

CEMENTOVÝ KOMPOZIT S NEKOVOVOU VLÁKNOVOU VÝZTUŽÍ A JEHO ZKOUŠENÍ

Vladan Prachař, Wail Khazal, René Čechmánek, Josef Knězek¹

Zhodnocení poznatků vlivu různých parametrů na vlastnosti vláknocementového kompozitu při použití vláken odlišného druhu, typu a množství. Možnost kombinování vláknové výztuže. Porovnání odlišných postupů při dávkování a míchání složek. Efektivnost použitých složek na zpracovatelnost a konečné fyzikálně-mechanické vlastnosti cementového kompozitu s nekovovou vláknovou výztuží (pevnost v tahu za ohybu, pevnost v rázu, objemová hmotnost, nasákavost).

Úvod

Beton je konstrukční materiál, relativně křehký, který se vyznačuje nízkou pevností v tahu proti pevnosti v tlaku. Všeobecně vyztužujeme látky s malou pevností v tahu a látky křehké takovými látkami, které mají vysokou pevnost v tahu a tím v konstrukci přebírají převážnou část tahových napětí. Jednou z možností je i vyztužování betonu rozptýlenou vláknovou výztuží.

Rozptýlená vlákna v betonu přebírají tahová napětí a zabraňují vzniku smršťovacích trhlin při tuhnutí betonu. Zároveň mohou zvyšovat pevnost betonu v tahu za ohybu a rázovou pevnost betonu.

Jako vláknovou výztuž do betonu lze použít celou řadu vláken: ocelová, minerální, skleněná, azbestová, z minerální vlny, přírodní (celulósová, jutová atd.), polypropylenová, polyamidová, polyetylenová, polyacrylonitrilová, polyvinylalkoholová, uhlíková, aramidová, nylonová.

Cílem našeho výzkumu je prověřit možnosti vyztužení cementového kompozitu nekovovou vláknovou výztuží. Navrhli jsme 2 receptury, u kterých jsme měnili postup míchání, dávkování složek, druh vláken a jeho množství.

Po 28 dnech zrání byly na vyrobených zkušebních vzorcích stanoveny fyzikálně-mechanické vlastnosti: pevnost v tahu za ohybu, pevnost v rázu, objemová hmotnost a nasákavost.

PRACHAŘ Vladan, Ing., prachar@vustah.cz
KHAZAL Wail, RNDr., khazal@vustah.cz
ČECHMÁNEK René, Ing., cechmanek@vustah.cz
KNĚZEK Josef, Ing., CSc., knezek@vustah.cz
Výzkumný ústav stavebních hmot, a. s. , Hněvkovského 65, 617 00 Brno

Zkušební laboratoř kameniva a kompozitních materiálů – ZL KKM

Akreditovaná ČIA podle ČSN EN ISO/IEC 17025:2005, Osvědčení o akreditaci č. 311/2006 ze dne 26.7.2006.

Vedoucí laboratoře: RNDr. Wail Khazal, tel. +420 543 529 299, e-mail: khazal@vustah.cz

Tabulka 1: Prezentace zkoušek ZL KKM

Název zkušebního postupu	Identifikace zkušebního postupu	Název normy
Předmět zkoušky: Sklovláknobeton		
Stanovení nasákavosti vodou a objemové hmotnosti v suchém stavu	ČSN EN 1170-6	Prefabrikované betonové výrobky – Zkušební metoda pro sklovláknobeton – Část 6: Stanovení nasákavosti vodou a objemové hmotnosti v suchém stavu
Stanovení délkových změn vlivem vlhkosti	ČSN EN 1170-7	Prefabrikované betonové výrobky – Zkušební metoda pro sklovláknobeton – Část 7: Stanovení délkových změn vlivem vlhkosti
Stanovení nepropustnosti vody	PZN – VUSTAH 0200 05 2005	Fyzikální vlastnosti sklovláknobetonových výrobků Nepropustnost vody
Stanovení působení střídavého nasákání vodou a vysoušení	PZN – VUSTAH 0200 06 2005	Fyzikální vlastnosti sklovláknobetonových výrobků Působení střídavého nasákání vodou a vysoušení
Stanovení vlivu uložení ve vodě 60 °C	PZN – VUSTAH 0200 07 2005	Fyzikální vlastnosti sklovláknobetonových výrobků Vliv uložení ve vodě 60 °C
Stanovení mrazuvzdornosti	PZN – VUSTAH 0200 08 2005	Fyzikální vlastnosti sklovláknobetonových výrobků Mrazuvzdornost
Stanovení objemové hmotnosti hydrostatickým vážením	PZN – VUSTAH 0200 09 2005	Fyzikální vlastnosti sklovláknobetonových výrobků Objemová hmotnost hydrostatickým vážením
Stanovení pevnosti v tahu za ohybu	PZN – VUSTAH 0200 10 2005	Fyzikální vlastnosti sklovláknobetonových výrobků Stanovení pevnosti v tahu za ohybu
Stanovení únosnosti v tahu za ohybu kabelového žlabu	PN VUSTAH 0211:2006	UNICRET MIX KABELOVÉ ŽLABY UNI 121
Předmět zkoušky: Přírodní a umělé kamenivo		
Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor	ČSN EN 933-1	Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor
Stanovení tvaru zrn – Tvarový index	ČSN EN 933-4	Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 4: Stanovení tvaru zrn – Tvarový index
Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva	ČSN EN 1097-3	Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva
Stanovení vlhkosti sušením v sušárně	ČSN EN 1097-5	Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně
Stanovení měrné hmotnosti fileru – Pyknometrická zkouška	ČSN EN 1097-7	Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru – Pyknometrická zkouška
Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování	ČSN EN 1367-1	Zkoušení odolnosti kameniva vůči teplotě a zvětrávání – Část 1: Stanovení odolnosti proti zmrazování a rozmrazování
Stanovení obsahu humusovitých částic	ČSN EN 1744-1	Zkoušení chemických vlastností kameniva - Část 1: Chemický rozbor – Stanovení obsahu humusovitých částic
Zkouška trvanlivosti kameniva síranem sodným	ČSN 72 1176	Zkouška trvanlivosti a odolnosti kameniva proti mrazu
Stanovení rozlišných částic kameniva	ČSN 72 1180	Stanovení rozlišných částic kameniva
Zkouška ztrátou sušením – Stanovení míry nevhodných jemných částic (Míra zahlinění)	ČSN 72 1187	Zkoušení jemných částic pro asfaltové směsi – Zkouška ztrátou sušením
Stanovení nasákavosti kameniva	PZN – VUSTAH 0200 11 2006	Fyzikální vlastnosti kameniva Stanovení nasákavosti kameniva
Odběr vzorků kameniva	ČSN EN 932-1	Zkoušení všeobecných vlastností kameniva Část 1: Metody odběru vzorků

ZKOUŠENÍ ZÁKLADNÍ MATRICE (bez vláknové výztuže)

Receptura

Tabulka 2: Složky receptury U

Receptura U	
složka	(%)
Cement	47,4
Křemičitý písek	35,7
Křemičité úlety	2,4
Superplastifikátor	1,6
Voda (v/c = 0,31)	14,5

Tabulka 3: Složky receptury M

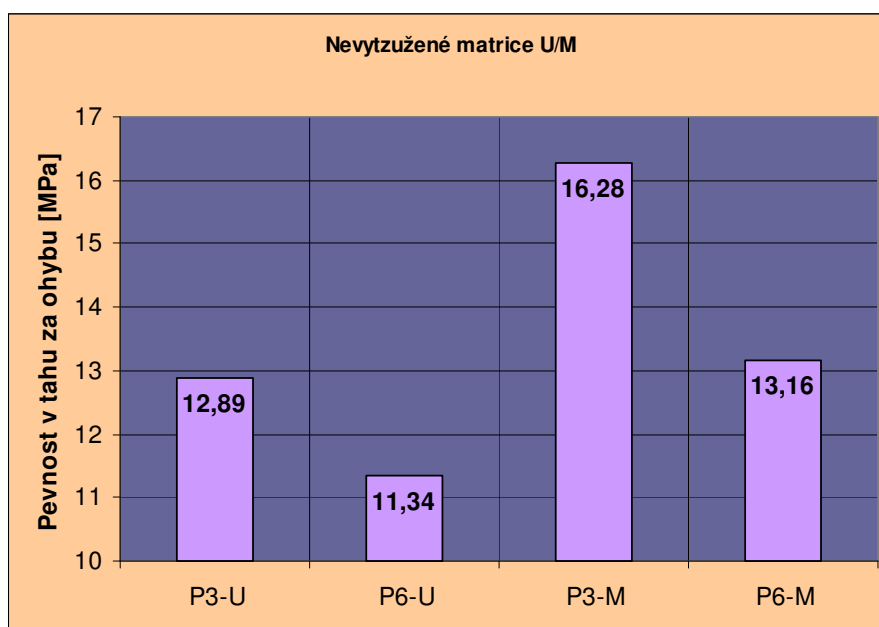
Receptura M	
složka	(%)
Cement	47,4
Křemičitý písek	23,7
Jemné křemičité plnivo	11,9
Křemičité úlety	2,4
Superplastifikátor	1,9
Voda (v/c = 0,31)	14,5

Postup přípravy

Do míchačky byly vpraveny suché složky a směs byla homogenizována po dobu 2 minut. Ke směsi byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor, směs byla poté homogenizována u vzorku P3-U a P3-M po dobu 3 minut a u vzorku P6-U a P6-M po dobu 6 minut.

Tabulka 4: Výsledky zkoušení matrice U/M bez vláknové výztuže

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	P3-U	P6-U	P3-M	P6-M
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	12,89	11,34	16,28	13,16
Pevnost v rázu	kJ/m ²	2,52	2,32	3,04	2,67
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 149	2 125	2 076	2 112
Nasákavost	%	6,20	7,50	6,68	6,92



Obr. 1: Pevnost v tahu za ohybu matrice U/M bez vláknové výztuže

Při zkoušení základní matrice bez vláknové výztuže se prokázalo, že příznivější dopad na pevnost v tahu za ohybu má kratší doba míchání a to v případě obou matric. Ze zjištěných výsledků vyplývá, že matrice s recepturou M má vyšší pevnost v tahu za ohybu při obou způsobech míchání.

ZKOUŠENÍ VYZTUŽENÉ MATRICE (s vláknovou výztuží)

Skleněné vlákno

Receptura

K vyztužení matrice bylo použito skleněné vlákno v množství 2 % hm. suchých složek receptury U a receptury M (**US** – receptura **U** vyztužená skleněnými vlákny, **MS** – receptura **M** vyztužená skleněnými vlákny).

Postup přípravy

Byly provedeny 2 postupy míchání.

Postup míchání **A**:

Do míchačky byly vpraveny suché složky a homogenizovány po dobu 2 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 3 minut. Nakonec byla do směsi vpravena skleněná vlákna a kompletní směs homogenizována 1, 5 nebo 10 minut.

Postup míchání **B**:

Do míchačky byly vpraveny suché složky se skleněnými vlákny a homogenizovány po dobu 1 nebo 2 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 3 nebo 6 minut.

Tabulka 5: Přehled časových průběhů homogenizací (skleněné vlákno)

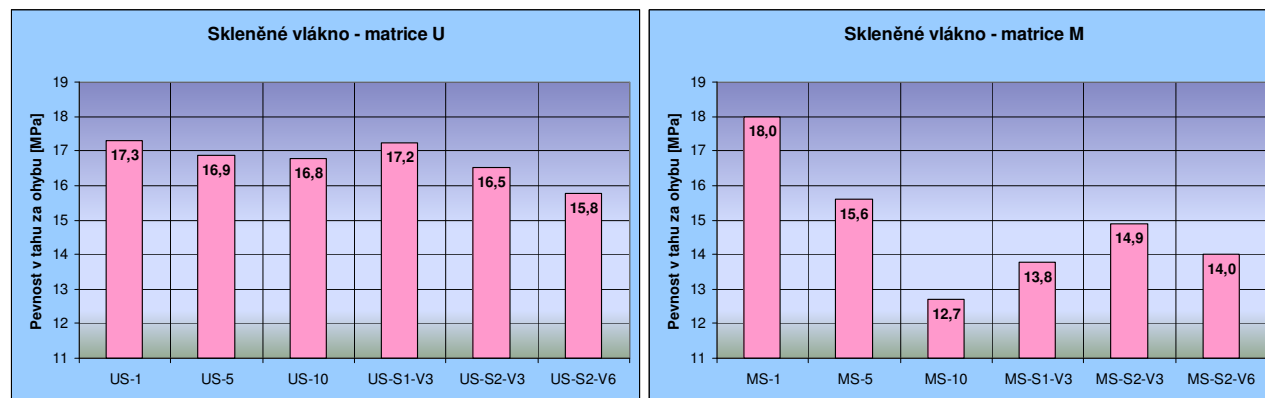
A	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky	Záměsová voda s plastifikátorem	Skleněná vlákna
US-1, MS-1	2	3	1
US-5, MS-5	2	3	5
US-10, MS-10	2	3	10
B	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky se skleněnými vlákny	Záměsová voda s plastifikátorem	
US-S1-V3, MS-S1-V3	1	3	
US-S2-V3, MS-S2-V3	2	3	
US-S2-V6, MS-S2-V6	2	6	

Tabulka 6: Výsledky zkoušení matrice U vyztužené skleněnými vlákny

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	US-1	US-5	US-10	US-S1-V3	US-S2-V3	US-S2-V6
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	17,30	16,88	16,77	17,23	16,51	15,78
Pevnost v rázu	kJ/m ²	4,67	3,35	2,70	3,50	3,48	3,20
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 077	2 081	2 062	2 107	2 083	2 103
Nasákavost	%	7,81	8,12	7,66	7,59	8,25	8,58

Tabulka 7: Výsledky zkoušení matrice M vyztužené skleněnými vlákny

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	MS-1	MS-5	MS-10	MS-S1-V3	MS-S2-V3	MS-S2-V6
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	17,99	15,60	12,69	13,78	14,88	14,00
Pevnost v rázu	kJ/m ²	3,29	2,86	1,79	1,79	1,63	1,14
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 096	2 095	2 051	2 069	2 079	2 055
Nasákavost	%	7,32	7,53	8,04	7,55	7,59	7,26



Obr. 2-1/2-2: Pevnost v tahu za ohybu matrice U/M vyztužené skleněnými vlákny

Pevnost v tahu za ohybu matrice U vyztužené skleněnými vlákny není zásadně ovlivněna postupem míchání, a to ani způsobem dávkování, ani délkou doby homogenizace.

U Matrice M výsledky pevnosti v tahu za ohybu významně kolísají. Zejména u postupu míchání A, kde se zvětšující se dobou míchání pevnost v tahu za ohybu klesá asi o 1/3. V případě postupu míchání B, jsou hodnoty vyrovnanější.

Uhlíkové vlákno

Receptura

K vyztužení matrice bylo použito uhlíkové vlákno v množství 1 % hm. suchých složek receptury U a receptury M (**CU** – receptura **U** vyztužená uhlíkovými vlákny, **CM** – receptura **M** vyztužená uhlíkovými vlákny).

Postup přípravy

Byly provedeny 2 postupy míchání.

Postup míchání **A**:

Do míchačky byly vpraveny suché složky a homogenizovány po dobu 2 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 2 minut. Nakonec byla do směsi vpravena uhlíková vlákna a kompletní směs homogenizována 2 nebo 4 minuty.

Postup míchání **B**:

Do míchačky byly vpraveny suché složky s uhlíkovými vlákny a homogenizovány po dobu 3 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 2 nebo 4 minut.

Tabulka 8: Přehled časových průběhů homogenizací (uhlíkové vlákno)

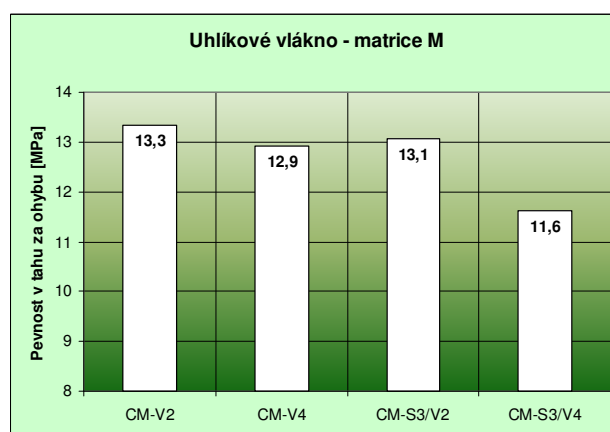
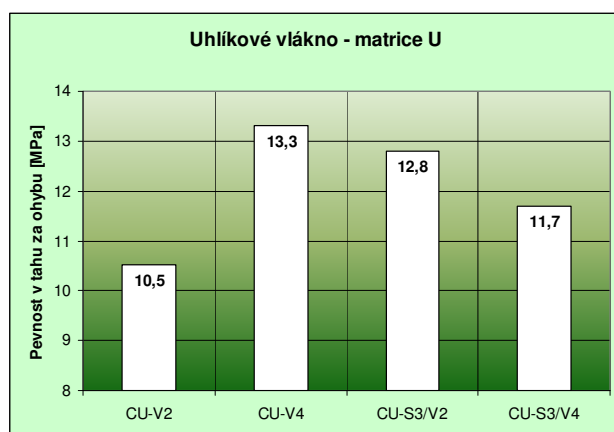
A	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky	Záměsová voda s plastifikátorem	Uhlíková vlákna
CU-V2, CM-V2	2	2	2
CU-V4, CM-V4	2	2	4
B	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky s uhlíkovými vlákny	Záměsová voda s plastifikátorem	
CU-S3/V2, CM-S3/V2	3	2	
CU-S3/V4, CM-S3/V4	3	4	

Tabulka 9: Výsledky zkoušení matrice U vyztužené uhlíkovými vlákny

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	CU-V2	CU-V4	CU-S3/V2	CU-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	10,52	13,32	12,80	11,70
Pevnost v rázu	kJ/m ²	1,27	1,37	1,45	1,18
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 027	2 008	2 026	2 029
Nasákavost	%	8,31	8,05	8,09	7,71

Tabulka 10: Výsledky zkoušení matrice M vyztužené uhlíkovými vlákny

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	CM-V2	CM-V4	CM-S3/V2	CM-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	13,34	12,92	13,07	11,63
Pevnost v rázu	kJ/m ²	1,21	1,12	1,38	1,01
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 028	2 015	2 021	2 013
Nasákavost	%	7,44	7,41	7,91	8,06



Obr. 3-1/3-2: Pevnost v tahu za ohybu matrice U/M vyztužené uhlíkovými vlákny

Vliv odlišného způsobu dávkování a míchání se u matric U a M vyztužených uhlíkovými vlákny výrazně neprojevil. Hodnoty pevností v tahu za ohybu si jsou velmi podobné jak ve vzájemném porovnání obou matric, tak postupů míchání a homogenizací. Výjimkou je snad pouze vzorek CU-V2, který v porovnání s ostatními zaostává.

Aramidové vlákno

Receptura

K vyztužení matrice bylo použito aramidové vlákno (1,5 mm; 6,0 mm) v množství 1 % hm. suchých složek receptury U a receptury M (**AU** – receptura **U** vyztužená aramidovými vlákny, **AM** – receptura **M** vyztužená aramidovými vlákny).

Postup přípravy

Byly provedeny 2 postupy míchání.

Postup míchání A:

Do míchačky byly vpraveny suché složky a homogenizovány po dobu 2 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 2 minut. Nakonec byla do směsi vpravena aramidová vlákna a kompletní směs homogenizována 4 minuty.

Postup míchání B:

Do míchačky byly vpraveny suché složky s aramidovými vlákny a homogenizovány po dobu 3 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 4 minut.

Tabulka 11: Přehled časových průběhů homogenizací (aramidové vlákno)

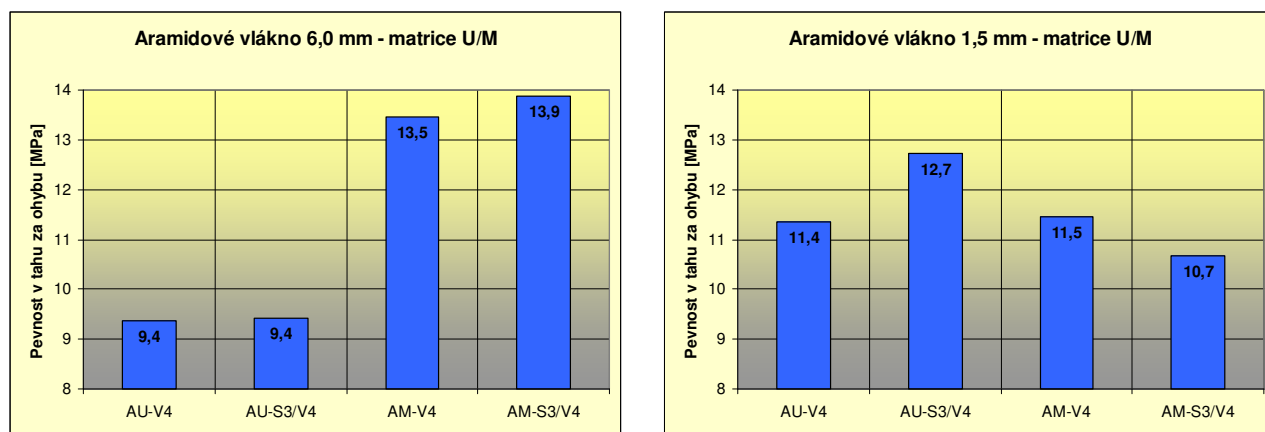
A	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky	Záměsová voda s plastifikátorem	Aramidová vlákna
AU-V4, AM-V4	2	2	4
B	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky s aramidovými vlákny	Záměsová voda s plastifikátorem	
AU-S3/V4, AM-S3/V4	3	4	

Tabulka 12: Výsledky zkoušení matrice U/M vyztužené aramidovými vlákny o délce 6,0 mm

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	AU-V4	AU-S3/V4	AM-V4	AM-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	9,36	9,43	13,47	13,87
Pevnost v rázu	kJ/m ²	2,13	2,25	2,38	2,29
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 041	2 030	2 037	2 053
Nasákavost	%	8,00	8,27	7,91	7,91

Tabulka 13: Výsledky zkoušení matrice U/M vyztužené aramidovými vlákny o délce 1,5 mm

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	AU-V4	AU-S3/V4	AM-V4	AM-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	11,36	12,73	11,46	10,68
Pevnost v rázu	kJ/m ²	1,42	1,34	1,30	1,22
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 023	2 025	2 040	2 033
Nasákavost	%	8,08	7,98	8,13	8,27



Obr. 4-1/4-2: Pevnost v tahu za ohybu matrice U/M vyztužené aramidovými vlákny

Vyztužení aramidovými vlákny o délce 6,0 mm se při porovnání matrice U a M projevilo výrazným rozdílem hodnot pevností v tahu za ohybu. V rámci jedné matrice se hodnoty prakticky neliší, ale hodnoty matrice U jsou asi o 1/3 nižší než hodnoty matrice M. Způsob míchání nemá tedy významný vliv, za to je značný rozdíl mezi matricemi.

Aramidová vlákna délky 1,5 mm se projevila vyrovnanějšími hodnotami, ze kterých vyčnívá snad jen vzorek AU-S3/V4.

Při vyztužování aramidovými vlákny mají vlákna o délce 6,0 mm větší uplatnění z hlediska pevnosti v tahu za ohybu v matrici M, zatímco vlákna o délce 1,5 mm v matrici U.

PVA (polyvinylalkoholové) vlákno

Receptura

K vyztužení matrice bylo použito PVA vlákno (6,0 mm; 12,0 mm) v množství 1-2 % hm. suchých složek receptury U a receptury M (**PU** – receptura **U** vyztužená PVA vlákny, **PM** – receptura **M** vyztužená PVA vlákny).

Postup přípravy

Byly provedeny 2 postupy míchání.

Postup míchání **A**:

Do míchačky byly vpraveny suché složky a homogenizovány po dobu 2 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 2 minut. Nakonec byla do směsi vpravena PVA vlákna a kompletní směs homogenizována 4 minuty.

Postup míchání **B**:

Do míchačky byly vpraveny suché složky s PVA vlákny a homogenizovány po dobu 3 minut. Dále byla přidána záměsová voda obsahující plastifikátor a celá směs homogenizována po dobu 4 minut.

Tabulka 14: Přehled časových průběhů homogenizací (PVA vlákno)

A	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky	Záměsová voda s plastifikátorem	PVA vlákna
PU-V4, PM-V4	2	2	4
B	Doba homogenizace (minuty)		
	Suché složky s PVA vlákny	Záměsová voda s plastifikátorem	
PU-S3/V4, PM-S3/V4	3	4	

Tabulka 15: Výsledky zkoušení matrice U/M vyztužené PVA vlákny o délce 6,0 mm v množství 1%

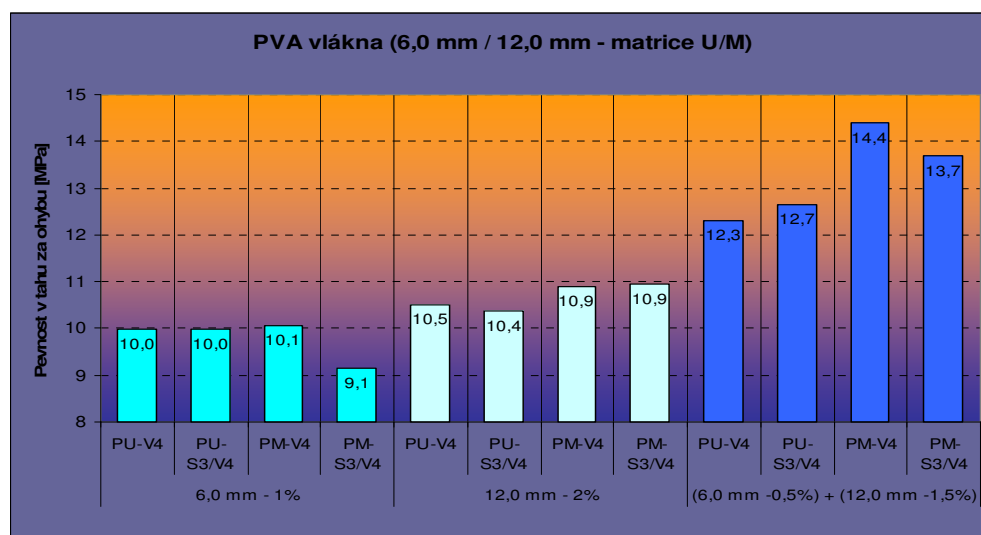
Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	PU-V4	PU-S3/V4	PM-V4	PM-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	9,98	9,99	10,06	9,14
Pevnost v rázu	kJ/m ²	2,37	2,18	2,18	1,95
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 068	2 093	2 078	2 113
Nasákavost	%	9,65	8,79	8,12	7,06

Tabulka 16: Výsledky zkoušení matrice U/M vyztužené PVA vlákny o délce 12,0 mm v množství 2%

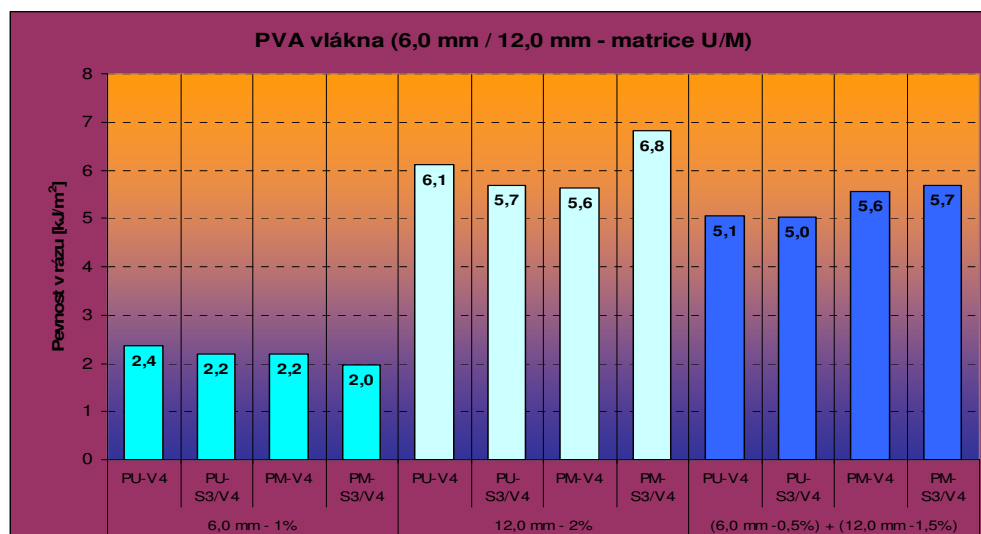
Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	PU-V4	PU-S3/V4	PM-V4	PM-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	10,52	10,37	10,90	10,94
Pevnost v rázu	kJ/m ²	6,12	5,69	5,64	6,81
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 098	2 077	2 079	2 072
Nasákavost	%	8,82	9,90	8,15	8,77

Tabulka 17: Výsledky zkoušení matrice U/M vyztužené PVA vlákny v kombinaci (6,0 mm v množství 0,5% a 12,0 mm v množství 1,5%)

Fyz.-mech.vlastnosti	Jednotky	PU-V4	PU-S3/V4	PM-V4	PM-S3/V4
Pevnost v tahu za ohybu	MPa	12,31	12,66	14,39	13,69
Pevnost v rázu	kJ/m ²	5,06	5,03	5,55	5,68
Objemová hmotnost	kg/m ³	2 064	2 080	2 080	2 091
Nasákavost	%	9,79	9,35	7,75	7,27



Obr. 5: Pevnost v tahu za ohybu matrice U/M vyztužené PVA vlákny



Obr. 6: Pevnost v rázu matrice U/M vyztužené PVA vlákny

Kombinace PVA vláken 6,0 mm a 12,0 mm se v matricích U a M ukázala jako příznivější z hlediska hodnot pevnosti v tahu za ohybu, než při použití vláken pouze jedné délky.

Z výsledků je také patrné, že hodnoty vzorků s vlákny 6,0 mm – 1,0% jsou téměř stejné jako hodnoty vzorků s vlákny 12,0 mm – 2,0%. Takže dvojnásobné množství vláken 12,0 mm se neprojevovalo výrazným nárůstem pevností v tahu za ohybu.

Pevnost v rázu je nejvyšší u vláken 12,0 mm, ale jen s malým odstupem je kombinace vláken. Za to vlákna 6,0 mm mají pevnost v rázu 2,5 – 3 x menší.

Nejvyšší hodnoty v obou pevnostních charakteristikách byly dosaženy u matrice M.

Závěr

Z výsledků zkoušení PVA vláken jednoznačně vyplývá, že užití kombinace těchto vláken má pozitivní dopad na vlastnosti obou matric v porovnání s vyztužením vlákny jednoho typu.

V některých případech vyztužení matric vlákny se nepotvrdil předpoklad zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností.

V dalším výzkumu se budeme zaměřovat právě na kombinace vláken, a to nejen různých typů, ale i druhů.

Tento příspěvek byl vypracován v rámci projektů:

1M06005 CIVAK – „Centrum integrovaného výzkumu anorganických kompozitů“

GAČR 103/06/1474 „Mechanické, vlhkostní a tepelné vlastnosti silikátových kompozitů s rozptýlenou výztuží“