

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební
Czech Technical University in Prague, Faculty of Civil Engineering

Ing. Jiří Kolísko , Ph.D.

Vliv krátkých všesměrně rozptýlených polypropylénových mikro a makrovláken na vlastnosti cementových malt a betonů.

Influence of short randomly distributed polypropylene micro and macro fibres on properties of cement mortars and concrete.

SUMMARY

Presented work deals with an influence of short polypropylene (PP) micro and macro fibres on resulting mechanic-physical qualities of cement mortars and concrete. At introductory chapters there is given a more general summarisation of knowledge and experience gained from literature and own experiments. Theoretical derivation of qualities of short – fibre composites with omni-directional orientation of fibres is very complicated. Even a remarkable progress in micromechanics modelling and computer simulation techniques, experiments are still needed to examine and prove final mechanic – physical properties of fibre reinforced cementitious materials.

At the work, the experimental program dealing with an influence of a few factors, such as dosage and type of fibres, treatment of test specimens and speed of loading on final qualities of the composite is presented in more details. Considerable attention is paid to experimental techniques of determination of deformation diagrams from bending test on beams, that enables to evaluate influence of fibres on pre-cracked and post-cracked stadium of cementitious composite. The influence of two types of short PP microfibrils (length 12 mm) on qualities of fine – grained cement mortar is presented in more details in experimental part of this work. Especially an influence on energy of rupture is analysed in more details. In the frame of suggested experimental program, possibilities of measuring and evaluating of energy of rupture not only from deflection of specimens (δ diagram), but also from crack opening (CMOD diagram) were verified successfully. Simultaneously it was managed to gain and evaluate stress-strain diagrams of bending tests with high speed of loading, where the time up-to reaching of maximum strength is 0,5- 1 sec.

SOUHRN

Předkládaná práce se zabývá vlivem krátkých polypropylénových (PP) mikro a makrovláken vláken na výsledné mechanicko-fyzikální vlastnosti cementových malt a betonů. V úvodních kapitolách je provedeno obecnější shrnutí poznatků a zkušeností získaných z literárních pramenů a z vlastní experimentální praxe. Teoretické odvozování vlastností krátko-vláknových kompozitů s všesměrovou orientací vláken, a to ještě v malém množství, je značně komplikovanou záležitostí. Přes zjevný pokrok v technikách mikromechaniky a počítačových simulacích se při návrhu a hodnocení vláknocementových kompozitů stále nelze obejít bez využití experimentálních postupů pro vyšetření jejich konečných mechanicko-fyzikálních vlastností.

Z literárních rešerší a na příkladech vlastních experimentálních programů jsou rozebírány faktory jako tvar vlákna, dávkované množství, ošetřování zkušebních těles, atd. mající vliv na výsledné chování kompozitu. Velká pozornost je věnována postupu objektivního popisu přínosu vláken k chování vláknového kompozitu před a po vzniku trhlin. Jedná se o metodu měření pracovních diagramů ohybových zkoušek na trámčích a následné vyhodnocení těchto diagramů. V experimentální části je podrobněji sledován vliv dvou typů krátkých PP mikrovláken délky 12 mm na vlastnosti jemnozrnné cementové malty a zejména lomové vlastnosti kompozitu. V rámci navrženého experimentálního programu byly úspěšně ověřeny možnosti měření a vyhodnocení lomové energie nejen z průhybu zkušebního vzorku, tj. z δ diagramů, ale také obdobně z rozvětvení trhliny z diagramů CMOD. Současně se podařilo experimentálně získat a vyhodnotit pracovní diagramy ohybových zkoušek s vysokou rychlostí zatěžování, kdy doba do dosažení maximální síly je 0,5-1 s.

OBSAH:	str.
1. Úvod	5
2. Dělení vláken	5
3. Vyztužování malt a betonů krátkými vlákny	6
4. Princip omezení vzniku a šíření trhlin	9
5. Polypropylénová vlákna (PP vlákna)	10
6. Omezení vzniku trhlin	15
6.1. Trhliny v plastickém stavu směsi	15
6.2. Omezení trhlin v zatvrdlém stavu hmoty-zkouška lomové energie ..	16
6.3. Lomová energie jemnozrnného kompozitu s PP mikrovlákny	17
7. Shrnutí	22
8. Literatura.....	23
9. Osobní údaje	24

1. ÚVOD

Aplikace všesměrně rozptýlených krátkých vláken jako výztuže ve stavebních hmotách není technologie nová. Používání rostlinných stonků či vláken přírodního původu, zvířecích chlupů, lidských vlasů atd., lze zaznamenat u nejstarších známých kultur. Zmiňme například podkladní omítky nástěnných maleb domů katastrofou stížených Pompejí a Herkulánea, které obsahují zvířecí chlupy. Jistě také nelze opomenout všeobecně známé nepálené hliněné cihly "vepřovice", do kterých byly přimíchávány sekané stonky rostlin.

Díky rozvoji moderních technologií a materiálů naše doba uchopila starý osvědčený princip novým způsobem. Nepřeberná škála nových syntetických materiálů různých specifických vlastností umožňuje připravit a vyrobit vlákna, jejichž vlastnosti i aplikační možnosti se diametrálně liší. Při úvahách o vhodnosti a přínosech všesměrně rozptýlených vláken je nutno si položit následující otázky:

- a) Proč je výhodné a smysluplné aplikovat jakákoli krátká všesměrně rozptýlená vlákna do malt a betonů.
- b) Jaké je postavení polypropylénových mikro a makrovláken ve velké škále vláken používaných pro všesměrné vyztužování.
- c) Jakým způsobem objektivně hodnotit přínos všesměrně orientovaných vláken k mechanickým vlastnostem kompozitů.

2. DĚLENÍ VLÁKEN

Vlákna jsou v maticích ze silikátových poživ, jako je cement či vápno, používána k různým účelům. Je velký rozdíl mezi užitím přírodních azbestových vláken v azbestocementových výrobcích s obsahem vláken V_f až 10 % objemu matrice, skládající se převážně z cementu, a používáním polypropylenových mikrovláken s dávkováním cca 0,1% objemu do běžného betonu či malty. Rozdíl je v typu vláken, v materiálu, z něhož jsou vlákna vyrobena a zejména ve funkci vlákna. Vlákna lze dělit podle různých kritérií.

A) Jedno ze základních je dělení vláken dle zdroje a procesu výroby na:

1. přírodní
 - organická (buničina, stvoły rostlin, hobliny, piliny, dřevěné třísky, sisál, vlákna z kokosových ořechů, atd.),
 - anorganická (azbest),
2. syntetická
 - organická (celulosaová vlákna, vlákna ze syntetických polymerů, atd.),
 - anorganická (vlákna skleněná, ocelová, z ostatních kovů, speciální).

B) Kompozitní hmoty složené z matrice a vláken lze, dle způsobu aplikace vláken, rozdělit na:

- Ø kompozity dlouhovláknové ⇒ s jednosměrovou orientací,
⇒ s vícesměrovou orientací,
- Ø kompozity krátkovláknové ⇒ s přednostní orientací,
⇒ s všesměrovou orientací.

Příkladem dlouhovláknového cementového kompozitu mohou být klasické železobetonové prvky (trámy, desky, sloupy), kde výztužné pruty tvoří usměrněná dlouhá vlákna. Jako krátkovláknové cementové kompozity lze zmínit např. azbestocementové prvky, cementotřískové desky (Heraklit, CIDEM), beton vyztužovaný krátkými vlákny z ocele (drátkobeton), polypropylénu nebo alkalirezistentního skla.

C) Dělení dle průměru na:

- Ø mikrovlákna ⇒ průměr < 300 μm,
- Ø makrovlákna ⇒ průměr > 300 μm.

Do klasických maltových a betonových směsí se jako krátkovláknové vyztužení v běžné stavební výrobě v současné době v největší míře používají mikro i makro vlákna ocelová, skleněná alkalirezistentní (ARS), syntetická organická (propylénová, celulózová).

Mimo informací o těchto vláknech je možné narazit v současnosti také na experimentální data o cementových kompozitech s vlákny speciálnějšími jako jsou vlákna uhlíková, nylonová, hliníková, polyetylénová, PVA, whiskery.

3. VYZTUŽOVÁNÍ MALT A BETONŮ KRÁTKÝMI VLÁKNY

Vlastnosti jakýchkoliv kompozitů obecně závisí na vlastnostech složek, na jejich rozložení a vzájemné fyzikální či chemické interakci. Změníme-li některé proměnné kompozitního systému, jako je např. relativní objemové zastoupení složek, jejich vlastnosti či technologii výroby, je třeba nových měření, která jsou obvykle časově i finančně náročná. Proto je vhodné užívat teoretických a semiempirických metod k predikci vlastností, závislých na velkém počtu proměnných kompozitního systému.

Všesměrně vyztužený krátkovláknový kompozit, kterým se zabývá tato práce, je jednou z nejkomplicovanějších forem. Přesné a jednoznačné teoretické řešení této problematiky je obtížné. *S ohledem na řadu proměnných ve skladbě kompozitů je stále nezbytné jejich vlastnosti stanovit experimentálně.*

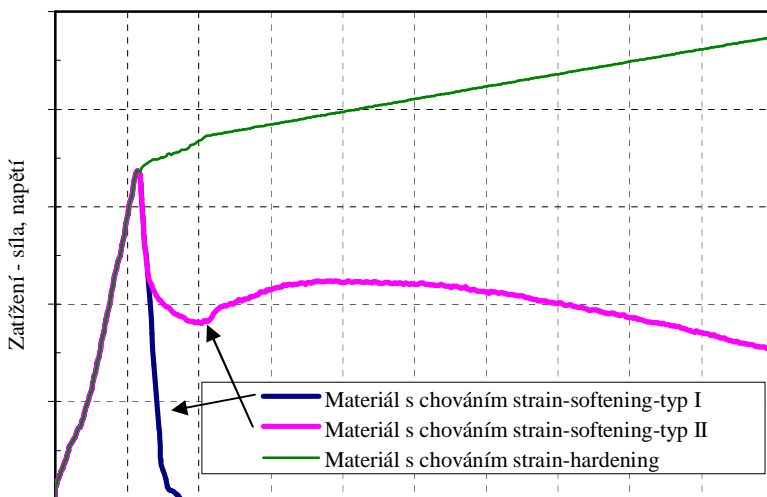
Obecně je přítomnost krátkých vláken v maltové či betonové směsi spojována se zlepšením méně příznivých mechanicko-fyzikálních vlastností

těchto hmot, jako jsou objemové změny během tuhnutí a tvrdnutí, malá pevnost v tahu a křehkost. Mechanické chování cementových kompozitů (betony, malty) vyjádřené pracovními diagramy zkoušek v tahu či ohybu (viz obrázek 1), a to jak s vlákny, tak bez nich, lze rozdělit minimálně na dvě fáze.

- 1) Fáze I - je před vznikem trhliny a dosažením jakési hranice pseudo-plasticity, tj. „meze kluzu“.
- 2) Fáze II - po vzniku trhliny, tj. po dosažení „meze kluzu“, kdy dále dochází k výraznějšímu rozvoji deformací v závislosti na působícím zatížení.

Podle toho, jakým způsobem materiály odolávají mechanickému namáhání po dosažení meze plasticity (vznik trhliny, smluvená deformace či výrazná oblast plasticity = meze kluzu), hovoříme o kompozitech:

- a) s chováním strain-softening, kdy dochází k tzv. „změkčení“ materiálu a poklesu odolnosti materiálu přenášet zatížení - typický materiál je beton a cementové materiály, včetně valné většiny cemento - vláknových kompozitů,
- b) s chováním strain-hardening, kdy dochází ke zpevnění a dalšímu nárůstu pevnosti odolnosti - typický materiál je např. ocel nebo i tzv. ECC kompozity.



Přetvoření - průhyb, protažení, rozevření trhliny

Obr. 1. Schématické znázornění charakteristických pracovních diagramů zkoušky v prostém tahu nebo zkoušky v ohybu pro chování materiálů způsobem strain-hardening a strain-softening

Běžně je používání rozptýlených vláken spojováno s představou o zpevnění vyztužované matrice (strain – hardening viz obr. 1.), a proto se o tomto zpevnění hovoří jako o "vláknovém vyztužení". **Jenže v rozhodující většině aplikací vláken v maltách a betonech tomu tak není.** Jestliže slovo "vyztužení" užíváme pro funkci oceli v tradičním železobetonu, nebo pro funkci vláken v laminátových plastech, pak je u vláken použitých v rozptýlené formě v materiálech jako je beton a malta toto označení trochu matoucí. Běžné aplikace různých typů vláken (ocelových, skleněných a polypropylénových) při obvyklém dávkování V_f od 0,1 do cca 1% objemu v maltách a betonech je vhodné spíše chápat jako aditivum, jehož úkolem je změnit celkově užité charakteristiky betonu či malty, nikoliv však jako prvek rozhodujícím způsobem přispívající ke zvýšení tahové pevnosti nebo odolnosti vůči statickému namáhání.

Omezená účinnost vláken, tzn. že vlákna nemohou být využita k výraznému zvýšení výsledné pevnosti malty a betonu v tradičním smyslu slova, je dána zejména následujícími faktory:

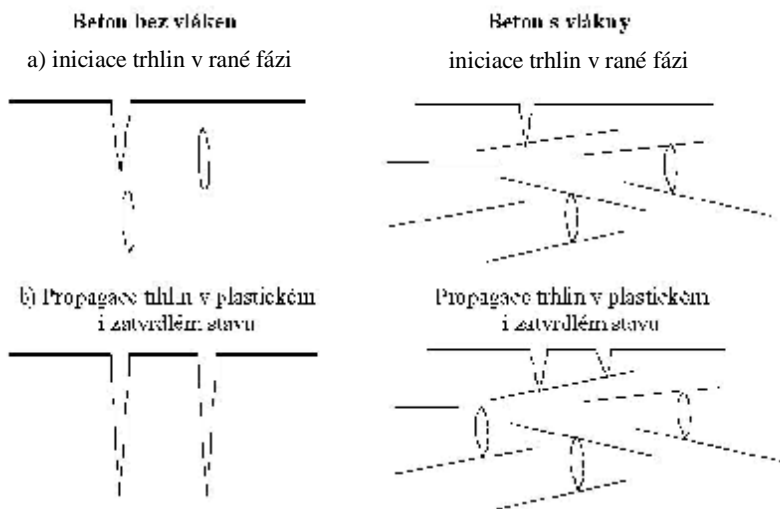
- a) **Orientací vláken** - U všesměrně orientovaných vláken v trojrozměrném prostoru působí jen jedna třetina ve směru namáhání. Zjednodušeně to znamená, že zbývající 2 třetiny nepůsobí a jsou prakticky neefektivní.
- b) **Objemovým podílem vláken** - S ohledem na zpracovatelnost výsledné směsi není racionální ani možné přidávat vlákna nad určitý objem v matrici. Tento objem závisí zejména na typu a rozměrech vláken. Obecně však platí, že maximální objem vláken pro aplikace do betonů a malt aby byly zpracovatelné běžnou technologií je V_f do cca 1 max. 2 % celkového objemu matrice.
- c) **Ekonomickým faktorem** - I jedno objemové procento například ocelových vláken (cca 78,5 kg/m³) je přibližně stejně drahé jako beton či malta, do které jsou aplikována.

Vyztužení vláknem, která by kvůli svým charakteristikám, jako je pevnost, tažnost, modul pružnosti, soudržnost s matricí, výrazněji přispívala ke zvýšení tahové pevnosti betonu, je u trojrozměrně orientovaných vláken v matrici prakticky dosažitelné za značně vysokých nákladů. **Toto konstatování v zásadě platí bez ohledu na materiál, z něhož jsou vlákna vyrobena.** Současně si je nutno uvědomit, že příspěvek jakéhokoliv typu vláken k výsledným parametrům hmoty je závislý na poměru modulů pružnosti vláknem a betonu či malty. Poměry modulů pružnosti aplikovaných vláken a vyztužovaných betonů E_f/E_b mohou být různé, a to větší či menší než 1. Je zřejmé, že při poměru $E_f/E_b < 1$ přínos k pevnosti hmoty při

statickém zatížení nemůže být výrazný a zásadní. Proč má tedy smysl aplikovat rozptýlená vlákna do betonů a malt?

4. PRINCIP OMEZENÍ VZNIKU A ŠÍŘENÍ TRHLIN

Slabinou všech cementových materiálů (betonu, malt) způsobující snížení pevnosti (a mnohdy i úplné selhání) je vznik mikrotrhlin a trhlin v jejich struktuře. Náchylnost na vznik trhlin ve struktuře i bez externích statických namáhání pouze procesem vytvrzování je u cementových materiálů jejich integrální vlastností. Přítomnost trhlin lze bohužel předpokládat v každém betonu a jejich velikost a frekvence má vliv na pevnost a trvanlivost cementových hmot v celém jeho objemu. Proto má zabránění jejich vzniku a šíření velký praktický význam. A co je velmi důležité, ve všech směrech materiálu. Klasická výztuž je schopna tohoto efektu dosáhnout velmi omezeně. Tento fakt je patrně také hlavním důvodem, proč se praktické užívání vláken rychle zvyšuje. Tohoto výsledku však není dosaženo pomocí konvenčně chápaného vyztužovacího účinku, nýbrž tím, že vlákna omezí ve hmotě betonu či malty vznik a šíření trhlinek, a to zejména v rané fázi výroby hmoty (v době po uložení materiálu). Princip působení rozptýlených vláken na omezení vzniku trhlin je zjednodušeně znázorněn na obr . 2.



Obr.2. Schématické znázornění vlivu vláken na omezení vzniku a propagaci mikrotrhlin a následných makrotrhlin

Z výše uvedeného lze odvodit, že funkce všesměrně orientovaných vláken v betonu spočívá zejména v limitování vzniku trhlinek a nikoli v klasickém vyztužení. Platí to i v případě ocelových a skleněných vláken, kdy může být získán materiál s určitým zvýšením tahových pevností 2 až 3x. Jakmile trhliny vznikají, začne se na vlákna, směřující napříč trhlinami, přenášet tahové napětí. Vlákna tak působí přímo ve směru namáhání a faktor orientace vláken ztrácí svůj omezující účinek.

Pro posouzení účinnosti vyztužení, s ohledem na omezení vzniku trhlin ve všech fázích stavu betonu či malty, tj. v plastickém stavu nebo v zatvrdlém stavu, je nutno vzít v úvahu následující vlivy:

- a) celkový objem dávkovaných vláken V_f ,
- b) tvarové charakteristiky vláken, tj. průměr (d_f) a délku (l_f) a štíhlostní poměr $I = l_f / d_f$,
- c) soudržnost vláken s vyztužovanou maticí, která je vyjádřena např. smykovým napětím na rozhraní vlákno X matrice t ,
- d) poměry modulů pružnosti vláken a matrice E_f/E_m ,
- e) mechanické vlastnosti vláken jako je pevnost R_f a tažnost A_f ,
- f) rovnoměrnost rozptýlení a rozdělení vláken,
- g) složení a mechanické vlastnosti cementové matrice – pevnosti a lomové vlastnosti matrice.

Při hodnocení těchto vlivů je nutno si uvědomit, že parametry v bodech c), d) a g) jsou proměnné v čase s vývojem pevností cementové matrice.

5. POLYPROPYLENOVÁ VLÁKNA (PP VLÁKNA)

Polypropylénová vlákna tvoří významnou skupinu materiálů používaných pro rozptýlenou výztuž. Chemické složení polypropylénu je $(C_3H_6)_n$. Nahlédneme-li do různých článků a studií, zjistíme, že uvádějí zejména následující přínosy aplikování krátkých vláken a tudíž i PP vláken do malt a betonů:

- Ø omezení vzniku a rozvoje plastických smršťovacích trhlin v počátečních tuhnutí a tvrdnutí cementových matic,
- Ø omezení vázaných objemových změn a vznik trhlin při vysychání,
- Ø zvýšení reziduální duktility vlákny vyztuženého kompozitu a odolnosti proti rázům.

Z omezení vzniku trhlin lze dále odvozovat, že v důsledku snížení počtu trhlin dochází ke zlepšení mrazuvzdornosti, snížení permeability a zvýšení vodonepropustnosti, a že přítomnost vláken pozitivně ovlivňuje zvýšení odolnosti proti rázům a zvýšení lomové houževnatosti. V posledních letech se objevují informace o velmi pozitivním vlivu

polypropylénových mikrovláken na odolnost betonu proti působení vysokých teplot. Důležitou uváděnou skutečností je, že PP vlákna v dávce do 1 % neovlivňují výrazným způsobem pevnosti v tlaku a tahu betonů a malt. Tato skutečnost vyplývá zejména z toho, že poměr modulu pružnosti PP vlákna a cementové matrice E_f/E_m je < 1 (cca 0,1-0,5) a dále, že celkový objem vláken V_f je relativně malý.

V současnosti jsou pro vyztužování cementových matric, malt i betonů běžně užívána vlákna PP tří typů, které se liší způsobem výroby:

- a) **vlákna monofilamentní**- jsou vyráběná rozvlákněním z taveniny, protlačováním tryskou do vzduchu; produktem jsou mikrovlákna od 15 do cca 40 μm (Foto 1) i makrovlákna průměru od 300 μm až do 1 mm (Foto 2),
- b) **vlákna fibrilovaná** - vyráběná fibrilací (rozvlákněním) předepnuté fólie (Foto 3),
- c) **vlákna sdružená** - vytvořená složením z jednotlivých vláken, která vznikla výrobními postupy uvedenými v bodech a) nebo b) (Foto 4).

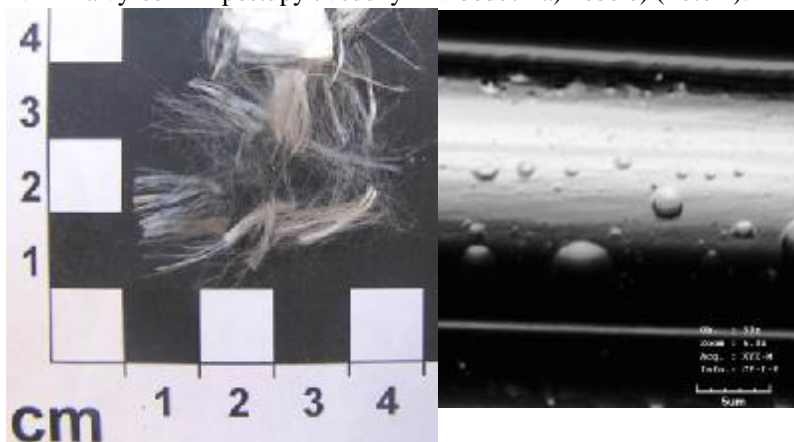


Foto 1. Celkový pohled na monofilamentní PP mikrovlákno délky 12 mm a zvětšený povrch vlákna pod konfokálním rastrovacím mikroskopem LEXT OLS 3000. Povrch vlákna je relativně hladký. Výstupky na povrchu jsou kapičky povrchové úpravy lubrikační pro lepší smáčení vodou.

Pro vyztužování malt a betonů je v současnosti běžně používán typ monofilamentních mikrovláken s průměrem do cca 40 μm . Tato mikrovlákna se vyznačují vysokou jemností. Mají velký měrný povrch a vysoké množství vláken ve hmotnostní jednotce (řádově stamiliony 12 mm dlouhých vláken v 1 kg). To je z hlediska účinnosti vláken velmi výhodné,

zejména v plastickém stavu směsi. K dosažení požadovaného účinku mikrovýztuže je třeba poměrně malé dávky těchto vláken (obvyklá dávka $V_f < 0,1\%$ objemu tj. $0,6-0,9 \text{ kg/m}^3$) a jejich aplikace se tím stává ekonomicky přijatelnou. Příspěvek k reziduální pevnostem materiálu ztvrdlého materiálu po vzniku trhliny je však zanedbatelný.

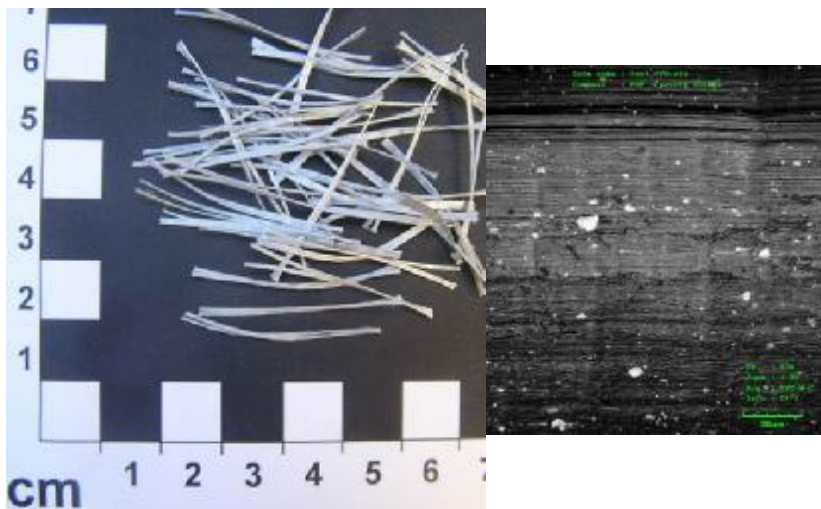


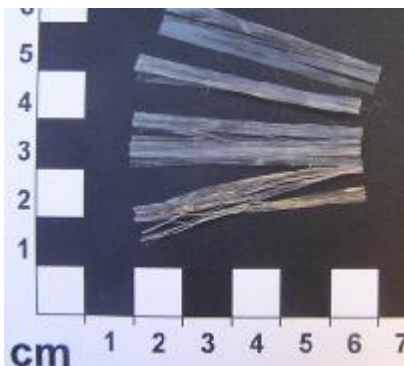
Foto 2. Celkový pohled na monofilamentní PP makrovlákno BENESTEEL 50/35 a zvětšený povrch vlákna pod konfokálním rastrovacím mikroskopem LEXT OLS 3000. Na povrchu jsou charakteristické prvky zdrsnění.

Monofilamentní makrovlákna mají díky větším průměrům a obvykle strukturovanému povrchu (Foto 2) relativně lepší soudržnost s cementovým tmelem a jejich dostatečné množství (cca již obsah $V_f = 0,5\%$ objemu tj. $4,5 \text{ kg/m}^3$) významně přispívá ke reziduální pevnosti vláknových betonů po vzniku trhliny. Tento typ makrovláken v současnosti postupně nalézá uplatnění při aplikacích zahrnující i částečné statické namáhání obdobně jako vlákna ocelová u desek podlahových konstrukcí. Proto se pro tento typ polypropylénových vláken v posledních letech začalo používat také označení SSF vlákna, tj. Structural Syntetic Fibres. Toto označení však může zahrnovat i vlákna na jiné materiálové bázi než je polypropylen.

Vlákna fibrilovaná se vyrábějí rozvláknováním upravené plastové fólie (tl. cca $40 - 200 \mu\text{m}$), která sama o sobě v průběhu zpracování získá fibrilní (vláknitý) charakter (Foto 3).



PP vlákna Crackstop-12 mm



PP pásky Forta Ferro ECO – 56 mm

Foto 3. Celkový pohled na dva typy PP fibrilovaných vláken.

Vlákna sdužená jsou vlákna vyrobená výše uvedenými technologiemi a jejich dalším sdužováním a vytvořením svazků, které pak označujeme jako vlákna sdužená. Obvykle se pak jedná o makrovlákna s průměrem $> 0,3$ mm (Foto 3).



Foto 3. Celkový pohled na sdužená PP vlákna vlevo složená sdužením PP makrovláken Forta Ferro (vpravo) délky 56 mm

V tabulce 2 jsou shrnuty základní mechanicko-fyzikální vlastnosti nejen PP ale i dalších vláken. Uváděné hodnoty jsou orientační v tom smyslu, že aktuální parametry vláken jsou závislé na konkrétním producentovi a jím použité technologii výroby vláken.

Tabulka 2: Vybrané charakteristiky různých typů vláken

Materiál vlákna	Pevnost v tahu [MPa]	Modul pružnosti [GPa]	Protahení při přetržení tažnost [%]	Průměr vlákna [μm]	Hustota [kg/m^3]
PP – vlákna	200 - 700	3,5 - 18	5 - 40	10 - 300	910
Skleněná vlákna	1500 - 3600	60 - 90	2 - 4	10 - 15	2700
Ocelová vlákna	1500 - 3800	170 - 300	1 - 2	100 - 600	7850
Uhlíková vlákna	1700 - 3500	200 - 700	2 - 4	15 - 200	1900-2100
PVA vlákna	1600 - 2500	40-60	cca 6	14-40	1300

Samotný polypropylén, ze kterého jsou vlákna vyrobena, má následující charakteristické vlastnosti:

- Ø Je dlouhodobě odolný vůči většině kyselin a alkálií. Na polypropylén působí agresivně vysoce oxidačně působící chemikálie jako hydroperoxid, kyselina dusičná, halogeny atd., a také organická rozpouštědla, jejichž báze obsahuje chlor.
- Ø Polypropylén dobře odolává biologickému působení.
- Ø Nasákavost je nulová, takže jeho vlastnosti jsou jak ve vysušeném, tak ve vlhkém stavu srovnatelné.
- Ø Je dobrý elektrický izolant.
- Ø V průběhu zahřívání dochází u polypropylénových vláken k silné kontrakci. Maximální teplota pro aplikaci vláken je 130 - 140°C .
- Ø Teplota měknutí polypropylénu je 140 - 160°C.
- Ø Teplota tavení polypropylénu je 165 - 175°C.
- Ø Bod varu je 590°C.
- Ø Měrné teplo je $1,7 \cdot 10^3 - 2,1 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.
- Ø Tepelná vodivost je $0,08 - 0,11 \text{ J} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

6. OMEZENÍ VZNIKU TRHLIN

6.1. Trhliny v plastickém stavu směsi

Rada praktických aplikací u konstrukcí typu jako betony pro podlahy, sanační malty na beton, stříkané betony dokonce i sírobeton (pojivo roztavená síra) apod., potvrzují přínos vláken ke zlepšení výsledných užitných vlastností kompozitů.

Trochu paradoxní je skutečnost, že pro kvantifikaci přínosu, tj. omezení vzniku smršťovacích trhlin v plastickém stavu betonu či malty a omezení vzniku a šíření trhlin v zatvrdlé hmotě betonu a malty, chybí jednoduché normované, či jiným způsobem podchycené, zkušební postupy, které by jednoznačně stanovily, o kolik bylo co zlepšeno a tedy jakým způsobem optimalizovat typ a množství dávkování vláken. Stanovení účinnosti lze provádět na tělesech simulujících tzv. vázané smršťění, jak je prezentováno na následující fotografii.

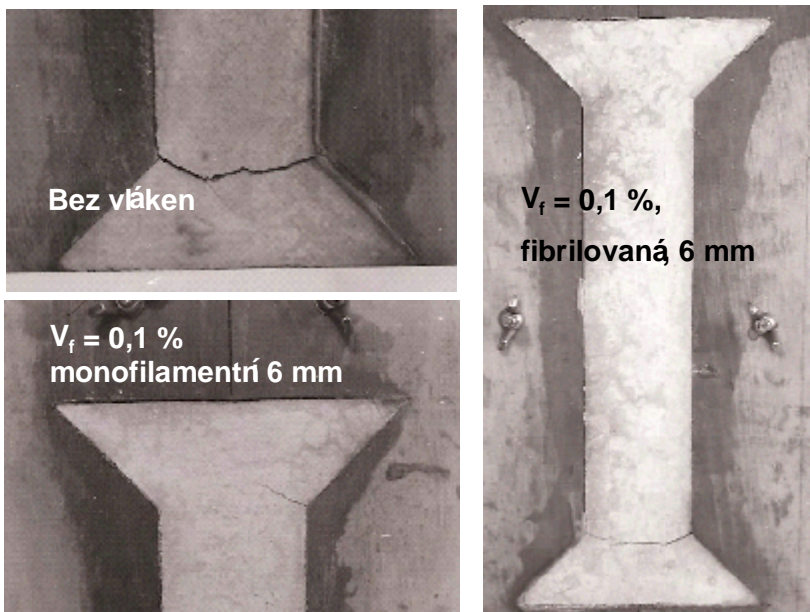
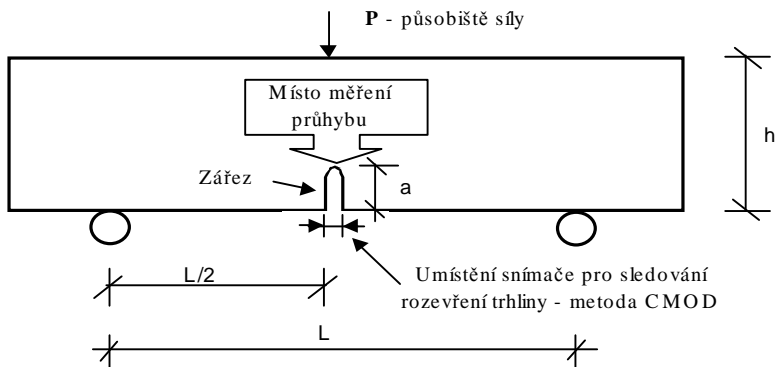


Foto 4. Srovnávací test vázaného smršťění jemnozrné malty stejného složení v plastickém stavu pro dva různé typy PP vláken a směsi bez vláken a s dávkou $V_f = 0,1\%$ objemu.

6.2. Omezení trhlin v zatvrdlém stavu hmoty- zkouška lomové energie

Vyztužení vlákný obecně může mít nezanedbatelný pozitivní vliv na zvýšení duktility, celkové houževnatosti materiálu a omezení vzniku a šíření trhlin v zatvrdlém stavu hmoty. Experimentálně stanovený pracovní diagram δ (průhyb) a hodnota lomové energie G_f jsou jednou z mála dostupných možností, jak tuto vlastnost materiálu exaktně charakterizovat. Stanovování lomových vlastností betonu a malt je experimentálně náročná oblast. Přínosem pro stanovování lomových charakteristik jsou nové experimentální přístroje, které umožňují sledování průběhu přetváření těles při rozdílných způsobech zatěžování a rychlostech zatěžování, a to i velmi vysokých, blížících se rázovému namáhání.

Klasickým způsobem stanovení lomové energie cementových kompozitů je ohybová zkouška trámce (viz obrázek 3). Trámce obvykle mají ve středu rozpětí inicializační zářez. Klasickou metodu jejího stanovení je zkušební postup dle doporučení RILEM z roku 1985, jehož principy jsou dále aplikovány v předpisech RILEM TC 162 [13]. V průběhu zkoušky je snímán průhyb trámce ve středu rozpětí v závislosti na síle. Stále častěji se však v publikacích i předpisech, které se zabývají touto problematikou, objevuje přímé měření rozevírání trhliny a hovoříme o tzv. CMOD metodě (Crack Mouth Opening Diagram).



Obr. 3. Schématické znázornění uspořádání zkoušky lomové energie

V doporučení RILEM [12] je lomová energie vyjadřující potřebné množství práce k šíření trhliny v dané ploše průřezu definována vztahem:

$$G_f = \frac{W_0 + m \cdot g \cdot d_0}{b \cdot (h - a_0)} \quad (1)$$

kde G_f - je hodnota lomové energie (J/m^2),
 W_0 - plocha vymezená pracovním diagramem a osou znázorňující průhyb (J),
 m - hmotnost tělesa mezi podporami (kg),
 g - tíhové zrychlení ($9,806 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$),
 d_0 - maximální průhyb (m),
 b, h - příčné rozměry trámce (m),
 a_0 - hloubka zářezu (m).

Zjednodušeně formulováno - velikost lomové energie G_f vyjadřuje jednotkové množství energie (práce) nutné ke vzniku a šíření trhliny. Lomovou energii definovanou dle vzorce 1 je možné stanovit pro celý průběh pracovního diagramu nebo jen pro jeho určitou část, např. do místa maximální síly (tj. do okamžiku před vznikem trhliny), či do úrovně zvolené reziduální síly na klesající větvi diagramu, případně pro zvolenou deformaci např. násobku deformace při dosažení maximální zatěžovací síly. Vyšší velikost lomové energie znamená zvýšenou odolnost materiálu vůči vzniku trhlin a jejich šíření.

6.3. Lomová energie jemnozrného kompozitu s PP mikrovlákný

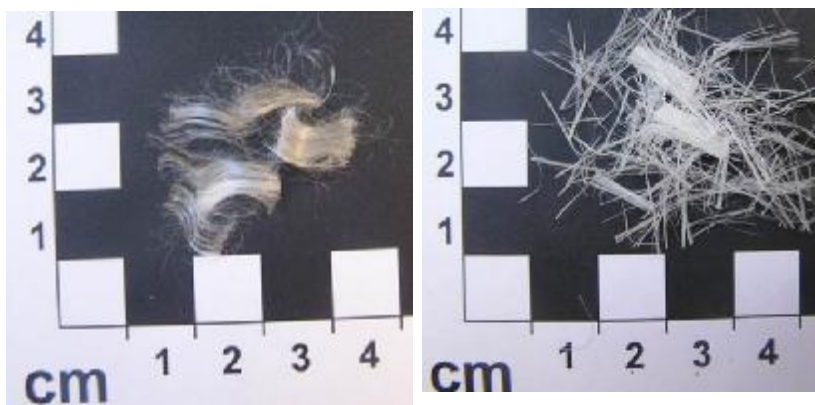
S přihlédnutím k experimentálním možnostem laboratoří KU (vysoce sofistikovaný systém MTS) byl pro jemnozrný kompozit navržen experimentální program, jehož hlavními cíli bylo:

1. Ověřit možnost experimentálního vyšetřování lomové energie pro vysoké rychlosti zatěžování zkušebních těles.
2. Sledovat vliv proměnného dávkování různých typů PP vláken na lomovou energii modelového, cementem pojeného, kompozitu.
3. Sledovat vliv rychlosti zatěžování na lomovou energii modelového, cementem pojeného, kompozitu, obsahujícího PP vlákna.
4. Sledovat vliv ošetřování na lomovou energii modelového, cementem pojeného, kompozitu.

V rámci prováděných experimentů byly současně vyhodnocovány i další vlivy vláken na charakteristiky kompozitu, jako jsou pevnosti v tahu za ohybu a tlaku a objemové hmotnosti. Zkoušky byly prováděny na sérii 7 modelových jemnozrných malt, jejichž složení a označení je v následující tabulce 3.

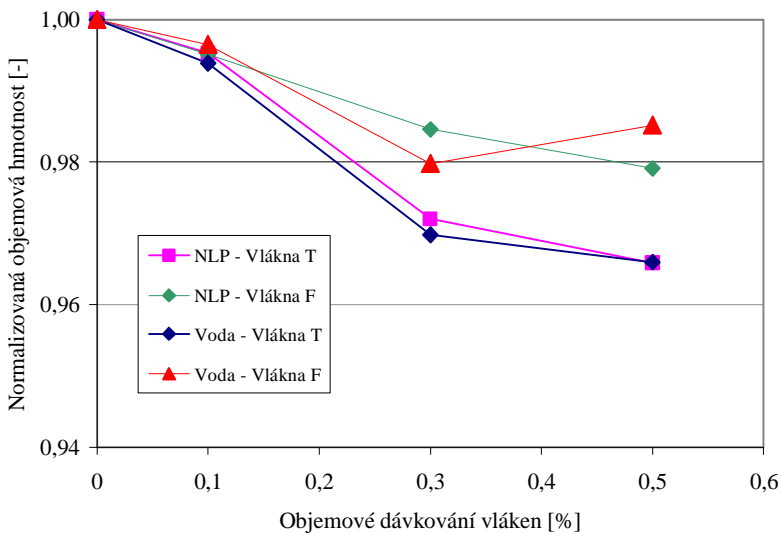
Tabulka 3. Poměry míšení složek modelových malt

Dávkovaná složka	Označení směsi a podílové dávkování složek						
	O	T1	T3	T5	F1	F3	F5
Cement CEM I 42,5	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Písek I – ČSN EN 196-1	1	1	1	1	1	1	1
Písek II -ČSN EN 196-1	1	1	1	1	1	1	1
Písek III -ČSN EN 196-1	1	1	1	1	1	1	1
PP vlákna-lubrikovaná 12 mm, průměr 32 μm [% objemu]		0,1	0,3	0,5			
PP vlákna- nelubrikovaná 12 mm, rozměry 30 μm x 100-200 μm, [% objemu]					0,1	0,3	0,5
Vodní součinitele v/c	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

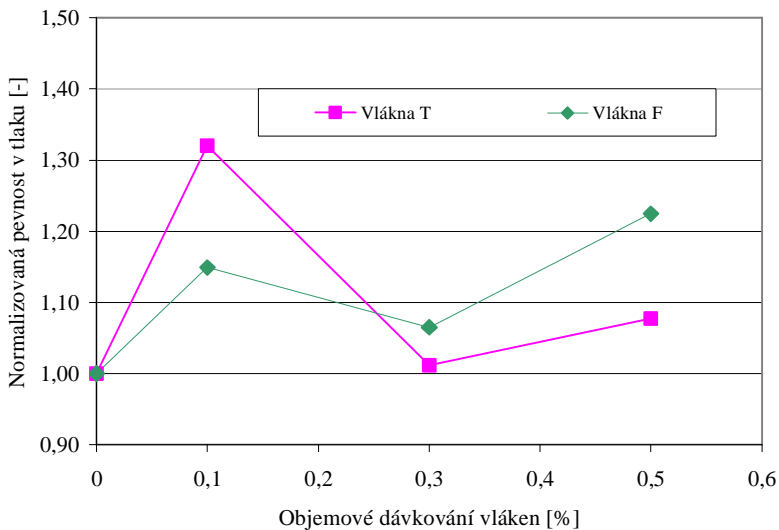
**Foto 5. Celkový pohled na aplikovaná vlákna**

Z modelových směsí byly vyrobeny sady zkušebních těles - trámečků 40x40x160 mm. Pro každou skladbu záměsi bylo vyrobeno vždy 18 trámečků. 9 těles bylo uloženo do vody (20°C±2°C) a 9 těles bylo uloženo na vzduchu v laboratoři (NLP 20°C±2°C a rel. vlhkost vzduchu 50 %±10 %). V čase 28 –30 dní po výrobě pak byly provedeny na každém zkušebním trámečku následující zkoušky:

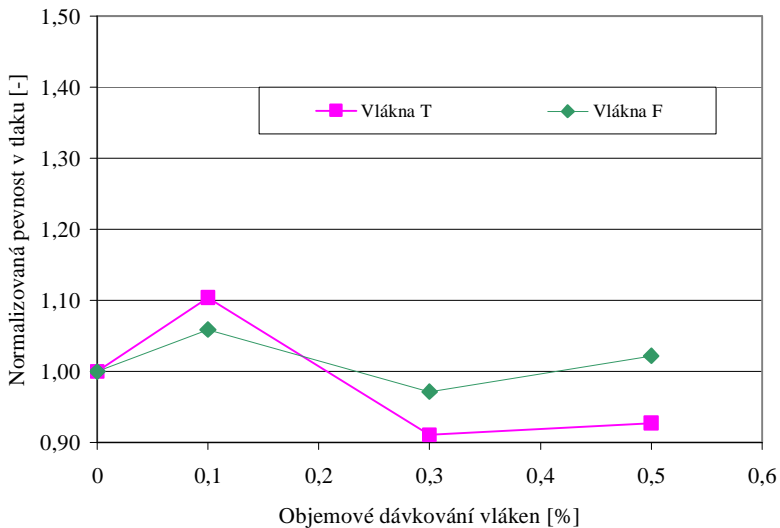
1. stanovení objemové hmotnosti - vážením a měřením,
2. zkouška lomové energie – tříbodový ohyb na trámečcích s vrubem,
3. zkouška pevnosti malt v tlaku. - na zlomcích trámečků ze zkoušky lomové energie.



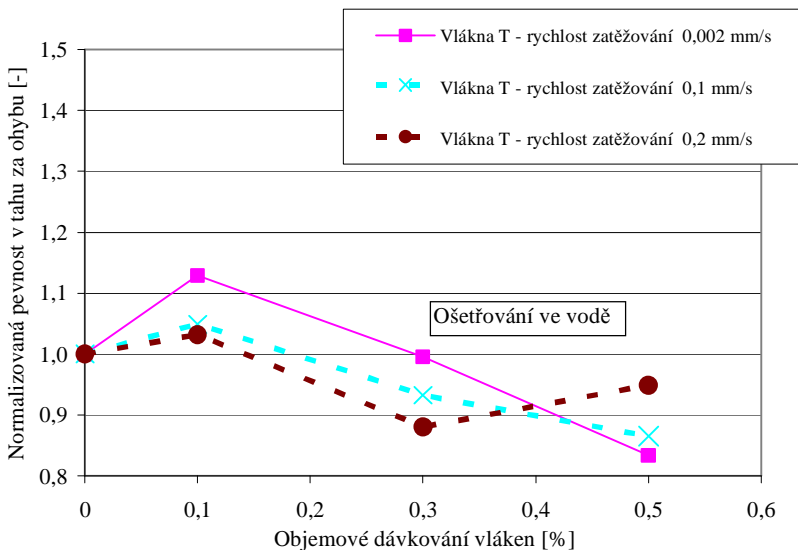
Obr. 3. Normalizovaná závislost objemové hmotnosti na typu a dávkování vláken - ošetřování na vzduchu (NLP) i ve vodě



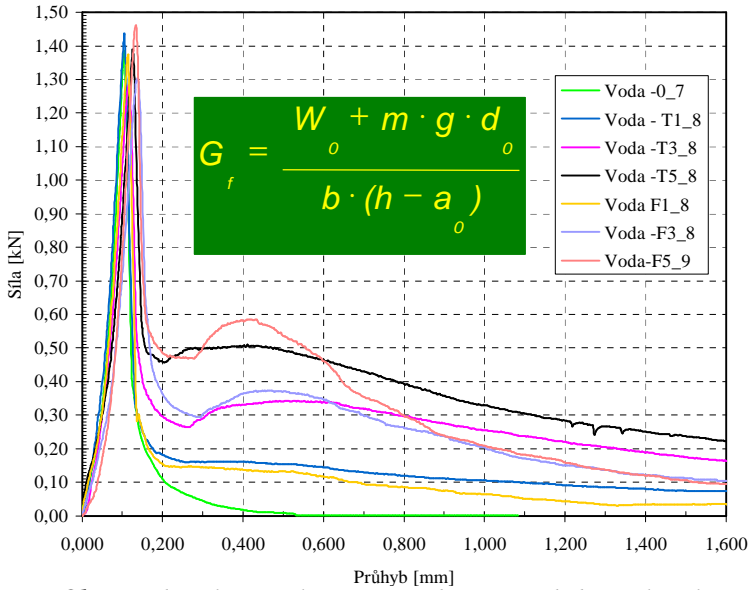
Obr. 4. Normalizovaná závislost pevnosti v tlaku na typu a dávkování vláken - ošetřování na vzduchu (NLP)



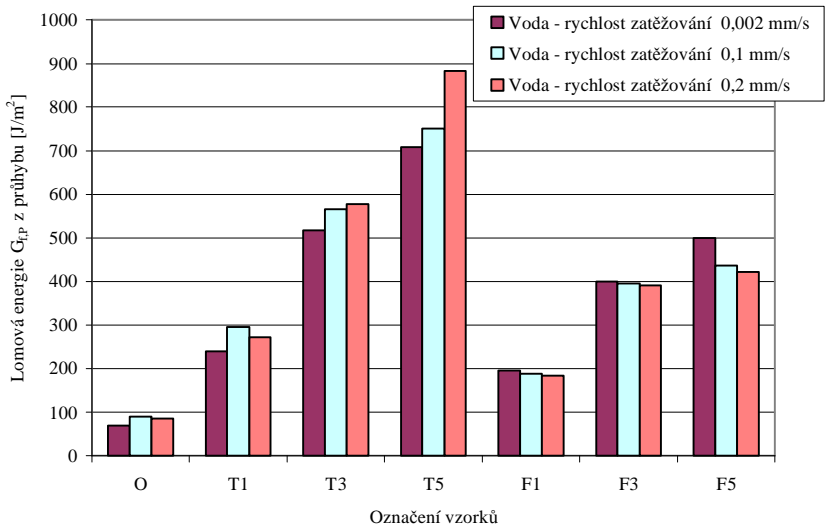
Obr. 5. Normalizovaná závislost pevnosti v tlaku na typu a dávkování vláken - ošetřování ve vodě



Obr. 6. Normalizovaná závislost pevnosti v tahu za ohybu pro rychlosti zatěžování na dávkování vlákna typu T- ošetřování ve vodě



Obr. 7. Charakteristické pracovní diagramy ohybové zkoušky – průhyb v místě trhliny – rychlost 0,2 mm/s – uložení voda



Obr. 8. Lomová energie $G_{f,P}$ z průhybu pro jednotlivé typy záměsí a rychlosti zatěžování – ošetřování ve vodě

7. SHRnutí

Na základě vlastních experimentálních zkušeností a získaných informací lze pro aplikaci nejen PP vláken v maltách betonech konstatovat následující:

- Běžné aplikace různých typů vláken (ocelových, skleněných a polypropylénových) při dávkování V_f od 0,1 do cca 1% objemu v maltách a betonech je vhodné spíše chápat jako aditivum, jehož úkolem je změnit celkově užité charakteristiky betonu či malty, nikoliv však jako prvek rozhodujícím způsobem přispívající ke zvýšení tahové pevnosti nebo odolnosti vůči statickému namáhání. Díky svým vlastnostem a limitům v dávkování u aplikací PP vláken dochází po vzniku trhlin k tzv. změkčení (tension strain-softening).
- PP vlákna mají relativně malou soudržnost s betonem, nízký modul pružnosti. Také pevnost v tahu je relativně nízká při srovnání s jinými vlákny.
- PP vlákna jsou pružná a tažná a nehrozí riziko porušení při míchání čerstvých směsí. Současné technologie umožňují vyrobit PP vlákna široké tvarové a délkové škály.
- Vlákna lze relativně snadno do cementových malt a betonů vmísit a rovnoměrně rozptýlit.
- Dávkování vláken nad určitou mez, která je pro jednotlivé typy vláken různá, může způsobit snížení objemové hmotnosti výsledného kompozitu a tím i jeho pevnosti. Nenastane-li tato situace a vlákna jsou dávkována optimálně, pak ovlivňují pevnosti nevýznamně.
- S ohledem na zpracovatelnost a ovlivnění pevností se pohybuje horní limit dávkování v běžných podmínkách stavební výroby na úrovni do cca 1 % objemově, u mikrovláken je tato hranice ještě nižší, a to cca do 0,5 % objemově.
- Vlákna účinně omezují vznik a rozvoj trhlin v plastickém stavu směsí. Vysoce účinná jsou mikrovlákna průměru 20-40 μm délky do 12 mm, která mají vysokou účinnost již při velmi malé dávce $V_f = 0,1\%$ objemu (0,9 kg do 1 m^3 betonu či malty).
- Vlákna účinně omezují vznik a rozvoj trhlin v zatvrdlém stavu materiálu. Jak je patrné z experimentů, se zvyšujícím se dávkováním se zvyšuje i hodnota lomové energie G_f .
- Vhodně technologicky upravená PP makrovlákna se zvýšenou soudržností maticí dosahují srovnatelných lomových vlastností s vlákny ocelovými. Tento typ vláken je pak označován jako Structural Syntetic Fibres (SSF). Praktické aplikace ukazují, že mohou být dobrou náhradou za ocelová vlákna např. do podlahových konstrukcí, kde mají i částečnou statickou funkci.

8. LITERATURA

- [1] ALHOZAIMY, A. M. - SOUROUSHIAN, P. - MIRZA, F.: Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, Cement & Concrete Composites 18, 1996, pp. 85-92
- [2] BALAGURU, P.: Contribution of Fibres to Crack Reduction of Cement Composites During the Initial and Final Setting Period, ACI Materials Journal / May - June 1994, pp. 280-288
- [3] BANTHIA, N. – Gusta, R.: Influence of polypropylene fibres geometry on plastic shrinkage cracking in concrete, In: Proceedings of CON MAT 05, Vancouver 2005, ISBN # 0-88865-810-9, pp. 363
- [4] BAREŠ, R. S.: Kompozitní materiály, SNTL Praha 1, Praha 1988, L17-B3-IV-31/72231, stran 328
- [5] BAZANT, P. Z.- JIRÁSEK, M.: Inelastic Analysis of Structures, John Wiley and Sons, Ltd West Sussex 2000, ISBN 0-471-98716-6, p. 734
- [6] KOHOUTKOVÁ A: Numerical simulation in design of structural fibre concrete members, In: Proceedings of CON MAT 05, Vancouver 2005, ISBN # 0-88865-810-9, pp.298
- [7] KOLÍSKO, J. - KLEČKA, T.: Vliv polypropylénové disperzní mikrovýztuže na lomovou houževnatost betonu. In: 5. Mezinárodní sympozium Brno 10.11.5.1995. Sborník přednášek. Brno: Sdružení pro sanace betonových konstrukcí. 1995. s. 188-192.
- [8] KOLÍSKO, J. - KLEČKA, T.: Mrazuvzdornost a lomová houževnatost betonu s přídavkem polypropylénové disperzní výztuže. In: Stavební obzor. 5, č. 7, (1996) s. 209-211, ISSN 1210-4027
- [9] KOLÍSKO, J. -KLEČKA, T. - KOLÁŘ, K.: Příčiny vzniku nekonstrukčních trhlin v maltách a betonech a jejich prevence. In: Beton. 3, č. 2 (2000), s. 33-36. ISBN 1212-0154.
- [10] KOLÍSKO J.; VODIČKA J.; KLEČKA T.; KOLÁŘ K. KRÁTKÝ J.: Characteristic of FRC with structural Syntetic Fibres, In: Proceedings of CON MAT 05, Vancouver 2005, ISBN # 0-88865-810-9, pp. 93
- [11] LI V. C.: Large volume High performance Application of Fibres in Civil Engineering, In: Journal of Applied Polymer Science / 2000, vol. 83, pp. 660-683,
- [12] SARVARANTA, L.: Characterization methods for polypropylene fibre-reinforced cement mortar composites, VTT, Technical Research Centre of Finland, Espoo, 1993, No. 136, pp. 97
- [13] VANDEWALLE L. et al: Recommendation of RILEM TC162-TDF : Testing design method for steel fibre reinforced concrete, Materials and Structures, 2002, Vol.35, pp. 579-582,

9. OSOBNÍ ÚDAJE

Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.

VZDĚLÁNÍ

2001 Ph.D. ČVUT v Praze, Kloknerův ústav
1984 - 1989 Ing. ČVUT v Praze, Fakulta stavební obor
Konstrukce a doprava.

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

1989- současnost ČVUT v Praze, Kloknerův ústav

Pracovní aktivity v rámci KÚ

2002 - současnost Vedoucí Experimentálního oddělení KÚ
1998 - současnost Vedoucí Akreditované laboratoře KÚ č. 1061
1994 - 2002 Zástupce ved. Experimentálního oddělení KÚ
1993 - 1998 Zástupce vedoucího AL technologie betonu
1989 - 1994 Odborný asistent v oddělení Technologie
stavebních materiálů

PEDAGOGICKÉ AKTIVITY

2003 - současnost Přednášky předmětu „Metody zkoušení betonu“
Výuka v Kloknerově ústavu, ČVUT v Praze
2006 – 2007 Jednotlivé přednášky v rámci předmětu „Speciální betony“ na
katedře betonových a zděných konstrukcí ČVUT v Praze
1994 – 2006 Vedení cvičení v rámci předmětu „Stavební hmoty“ na
katedře stavebních hmot, nyní katedře materiálového
inženýrství a chemie FSV ČVUT v Praze.

VĚDECKOVÝZKUMNÉ AKTIVITY

V letech 2000-2007 se podílel na řešení

- | | |
|-------------------------|-------|
| 1) projekty GAČR | 8 x |
| 2) projekty MPO a MD ČR | 2+1 x |
| 3) výzkumné záměry | 1 x |

PUBLIKAČNÍ ČINNOST

Za období 1990-2007 spoluautor 12 monografií a autor či spoluautor více než 100 článků a referátů v časopisech a sbornících konferencí. V rámci působení v KÚ probíhá intenzivní spolupráce s praxí. Výstupem těchto aktivit za období 2000–2007 je několik stovek protokolů o provedených zkouškách, zpráv z řešení požadované problematiky nebo znaleckých posudků.