

VLIV ČEDIČOVÝCH MIKROVLÁKEN NA ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ČERSTVÉHO A ZTVRDLÉHO UHPC

Jan Vesecký, Jan Kubát, *

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

ABSTRAKT

Vlákna se používají za účelem zlepšení vlastností betonu více než 50 let a přibližně v posledních deseti letech jsou zkoumány možnosti využití nového typu – čedičových vláken. Tento článek proto představuje výsledky experimentální studie zaměřené na ultra-vysokohodnotný beton (UHPC) s rozptýlenou výztuží z čedičových mikrovláken, a to samostatně nebo v kombinaci s ocelovými mikrovláky. Zkoumány byly vlastnosti čerstvého i ztvrdlého UHPC v závislosti na stupni vyztužení čedičovými mikrovláky v rozmezí 0 až 12 kg/m³. Z výsledků vyplývá, že zvyšování obsahu čedičových mikrovláken výrazně snižuje zpracovatelnost a mírně snižuje objemovou hmotnost UHPC. Modul pružnosti, pevnost v tlaku a mez vzniku první trhliny v ohybu jsou ovlivněny zanedbatelně až mírně negativně. Bylo nicméně pozorováno mírné zvýšení maximální reziduální ohybové pevnosti při stupni vyztužení čedičovými mikrovláky do 4 kg/m³.

KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • Čedičová mikrovlákna • Zpracovatelnost • Mechanické vlastnosti

ABSTRACT

Fibers have been used to improve the properties of concrete for more than 50 years, and for about the last ten years, a new type – basalt fibers – have been investigated. Therefore, this paper presents the results of an experimental study focused on ultra-high performance concrete (UHPC) with dispersed basalt microfiber reinforcement, either separately or in combination with steel microfibers. The properties of fresh and hardened UHPC were investigated depending on the amount of basalt microfiber reinforcement, ranging from 0 to 12 kg/m³. The results show that an increase in the content of basalt microfibers significantly decreases the workability and slightly reduces the density of UHPC. The modulus of elasticity, compressive strength, and the limit of the first crack in bending are affected negligibly to mildly negatively. However, a slight increase in the maximum residual flexural strength was observed with a basalt microfiber content of up to 4 kg/m³.

KEYWORDS

UHPC • Basalt microfibers • Workability • Mechanical properties

1. ÚVOD

Čedič jako výlevná magmatická hornina (Obrázek 1 vlevo) nachází, vzhledem ke svým vlastnostem, široké uplatnění ve stavebnictví. Samotná neporušená hornina dosahuje (v závislosti na mineralogickém složení) pevnosti v tlaku přibližně 150-400 MPa, pevnosti v tahu 10-20 MPa modulu pružnosti 50-100 GPa, Poissonova čísla 0,2-0,3, hustoty 2900-3100 kg/m³, součinitele teplotní roztažnosti $6-8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, je mrazuvzdorná a velmi málo nasáková (Schultz 1995, He et al. 2019, Chamra et al. 2009). Proto se s výhodou používá ve formě drtí a šterků v násypech a souvrstvích železničních a silničních staveb a jako kvalitní kamenivo do betonu (Obrázek 1 uprostřed), a to především u betonů vysokých a velmi vysokých pevností.

Čedič lze navíc tavit při teplotě zhruba 1200-1500 °C (Chen 2017, Makhova 1989; viz Obrázek 1 vpravo) a vyrábět z něho mnoho dalších výrobků, například dlaždice, tkaniny, provazce, filamenty, nekonečná vlákna, geomříže a především několik typů výztuže pro betonové konstrukce (Raj et al. 2017), viz dále.



Obrázek 1: Čedič (hornina), čedičové kamenivo a tavený čedič.

1.1. Typy výztuže na bázi čediče

Provazce a nekonečná vlákna z taveného čediče dosahují díky homogenizaci hmoty a velmi malému průměru výrazně lepších mechanických vlastností (a to především v tahu) než samotná čedičová hornina. Proto jsou vhodné pro následnou výrobu dvou základních typů výztuže – kompozitních prutů a krátkých vláken, viz Obrázek 2.

* Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.



Obrázek 2: Čedičové výztužné pruty (BFRP), výztužné sítě, mikrovlákná a makrovlákná.

Čedičová kompozitní prutová výztuž (BFRP) vzniká z velkého množství čedičových provazců spojených (slepených) pryskyřicí, celkového průměru přibližně 2-50 mm. Svým tvarem se čedičové pruty podobají klasickým ocelovým výztužným prutům, odlišují se ale mechanickými a fyzikálními vlastnostmi – pevností v tahu 750-1500 MPa, modulem pružnosti 40-55 GPa, objemovou hmotností 1900-2100 kg/m³, jsou nekorodující, chemicky odolné, nemagnetické a elektricky nevodivé (Fan 2017, Attia 2019). Mají podobnou teplotní délkovou roztažnost jako ocel – přibližně $8-12 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Jejich velkou nevýhodou, je křehkost a rovněž neohybatelnost za běžných podmínek. Z čedičových kompozitních prutů malého průměru (přibližně od 2 do 10 mm) jsou často vyráběny sítě, spojené v místě křížení plastovými spojkami nebo provlečením skrz lokální rozplet prutu.

Krátká čedičová vlákna vznikají nasekáním nekonečného vlákna po vzdálenostech v řádu jednotek až desítek milimetrů. Nejsou-li po nasekání provedeny další úpravy, jedná se o tzv. čedičové mikrovlákná (Adesina 2021) o průměru přibližně 10-25 μm (pro srovnání, průměr lidského vlasu se pohybuje nejčastěji v řádu vyšších desítek μm), pevnosti v tahu 3000-5000 MPa, modulu pružnosti 75-115 GPa a objemové hmotnosti 2600-2800 kg/m³. Pokud jsou vlákna navíc vzájemně slepena/obalena pryskyřicí jedná se o tzv. čedičové makrovlákná (Muhammad a Yousif 2023) o průměru cca 0,4-1,0 mm (tedy srovnatelným s průměrem typických ocelových drátků do betonu), pevnosti v tahu 1000-1400 MPa, modulu pružnosti 40-45 GPa a objemové hmotnosti 1800-2100 kg/m³.

Čedičová vlákna jsou podobná jako samotná hornina z podstaty křehká (tj. že při dosažení pevnosti dochází k okamžitému porušení). Pokud jsou použita do betonu ve formě mikrovláken, dochází při vzniku trhliny k jejich přetržení, a tedy i celková odezva betonu je křehká. Naopak čedičová makrovlákná podle dostupných studií dokáží trhlínu přemostit a dochází k jejich postupnému vytrhávání z matrice (Chen et al. 2023). I při malých

dávkách makrovláken (v řádu desetin procent objemu) pak beton vykazuje reziduální pevnost podobnou drátkobetonu (Shi et al. 2024) a při vysokých dávkách (v řádu jednotek procent objemu) pak dochází ke zpevnění po vzniku první trhliny, podobně jako u UHPC s ocelovými mikrovlákná (Chen et al. 2023).

1.2. Čedičová mikrovlákná jako rozptýlená výztuž cementových kompozitů

Vliv čedičových mikrovláken na vlastnosti betonu byl poprvé zkoumán již na konci minulého století (Ramakrishnan et al. 1998), ale podrobně je tomuto typu vláken věnována pozornost až přibližně v posledních deseti letech (viz např. High et al. 2015, Kizilkhan et al. 2015, Biradar et al. 2020, Adesina 2021, Li et al. 2022). Většina dosavadních studií je zaměřena na použití vláken v betonu běžných pevností (tj. s tlakovou pevností v rozmezí přibližně 20-60 MPa). Byla testována vlákna různých délek (nejčastěji 6-36 mm) a různých dávek (zpravidla v rozmezí 0-1 % objemu, v několika případech až do 3 % objemu – tj. hmotnostní dávka zhruba 0-27 kg/m³, resp. až 81 kg/m³).

Z hlediska vlivu čedičových mikrovláken na mechanické vlastnosti betonu z dostupných studií vyplývá, že pevnost v tlaku je zpravidla ovlivněna zanedbatelně a může dokonce klesat při vysokých dávkách vláken. Podobně byl zjištěn zanedbatelný až mírně negativní vliv na modul pružnosti. Naopak z většiny experimentů vyplývá zlepšení tahových vlastností (pevnosti v tahu a ohybu a lomové energie) o jednotky až nižší desítky procent. Některé studie navíc udávají zlepšení odolnosti proti mrazu a obrusu. Jednoznačná shoda panuje na poklesu zpracovatelnosti čerstvého betonu o desítky procent (vyjádřeno hodnotou rozliti) s rostoucí dávkou čedičových vláken – pokles je přisuzován nasákavosti vláken a jejich relativně velkému měrnému povrchu, který absorbuje část vody, resp. cementové kaše.

Přibližně v průběhu posledních 5 let bylo publikováno i několik studií zkoumajících vliv čedičových mikrovláken na vlastnosti vysokohodnotného a ultra-vysokohodnotného betonu (HPC a UHPC), především v asijských zemích (Ayub et al. 2014, Li et al. 2023). Poznatky jsou dosud omezené, nicméně ukazují na podobný vliv čedičových mikrovláken jako u betonu běžných pevností – tzn. zanedbatelný až mírně negativní vliv na vlastnosti v tlaku a pozitivní vliv na vlastnosti v tahu/ohybu. Nejlepších výsledků je často dosaženo při určité „optimální“ dávce vláken a následně se vlastnosti začínají zhoršovat. Tato optimální dávka se ale v jednotlivých studiích výrazně liší, a proto nelze stanovit jednoznačný závěr. Výzkum zároveň prokazuje zhoršování zpracovatelnosti s rostoucí dávkou čedičových vláken, a naopak zvýšení odolnosti proti vlivům prostředí, ačkoliv v případě UHPC, které je samo o sobě vysoce odolné, je měření případného zlepšení komplikované. Některé studie dokonce zmiňují mírně pozitivní vliv vláken na požární odolnost, ačkoliv zdaleka ne tak výrazný, jako v případě polypropylenových vláken.

Především s ohledem na výše zmíněné omezené dosavadní poznatky je předložený příspěvek zaměřen na čedičová vlákna v UHPC, konkrétně na UHPC vyrobené ze surovin dostupných v České republice.

2. EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Cílem níže popsaného experimentálního programu bylo stanovit vliv čedičových mikrovláken na základní vlastnosti UHPC a to samostatně, nebo v kombinaci s ocelovými mikrovláky.

2.1. Výroba UHPC

K výrobě UHPC byla použita předpřipravená suchá směs Valucem (obsahující jemné kamenivo, cement a příměsi), smíchaná s vodou a superplastifikátorem. Do směsi byla v různých dávkách přimíchána čedičová mikroválka délky 15 mm a ocelová mikroválka 14/0,2 mm, viz Tabulka 1 a Obrázek 3. Mechanické vlastnosti čedičových mikrovláken odpovídaly rozsahům uvedeným v kapitole 1.1, pevnost ocelových vláken byla dle technického listu výrobce 3000 MPa. Objemový stupeň vyztužení byl vypočítán dle vztahu:

$$\rho_{f,v} = \frac{m_f}{\rho_f} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

kde m_f je hmotnostní dávka vláken v 1 m³ UHPC a ρ_f objemová hmotnost vláken (uvažováno 2700 kg/m³ pro čedič a 7850 kg/m³ pro ocel).

Tabulka 1: Vyrobené UHPC s různými dávkami vláken.

Ozn. směsi	Čedičová vlákna		Ocelová vlákna	
	m_f (kg/m ³)	$\rho_{f,v}$ (%)	m_f (kg/m ³)	$\rho_{f,v}$ (%)
B0S0	0	0,00	0	0,00
B2S0	2	0,07	0	0,00
B4S0	4	0,15	0	0,00
B6S0	6	0,22	0	0,00
B12S0	12	0,44	0	0,00
B0S120	0	0,00	120	1,53
B2S120	2	0,07	120	1,53
B4S120	4	0,15	120	1,53
B6S120	6	0,22	120	1,53
B12S120	12	0,44	120	1,53



Obrázek 3: Složky pro výrobu UHPC.

Výroba UHPC probíhala v míchačce s vertikální osou a nuceným oběhem (viz Obrázek 4), objem každé záměsi byl přibližně 19 l. Oba typy vláken byly dávkovány postupným sypáním do suché směsi za stálého míchání, teprve poté byly přidány tekuté složky (voda a superplastifikátor).



Obrázek 4: Čerstvá směs UHPC.

2.2. Zkušební tělesa

Výše popsanou čerstvou směsí UHPC byly naplněny válcové formy 100×200 mm a trámčové formy 100×100×400 mm (viz Obrázek 5) v souladu s EN 12390-1 a EN 12390-2 bez mechanického zhutňování. Z každé záměsi byla vyrobena 3+3 tělesa, přičemž od každého typu směsi (viz Tabulka 1) byla zhotovena pouze jedna záměs. Ihned po betonáži byl volný povrch zakryt PE folií proti vysychání. Přibližně po 24 hodinách byla ztvrdlá tělesa odbedněna a ponořena do vody o teplotě cca 20 °C, kde byla udržována do stáří 37 až 66 dnů. Válcová tělesa byla přibližně po 24-25 dnech krátce vyjmuta z vody, aby mohla být z obou stran upravena broušením.



Obrázek 5: Lití zkušebních těles.

2.3. Laboratorní zkoušky

Před betonáží těles byla provedena základní zkouška konzistence čerstvé směsi – rozliti malého (Hagermanova) kuželu dle EN 1015-3. Po zatvrdnutí a vyzrání těles byly provedeny zkoušky základních fyzikálních a mechanických vlastností – objemové hmotnosti dle EN 12390-7, modulu pružnosti a pevnosti

v tlaku na válcích 100×200 mm dle EN 12390-13 a EN 12390-3 a vlastností v tahu za ohybu na trámcích 100×100×400 mm dle EN 12390-5.

Průměr rozliti byl měřen po předepsaných 15 úderech stráscího stolku. Objemová hmotnost ztvrdlého UHPC byla stanovena výpočtem ze změřených skutečných rozměrů. Modul pružnosti byl zjišťován cyklickým zatěžováním mezi 10 a 33 % očekávané tlakové pevnosti na lisu o maximální kapacitě 1000 kN. Samotná pevnost v tlaku byla zkoušena na lisu o maximální kapacitě 4500 kN a to předepsanou rychlostí zatížení 4,5 kN/s, tj. cca 0,6 MPa/s. Ohybové vlastnosti byly zjišťovány v tahu za čtyřbodového ohybu na rozpětí 300 mm. Zkouška byla řízena předepsanou rychlostí posunu hlavy lisu, která byla nastavena tak, aby nárůst napětí v nejvíce tažených vláknech průřezu nepřekročil 0,05 MPa/s. Provedené zkoušky ilustrativně shrnuje Obrázek 6.

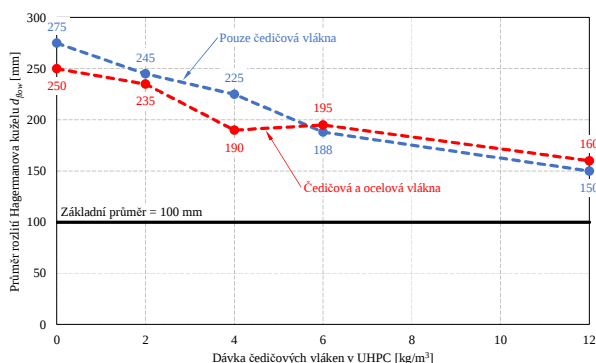


Obrázek 6: Zkoušky UHPC – konzistence (rozliti), objemová hmotnost, modul pružnosti, pevnost v tlaku, vlastnosti v ohybu.

3. VÝSLEDKY

3.1. Výsledky pro čerstvé UHPC

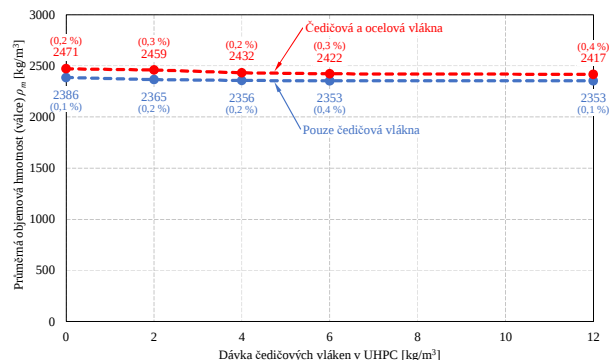
Pro každý typ směsi byla realizována jedna zkouška konzistence, přičemž rozliti Hagermanova kuželu bylo měřeno ve dvou na sebe kolmých směrech a následně zprůměrováno. Výsledky v závislosti na obsahu čedičových mikrovláken a (ne)přítomnosti ocelových mikrovláken prezentuje Obrázek 7.



Obrázek 7: Vliv obsahu čedičových vláken na konzistenci čerstvého UHPC.

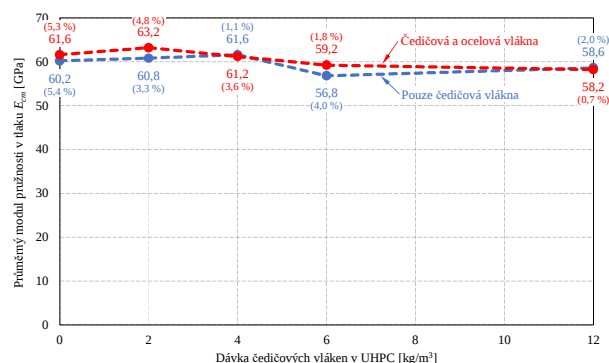
3.2. Výsledky pro ztvrdlé UHPC

Objemová hmotnost ztvrdlého UHPC byla měřena u všech vyrobených těles, ale pro vyhodnocení (viz Obrázek 8) byly využity pouze výsledky z trojice broušených válců od každého typu směsi, jelikož povrch trámů nebyl upravován, a jejich objemová hmotnost proto byla mnohem méně přesná.

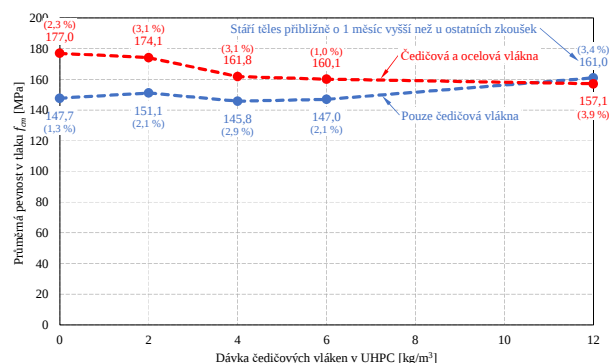


Obrázek 8: Vliv obsahu čedičových vláken na objemovou hmotnost ztvrdlého UHPC (měřeno na válcích 100×200 mm; hodnoty v závorce značí variační koeficient).

Výsledky měření modulu pružnosti a pevnosti v tlaku na válcích jsou shrnuty na Obrázku 9 a Obrázku 10.

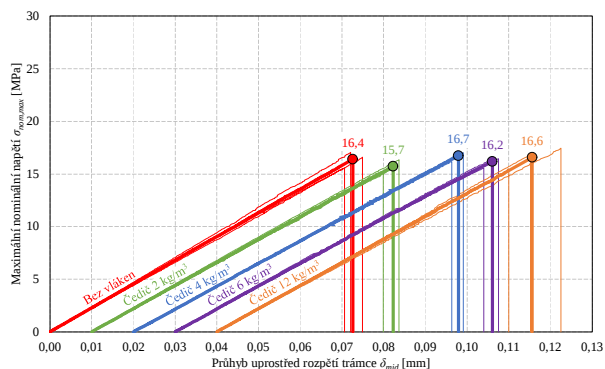


Obrázek 9: Vliv obsahu čedičových vláken na modul pružnosti UHPC (hodnoty v závorce značí variační koeficient).

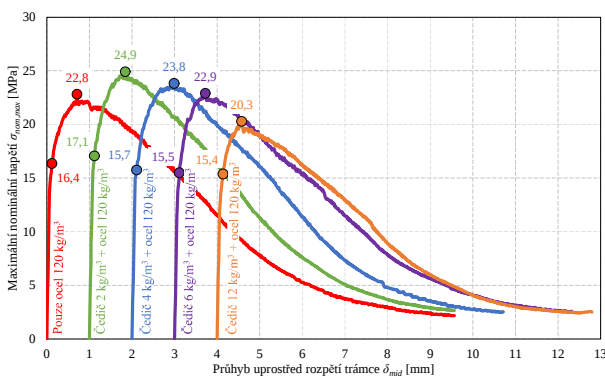


Obrázek 10: Vliv obsahu čedičových vláken na pevnost UHPC v tlaku (hodnoty v závorce značí variační koeficient).

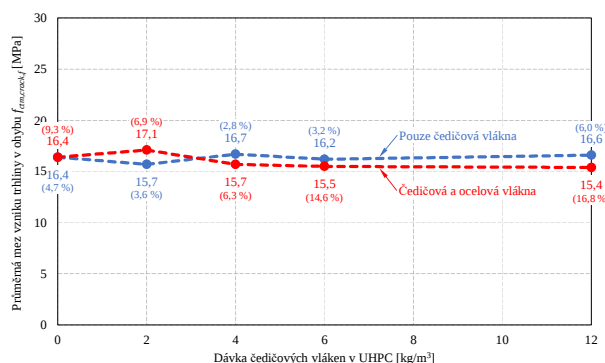
Při čtyřbodových ohybových zkouškách byl zaznamenán celý pracovní diagram, včetně sestupné větve, přičemž hodnota zatížení byla přepočtena na maximální nominální napětí s využitím elementárních vztahů lineární mechaniky a teorie pružnosti, viz Obrázek 11 a Obrázek 12. Z diagramů byly vyhodnoceny dvě hlavní vlastnosti – mez vzniku 1. trhliny a maximální pevnost v (tahu za) ohybu, viz Obrázek 13 a Obrázek 14. Maximální pevnost bylo možné vyhodnotit jen v případě těles obsahujících ocelová mikrovlákná.



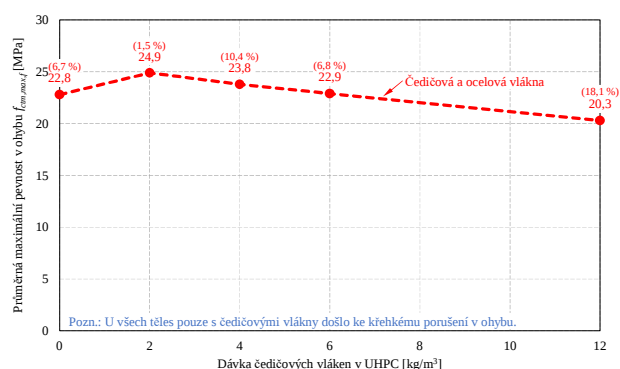
Obrázek 11: Pracovní diagramy trámů z UHPC ve čtyřbodovém ohybu (bez ocelových mikrovláken).



Obrázek 12: Pracovní diagramy trámů z UHPC ve čtyřbodovém ohybu (s ocelovými mikrovláknami).



Obrázek 13: Vliv obsahu čedičových vláken na mez vzniku 1. trhliny UHPC v ohybu (hodnoty v závorce značí variační koeficient).



Obrázek 14: Vliv obsahu čedičových vláken na maximální pevnost UHPC v ohybu (hodnoty v závorce značí variační koeficient).

4. DISKUZE

Na základě dosažených výsledků prezentovaných v předchozí kapitole jsou níže diskutovány hlavní poznatky o vlivu čedičových mikrovláken na základní vlastnosti UHPC a porovnány v kontextu dosavadních znalostí publikovaných v článcích citovaných výše, v kapitole 1.2.

4.1. Vliv čedičových vláken na zpracovatelnost čerstvého UHPC

Z grafů na Obrázku 7 je zřejmé, že s rostoucím obsahem čedičových mikrovláken poměrně výrazně klesá zpracovatelnost. Míra poklesu je nižší pro směsi obsahující zároveň ocelová mikrovlákná, ale tento poznatek může být zkrácen vzhledem k provedení pouze jedné zkoušky rozliti od každého typu směsi.

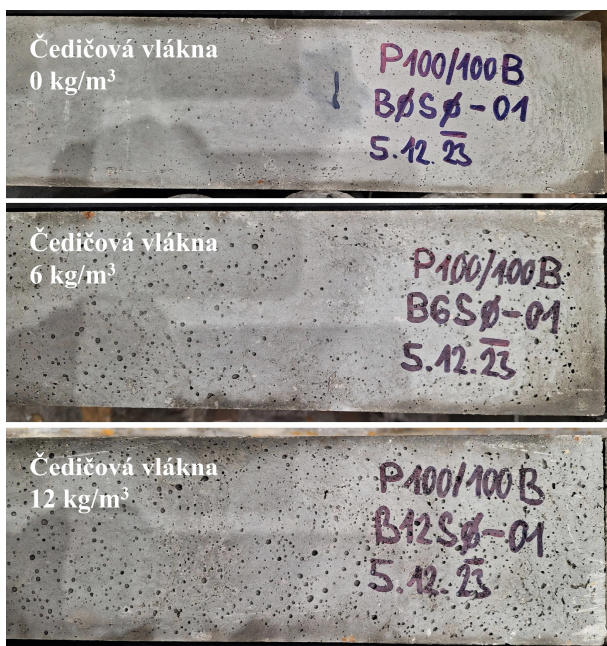
Zpracovatelnost směsí s 12 kg/m³ čedičových mikrovláken dosahuje pouze 29 %, resp. 40 % v porovnání se směsí zcela bez vláken (při uvážení základní hodnoty rozliti 100 mm). Zjištěný pokles zpracovatelnosti odpovídá dosavadním poznatkům o běžném betonu i HPC a UHPC.

Ačkoliv je tento jev obecně považován za negativní, je možné nalézt aplikace, u kterých by nižší zpracovatelnost mohla být žádoucí – typickým příkladem je velmi rozšířená aplikace UHPC jako zesilující/obrusné vrstvy stávajících betonových mostů, kdy je často třeba dosáhnout spádovaného povrchu, což je nemožné s klasickou, vysoce tekutou, konzistencí UHPC, která zpravidla odpovídá samozhutnitelným (samonivelačním) betonům.

4.2. Vliv čedičových vláken na objemovou hmotnost ztvrdlého UHPC

Jak v případě směsí pouze s čedičovými mikrovláknami, tak s čedičovými i ocelovými mikrovláknami byl u grafů na Obrázku 8 pozorován mírný, ale nezanedbatelný pokles objemové hmotnosti ztvrdlého UHPC, a to maximálně o 1,4 %, resp. 2,2 %.

Tento pokles byl s největší pravděpodobností způsoben narůstající pórovitostí spolu s narůstajícím obsahem čedičových mikrovláken, která byla zřetelně pozorována jak na povrchu, tak na lomové ploše zkušebních těles, viz Obrázek 15.



Obrázek 15: Zřetelný nárůst pórovitosti na povrchu těles s vyšším obsahem čedičových mikrovláken.

4.3. Vliv čedičových vláken na vlastnosti UHPC v tlaku

Ze zkoušek válcových těles v tlaku vyplývá, že modul pružnosti prakticky není závislý na obsahu čedičových (ani ocelových) mikrovláken, rozdíly se pohybují v rozmezí směřodonné odchylky, viz grafy na Obrázku 9.

Způsob porušení byl u těles obsahujících pouze čedičová vlákna zřetelně křehký (až explozivní), zatímco při kombinaci s ocelovými mikrovlásky bylo porušení duktilní, pro srovnání viz Obrázek 16.



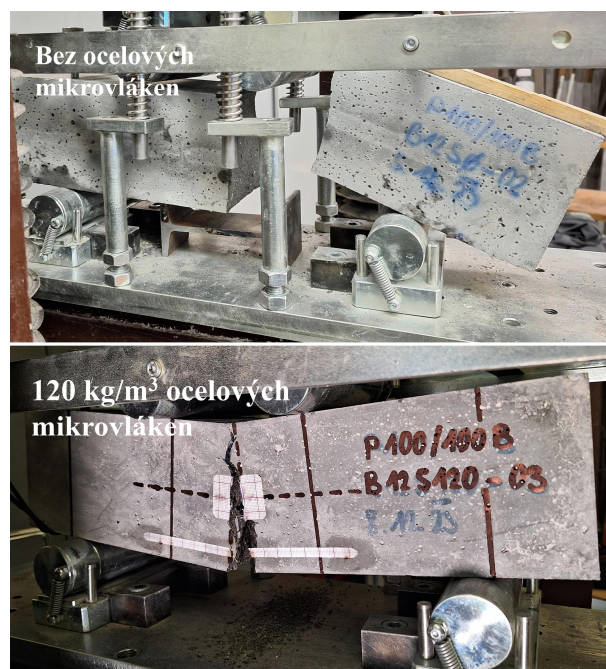
Obrázek 16: Porovnání způsobu porušení těles při zkoušce v tlaku.

Pevnost v tlaku rovněž nebyla prakticky ovlivněna, pokud byla v UHPC přítomna pouze čedičová vlákna, viz Obrázek 10 (pozn.: nárůst o cca 10 % pro směs s 12 kg/m³ vláken byl patrně způsoben vyšším stářím těles). Naopak při kombinaci čedičových a ocelových mikrovláken byl pozorován negativní vliv čedičových vláken na tlakovou pevnost, a to až o přibližně -10 %, přičemž zřetelný pokles započal při dávkách od 4 kg/m³.

4.4. Vliv čedičových vláken ohybové vlastnosti UHPC

Posledním zkoumaným parametrem byl vliv čedičových mikrovláken na odezvu trámů ve čtyřbodovém ohybu.

Z diagramů na Obrázku 11 a Obrázku 12 je zřejmé, že podobně jako v případě tlakových zkoušek dochází u těles vyztužených pouze čedičovými vlákny ke křehkému porušení a duktilní odezvu zaručují pouze ocelová mikrovláskna. Způsoby porušení také znázorňuje Obrázek 17.



Obrázek 17: Porovnání způsobu porušení těles při zkoušce v ohybu.

Přítomnost čedičových (i ocelových) mikrovláken neovlivňuje mez vzniku 1. trhliny v ohybu – u všech zkoumaných směsí byla její hodnota mezi 15 až 17 MPa, viz Obrázek 13.

Maximální pevnost v ohybu bylo možné vzhledem k výše zmíněné křehkosti/duktilitě vyhodnotit pouze u těles obsahujících ocelová mikrovláskna. U nich byl pozorován mírný nárůst maximální pevnosti o cca 9 %, resp. 4 % při dávkách čedičových vláken 2 kg/m³, resp. 4 kg/m³, při vyšších dávkách již maximální ohybová pevnosti naopak klesala, viz Obrázek 14. Lze se domnívat, že čedičová vlákna v množství 2 až 4 kg/m³ mají mírně pozitivní vliv na rovnoměrnost rozložení ocelových mikrovláken v matrici UHPC, čímž zlepšují ohybové vlastnosti prvků z něho vyrobených. Samotná čedičová vlákna ale k maximální ohybové pevnosti vzhledem ke své křehkosti nepřispívají.

5. SHRNU TÍ A ZÁV ĚR

Článek představil výsledky experimentální studie zkoumající vliv čedičových mikrovláken na základní vlastnosti čerstvého a ztvrdlého UHPC vyrobeného z průmyslově vyráběné suché směsi. Bylo zkoumáno dávkování čedičových vláken délky 15 mm v rozmezí 0 až 12 kg/m³ (tj. 0 až 0,44 %) a to samostatně nebo v kombinaci s vysokopevnostními ocelovými mikrovláknami 14/0,2 mm v dávce 120 kg/m³ (tj. 1,53 %).

Dosažené výsledky ukazují, že čedičová mikrovláknata ovlivňují především vlastnosti čerstvého UHPC, zatímco vliv na mechanické vlastnosti ztvrdlého UHPC je obecně malý. Vyzdvihnout lze následující poznatky:

- S rostoucím obsahem čedičových vláken výrazně klesá zpracovatelnost čerstvé směsi.
- Mírně (ale setrvale) klesá s rostoucím obsahem čedičových vláken také objemová hmotnost ztvrdlého UHPC. Pokles je způsoben především zřetelným nárůstem pórovitosti matrice.
- Modul pružnosti a pevnost v tlaku jsou čedičovými vláknami ovlivněny zanedbatelně až mírně negativně.
- Mez vzniku první trhliny je nezávislá na (ne)přítomnosti čedičových i ocelových mikrovláken.
- Maximální pevnost v ohybu mírně narůstá při dávkách čedičových mikrovláken 2 až 4 kg/m³ v kombinaci s ocelovými mikrovláknami. Zjištěné navýšení pevnosti o max. 10 % je ale třeba vnímat s rezervou, v kontextu výroby a zkoušení pouze jedné záměsi a nízkého počtu (tří) zkušebních těles od každého typu směsi.
- Duktilní odezvu UHPC zaručují pouze ocelová mikrovláknata. UHPC s čedičovými mikrovláknami je křehkým materiálem.

Z výše uvedeného vyplývá, že při snaze o zlepšení mechanických vlastností UHPC, postrádá použití čedičových mikrovláken obecně hlubšího smyslu. V budoucnu by se ovšem mohla uplatnit v praktických aplikacích, u kterých je žádoucí snížení konzistence čerstvé směsi – například u zesilujících vrstev stávajících mostů ukládaných do spádu. Takové použití je nicméně nejprve nutné ověřit dalšími zkouškami.

PODĚKOVÁNÍ

Prezentovaný výzkum byl podpořen granty Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/039/OHK1/1T/11 (*Analýza štihlých prvků z cementových kompozitů a oblastí s vysokou koncentrací napětí*) a SGS24/040/OHK1/1T/11 (*Moderní cementové kompozity a jejich efektivní použití v konstrukcích*).

Literatura

Adesina, A. (2021), Performance of cementitious composites reinforced with chopped basalt fibres – An overview. *Construction and Building Materials*. 266, 120970.

Attia, K. Alnahhal, W., Elrefai, A. & Rihan, Y. (2019), Flexural behavior of basalt fiber-reinforced concrete slab strips reinforced with BFRP and GFRP bars. *Composite Structures*. 211, 1-12.

Ayub, T., Shafiq, N. & Nuruddin, M. F. (2014), Mechanical Properties of High-performance Concrete Reinforced with Basalt Fibers. *Procedia Engineering*. 77, 131-139.

Biradar, S. V., Dileep, M. S. & Gowri, T. V. (2020), Studies of Concrete Mechanical Properties with Basalt Fibers. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 1006, 012031.

EN 1015-3 (1999), *Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. CEN.

EN 12390-1 (2021), *Testing hardened concrete – Part 1: Shape, dimensions and other requirements for specimens and moulds*. CEN.

EN 12390-2 (2019), *Testing hardened concrete – Part 2: Making and curing specimens for strength tests*. CEN.

EN 12390-3 (2019), *Testing hardened concrete – Part 3: Compressive strength of test specimens*. CEN.

EN 12390-5 (2019), *Testing hardened concrete – Part 5: Flexural strength of test specimens*. CEN.

EN 12390-7 (2019), *Testing hardened concrete – Part 7: Density of hardened concrete*. CEN.

EN 12390-13 (2021), *Testing hardened concrete – Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression*. CEN.

Fan, X., Xu, T., Zhou, Z., Zhou, X. (2017), Experimental Study on Basic Mechanical Properties of BFRP Bars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 250, 012014.

He, Q., Li, Y. & She, S. (2019), Mechanical Properties of Basalt Specimens Under Combined Compression and Shear Loading at Low Strain Rates. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 52, 4101–4112.

High, C., Seliem, H. M., El-Safty, A. & Rizkalla, S. (2015), Use of basalt fibers for concrete structures. *Construction and Building Materials*. 96, 37-46.

Chamra, S., Schröfel, J. & Tylš, V. (2009), *Základy petrografie a regionální geologie ČR*. Česká technika. ISBN 978-80-01-03138-4.

Chen, X., Zhang, Y., Hui, D., Chen, M. & Wu, Z. (2017), Study of melting properties of basalt based on their mineral components. *Composites Part B: Engineering*. 116, 53-60.

Chen, X., Wang, X., Ding, L., Jiang, K., Su, Ch., Liu, J. & Wu, Z. (2023), Mechanical properties of a novel UHPC reinforced with macro basalt fibers. *Construction and Building Materials*. 377, 131107.

Kizilkant, A. B., Kabay, N., Akyüncü, V., Chowdhury, S. & Akça, A. H. (2015), Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study. *Construction and Building Materials*. 100, 218-224.

Li, F., Lv, T. & Wei, S. (2023), Performance, Mechanical Properties and Durability of a New Type of UHPC – Basalt

Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete: A Review. *Polymers*. 15, 3129.

- Li, Z., Shen, A., Zeng, G., Chen, Z. & Guo, Y. (2022), Research progress on properties of basalt fiber-reinforced cement concrete. *Materials Today Communications*. 33, 104824.
- Makhova, M. F., Bocharova, I. N., Mishchenko, E. S. & Kovalenko, V. G. (1989), Glass fiber from rock. *Glass and Ceramics*. 46, 374-376.
- Muhammad, J. H. & Yousif, A. R. (2023), Shear behavior of normal and high-strength concrete beams reinforced with BFRP bars and basalt macro fibers. *Construction and Building Materials*. 408, 133516
- Raj, S., Kumar, V. R., Kumar, B. H. B. & Iyer, N. R. (2017), Basalt: structural insight as a construction material. *Sādhanā*. 42, 75-84.
- Ramakrishnan, V., Tolmare, N. S. & Brik, V. B. (1998). *Performance evaluation of 3-D basalt fiber reinforced concrete & basalt rod reinforced concrete*. Transportation Research Board of the National Academies.
- Shi, J., Lu, Y., Zhu, R., Liu, Y., Zhang, Y. & Lv, Q. (2024), Experimental evaluation of fracture toughness of basalt macro fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. 411, 134638.
- Schultz, R. A. (1995), Limits on strength and deformation properties of jointed basaltic rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 28, 1-15.