Vyhodnocení zkoumaných vzorků.....	37
5.2	Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku	42
5	Závěr.....	48
6	Použitá literatura.....	50

Seznam obrázků

Obrázek 1: Hlavní rozdělení kompozitů, podle vyztužení [3].....	10
Obrázek 2: Vlákna, cementová matrice a jejich vzorové vlastnosti [3].	11
Obrázek 3: Ocelová vlákna a jejich tvarová úprava [3].....	14
Obrázek 4: Spojení vlákna a matrice v mikroměřítku [3].	17
Obrázek 5: Vliv použití vláken na pevnost v tlaku pro betony: HSC, FRHSC, SCC, FRSCC, FRC, OC [11].	18
Obrázek 6: Jak se rozvíjí trhliny při zatížení u FRC, FRSCC a FRHSC [11].	19
Obrázek 7: Bednicí forma na desky.....	23
Obrázek 8: Talířová míchačka o objemu 40 l.....	24
Obrázek 9: Vysokopevnostní mikrovlákna z ocele použita ve směsi UHPFRC.	25
Obrázek 10: Laboratorní váha.	27
Obrázek 11: Odstraňování vytvořených shluků vláken a betonové směsi.	28
Obrázek 12: Betonová směs se 4,7 % zastoupením ocelových vláken, po vlití do formy.....	30
Obrázek 13: Betonová směs se 4,7 % zastoupením ocelových vláken po zhutnění a zavibrování.....	30
Obrázek 14: Testovací sestava.....	31
Obrázek 15: Umístění zbraně v horizontální poloze do nástavce.....	32
Obrázek 16: nahoře: ochranná střelecká sluchátka B-15 [16]; dole: ochranné střelecké brýle.	33
Obrázek 17: 7,62 x 39 FMJ popis: A – deformovatelný projektil, B – nedeformovatelný projektil, 1 - olovo, 2 - ocelový plášť, 3 - ocelové jádro [18].....	36
Obrázek 18: Vyhodnocení průstřelu dle ČSN 39 5360.	38
Obrázek 19: Přední strana testované desky s obsahem 4,7 % ocelových vláken.	39
Obrázek 20: Zadní strana testované desky s obsahem vláken 4,7 % ocelových vláken.	39
Obrázek 21: Vyhodnocení průstřelu dle normy EN – 1522.	40
Obrázek 22: Vyhodnocení průstřelu dle dopadové energie střely [J].....	41
Obrázek 23: Tříbodové schéma zkoušky [19].	42
Obrázek 24: vlevo: zatížení trámku tříbodovým lisem, vpravo: porušení trámku tříbodovým lisem.	43
Obrázek 25: Zkouška pevnosti v tlaku.	44
Obrázek 26: Závislost stáří vzorku na tahové pevnosti.	47
Obrázek 27: Závislost stáří vzorku na tlakové pevnosti.:	47

Seznam tabulek

Tabulka 1: Směs UHPFRC vyjádřená hmotnostním poměrem [14].	26
Tabulka 2: Český standart střelných zbraní [15].	34
Tabulka 3: Evropská norma EN - 1522 [17].....	35
Tabulka 4: Tlaková a tahová pevnost zkoušených trámků.	45
Tabulka 5: Objemová hmotnost zkoušených trámů.	45

1 Úvod

Pro náš výzkum, který se zabývá obsahem vláken v cementovém kompozitu, se jako zajímavý postup v rozvoji betonu řadí například pokus využití ocele pro přenos tahu v materiálu s co největší objemovou hmotností a v každém směru. Při použití prutové výztuže, která účinkuje pouze podle jejího uložení tím, že je výztuž rozptýlená, je eventuální udělat materiál z kompozitu, jenž je stejnorodý a má vysokou pevnost v tahu v každém směru. Mezi první pokusy, kdy byla použita ocelová vlákna do betonu, můžeme řadit pokus v roce 1847. Joseph Lambot založil svůj patent na popsání využití ocelových vláken a drátů ve formě mřížky, které by vyztužily beton a následně vytvořily nový druh materiálu nazývaný železobeton [1]. Po tomto pokusu byla na základě tohoto výzkumu provedena spousta dalších testů a použití v reálných stavbách, které se pokoušely a doposud pokouší docílit ideálních vlastností ztvrdlých materiálů.

1.1 Motivace

V dnešní době, ať se nám to líbí nebo ne, dochází ve světě k mnoha útokům. Je tedy potřeba zohlednit fakt, že budovy mohou být namáhány extrémním zatížením ve formě střel nebo výbuchů. V této práci se budu snažit vyřešit, zda různé zastoupení vláken v cementovém kompozitu má vliv na jeho vlastnosti a odolnost vůči právě těmto extrémním zatížením. Ve spojitosti s cementovým kompozitem se čím dál tím víc používají ocelová, polypropylenová nebo skelná vlákna. Vlákna jako taková se do kompozitu přidávají, aby vydržel větší množství zatížení na materiál, větší teplotu, ale taky aby nevznikaly smršťovací trhliny, které se objevují v počáteční fázi zrání betonu. Jestliže je náš cíl zlepšit tyto vlastnosti pomocí zvyšování objemu vláken v kompozitu a nemá na to vliv například jejich orientace, musíme se to pokusit vyřešit právě touto cestou. V této práci by měl být stanoven vhodný počet objemu vláken pro využití do ochranných betonů v budoucnu a pomoci tak dalším výzkumům a pracím.

1.2 Dané cíle práce

Hlavním cílem této bakalářské práce je zjistit vliv různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu na odolnost vůči extrémnímu zatížení. Dalším cílem této práce je experimentálně ověřit pevnost, napětí, sílu a odolnost vyrobených betonových desek zatížených projektilem vystřeleným ze střelné zbraně na fakultou zajištěné střelnici. Po provedení těchto testů budou všechny výsledky zkoumány a vyhodnocovány. Dále pak budou provedeny zkoušky v tlaku a tahu na menších vzorcích o rozměru 40 x 40 x 160 mm, které budou vytvořeny z daných směsí cementového kompozitu na příslušných přístrojích. V této práci chceme, aby byl požadovaným výstupem určení správného procentuálního množství vláken na tvorbu betonu, který by byl použitelný v praxi.

1.3 Rozsah práce

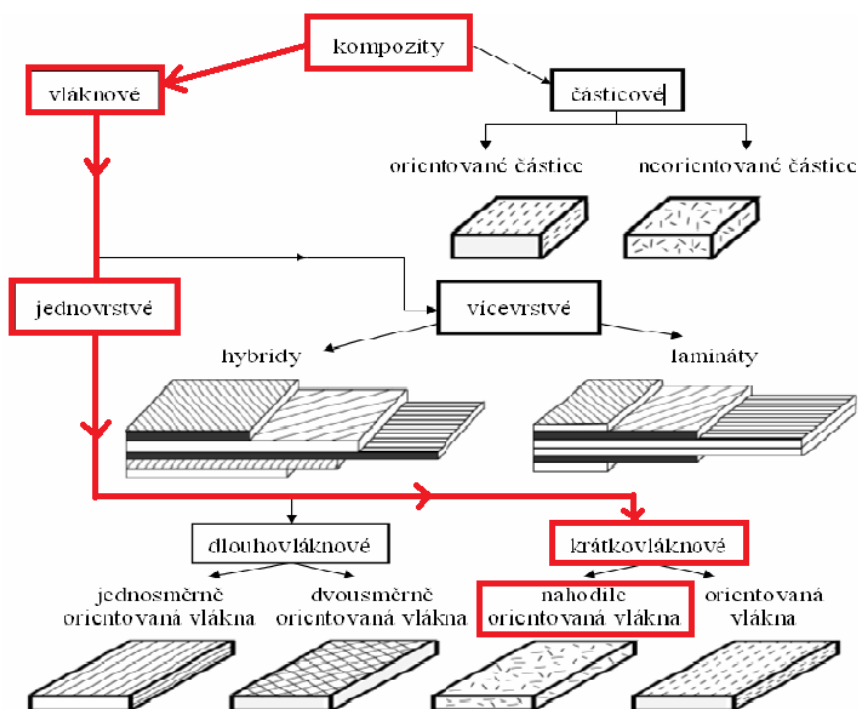
Tato práce se skládá ze dvou částí. První částí je rešerše a druhou tvoří experimentální výzkum. Rešerše se dělí na sekce, které se zabývají cementovým kompozitem, ocelovými vlákny a procentuálním množstvím vláken.

Experimentální část je rozdělena na dvě části, a to na přípravu a výrobu cementových kompozitů vyztužených vlákny a na posouzení vzorků na extrémní zatížení. První část popisuje použité materiály a zkoumané vzorky. Druhá část se zabývá převážně testováním a posuzováním vzorků na extrémní zatížení, které byly vytvořeny na střelnici, a její popis.

2 Cementový kompozit vyztužený vlákny

Beton patří mezi kompozitní látky, jenž vznikají po ztuhnutí směsí. Mezi základní složky se řadí cement jako pojivo, kamenivo jako plnivo a voda. Při přidání správně zvolených příměsí a přísad můžeme vylepšit jeho vlastnosti. Mezi ně patří zvýšení pevnosti, zkrácení doby tuhnutí, zlepšení zpracovatelnosti a větší odolnosti proti vnějším vlivům. Pro výrazné vylepšení parametrů běžného cementového kompozitu je důležité správně zvolit návrh směsi, který se však může zdát z technologického hlediska velmi náročný. Jednou variantou pro dosažení výrazných výsledků u tahové a smykové pevnosti, především u křehkých konstrukcí, je vyztužení cementového kompozitu vlákny [2].

Kompozity a jejich hlavní rozdělení dle typu vyztužení jsou zobrazeny na Obr. 1 [3]. Během této studie byly zkoumány cementové kompozity jednovrstvé, u kterých byla použita vlákna krátkovláknová a jejich orientace byla nahodilá.



Obrázek 1: Hlavní rozdělení kompozitů, podle vyztužení [3].

Abychom zdokonalili vlastnosti cementového kompozitu pomocí vláken, je potřeba zohledňovat použití materiálu pro jejich výrobu a jejich vlastnosti. Všechny

materiály se dají použít ve své určité oblasti. Hlavní rozdělení všech vláken podle daných materiálů pro jejich zhotovení a typické způsoby aplikování [3]:

- ❖ *Ocelová:* využití v průmyslových podlahách a jako doplněk klasické výztuže.
- ❖ *Polymerní:* chrání před odštipováním betonu při požáru, kdy se rozpouštějí vlákna.
- ❖ *Skleněná:* aplikace v textilních výrobcích a zpevnění jiných materiálů.
- ❖ *Uhlíková:* vysoká odolnost při mechanickém a chemickém namáhání.
- ❖ *Azbestová:* odolnost proti korozi a obroušení.
- ❖ *Celulózová:* aplikování místo vláken z azbestu, velká tahová pevnost.

Vlákna, cementové matrice a jejich vlastnosti jsou zobrazeny na následujícím Obr. 2. Během této studie byla do cementového kompozitu aplikována ocelová vlákna, jenž měla průměr 0,13 mm.

Materiál vlákna	Průměr (μm)	Objemová hmotnost (kg/m ³)	Modul pružnosti (GPa)	Pevnost v tahu (GPa)	Prodloužení při přetržení (%)
Ocel	5-500	7.84	200	0,5-2	0,5-3,5
Sklo	9-15	2.60	70-80	2-4	2-3,5
Azbest	0,02-0,4	3,4	196	3,5	2-3
Polypropylen	6-200	0,91	5-77	0,15-0,75	15
Aramid (Kevlar)	10	1,45	65-133	3,6	2,1-4
Uhlík	9-18	1,6-2,15	28-480	0,5-3	0,5-2,4
Nylon	20-200	1,1	4	0,9	13-15
Celulóza	-	1,2	10	0,3-0,5	-
Polyethylen	25-1000	0,95	0,3	0,08-0,6	3-80
Sisal	10-50	1,5	13-26	0,3-0,6	3-5
Cement	-	2,5	10-45	0,004	0,02

Obrázek 2: Vlákna, cementová matrice a jejich vzorové vlastnosti [3].

Při použití vláken do betonu dále sledujeme omezení vlivu smršťování, vzniku malých trhlin, zabraňujeme jemnému lámání konstrukce a přispíváme k většímu

zabezpečení. Beton vyztužený vláknem byl v minulosti omezen pouze na používání v průmyslových podlahách z betonu. V dnešní době se ovšem častěji používá při konstrukci jak dopravních, tak i pozemních staveb, kde může být použit ve výrobě nápadně složitějších konstrukcí, což nešlo využít při standartní betonářské výztuži [2].

2.1 Ocelová vlákna

Pro správné zvolení druhu vlákna je zapotřebí zohlednit místo a účel aplikování. K získání materiálu podle požadovaných vlastností je jako nejvhodnější použít vlákna s vysokým modulem pružnosti, která se smíchají s cementem nebo betonem. Proto se jako nejlepší variantou pro spojení s betonem ukazuje použití ocelových vláken. Mezi nejdůležitější vlivy určující působení vláken v betonu patří především délka vláken, tvar průřezu, pevnost v tahu, tvárnost a jak spolu působí. Jak jsou vlákna dlouhá a jaký mají tvar ovlivňuje kompozit, jaké získá vlastnosti a ovlivňuje, jak se vlákna chovají v objemu a vlhké formě. Stanovení odolnosti betonu při zatížení určuje, jak spolu působí vlákna a pevnost v tahu [1,2].

2.1.1 Typy ocelových vláken

Výroba ocelových vláken lze provést mnoha způsoby. Mezi ně patří tvarování z taveniny anebo mohou být formovány a řezány z už vyhotoveného ocelového produktu. Je potřeba počítat s tím, že pokud budou ocelová vlákna vyráběna rozdílnými způsoby, bude mít výsledný materiál po zatížení, účinku teplot a finální trvanlivosti materiálu různé chování. Podle typu výroby se ocelová vlákna dělí na [4]:

- ❖ *Za studena tažený drát.*
- ❖ *Vlákna stříhaná z plechu.*
- ❖ *Vlákna oddělovaná z taveniny.*
- ❖ *Vlákna protahována z drátu taženého za studena.*
- ❖ *Vlákna frézovaná z ocelových bloků.*

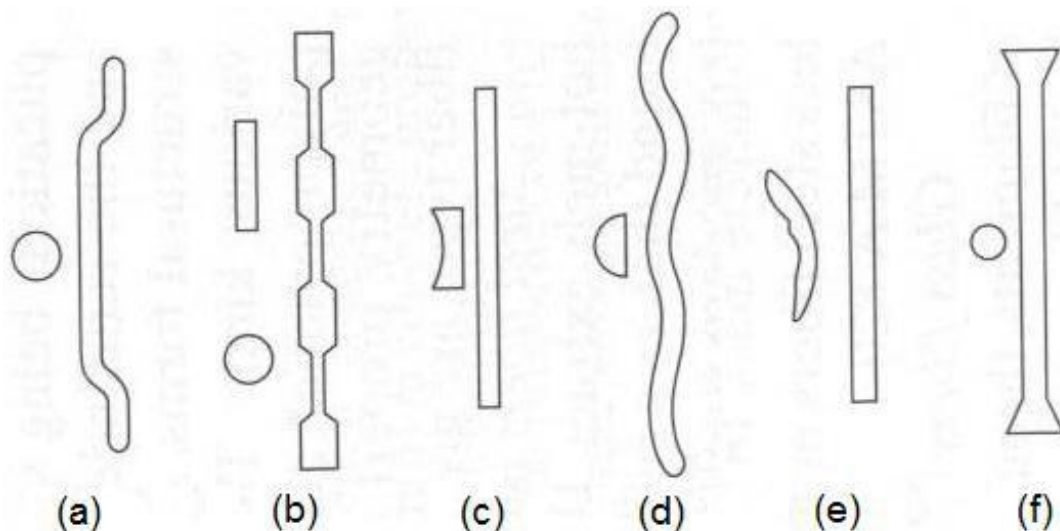
Tyto varianty, ať už ocelový polotovár nebo tavenina, lze řadit mezi postupy, ze kterých lze vyrobit vlákno odlišných forem a velikostí. Záleží na výběru zákazníka a na tom, kam se má vlákno aplikovat. Geometrie vláken se dělí na vlákna [5]:

- ❖ *Hranolová:* vlákna mají zaoblený nebo mnohoúhelníkový průřez
- ❖ *Nepravidelná:* průřez se mění po délce vlákna
- ❖ *Tříděná:* větvená vlákna, roztřepené a sítě tvořené z jednoho vlákna

Pro lepší kotvení a soudružnost s cementovou matricí slouží jejich úprava povrchů (viz *Obr. 3*), která je jednou z požadovaných vlastností. Sílu potřebnou k vytržení vlákna, zvyšování tření a lepší držení vláken v matrici zajišťuje zdrsnění a tvarování. Tato síla odpovídá přenosu napětí v tahu. Nejlepším řešením by bylo použít vlákna těch nejsložitějších tvarů, která jsou na konci zahnutá. Tato možnost se sice jeví jako přínos, ale pouze pro přenášení sil. Jinak je to velmi složité zpracovávat typ těchto vláken do betonu. Problém je i u obyčejných vláken, která se sdružují do tzv. shluků a nejsou pravidelně promíchaná, protože tak ztrácí přínos.

Úpravy povrchů vláken můžeme dělit na [6]:

- ❖ *Přímé.*
- ❖ *Na konci zahnuté. (a)*
- ❖ *Nepravidelné. (b)*
- ❖ *Deformované. (c)*
- ❖ *Zvlněné. (d)*
- ❖ *Leptané. (e)*
- ❖ *Pádlovité. (f)*



Obrázek 3: Ocelová vlákna a jejich tvarová úprava [3].

Pokrok dnešní doby je tak rychlý, že se vlákna vyrábějí prakticky v nekonečných tvarech a uspořádáních. Záleží pouze na spotřebiteli, které si vybere. Z tohoto důvodu je dělení tvarů vláken a jejich úprava pouze ukázková. Při navrhování směsi kompozitu je potřeba vzít v úvahu to, že pokud jsou do směsi přidána vlákna, sníží zpracovatelnost a zhorší reologii dané směsi [4].

2.1.2 Ocelová vlákna a jejich vlastnosti

Pro ocelová vlákna jsou velmi důležité jejich vlastnosti. Kromě jejich tvaru, velikosti a povrchové úpravy. Mezi důležitý faktor patří tahová pevnost samotného vlákna. Pevnost v tahu celého kompozitu udává společně se silou vazba mezi matricí a povrchem vláken. Pevnost v tahu vlákna je určena především zvolením materiálu a upravením při zhotovení. Mezi úpravy patří například legování ocele. Tato úprava může způsobit, že materiál zcela změní své chování. Vzhledem k tomu, že je finančně náročná, používá se při výrobě vysokohodnotných betonů. Například u vláken s běžnou pevností je jejich tahová pevnost 400–1050 N/mm². Zpravidla se používají ve FRC¹, kde jsou vlákna vložena, aby nedocházelo ke vzniku větších prasklin. Vlákna vysokopevnostní mají pevnost v tahu větší než 2000 N/mm² a používají

¹ FRC – beton vyztužený vlákny, z anglického: Fibre-Reinforced Concrete.

se v UHPFRC². Je vyztužený rovnoměrně vlákny, které se do betonu vkládají, jelikož výrazně zvyšují tahovou pevnost, zamezují vznik mikrotrhlin a křehké lámání [4].

Když se rozhodneme v betonové směsi použít ocelová vlákna, je potřeba abychom před návrhem znali nejen pevnost vláken, ale také další parametry, mezi něž patří zejména níže uvedené [3]:

- ❖ **Průřezový modul:** jedná se o poměr délky vlákna ku jeho průměru (L_f/d), kde se z poměru dozvíme, jaká je geometrie vlákna a jestli má náchylnost k vytváření tzv. shluků. Pokud je hodnota modulu v intervalu 50–150, je směs dobře zpracovatelná, a proto i většina vláken, která se vyrábí, mají z tohoto důvodu modul v tomto rozmezí.
- ❖ **Kritická délka l_c :** určuje teoretickou délku vlákna, kdy je potřebná síla na přetržení vlákna menší, než síla potřebná k vytržení z matrice (k přetržení vlákna dojde dříve, než bude vytaženo). Uvažujeme prostředek délky vlákna při vzniku trhliny. Pokud bude teoretická délka vlákna menší než délka skutečná, je zapotřebí aby byla použita taková vlákna, která mají větší pevnost nebo větší průměr. Vláknem se stává nevyužitelné, když je teoretická délka naopak větší než délka skutečná. Potom je lepší využít vlákna, která mají pevnost nižší a menší průměr.
- ❖ **Faktor orientace:** určuje účinnost vláken oproti jejich síle vzhledem k tomu, jak je vlákno orientováno ke směru trhliny, která tam vzniká. Tento faktor se ovlivňuje především stejnorodostí a preferovanou orientací vláken. Účinnost je vyšší, pokud vlákna vyrovnaváme do kolmého směru ke vzniklé trhlíně, než když jsou náhodně orientována. Tento faktor je v rozmezí 0,2 – 1, přitom 1 značí vlákna úplně vyrovnaná kolmo na trhlinu.
- ❖ **Rozdělovací faktor:** mez tahu betonového kompozitu je větší než pevnost samotné matrice, když jsou vlákna přijatelně vedle sebe. Potom se napětí, které působí mezi nimi, rozdělí rovnoměrně a potom vlákna účinkují efektivněji.
- ❖ **První lomová síla:** je síla, která odpovídá zatížení v tahu za ohybu, kdy zatěžovací zařízení zaznamenává první změnu deformace ve speciálním

² UHPFRC – beton ultra vysokohodnotný vyztužený vlákny, z anglického Ultra-High performance Fibre-Reinforced.

programu zaznamenávajícím zatížení. Její hodnota závisí především na pevnosti dané matrice v tahu. Při použití ocelových vláken může být značně zvýšena. Vlákná dokážou přenést zatížení v místech, kde dochází ke vzniku trhlin, tam kde není matrice k tomu samostatně schopná.

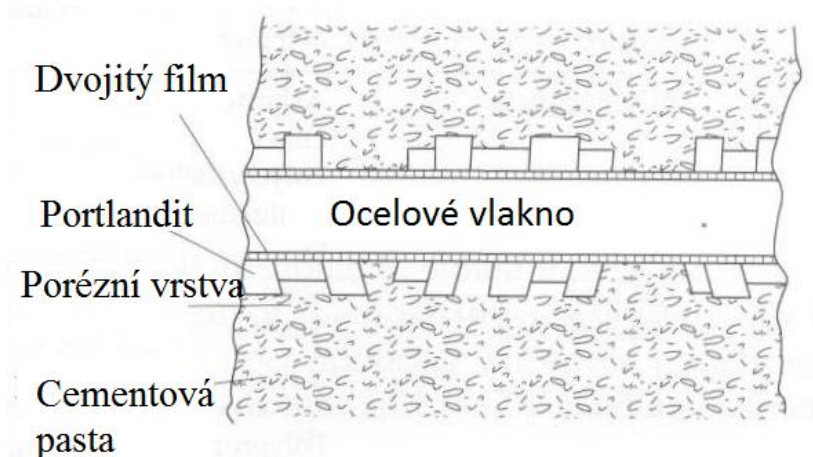
Na základě těchto parametrů se můžou zvolit vlákna do betonových kompozitů, které mají vhodné rozměry, pevnost a můžeme pomocí nich určit preferovanou orientaci vláken a jejich význam na větší odolnost proti mechanickému zatížení.

Na vzájemném spojení jednotlivých složek kompozitu a jejich vlastnostech jsou závislé jejich výsledné mechanické vlastnosti [3]. Přenos síly i za hranici samotné pevnosti matrice umožňuje vazba mezi vláknem a matricí. Tato vazba je závislá na úpravě povrchu, ukotvení a použitém materiálu. Podle toho jaký použijeme materiál volíme vazby:

- ❖ *Vlákná ocelová:* přílnavost, tření, vzájemné mechanické spojení.
- ❖ *Vlákná skelná:* chemická reakce.
- ❖ *Vlákná organická* vzájemné mechanické spojení.

Zásadní jsou také dopady oslabující vazbu, se kterými je potřeba při návrhu počítat. Při zatížení betonu v tlaku se jeho pevnost zvyšuje rychleji než pevnost spoje v oblasti tzv. tranzitní zóny. To vede k výraznějším rozdílům hodnot modulu pružnosti v počátečním a pozdějším stáří betonu [7]. Velikost tranzitní zóny je určována vodním součinitelem a poměrem kameniva ku cementu. Ke zvětšování tranzitní zóny dochází zvyšováním vodního součinitele (w/c) [8]. Na rozmezí vlákna a matrice (viz *Obr. 4*) působí tyto úkazy [3]:

- ❖ *Probíhající chemická reakce.*
- ❖ *Změny chování v čase.*
- ❖ *Objemové změny*
- ❖ *U povrchu vláken je matrice poréznější než ve zbytku objemu.*
- ❖ *Cementová zrna obtížně pronikají do prostoru mezi jednotlivými vlákny.*



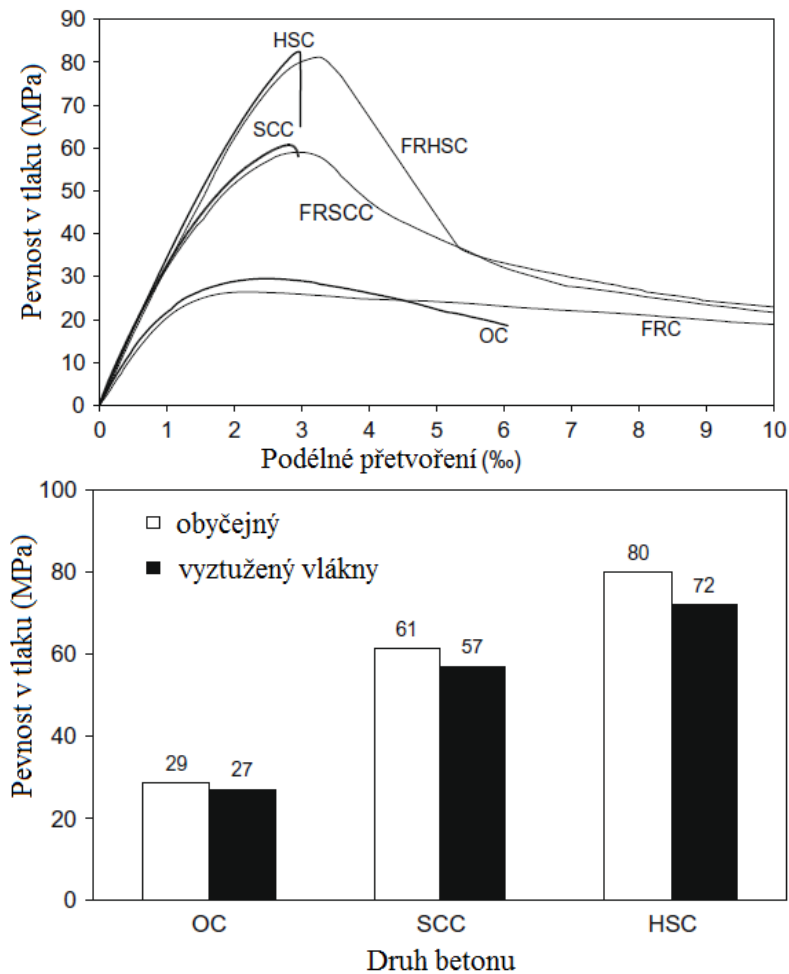
Obrázek 4: Spojení vlákna a matrice v mikroměřítku [3].

Portlandit neboli hydroxid vápenatý tvoří 20–25 % objemu pevné fáze zhydratované cementové pasty. Vytváří velké hexagonální krystaly. Díky portlanditu má beton nepříznivý vliv na chemickou reakci v kyselém prostředí [9]. Cementová pasta neboli hydrát vzniká ze slínku, který vzniká a reaguje po ošetření vodou [10].

2.1.3 Jak působí vlákna v betonu

Pokud jsou vlákna přítomna v betonu, snižuje se tím jeho tlaková pevnost. V jednom díle z použité literatury od BOULEKBACHE a kol. [11] bylo zjištěno snížení pevnosti v průměru o 7 % u běžného vláknobetonu, o 6 % u vláknobetonu samozhutnitelného a u vysokopevnostního betonu bylo naměřeno snížení až o 10 % (viz Obr. 5). Vlákna orientovaná u SCC³ vedla ke větší stejnorodosti a k menším chybám v matrici, což zaznamená lepší výsledky. Při namáhání betonu tahem se vlákna ukázala jako přínos, kdy zabraňovala vzniku a zvyšování počtu trhlin [11].

³ SCC – samozhutnitelný beton, z anglického: Self-Compacting Concrete



Obrázek 5: Vliv použití vláken na pevnost v tlaku pro betony: HSC⁴, FRHSC⁵, SCC, FRSCC⁶, FRC, OC⁷ [11].

U zatěžovací zkoušky pro pevnost v tahu ohybem mezi vznikem počáteční trhliny a dosažení mezního zatížení se vytvoří mnoho trhlín, které zachytí vlákna. U betonů jako jsou FRC a FRSCC, jenž mají nízké kluzové napětí, nevznikají trhliny v jedné linii, ale jen v určitých oblastech, protože jsou vlákna lépe uspořádána.

To bývá známkou toho, že působící napětí se přenáší do další skupiny prvků místo toho, aby se umístilo tam, kde bylo prvně porušeno. Vzniká to díky aktivaci přenášejícího podélného zatížení, které můžeme vidět i u standardního železobetonu. Na druhou stranu, pokud chceme zmínit beton, u kterého jsou všechny vytvořené deformace umístěny v jedné trhlíně, musíme vzít FRHSC (vysokopevnostní beton

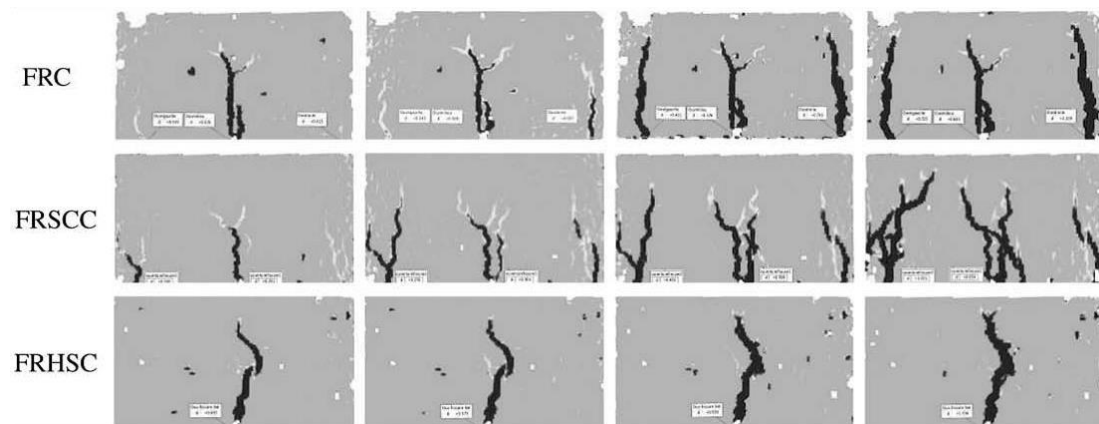
⁴ HSC – Vysokopevnostní beton, z anglického: High Strength Concrete.

⁵ FRHSC – Vysokopevnostní beton vyztužený vlákny, z anglického: Fibre-Reinforced High Strength Concrete.

⁶ FRSCC – Samozhutnitelný beton vyztužený vlákny, z anglického: Fibre-Reinforced Self Compacting Concrete.

⁷ OC – Běžný beton, z anglického: Ordinary Concrete

vyztužený vlákny), jenž má vyšší kluzové napětí. Vlákna zde nemohou přenášet podélné zatížení, protože nejsou dostatečně propojena a orientována mezi sebou [11].



Obrázek 6: Jak se rozvíjí trhliny při zatížení u FRC, FRSCC a FRHSC [11].

2.2 Vliv různého zastoupení objemu vláken

V dnešní době je potřeba, aby beton a budovy z něj postavené odolávaly různým okolním vlivům, mezi které patří výbuchy a střely, ať už náhodné nebo mířené. Během působení těchto vlivů vzniká velké rázové zatížení, značně vysoká deformační rychlost a zároveň je velké množství energie přeneseno do těchto betonových konstrukcí. Při návrhu takových konstrukcí je důležité správně zvolit materiál a podrobit ho testům. Beton je velice citlivý na deformaci pod tlakem, napětím a ohybem [12].

2.2.1 Procentuální obsah v cementovém kompozitu

V práci Soufeiani a kol. [12] bylo prováděno několik testů na betonu vyztuženém vlákny: SFRC⁸, HSFRC⁹, CRC¹⁰, UHPFRC a HFRC¹¹

- ❖ **SFRC:** Kdy je tisíce malých ocelových vláken rozprostřeno náhodně do betonu, aby zlepšila jeho mechanické vlastnosti. Podíl objemu vláken použitý v SFRC by měl být 0,5 – 1,5 %, jelikož po přidání vláken se snižuje

⁸ SFRC – Beton vyztužený ocelovými vlákny, z anglického: Steel Fiber Reinforced Concrete.

⁹ HSFRC – Vysokopevnostní beton vyztužený ocelovými vlákny, z anglického: High-Strength Steel Fiber Reinforced Concrete.

¹⁰ CRC – Kompaktně vyztužený kompozit, z anglického: Compact Reinforced Composite.

¹¹ HFRC – Smíšený beton vyztužený vlákny, z anglického: Hybrid Fiber Reinforced Concrete.

zpracovatelnost betonové směsi a může způsobit jejich nabalování a vznik tzv. shluků, které je pak obtížné od sebe oddělit pomocí vibrační plošiny. Lze tomu předejít při správné technice sypaní vláken.

- ❖ **HSFRC**: HSC je standardně definován jako beton s tlakovou pevností 40 MPa [13]. Patří mezi křehké materiály, avšak jeho křehkost můžeme snížit náhodným vložením krátkých jednotlivých vláken do objemového podílu 2 % nebo vyšší. Přidáním vláken se zlepší odolnost proti nárazu a zlomení. Tím vznikne z HSC lepší HSFRC.
- ❖ **CRC** patří mezi speciální druhy vysoce pevnostního betonu vyztuženého vláknou s pevností 150–400 MPa a vysokým podílem objemu ocelových vláken 5–10 %. CRC matrice je extrémně tvárná z důvodu velkého obsahu ocelových vláken. Důsledkem této funkce nedochází vytváření velkých trhlin za provozních podmínek.
- ❖ **UHPFRC** patří mezi nové třídy materiálů, která je kombinací velmi silné a husté cementové matrice s velkým obsahem vláken. UHPFC jehož vysoká pevnost v tlaku (v řádu 200 MPa) a poměrně velká pevnost v tahu (řádově 10 MPa) zajišťuje, že vytvořené trhliny zůstávají relativně malé a tím má získaný beton lepší materiálovou tažnost ve srovnání s betonem běžných pevností. Tento typ betonu se plní vláknou v objemovém množství větším než 1,5 %, tím poskytne lepší pevnost v tlaku i v tahu. UHPFRC je jeden z materiálů, který dokáže výrazně vylepšit odolnost panelů proti nárazu při zachování standardní tloušťky stěn.
- ❖ **HFRC** je definován jako beton s kombinací různých typů vláken. Dva nebo více typů vláken různých tvarů a velikostí, které jsou vyrobené z různých materiálů. Jsou kombinovány, aby mohl materiál využít těch nejlepších vlastností každého vlákna.

2.2.2 Vliv různého obsahu vláken na mechanické vlastnosti

Po přidání ocelových vláken se podstatně sníží křehkost betonu a odolnost vůči některým jeho slabinám, jimiž jsou tahová pevnost a odolnost. Již v minulosti, v některých studiích [12] bylo provedeno několik testů mechanických vlastností betonu SFRC na statické a dynamické zatížení. Tyto studie poukázaly, že pokud budou ocelová vlákna nahodile rozptýlena do betonové směsi, dojde ke zlepšení tahových

a ohybových vlastností. FRC můžeme rozdělit do tří kategorií na základě obsahu vláken:

- ❖ **Nízký obsah vláken (<1 %)** použití při plastickém smrštění, regulují trhliny s minimálním zvýšení síly.
- ❖ **Střední obsah vláken (1–2 %)** používá se jako doplnění hlavní ocelové výztuže, dobrá zpracovatelnost při lití na místě.
- ❖ **Vysoký obsah vláken (> 2 %)** může poskytnout výjimečné mechanické vlastnosti jako lepší odolnost proti zlomení, lepší tahovou a tlakovou pevnost.

Výzkumy provedeny v minulosti zjistily [8], že betonová směs, do které byl přidán větší objem ocelových vláken, lépe absorbuje energii, má lepší pevnost v tlaku, lomovou pevnost a má větší odolnost proti střelám. Mimo to také houževnatost, tahovou a tlakovou pevnost, nosnost a schopnost absorpce energie. Zvětšuje se větším objemovým podílem ocelových vláken až o 1,5 %, zatímco množství a vzdálenost trhlin se sníží pod hodnotu pevnosti při statickém zatížení. Kromě toho ocelová vlákna v objemovém zastoupení od 1,5 % brání průstřelu. Po přidání ocelových vláken v objemu od 1 % do 3 % v SFRC se zlepšily jeho vlastnosti na extrémní zatížení. Při zvýšení objemu vláken v HSFRC o 0,5 % až 2 % podílu se zlepšily odolnost proti nárazu, pevnost v tahu a modul prasknutí. Použitím 4–10 % vláken v SFRHPC¹² se zdokonalily mechanické vlastnosti.

Pokud je brán v potaz tvar ocelových vláken při zkoumání nárazu, vykazují vlákna se zahnutým a zvlněným koncem lepší účinnost než jiné druhy ocelových vláken. Ocelová vlákna se zahnutým koncem v SFRC snižují šířku trhliny, šířku rozteče a mechanické poškození při nízkých rychlostech střely. Deskám se zvýšila jejich pevnost a odolnost. U vzorků z FRC se zvlněnými a na konci zahnutými vlákny je podobná tahová a tlaková pevnost pod statickým a dynamickým zatížením. FRC s vlákny ve zvlněném tvaru mají lepší účinek než vlákna s koncem zahnutým. Rozdíl je především v houževnatosti, tažnosti, regulaci trhlin a citlivosti na rychlost deformace z důvodu tvaru 3D zakroucených vláken, což má za důsledek posílení vazby mezi vlákny a maticí. Proto jsou SFRC se zvlněnými vlákny tou správnou

¹² SFRHPC – Vysocevýkonný beton vyztužený ocelovými vlákny, z anglického Steel-Fiber Reinforced High-Performance Concrete.

volbou pro odolnost proti průstřelu, konečné pevnosti v tlaku a schopnosti lépe absorbovat energii v porovnání s dalšími druhy ocelových vláken [12].

3 Experimentální část I. – příprava a výroba vzorků

V experimentální části jsem si stanovil za cíl vytvořit desky a ověřit, jestli různé zastoupení ocelových vláken v cementovém kompozitu má vliv na odolnost vůči extrémnímu zatížení, které bylo vyvoláno projektilem ze střelné zbraně. Vzorky byly vyhodnocovány a porovnávány na základě na lokální poškození. Jednotlivé vzorky byly porovnávány. Jelikož ocelová vlákna, která byla použita, mají velký přínos na mechanické vlastnosti, bylo zapotřebí je také ověřit v tlakové a ohybové zkoušce.

Pro uskutečnění experimentu bylo zapotřebí vytvořit několik sad vzorků desek s různým zastoupení obsahu vláken po třech kusech a na každou směs vytvořit sadu tří trámků. Všechny sady byly vytvořeny ve vodorovném směru a byla použita normou daná ocelová bednění rozměru 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm (viz *Obr. 7*). Menší vzorky byly vytvořeny do ocelových forem o rozměru 40 x 40 x 160 mm.

Vyrobeno bylo celkem 15 desek o rozměru 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm a 15 trámků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Všechny vzorky byly ze směsi UHPFRC, kdy návrh uvedené směsi byl převzat z užitého vzoru od původců doc. Ing Karla Koláře, CSc., Ing. Arch. Zdeňky Bažantové CSc. a prof. Ing Petra Konvalinky, CSc. [14].



Obrázek 7: Bednící forma na desky.

3.1 Popis použitých pomůcek

Ke správné výrobě požadované směsi bylo zapotřebí nejen správně zvolit vybavení, ale také zajistit bezpečnost práce. Abychom předcházeli případným zraněním a újmám na zdraví, bylo nutné se vybavit ochrannými brýlemi, respirátorem a pracovními rukavicemi. Jelikož se při výrobě dostalo naše tělo do kontaktu jak s prachovými částicemi, které jsou uvolňovány z cementových pytlů, tak i při manipulaci s ocelovými vlákny.

Na výrobu byly použity např. tyto pomůcky: zednická špachtle, zednická lžice, talířová míchačka M80 o objemu 40 litrů (viz Obr. 8), vibrační plošina ke správnému zhutnění, kýble o objemu x litrů na rozdělení složek, dva rozprašovače s vodou a olejem, štětec na vymazání bednění a samotné bednění (na každou směs tři formy).



Obrázek 8: Talířová míchačka o objemu 40 l.

3.1.1 Prefabrikovaná směs pro přípravu UHPFRC

V tomto výzkumu byla použita směs pro výrobu betonu s náhodně rozptýlenou výztuží a to UHPFRC. Všechny používané směsi byly vyvíjeny a používány Experimentálním centrem ČVUT v Praze.

Složení směsi UHPFRC [14] (*Tabulka 1*) bylo následovné: Portlandský cement CEM I 42,5R, křemičitý úlet tzv. mikrosilika, jemný křemičitý písek ve frakcích 0,1 – 0,6 mm a 0,3 – 0,8 mm, mletá křemičitá moučka, superplastifikátory a voda. V našem případě byl vodní součinitel stanoven na hodnotu 0,30. Jelikož je vodní součinitel takto malý, nemusí docházet ke 100 % hydrataci pojiva, a tak nezhydratované pojivo zastupuje funkci plniva. Jako rozprostřená výztuž byla použita vysokopevnostní mikrovlákná (viz *Obr. 9*) z ocele o velikosti délky $L_f = 12$ mm a velikosti průměru $d = 0,13$ mm. Vlákná byla rovného tvaru s tahovou pevností 2400 MPa. Mikrovlákná byla do směsi dávkována objemově. V této práci, při zaměření na vliv různého zastoupení vláken, se do směsi dávkovala vlákna v 2 %, 3 %, 3,6 %, 4 % a 4,7 %. Symbolem Δ je v tabulce znázorněno procentuální zastoupení ocelových mikrovláken v objemu směsi.



Obrázek 9: Vysokopevnostní mikrovlákná z ocele použítá ve směsi UHPFRC.

Tabulka 1: Směs UHPFRC vyjádřená hmotnostním poměrem [14].

Složka	UHPFRC $\Delta 1,5$	$\Delta 2$	$\Delta 3$	$\Delta 4$	$\Delta 5$
Cement CEM I 42,5R	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Voda	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Mikrosilika	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Křemičitá moučka	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Křemičitý písek 0,1-1,2	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60
Plastifikátor	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Odpevňovač	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Vlákna 13/0,15*	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50

*Množství mikrovláken je v objemových procentech

3.1.2 Výroba vzorků ze směsi UHPFRC

Výroba probíhala v talířové míchačce M80 o objemu 40 litrů, která byla ideální pro vytvoření sady tří desek. Jako první bylo potřeba navážit jednotlivé složky na předem zkalibrované laboratorní váze (viz Obr. 10). Každá sada tří desek měla jiný obsah ocelových vláken, a proto bylo potřeba správně připravit všechny složky. Nejprve se používaná míchačka vystříkala vodou pomocí rozprašovače. Pak se do ní nasypala všechna navážená suchá směs a byla zpuštěna. Směs bylo zapotřebí nechat v míchačce pár minut promíchat. Poté se přilávala část vody a zbytek byl ponechán pro případné vylepšení směsi. V této fázi se nechala míchačka 5–7 minut míchat. V poslední fázi, po ideálním promíchání vody a suché směsi, byla postupně přidávána ocelová vlákna, a to formou lehkého vsypávání, aby byla rozprostřena v celé směsi. Na závěr se nechala míchačka běžet dalších 5 min a přilil se zbytek vody.



Obrázek 10: Laboratorní váha.

„Získaná směs se záměsovou vodou vykazovala v prvních fázích zpracování samozhutnitelnou konzistencí. Doba zpracovatelnosti byla závislá na poměru pojivové složky s různým obsahem síranu vápenatého a dávce plastifikační přísady v rozmezí několika minut až několika hodin.“ [14] Následně byla postupně vkládána do připravených kýblů a vlévána do připravených forem pomocí zednické lžice a špachtle, které byly před výrobou směsi smontovány z ocelových „L“ profilů, jež byly přišroubovány na dřevěné desky a opatřeny odformovacími prostředky pomocí rozprašovače a štětce. Tím se zajistilo lepší a pohodlnější odbednění. Následně byla směs ve formách zhutněna pomocí vibrační plošiny po dobu dvaceti vteřin. Směs byla ve formách uložena a řádně zakryta fólií a druhý den odbedněna. Dalších 28 dní byly vzorky uloženy ve vodě.

3.2 Výroba vzorků s různým zastoupením vláken

V této experimentální části bylo naplánováno vytvořit desky o hodnotě objemu vláken 2 %, 3 %, 4 % a 5 %. Z důvodu několika okolních vlivů bylo zapotřebí několik složek pozměnit. Při výrobě vzorků o hodnotě 2 % a 3 % nedošlo k žádným komplikacím a vytvoření desek probíhalo podle naplánovaného míchání směsi, kdy byla betonová směs zalita do bednění pomocí zednické špachtle a zarovnána do hran

zednickou lžící. Následně byla po dobu dvaceti vteřin řádně zavibrována. Po vibraci byla buď zbytkem směsi dolita, při případném lehkém sednutí, eventuálně rovnou zakryta fólií, ponechána do druhého dne a následně odbedněna. Zbytek směsi byl vlit do připravených menších ocelových forem o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které byly řádně opatřeny odformovacími prostředky.

Výroba vzorku o hodnotě 4 % měla být vytvořena standartním způsobem, avšak došlo k nečekaným problémům. Míchačka nestíhala promíchávat naměřené množství směsi, zasekávala se z důvodu velkých shluků vláken a betonu (viz *Obr. 11*). Vsypávání ocelových vláken bylo nutné ukončit a tím změnit jeho výsledné procento. Jelikož beton začal tuhnout, z důvodu neustálého vypínání míchačky a odstraňování přilepených a nepromíchaných složek ze stěn, bylo třeba přidat malé množství vody, přesněji řečeno 300 ml, čímž se vodní součinitel změnil z původního 0,30 na 0,32 a následně, po krátkém přibližně minutovém míchání, byla finální směs vylita do třech připravených forem o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm. Zbylá směs byla vлита do menší ocelové formy o rozměru 40 x 40 x 160 mm. Následně byly formy řádně vibrovány po dobu dvaceti vteřin, přikryty fólií a ponechány do příštího dne, kdy byly odbedněny. Finální procento ocelových vláken bylo stanoveno pozdějším výpočtem, po zvážení zbylých ocelových vláken, a to na 3,6 %. Vzhledem k tomu, že bylo v plánu i větší procento vláken, musela být míchačka druhý den řádně vyčištěna a zatvrdlé kusy odsekány pomocí dláta a kladiva.



Obrázek 11: *Odstraňování vytvořených shluků vláken a betonové směsi.*

Odstranění přebytečných kusů zatvrdlého betonu umožnilo výrobu betonové směsi o procentuálním obsahu vláken 4 %. Výroba betonové směsi z předem navážených částí se uskutečnila podle plánu. Nedocházelo k vytváření shluků vláken a betonové směsi jako v předchozím míchání. Po dokončení námi požadované konzistence došlo opět k vylití betonové směsi do předem připravených forem o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm, zavibrování po dobu dvaceti vteřin a řádnému zakrytí fólií. Zbytek směsi byl vlit do připravené menší ocelové formy o rozměru 40 x 40 x 160 mm a řádně zavibrován po dobu dvaceti vteřin a zakryt fólií. Druhý den byly vytvořené desky a trámký odbedněny.

Poslední naplánovanou výrobou betonových desek, byly desky s 5 % zastoupením vláken v cementovém kompozitu. Jelikož předchozí míchání dopadlo dobře, očekávali jsme, že příprava následující směsi s větším zastoupením vláken bude probíhat dle našich představ. Části směsi byly opět řádně navázeny a rozděleny do připravených kýblů. Výroba z požadovaných částí směsi probíhala podle výše zmíněného postupu, nicméně při vsypávání ocelových vláken opět docházelo k vytváření větších shluků vláken s betonovou směsí. Míchačka se zasekávala a bylo nutné ji opakovaně čistit a odstraňovat přilepené a nepromíchané složky ze stěn. Z tohoto důvodu musel být přísun ocelových vláken ukončen. Z důvodu tuhnutí směsi bylo nutné přilít trochu vody, aby měla směs potřebnou konzistenci. Stanovený objem vody byl 150 ml, čímž se změnil vodní součinitel z původní hodnoty 0,3 na 0,31. I tak byla směs velmi tuhá a obtížně se vlívala do připravených forem na desky o rozměru 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm a trámký o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Důkladného zhutnění jsme dosáhli pomocí zednické lžice. Formy naplněné betonovou směsí byly řádně zavibrovány po dobu dvaceti vteřin, zakryty fólií a ponechány do druhého dne, kdy byly odbedněny.



Obrázek 12: *Betonová směs se 4,7 % zastoupením ocelových vláken, po vlití do formy.*



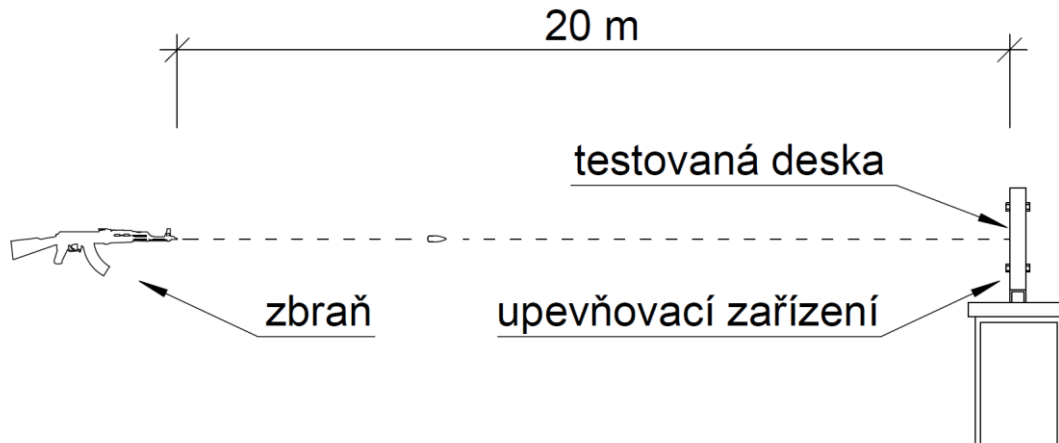
Obrázek 13: *Betonová směs se 4,7 % zastoupením ocelových vláken po zhuštění a zavibrování.*

4 Experimentální část II. – posouzení vzorků na extrémní zatížení

V této části experimentálního výzkumu jsme se zaměřili na posuzování lokálního poškození vytvořených desek obdélníkového tvaru o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm na extrémní zatížení způsobené projektilem vystřeleným ze střelné zbraně. Zkouška probíhala na předem smluvené střelnici fakultou ČVUT. Výzkum si kladl za cíl ověřit využití cementových kompozitů s různým zastoupením ocelových vláken v bezpečnostním inženýrství.

4.1 Popis zkoušky

Desky obdélníkového tvaru byly usazeny do speciální ocelové konstrukce, jež byla na tyto zkoušky vyrobena. Zkoumaný vzorek byl pomocí ocelových šroubů upevněn bodově ve svých rozích. Vzdálenost střelné zbraně od zkoumaného vzorku, která byla změřena pomocí homologovaného metru, byla 20 metrů. (viz Obr. 14)



Obrázek 14: Testovací sestava.

Cílem zkoušky bylo stanovit třídu balistické odolnosti nebo mez balistické odolnosti na vzorku zkoušeného materiálu [15]. Střelnou zbraň (viz Obr. 15) jsme umístili do nástavce do horizontální polohy, přičemž úhel dopadu střely musel být kolmý k ploše zkoušeného vzorku. Každý zkoumaný vzorek byl nejprve zasažen na střed a v případě dobrého výsledku se zvýšila ráže projektilu a střela se opakovala

do jednoho z rohů zkoumaného vzorku. Následně se vizuálně zkoumal průnik. Druhy průniku lze rozdělit a popsat dle normy [15] takto:

- ❖ **Úplný průnik:** stav, kdy střela, střepina nebo úlomek zkoušeného vzorku prorazí kontrolní desku definovaným způsobem
- ❖ **Částečný průnik:** stav, kdy střela, střepina nebo úlomek zkoušeného vzorku neprorazí kontrolní desku, ale poruší zadní stěnu vzorku
- ❖ **Neprůnik:** stav, kdy střela, střepina nebo úlomek zkoušeného vzorku neprorazí kontrolní desku, ani neporuší zadní stěnu vzorku



Obrázek 15: Umístění zbraně v horizontální poloze do nástavce.

4.1.1 Nutné vybavení na střelnici

Z bezpečnostních důvodů, aby nedocházelo ke zranění zraku, sluchu a fyzickému poškození, je zapotřebí být na střelnici řádně vybaven. Mezi hlavní výbavu střelce a ostatních přihlížejících, kteří se na experimentu podíleli, patří: ochranná střelecká sluchátka s normovaným útlumem 27 dB (viz *Obr. 16*) [16], ochranné střelecké brýle a správně zvolené oblečení a obuv. Jelikož při střele do zkoumaného vzorku může docházet k odrazu střely, úlomku nebo pláště projektilu.



Obrázek 16: *nahore: ochranná střelecká sluchátka B-15 [16]; dole: ochranné střelecké brýle.*

4.1.2 Testovací prostředky (zbraně a střely)

Pro posouzení vytvořených vzorků ve formě desek bylo použito několik zbraní, jenž jsme měli k dispozici. Kalibr, který může být použit na zařazení do třídy balistické odolnosti na zkoušení těchto vzorků, je udáván normou [15] českých standardů. Třída 1 značí nejnižší odolnost proti střelám, pokud je něco menší než třída 1, nemůže to být bráno jako materiál odolný proti střelám. Největší odolnost značí třída 7 CZ, což je vidět v následující *Tab. 2* [15].

Tabulka 2: Český standart střelných zbraní [15].

Zatřídění	Druh zbraně	Kalibr	Střela		Testovací podmínky
			Druh	Váha[g]	Rychlost střely [m/s]
1	Malorážka	.22LR 5,58mm	Pb / O	2,6 ± 0,1	300 ± 10
2	Pistole	9 mm Luger	CP / Pbj / O	8,0 ± 0,1	400 ± 10
2 CZ	Pistole	7,62 x 25	CP / Pbj / O	5,5 ± 0,1	470 ± 10
3	Pistole	.357 Magnum	CP / Pbj / KK	10,2 ± 0,1	430 ± 10
3 CZ	Pistole	9 mm Luger	CP / Fej / O	6,45 ± 0,1	440 ± 10
4	Pistole	.44 Magnum	CP / Pbj / KK	15,6 ± 0,1	550 ± 10
4 CZ		7,62 x 25	CP / Fej / O	5,5 ± 0,1	820 ± 10
5		.223 Rem.	CP / Pbj	4 ± 0,1	920 ± 10
5 CZ		7,62 x 39	CP / Fej	8 ± 0,1	710 ± 10
6	Puška	7,62 x 51	CP / Pbj	9,5 ± 0,1	830 ± 10
6 CZ	Puška	.223 Rem.	CP / Fej	3,95 ± 0,1	950 ± 10
7	Puška	7,62 x 51	CP / Fej	9,8 ± 0,1	820 ± 10
7 CZ	Puška	7,62 x 54 R	CP / Fej	9,75 ± 0,1	860 ± 10

Zkratky:

CP – celoplášť

Fej – ocelové jádro

Pbj – olovené jádro

O – ogivál

KK – komolý kužel

Mezi další normu, která byla použita v tomto výzkumu, řádíme normu EN 1522 [17]. Její klasifikace podle evropské anglicky psané normy zní: Třídy FB1 až FB7 se seřazují vzestupně podle odolnosti vůči perforaci (viz *Tab. 3*). Třída FB1 představuje nejnižší odolnost proti střelám a třída FB7 tu nejvyšší, např.: FB4 včetně FB3, FB2, FB1 a v případě potřeby zkušební ústav provede další zkoušky v nižších třídách, aby potvrdil tuto skutečnost. Zkušební vzorky, které nesplňují třídu FB1, nelze značit jako odolné proti střelám. Výsledky zkoušek se kvalifikují přidáním přípony "S" nebo "NS" podle přítomnosti nebo nepřítomnosti střepin [17].

Tabulka 3: *Evropská norma EN - 1522 [17].*

Zatřídění	Druh	Kalibr	Střela		Testovací podmínky		
			Druh	Váha[g]	Vzdálenost [m]	Rychlost střely [m/s]	Dopadová energie
FB1	Malorážka	.22LR 5,58mm	LB/RN	2,6 ± 0,1	10 ± 0,5	360 ± 10	170 J
FB2	Pistole	9 mm Luger	FJ(1) / RN / SC	8 ± 0,1	5,00 ± 0,5	400 ± 10	640 J
FB3	Pistole	.357 Magnum	FJ(1) / CB / SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940 J
FB4	Pistole	.357 Magnum	FJ(1) / CB / SC	10,2 ± 0,1	5,00 ± 0,5	430 ± 10	940 J
		.44 Rem. Mag.	FJ(2) / FN / SC	15,6 ± 0,1	5,00 ± 0,5	440 ± 10	1510 J
FB5	Puška	5,56 x 45	FJ(2) / PB / SCP1	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	1800 J
FB6	Puška	5,56 x 45	FJ(2) / PB / SC	4,0 ± 0,1	10,00 ± 0,5	950 ± 10	1800 J
		7,62 x 51	FJ(1) / PB / SC	9,5 ± 0,1	10,00 ± 0,5	830 ± 10	3270 J
FB7	Puška	7,62 x 51	FJ(2) / PB / HC1	9,8 ± 0,1	10,00 ± 0,5	820 ± 10	3280 J

Zkratky:

LB – Lead Bullet = Olověná střela

FJ/FMJ – Full Metal Jacket = Celokovový plášť souhrnné označení (Slitina mědi a niklu, oceli a vzácně zlatem)

FJ(1) – Full steel jacket = Celokovový plášť ocelový

FJ(2) – Full copper alloy jacket = Celokovový plášť slitiny mědi

FN – Flat Nose = Plochá špička

RN – Round nose = Ogivální špičatá střela

CB – Cone Bullet = Kuželovitá špička střely

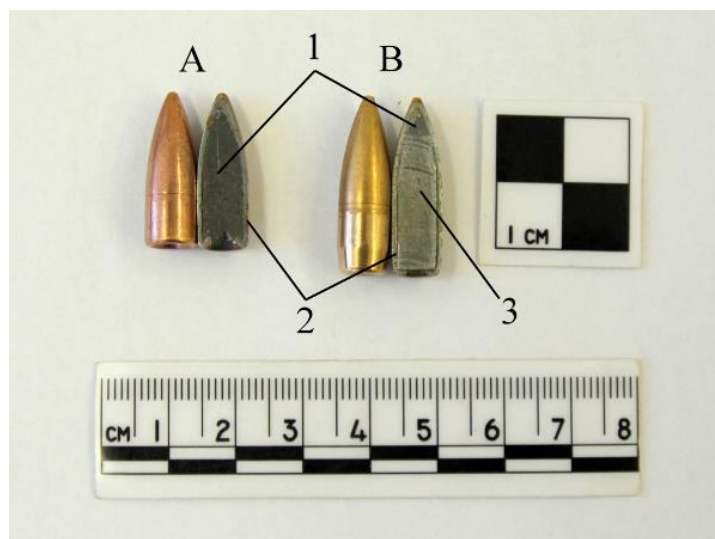
PB – Pointed Bullet = Špička střely do špičata

SC – Soft Core (lead)

SCP1 – Soft core (lead) & Steel Penetrator (type SS109)

HC1 – Steel hard core (váha $3,7 \pm 0,1$ g)

V tomto experimentu byly použity projektily několika typů 7,62 x 39 FMJ ve dvou variantách. První s deformovatelným projektilem, který je v práci označován jako měkké olověné jádro. Druhý s nedeformovatelným projektilem s ocelovým jádrem (viz *Obr. 17*). Jako další byl projektil s označením 5,56 x 45 FMJ také ve dvou variantách. V práci jsou označovány jako tvrdé s ocelovým jádrem a měkké s olověným jádrem. V experimentu a testování byly použity na desky o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm a o obsahu vláken 4,7 % silnější střely, přesněji řečeno 7,62 x 51 FMJ měkká s olověným jádrem a 7,62 x 54R FMJ tvrdá s ocelovým jádrem.



Obrázek 17: 7,62 x 39 FMJ popis: A – deformovatelný projektil, B – nedeformovatelný projektil, 1 - olovo, 2 - ocelový plášť, 3 - ocelové jádro [18].

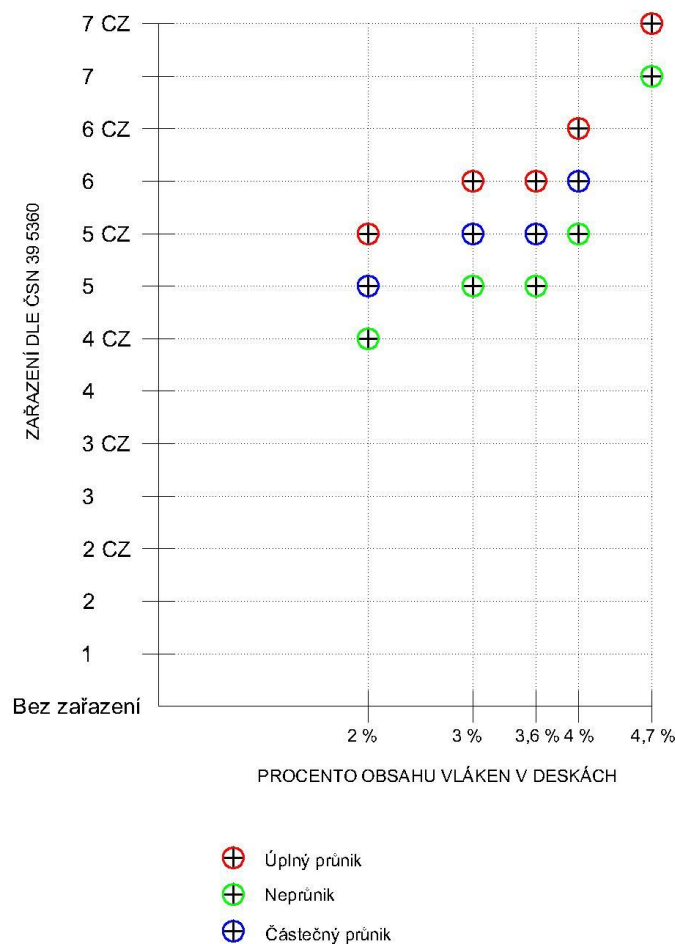
5 Výsledky

K získání výsledků z vytvořených desek o rozměrech 300 x 400 a tloušťce 50 mm ze směsi UHPFRC [14], které byly podrobovány extrémnímu zatížení vyvolanému projektilem vystřeleným ze střelné zbraně, bylo zapotřebí posoudit vizuálně na průnik. K tomu sloužilo zařazení do tříd z normy [17] z předchozí kapitoly, kdy je na vytvořeném grafu znázorněno, jaké procentuální zastoupení ocelových vláken je nejvíce odolné vůči střelám.

Jako další část výzkumu bylo zapotřebí provést tlakovou a ohybovou zkoušku na vytvořených menších vzorcích ze směsi UHPFRC o rozměrech 40 x 40 x 160 mm v experimentálním centru ČVUT, kde jsou k tomuto příslušné stroje.

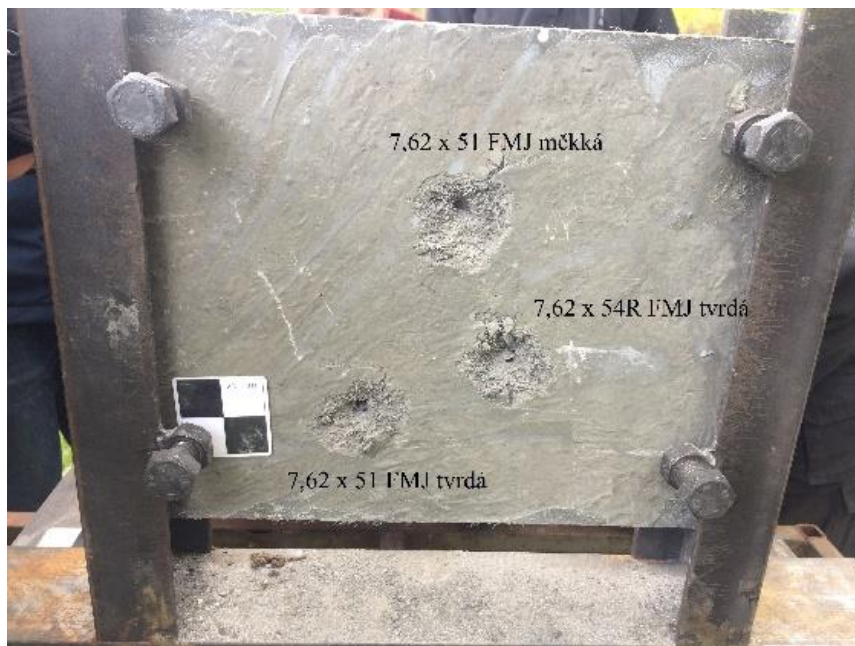
5.1 Vyhodnocení zkoumaných vzorků

Desky o rozměrech 300 x 400 o tloušťce 50 mm, které byly vytvořeny ze směsi UHPFRC po extrémním zatížení vyvolaném projektilem ze střelné zbraně. K dispozici bylo 15 desek s obsahem vláken 2 %, 3 %, 3,6 %, 4 % a 4,7 %, každá po třech kusech. Jako základní střelu jsme použili 7,62 x 39 FMJ s deformovatelným projektilem označovaným v této práci jako tvrdé ocelové jádro. V české normě [15] patří do zatřídění 5 CZ, v evropské normě [17] do zatřídění FB - 5. Z této střely se vycházelo a podle ní se pak volily projektily buď s menší nebo větší dopadovou energií. Záleželo na obsahu ocelových vláken v betonových deskách. Pro znázornění výsledků a zařazení do skupin podle české normy [15] byl použit tento graf (viz *Obr. 18*). Úplný průnik je značen červeným kolečkem, neprůnik zeleným a částečný průnik modrým.



Obrázek 18: Vyhodnocení průstřelu dle ČSN 39 5360.

Z výsledků je patrné, že nejlepší odolnost vůči extrémnímu zatížení způsobeném projektilem vystřeleným ze střelné zbraně do betonových desek o rozměrech 300 x 400 mm a tloušťce 50 mm s různým zastoupením ocelových vláken má deska, která byla vytvořena ze 4,7 % zastoupení. První projektil 7,62 x 51 FMJ měkké olověné jádro byl vystřelen na střed a deska vykazovala výsledek označovaný podle ČSN 39 5360 jako „neprůnik“. Došlo pouze k lehkému odštípnutí betonu s ocelovými vlákny. Jako další, a to druhá, byla použita střela 7,62 x 54 R FMJ tvrdá s ocelovým jádrem. Střela tohoto kalibru byla vyhodnocena dle ČSN 39 5360 jako „úplný průnik“. A poslední třetí střelou do této desky byla střela s kalibrem 7,62 x 51 FMJ tvrdá s ocelovým jádrem a byla vyhodnocena jako „částečný průnik“.

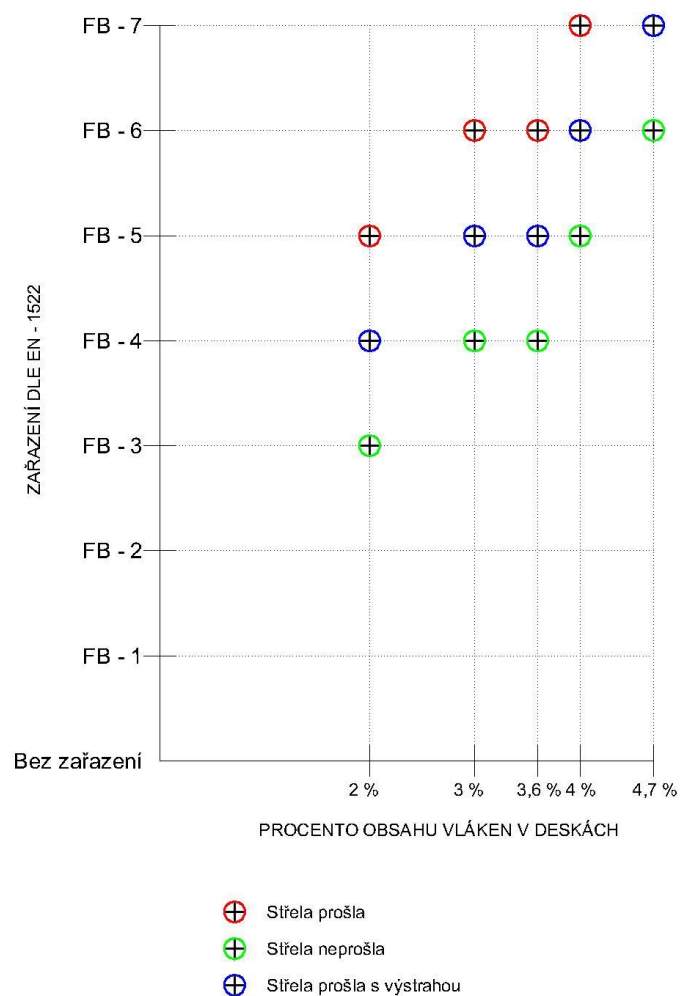


Obrázek 19: Přední strana testované desky s obsahem 4,7 % ocelových vláken.

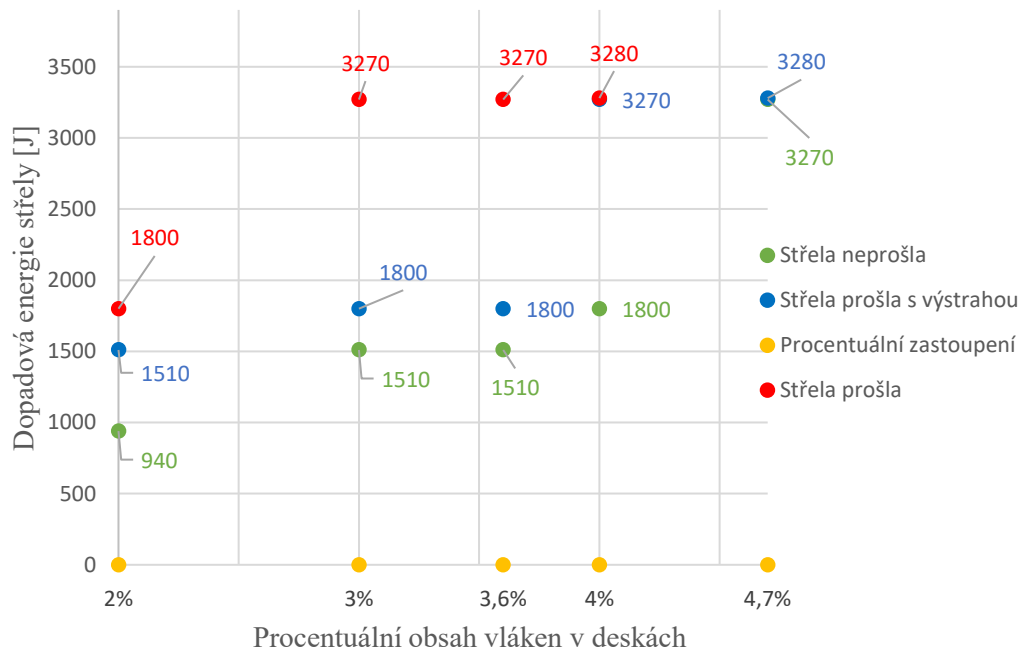


Obrázek 20: Zadní strana testované desky s obsahem vláken 4,7 % ocelových vláken.

Dalším tříděním dle evropské normy [17] bylo použito hodnocení výsledků dle jejich tříd (Obrázek 21) a podle dopadové energie (viz Obr. 22). Z výsledků je patrné, že ocelová vlákna zastoupená v betonových deskách mají vliv na jejich odolnost vůči extrémnímu zatížení. Pokud střela prošla je to v grafu níže označeno červeným kolečkem, pokud střela neprošla znázorňuje to zelené kolečko a modré kolečko značí střelu prošlou s výstrahou.



Obrázek 21: Vyhodnocení průstřelu dle normy EN – 1522.



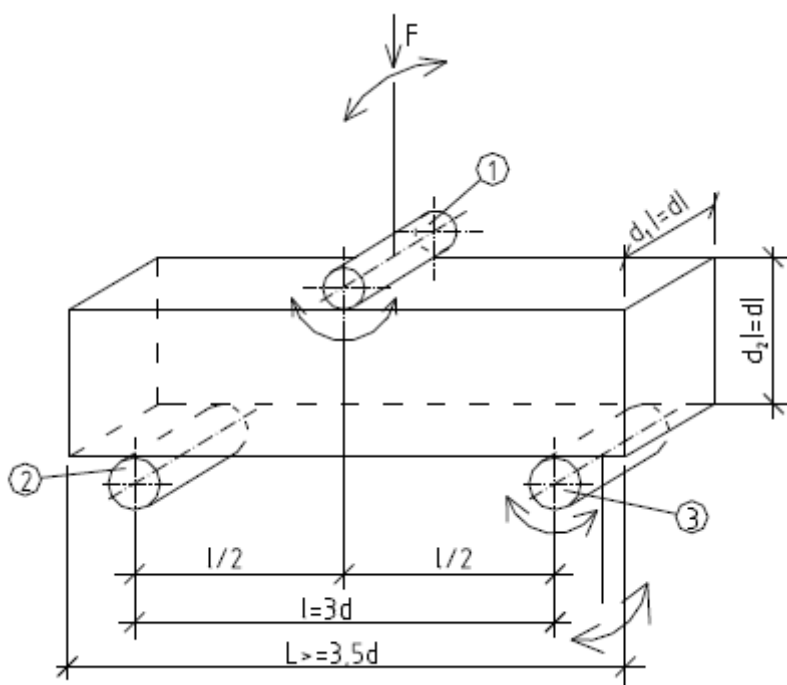
Obrázek 22: Vyhodnocení průstřelu dle dopadové energie střely [J].

„Při prostřelení pevných cílů, obzvláště tenkých vrstev, často dochází k zajímavým jevům. Při předpokladu, že se střela s mezní dopadovou energií E_{mez} při dopadu na desku právě ještě zastaví. Nepatrné zvýšení dopadové energie na E_0 potom vede k průstřelu, kdy u střely za deskou bude zjištěna zbytková energie E_{zbyt} . Energie E_{prost} , vynaložená na prostřelení desky, se potom vypočítá podle rovnice:“ [18]

$$E_{prost} = E_0 - E_{zbyt}$$

5.2 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Mezi nejdůležitější a nejvíce používané zkoušky betonových prvků patří zkoušky na zjištění pevnosti v tahu za ohybu. V dnešní době proto existuje i norma ČSN EN 12390–5: Zkouška ztvrdlého betonu, která je přesně definována zatěžovacím schématem a následným postupem zatěžování. Mezi nejčastější zatěžovací schémata patří čtyřbodové a tříbodové schéma [19]. V této práci jsme využili k vyhodnocování tříbodové zatěžovací schéma (viz *Obr. 23*). Na destrukci se podílí v kombinaci smyku a ohybu.



Obrázek 23: Tříbodové schéma zkoušky [19].

Číslo jedna na *Obr. 23* označuje válečky, které slouží k zatížení vzorku, přičemž je umožněna jejich horizontální a vertikální rotace. Jejich úkolem je vnést do daného vzorku napětí. Číslem dva je označený váleček tzv. podpěrný, jenž podpírá vzorek a má pevnou polohu. Zatímco číslo tři, má umožněnou vertikální a horizontální rotaci a je také podpěrný [19].

Na ohybovou zkoušku byly použity trámky vytvořené z horizontálního bednění o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, avšak z důvodu různého zastoupení vláken v cementovém kompozitu UHPFRC [14] bylo zapotřebí výšku trámku přeměřit a získat tak přesnou hodnotu. Trámky měly jiné zastoupení ocelových vláken v poměru 3 %, 3,6 %, 4 % a 4,7 % a od každého procenta byly vytvořeny 3 vzorky. Trámky byly zatěžovány třibodovým ohybem na zatěžovacím lisu, jenž byl k dispozici na fakultě ČVUT v experimentálním centru (viz *Obr. 24*). Trámky byly zkoušeny ohybem tak, že zatížení vyvolané lisem působilo kolmo na směr hutnění. Vzorek o šířce 160 mm byl zatěžován ve středu rozpětí vzorku. Zkoušení pevnosti v tahu bylo prováděno na jednobodovém lisu, kdy docházelo k úplnému porušení vzorku.



Obrázek 24: vlevo: zatížení trámku třibodovým lisem, vpravo: porušení trámku třibodovým lisem.

Mezi další testování mechanických vlastností patří zkoušení ztvrdlého betonu na pevnost v tlaku. Podstatou zkoušky je zatížení zkušební vzorku až do doby porušení ve zkušebním lisu, který byl propůjčen experimentálním centrem na fakultě ČVUT (viz Obr. 25). Zkoušeným vzorkem byl vhodně zvolen zlomený kus trámku. Vzorky nestandardně porušené předchozí ohybovou zkouškou byly ze zkoušky vyloučeny – předpokládá se u nich nějaká chyba. Příprava a usazení zkušebních těles je popsána v normě ČSN EN 12390 – 3: „Z povrchu tělesa se otře voda před jejich vložením do zkušebního lisu. Otřou se dotykové plochy tlačných desek lisu a odstraní se všechny zbytky písku nebo jiného uvolněného materiálu z povrchu zkoušeného tělesa na plochách, které budou v dotyku s tlačnými deskami. Vzorek se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Vzorek se umístí na střed spodní tlačené desky“ [20]. Dále se pak nastaví konstantní rychlost zatěžování od 0,25 kN/s. Zatížení probíhá plynule bez nárazů a zaznamená se dosažená maximální síla.



Obrázek 25: Zkouška pevnosti v tlaku.

Níže je uveden seznam všech zkoušených trámku, které byly vytvořeny z UHPFRC [14] v ocelových formách o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, při zastoupení vláken 3 %, 3,6 %, 4 % a 4,7 %. Jejich výsledná pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu a objemová hmotnost (viz Tab. 4 a Tab.5).

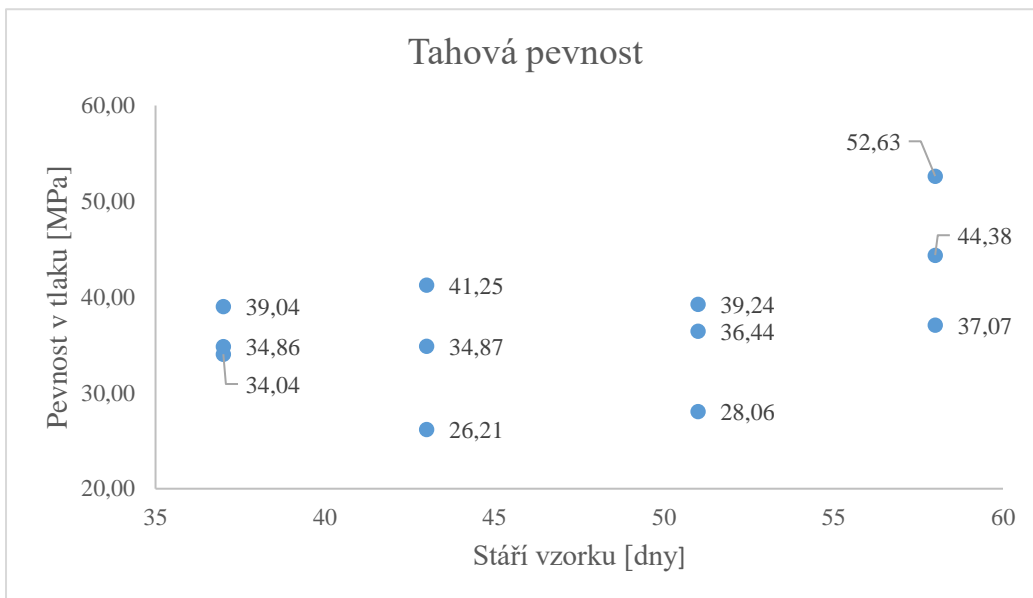
Tabulka 5: Objemová hmotnost zkoušených trámů.

Horizontální bednění	Číslo vzorku	Stáří vzorku [dny]	Výška vzorku [mm]	Hmotnost vzorku [g]	Objemová hmotnost [kg/m ³]
3%	1	58	41,18	634,00	2406
	2		40,98	618,00	2356
	3		40,28	631,00	2448
3,60%	1	51	40,58	639,50	2463
	2		41,68	656,50	2461
	3		40,66	632,00	2429
4,70%	1	43	42,12	694,50	2576
	2		41,48	683,50	2574
	3		41,56	673,50	2532
4%	1	37	41,45	645,50	2433
	2		40,88	639,00	2442
	3		40,97	637,50	2431

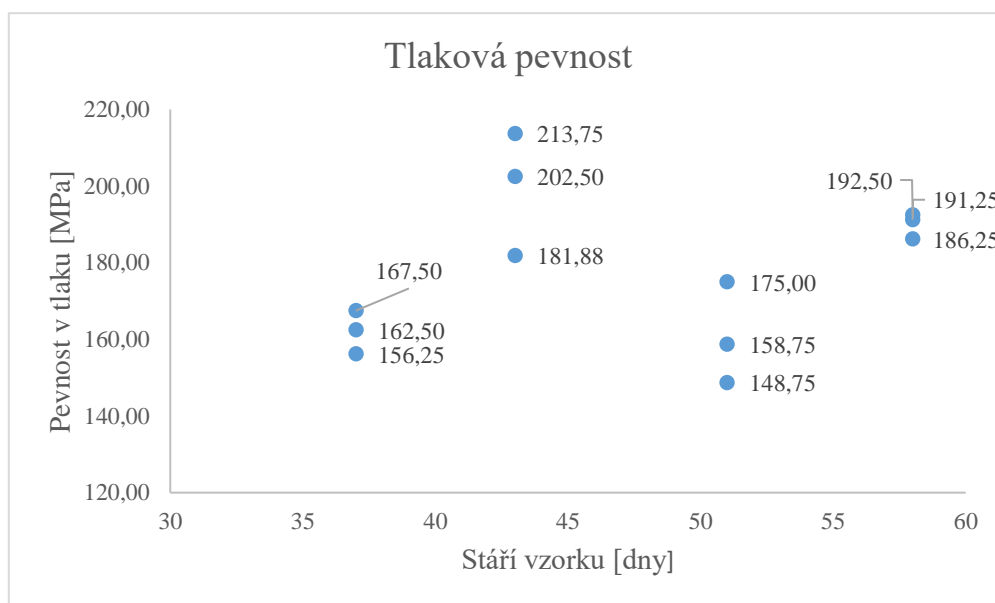
Tabulka 4: Tlaková a tahová pevnost zkoušených trámků.

Horizontální bednění	Číslo vzorku	Stáří vzorku [dny]	Maximální zatížení v tlaku při porušení [kN]	Pevnost v tlaku [MPa]	Maximální zatížení v tahu za ohybu při porušení [kN]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]
3%	1	58	308	192,50	23,80	52,63
	2		298	186,25	16,60	37,07
	3		306	191,25	19,20	44,38
3,60%	1	51	254	158,75	16,00	36,44
	2		280	175,00	13,00	28,06
	3		238	148,75	17,30	39,24
4,70%	1	43	324	202,50	12,40	26,21
	2		342	213,75	16,00	34,87
	3		291	181,88	19,00	41,25
4%	1	37	250	156,25	15,60	34,04
	2		268	167,50	17,40	39,04
	3		260	162,50	15,60	34,86

Průměrná objemová hmotnost byla 2463 kg/m³. Z výsledků změřených trámek je patrné, že každý vzorek má jinou výšku, to bylo způsobené kvalitou vibrování a hutnění směsi. Minimální pevnost v tlaku vykazoval třetí vzorek trámku s obsahem vláken 3,6 % a to 148,75 MPa a nejvyšší hodnotu vykazoval druhý vzorek trámku s obsahem 4,7 % a to 213,75 MPa. Tím by se dalo říci, že různé zastoupení ocelových vláken v cementovém kompozitu by měl mít vliv na jeho mechanické vlastnosti v pevnosti v tlaku. V pevnosti v tahu za ohybu se jako nejlepší vzorek ukázal ten se 3 % obsahem vláken a to 52,63 MPa. Nejhorší z této skupiny byl vzorek s obsahem 4,7 % a to 26,21 MPa. To by mé předchozí tvrzení vyvrátilo, avšak k absolutnímu potvrzení by bylo potřeba navázat na tento výzkum a vytvořit více vzorků. Výsledky tlakové a tahové zkoušky jsou znázorněny v níže uvedených grafech v závislosti pevnosti zkoumaných vzorků na jejich stáří. Kdy na ose „x“ je znázorněno stáří vzorku ve dnech a na ose „y“ jejich pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu v MPa (viz *Obr. 26* a *Obr. 27*).



Obrázek 26: Závislost stáří vzorku na tahové pevnosti.



Obrázek 27: Závislost stáří vzorku na tlakové pevnosti.:

5 Závěr

Cílem této práce bylo zjistit odolnost cementových kompozitů s různým procentuálním zastoupením ocelových vláken při extrémním zatížení. Toto zjištění mělo sloužit pro teoretické předpoklady na využití silnějších cementových kompozitů pro budovy vytvořené z bezpečnostní konstrukce. Odolnost kompozitu proti vyvolanému nárazu projektilem byla vyšetřena pomocí experimentálního výzkumu. V experimentu byla sledována odolnost vůči lokálnímu poškození a zařazení do tříd dle české normy ČSN 39 5360 a evropské normy EN – 1522. Stejně tak byly testovány mechanické vlastnosti (pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu) u vzorků trámku vytvořených z cementového kompozitu.

Celkem bylo vytvořeno 15 desek z ultra vysokohodnotného betonu s různým procentuálním zastoupením ocelových vláken: 2 %, 3 %, 3,6 %, 4 %, a 4,7 %. Při každém zvýšení procentuálního obsahu vláken prokazovaly vzorky zvýšení odolnosti proti nárazu. Dle ČSN 39 5360 2 % vzorky vyztuženy ocelovými vlákny vykazovaly tyto výsledky: v třídě 4 CZ „neprůnik“, v třídě 5 „částečný průnik“ a v třídě 5 CZ „úplný průnik“. Vzorky s 3 % a 3,6 % zastoupením ocelových vláken vykazovaly tyto výsledky: v třídě 5 „neprůnik“, v třídě 5 CZ „částečný průnik“ a v třídě 6 „úplný průnik“. Vzorky se 4 % zastoupením ocelových vláken vykazovaly tyto výsledky: v třídě 5 CZ „neprůnik“, v třídě 6 „částečný průnik“ a v třídě 6 CZ „úplný průnik“. Vzorky se 4,7 % zastoupením ocelových vláken vykazovaly tyto výsledky: v třídě 6 „neprůnik“, v třídě 7 „částečný průnik“ a v třídě 7 CZ „úplný průnik“. Podle evropské normy EN – 1522 vzorky vyztuženy ocelovými vlákny vykazovaly tyto výsledky: s 2 % zastoupením ocelových vláken v třídě FB – 3 „střela neprošla“, v třídě FB – 4 „střela prošla s výstrahou“ a v třídě FB – 5 „střela prošla“. S 3 % a 4 % zastoupením ocelových vláken v třídě FB – 4 „střela neprošla“, v třídě FB – 5 „střela prošla s výstrahou“ a v třídě FB – 6 „střela prošla“. Vzorky se 4,7 % zastoupením ocelových vláken v třídě FB – 6 „střela neprošla“, v třídě FB – 7 „střela prošla“.

Vyšší obsah rozptýlené výztuže ve formě ocelových vláken má značný vliv na mechanické vlastnosti UHPFRC. Při zvyšování procentuálního množství vláken se zlepšila nejen tahová pevnost, ale i duktilita, která je potřebná pro zajištění rozptýlení energie při nárazu střely plastickou deformací materiálu během zpevnění

a otevírání trhliny. Při všech procentuálních zastoupeních rozptýlené výztuže jiného obsahu se vyrobené desky z cementového kompozitu poškodily velmi lehce a tím pádem teoreticky vysoká odolnost vůči nárazu střely, vycházející z její vysoké pevnosti v tlaku, se neuplatnila. Vysoká pevnost v tahu a tlaku cementového kompozitu může být využita jedině při takovém extrémním zatížení, kdy bude vyloučen křehký lom materiálu, popřípadě když bude zaručeno výrazné tahové změkčení.

Součástí experimentálního výzkumu bylo zjišťování mechanických vlastností zkoumaného materiálu ve formě trámčových vzorků. Vyšetřeny byly 2 základní mechanické vlastnosti celkem na 12-ti vzorcích. Z výsledků je patrné, že stáří vzorků ovlivňuje jejich mechanické vlastnosti. Zkoumána byla tlaková pevnost a tahová pevnost za ohybu. Průměrná tlaková pevnost všech vzorků byla 178,07 MPa a průměrná tahová pevnost za ohybu byla 37,34 MPa.

Vyhodnocení experimentu omezoval fakt, že by bylo zapotřebí zredukovat typy projektilů. Projektily se chovaly při stejných zkouškách různě. Z tohoto důvodu bych doporučil pro další experimenty využít projektily stejnorodé konstrukce z jednoho materiálu, v nejlepším případě z vysokopevnostní oceli.

6 Použitá literatura

[1] Beddar Miloud: Fibre-reinforced concrete. Concrete [online]. 2004, 38(4) 47. ISSN 0010-5317. [vid. 24 February 2017]. Dostupné z:

<http://search.proquest.com.ezproxy.techlib.cz/docview/204111542#center>

[2] Tvarog Michal. Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů. Praha, 2016. Diplomová práce (Ing.). ČVUT v Praze. FSv, experimentální centrum.

[3] Pavlíková Milena. Vláknobeton. [přednáška]. Praha: ČVUT, 5.října 2014. In: ČVUT [online]. [vid. 30 February 2017]. Dostupné z:

<http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS7a.pdf>

[4] Vodička Jan, Veselý Vladimír, Krátký Jiří. Specifika z technologie vláknobetonu In: Beton TKS [online]. 2010, 02, pp. 38-42. ISSN 12133116. [vid. 30 February 2017]. Dostupné z:

http://www.betontks.cz/casopis/BETON_TKS_2010-02.pdf

[5] Zollo Ronald F.: Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development, Cement and Concrete Composites [online]. Elsevier, 1997, 19(2) 107–122. ISSN 0958-9465. [vid. 2 March 2017]. Dostupné z:

<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0958946596000467>

[6] Nemati Kamran M. Fiber-Reinforced Concrete [přednáška, online]. University of Washington. [vid. 4 March 2017]. Dostupné z:

<http://courses.washington.edu/cm425/frc.pdf>

[7] Ondráček Michal. Vývoj vysokopevnostních betonů definovaných vlastností s využitím druhotných surovin. Brno, 2013. Doktorská disertační práce (Ph.D.). VUT, FSv, Ústav technologie stavebních hmot a dílců.

- [8] Erdem, T., K., Kirca, Ö.: Use of binary and ternary blends in high strength concrete, *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2008, (22) 1477-1483. ISSN 0950-0618. [vid. 9 March 2017]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061807001018>
- [9] Pavlík Zbyšek. Beton – Vztah mezi strukturou a vlastnostmi. [přednáška]. Praha: ČVUT, 5.října 2014. In: ČVUT [online]. [vid. 15 March 2017]. Dostupné z:
http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/MAIN/MI_beton.pdf
- [10] Wikipedia, Slínek, [online], [vid. 18 April 2017] Dostupné z:
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Sl%C3%ADnek_\(cement\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sl%C3%ADnek_(cement)),
- [11] Boulekbache B., Hamrat M., Chemrouk M., Amziane S.: Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Materials* [online]. Elsevier, 2010, (24) 1664-1671. ISSN 0950-0618. [vid. 9 March 2017]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.techlib.cz/science/article/pii/S0950061810000681>
- [12] Soufeiani L., Sudharshan R., Mohd Zamin Bin Jumaat, Alengaram U., Ghadyani G., Mendis P.: Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiberreinforced concrete subjected to dynamic loading – A review [online]. Elsevier, 2016, (124) 405–417. ISSN: 0141-0296. [vid. 12 March 2017]. Dostupné z:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029616303005>
- [13] Česká technická norma, Beton-Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda (ČSN EN 206-1), ČNI, Praha, 2001
- [14] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 6. Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu. Česká republika. Užitečný vzor CZ 30 170 U1 20.12.2016.
- [15] Česká technická norma, Zkoušky odolnosti ochranných prostředků (ČSN 39 5360), ČNI, Praha, 1995

[16] B-15, střelecká sluchátka – technické parametry, [online], [vid. 15 April 2017].

Dostupné z:

<http://www.banner-eshop.cz/cz/katalog/ostatni-sortiment/strelecka-sluchatka/strelecka-sluchatka-b-15-0510>,

[17] European standart, Windows, doors, shutters and blinds – Bullet resistance – Requirements and classification (EN -1522), CEN, Brusel, 1998

[18] Vavříník Tomáš. Experimentální a numerická analýza nárazu projektilu na cementový kompozit. Praha, 2013. Diplomová práce (Ing.). ČVUT. FSv, experimentální centrum.

[19] Česká technická norma, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles (ČSN EN 12390–5), ČNI, Praha, 2009

[20] Vavříník Tomáš. Odolnost vysokohodnotného betonu proti nárazu projektilu. Praha, 2012. Bakalářská práce (Bc.). ČVUT. FSv, experimentální centrum.

[21] Česká technická norma, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles (ČSN EN 12390 – 3), ČNI, Praha, 2009