

## **DEVELOPMENT OF STRESSES IN FIBER REINFORCED STRUCTURES**

**P.P. Procházka<sup>\*</sup>, M.J. Válek<sup>\*</sup>, Š. Pešková<sup>\*</sup>**

**Summary:** *Fiber reinforced concrete (FRC) is studied in this paper, particularly the interfacial fiber-concrete matrix zones is observed. The maximum nominal size of the used aggregate is up to 25 mm. There are two basic processes, the dry-mix, and the wet-mix. The basic difference is that in the wet-mix process, all components of the mix, including water, are blended, and then conveyed. Wet-mix aggregate is preferred in this report.*

### **1. Úvod**

V tomto článku je studován vláknem vyztužený beton (FRC), a to zejména je sledováno materiálové chování mezifázové oblasti v betonové matici na kontaktu s vlákny. Pro přípravu vzorků se používá maximální nominální velikost do kameniva 25 mm. Používají se zde dva základní postupy pro míchání kompozitu, a to suchá metoda a mokrá metoda. Základní rozdíl je takový, že mokrá proces zahrnuje všechny složky směsi včetně vody. V tomto článku byla dána přednost mokrému procesu.

Výběr vlákniny vyztužených betonů (FRC) pro praxi by mělo být založeno na znalostech a zkušenostech projektanta a pečlivé studii doporučeného a dosažitelného materiálu. Úspěch použití FRC spočívá v náležitém plánování a řízení výroby těchto kompozitů, spojeném se znalostí a zkušeností uživatele.

Při posuzování kompozitních materiálů hrají rozhodující roli zóny, které jsou buď uměle nebo většinou přirozeně vytvářeny mezi vlákny a maticí. Tyto vrstvy budeme označovat jako mezifázové. Proto výzkum v této oblasti by měl být veden mnohem detailnějším způsobem než obvykle. V této studii se využívá kombinace experimentálních modelů, kde se zkoumají chemické a mechanické vlastnosti a numerických metod. Mechanické chování a chemické vlastnosti jsou zahrnuty v mezifázové zóně mezi vlákny a maticí. Tyto vlastnosti jsou rozhodující hlavně pro sledování rozpojovacích procesů.

---

\* Prof.Ing.RNDr. Petr Procházka, DrSc., Ing. Martin Jan Válek, Ph.D., Ing. Šárka Pešková: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra stavební mechaniky, Thákurova 7, 166 29 Praha 6; tel.: +420 2 2435 4480, fax: +420 2431 0775; e-mail: petr@fsv.cvut.cz

Na řešení tohoto problému byly již dříve použity některé numerické metody, zaměřené na vlastnosti zóny mezi vláknem a matricí, a to například řešení pomocí metody konečných prvků (Procházka & Šejnoha, 1995) nebo pomocí metody okrajových prvků (Procházka, 2001), a řešení bylo porovnáno s experimentálními výsledky z literatury. Srovnání ukázalo poměrně dobrou shodu mezi výsledky z obou typů simulací.

V dřívějších studiích autorů bylo použito většinou Uzawova algoritmu (Procházka & Šejnoha, 1995). V tomto příspěvku studii je využito jiného, prokazatelně stabilnějšího a rychlejšího algoritmu pro řešení kontaktu betonová matrice – ocelové vlákno. Vychází se z Mohr-Coulombova zákona s vyloučeným tahem převyšujícím tahovou pevnost. V našem modelu se předpokládá periodický systém vláken tak, že kvádr byl nahrazen kruhovým válcem.

Mechanické vlastnosti kontaktů jsou testovány na přístroji MTS Alliance RT/30. Jedná se o elektromechanický přístroj pro tlakové, tahové, a ohybové zkoušky materiálu.

Další testovací metoda orientovaná na chemické vlastnosti, stejně jako na mechanické vlastnosti v bodech mezifázové zóny, je Ramanova spektroskopie zjišťování napětového pole a chemických vlastností (Sundararajan, S., Bhutan, B., et al. 1993), je použita k získání celkového pohledu na vlastnosti mezifázové vrstvy kompozitu. V literatuře se uvádí (Balagru & Shah, 1992), (Snitka, Ulcinas & Mizariene, 1998), že mikrostruktura cementu pro matrici v blízkosti přechodové, mezivrstvé zóny je značně odlišná co do objemu od cementu dále od přechodové vrstvy. V poznámkách o mezifázové vrstvě se vychází též z práce (Altan & Subnash, 1996), ve které je studována mikrostruktura přechodové zóny s taženými ocelovými vlákny. Bylo shledáno, že mezifázová zóna v dozrálých kompozitech je bohatá na  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , obvykle v přímém kontaktu s plochou vlákna, a je také dosti pórovitá, strukturovaná odlišně od mikrostruktury dále od vláken. Vrstva  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  je okolo 1  $\mu\text{m}$  tlustá a podobá se duplexnímu filmu navrženému v (Pelet, Guttman & Bentur, 1992).

## 2. Pullout problém ocelových vláken ve vláknobetonu

V souvislosti s rozpojováním vláken a matrice v různých kompozitních strukturách je často vhodné řešit pullout problém (problém vytahování vlákna z matrice). V některých dřívějších publikacích řešili autoři tento problém numericky a srovnávali výsledky z numerických studií s výsledky z experimentů, uveřejněných v dostupné literatuře. Výsledky byly ve velmi dobré shodě, hlavně způsob rozpojování byl velmi dobře popsán matematickým modelem (Procházka, P. & Šejnoha, M., 1995). V této kapitole formulujeme problém vytahování (pullout) tak, že využijeme přirozeného triku, a to spojíme body na povrchu matrice s příslušnými body ve vlákně pružinami. Ty jsou v případě neporušeného spojení velmi tuhé, takže nepřipouští skok v posuvech. Uvolňování tuhostí pružin je řízeno kontaktními zákony. Připomeňme, že uvažujeme vlákna tužší než matrici. V opačném případě dochází k poškození uvnitř matrice, k tzv. crazeům. V každém případě je nutné uvažovat v okolí kontaktu poměrně hustou síť buď konečných prvků nebo vnitřních buňek u okrajových prvků.

Normálové a smykové poškození na kontaktu (rozpojování a pokluz) může být způsobeno z různých fyzikálních důvodů. Jedním poměrně jednoznačně zřejmým je porušení kontaktu v normálovém směru překročením tahové pevnosti. V standardních matematických formulacích se předpokládá, že tahová pevnost je nulová. Při matematické formulaci budeme také předpokládat, že tato restrikce platí. V technických aplikacích je však bližší skutečnosti

fakt, že tahové napětí (povrchová síla) je menší než některá hodnota tahové pevnosti různá od nuly. V tom případě je však postup závislý na vývoji zatížení a je třeba hodnotu vytahovací sílu postupně zvyšovat a v každém inkrementu řešit nelineární úlohu. Ve směru osy vlákna, tj. v tečném směru, se většinou uvažuje zobecněný Mohr-Coulombův zákon. Znamená to, že je třeba zavést další dvě materiálové charakteristiky, a to úhel vnitřního tření  $\varphi$ , který je definován pro styk dvou konkrétních materiálů, a smykovou tuhost  $\tau_b$ , neboli smykovou pevnost. U klasických kompozitů se předpokládá, že mezi vlákny a matricí není žádná přílnavost vyjma té, která plyne z rozdílu koeficientů roztažnosti mezi vlákny a matricí (většinou klasické kompozity jsou vyráběny za vysokých teplot a schlazením na pokojovou teplotu dochází k svírání vláken matricí, u betonových kompozitů se jedná o přílnavost, neboť koeficienty roztažnosti ocelových vláken a betonové matrice jsou stejné. V našem případě se zabýváme přímými vlákny, neuvažujeme vlákna typu Dramix, která se částečně opírají o betonovou matrici.

Předpokládáme pravidelnou periodickou strukturu vláken v matrici, kde však původní čtvercovou jednotkovou buňku nahrazujeme pro jednoduchost výpočtu válcem. Uvažujeme tedy válcový tvar vlákna a okolní matrice má též válcový tvar.

V předchozích člancích (Procházka, P., 2001) a (Procházka, P. & Šejnoha, M., 1995) je využito Uzawova algoritmu na řešení rozpojování vláken od matrice. V této studii využijeme poněkud jiného triku, totiž spojíme vzájemně příslušné body vlákna a matrice pružinami, a to jak v normálovém, tak v smykovém (tečném) směru.

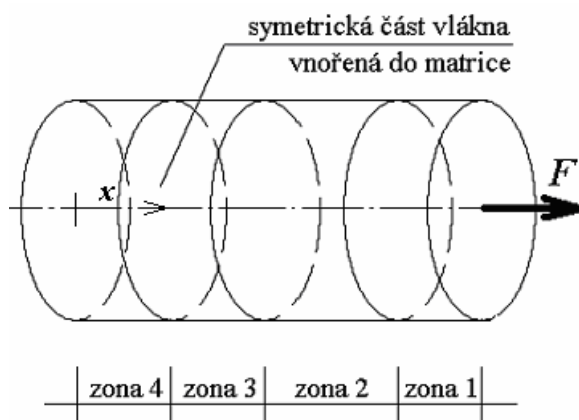
Uvažujeme kontaktní problém dvou těles. První těleso (vlákno) v nedeformovaném stavu zaujímá oblast  $\Omega'$  s kontaktní hranicí  $\Gamma'$  (čtvercový tvar je nahrazen kruhovým) a druhé těleso (betonová matrice) zaujímá oblast  $\Omega''$  s hranicí  $\Gamma''$ , (čtvercová jednotková buňka je opět nahrazena kruhem).

Nepředpokládáme jiné vnější zatížení, než vytahovací sílu na přední straně vlákna. Navíc se předpokládá, že se řeší symetrický problém, tzn. na obou stranách vlákna je aplikována táž vytahovací síla. Tělesa jsou situována v Kartézském souřadnicovém systému  $Oxyz$ ; osa  $x$  je zavedena v osovém směru válce. Předpokládá se, že na kontaktu  $\Gamma$  je vyloučen tah překračující tahovou pevnost, takže může dojít k dislokaci (skoku v posuvech v normálovém směru) v některé části společné hranice  $\Gamma$ , která je průnikem  $\Gamma'$  a  $\Gamma''$ . Mohr-Coulombova kontaktní podmínka vychází z myšlenky, že normálová a tečná napětí musí být v určitém vztahu, který když je porušen, dochází k smykovému poškození, pokluzu v tečném směru, nebo jinak řečeno ke skoku v tečných posuvech. Komplexnější studie je provedena v (Procházka, P. & Šejnoha, M., 1995). Z rozsáhlých studií se ukazuje, že na kontaktu se mohou vytvořit čtyři základní zóny, viz Obr. 1.

Zona 1 patří k čelu vlákna a je typickým otevřením typu trhliny. Průběhy napětí vykazují typické excesy v kořenu trhliny. Ve druhé zóně se mohou vyskytovat pokluzu mezi oběma tělesy, dochází tam tedy ke smykovému poškození. Třetí zóna je pevné spojení, nedochází k žádnému poškození. Pozoruhodná je čtvrtá zóna, ve které dochází k dodatečnému rozpojení v normálovém směru. Připomeňme, že tyto zóny jsou vytvářeny na symetrickém vláknu, tzn., že na konci čtvrté zóny je osa symetrie vlákna. Čtvrtá zóna se vyskytuje převážně v případě velkého objemového poměru vláken v matrici, např. u klasických kompozitů (objemový poměr je třeba 60 procent) nebo u bunkrů z kompozitních betonů (procento vláken v betonové matrici je kolem 10).

Zatížení je aplikováno vytahovací silou  $F$  na čele vlákna v osovém směru vlákna. Hodnota této síly se zvětšuje tak, že je odhadnuta dovolená síla a ta je rozdělena na deset dílů, kterými

je postupně třídimenzionální jednotková buňka zatěžována. Jelikož platí výše uvedená symetrie, problém se řeší pouze na jedné polovině buňky.



Obr. 1. Čtyři typické zóny na kontaktu vlákna a matrice

Posuvy jsou popsány vektorovou funkcí  $\mathbf{u} = \{u, v, w\}$  proměnné  $\mathbf{x} = \{x, y, z\}$ . Označme  $\Omega \equiv \Omega' \cup \Omega''$ . Restrikce funkcí na  $\Omega'$  nebo  $\Omega''$  jsou postupně označeny jedním resp. dvěma čárkami, např.  $u / \Omega' = u'$  a  $u / \Omega'' = u''$ . Na vnější hranici jednotkové buňky jsou posuvy a povrchové síly zavedeny tak, že je zajištěna periodicitá jednotkové buňky.

Označme množinu přípustných posuvů  $u$  na  $\Omega$ , které splňují přirozené okrajové podmínky symbolem  $V$ . Hodnoty a první derivace posuvů jsou kvadraticky integrovatelné v zobecněném smyslu.

Při výše uvedeném značení platí na obou tělesech Hookeův zákon:

$$\varepsilon_{ij}^{\cdot}(u') = L_{ijkl} \sigma_{kl}^{\cdot} \quad \varepsilon_{ij}^{\ddot{}}(u'') = L_{ijkl}^{\ddot{}} \sigma_{kl}^{\ddot{}} \quad (1)$$

kde  $L$  a  $L^{\ddot{}}$  jsou materiálové matice tuhosti postupně vláken a matrice (matrice podléhá Misesově plasticitě).

Předpokládáme-li teorii malých deformací, je dostatečné formulovat podmínky na kontaktu takto (Signoriniho podmínky):

*Problém:* Je třeba řešit kontaktní problém dvou těles, které na kontaktní hranici  $\Gamma$  splňují následující podmínky:

- $[u]_n \geq 0, p_n \leq 0, [u]_n p_n = 0$
- $|p_t| \leq -\tan \varphi p_n + \tau_b \kappa(-p_n); \{ |p_t| + \tan \varphi p_n - \tau_b \kappa(-p_n) \} | [u]_t | = 0$
- jestliže  $|p_t| \geq -\tan \varphi p_n + \tau_b \kappa(-p_n)$  pak  $|p_t| = [-\tan \varphi p_n + \tau_b \kappa(-p_n)] \text{sign}(p_t)$ .

V posledních nerovnostech jsme označili  $[u]_n$  rozdíl posuvů matrice a vlákna v normálovém směru k vláknu,  $[u]_t$  je rozdíl posuvů matrice a vlákna v tečném směru,  $\kappa$  je zobecněná

Heavisideova funkce rovná jedné pro kladné argumenty a nule jinak. Povrchové síly jsou označeny  $\mathbf{p} = \{p_n, p_t\}$ .

Poznamenejme, že v praktických aplikacích se užívá místo a) tato podmínka:

$$a1) \quad [u]_n \geq 0, \quad p_n \leq \sigma_+, \quad \text{jestliže } p_n = \sigma_+ \text{ pak } p_n = 0.$$

### 3. Variační formulace

Označme

$$H \equiv \{ \mathbf{u} \in V; [u]_n < 0 \text{ skoro všude na } \Gamma \}.$$

Množina  $H$  je kužel přípustných posuvů s ohledem na nepřekrývání vláken a matrice,  $V$  je množina spojitých posuvů.

Předpokládejme, že obě zkoumaná tělesa uvažujeme zvlášť, ale napětí a deformační stav je původní. Užitím podmínek a) (resp. a1)) až 3) v *Problému*, variační princip pak vede k následující definici: Nalézt minimum  $\mathbf{u} = \{u_n, u_t\}$  a současně maximum  $\mathbf{p} = \{p_n, p_t\}$  funkcionál celkové energie  $J$ :

$$J = \frac{1}{2} \left( \int_{\Omega^f} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} \, d\Omega^f + \int_{\Omega^m} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} \, d\Omega^m \right) - \int_{\partial\Omega} \mathbf{p}^T \mathbf{u} \, d\partial\Omega + \\ + \int_{\Gamma_c} \left( |p_t| + \tan \varphi p_n - \tau_b \kappa(-p_n) \right) | [u]_t | \, d\Gamma + \int_{\Gamma_c} p_n [u]_n \, d\Gamma, \quad (1)$$

kde horní index T znamená transpozici.

Napišme celkovou energii  $J$  obou těles uvažující je separovanými, a přidejme energii na kontaktu:

$$J(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \Pi(\mathbf{u}) - I(\mathbf{u}, \mathbf{p}), \quad (2)$$

kde

$$\Pi(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} a(\mathbf{u}, \mathbf{u}) - \int_{\partial\Omega} (\mathbf{p})^T \mathbf{u} \, d\partial\Omega, \\ I(\mathbf{p}, \mathbf{u}) = \int_{\Gamma_c} \left( |p_t| + p_n \tan \varphi - \tau_b \kappa(-p_n) \right) | [u]_t | \, d\Gamma + \int_{\Gamma_c} p_n [u]_n \, d\Gamma, \\ a(\mathbf{u}, \mathbf{u}) = \int_{\Omega^f} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} \, d\Omega^f + \int_{\Omega^m} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} \, d\Omega^m. \quad (3)$$

Poslední variační formulace vede bezprostředně na výše zmíněný Uzawův algoritmus, který byl použit například v (Procházka, P. & Šejnoha, M., 1995). Ukazuje se, že Uzawův algoritmus je mocný prostředek, ale v případě uzavřené trhliny je velmi nestabilní, jeho konvergence není totálně spojitá. To je důvodem, proč navrhujeme nový postup.

V předchozím jsme uvedli, že je vhodné využít modelu s vazbou na kontaktu pomocí pružin. Mechanické chování pružin je popsáno tuhostmi pružin a v tečném (osovém) směru vlastním pnutím, které budeme považovat přibližně za lineární. Označíme tuhosti pružin takto:  $k_n$  (normálový směr) a  $k_t$  (tečný – osový směr) a vlastní deformace na kontaktu v příčném směru, kterou vyjádříme v konstitučních rovnicích dále, bude  $\mu_n$ . Uvedené vlastnosti lze matematicky zaznamenat takto:

$$p_n = k_n [u]_n, \quad p_t = k_t [u]_t . \quad (4)$$

Energie na kontaktu  $I$  pak může být vyjádřena pomocí tuhostí na kontaktu, které slouží jako penalta v penaltové formulaci:

$$I(\mathbf{p}, \mathbf{u}) = \int_{\Gamma_c} \left\{ (k_n [u]_n^2 + k_t [u]_t^2) + \frac{1}{2} ([u]_n (k_n \tan \varphi | [u]_t | - 2\sigma_+) + | [u]_t | (k_n \tan \varphi [u]_n - 2\tau_b \kappa (-p_n)) \right\} d\Gamma_c \quad (5)$$

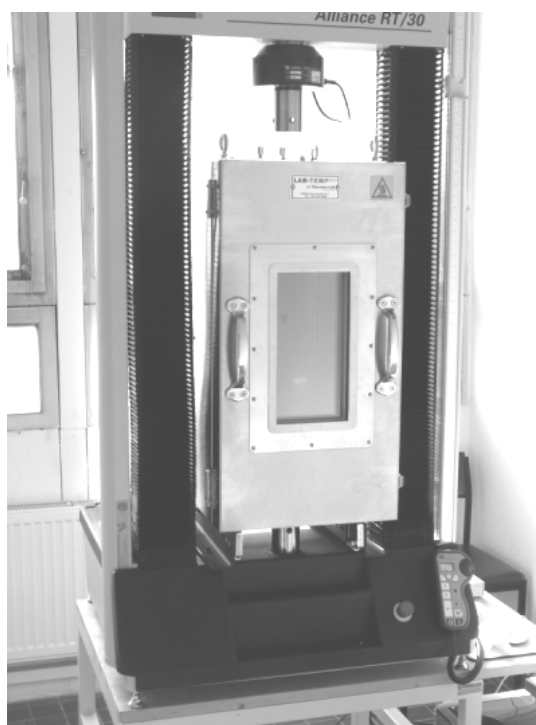
Z výše uvedené formulace se skutečně ukazuje, že pružinové tuhosti  $k_n$  a  $k_t$  hrají roli penalty. Jestliže jejich hodnoty jsou dostatečně velké, je zajištěno vetknutí vlákna do matrice. Jestliže je některá kontaktní podmínka porušena, hodnoty pružinových tuhostí se příslušným způsobem sníží, a to ve smyslu předpisů uvedených v *Problému*. Poslední člen v (5) reprezentuje vrcholové hodnoty (pevnost) pro oba normálový a tečný směr. Důsledkem této formulace je, že řešení je zajištěno pokud nedojde k rozpojení vlákna od matrice po celé délce kontaktní hranice.

#### 4. Experimentální program

Pro účely echanických experimentů byl použit testovací přístroj MTS Alliance RT/30, viz obr. 2. Jedná se o elektromechanický prostředek pro sledování vlivu tlaku, tahu a ohybu vzorků. Maximální tlaková a tahová síla je 30kN. Velikost možných vzorků je 150 x 150 x 250 mm<sup>3</sup> (šířka x délka x tloušťka). Rychlost zatěžování byla v našem případě 0.04 mm/minutu.

Schema kontejneru, ve kterém byly připravovány vzorky na pullout testy, je ukázáno na obr. 3. Do kontejneru se nalila cementová pasta a osově symetricky bylo uloženo vlákno. Poté byl agregát ponechán v pokojovém prostředí. Postupně probíhalo tuhnutí a po určitém čase se použily jednotlivé vzorky a byly prováděny pullout testy. Bylo sledováno celkově šest vzorků, aby bylo možné nestranně statisticky vyhodnotit průběhy pevnosti v závislosti na čase tuhnutí. Výsledky byly zpracovány a jsou vykresleny na obr. 4. Je třeba zdůraznit, že vzorky byly připraveny s mimořádnou pozorností a též pozice vlákna v ose kontejneru byla zajištěna s mimořádnou přesností. Výsledky těchto zkoušek tuto skutečnost prokazují, neboť z obr. 4 plyne velmi malá variance, malý rozptyl. Obr. 5 ukazuje odpovídající graf obdrženy ze statistického průměru předchozích výsledků experimentů. Ukazuje se, že pevnost kontaktu klesá během tuhnutí a až v závěrečné etapě tvrdnutí betonu po 28 dnech opět dochází k zvýšení únosnosti vláken.

V posledním stádiu tvrdnutí po 28 dnech byly provedeny rozhodující pullout testy za účelem získání vztahu  $\sigma$ - $\varepsilon$  pro všechny typy zmíněných šesti případů vzorků. Výsledky jsou zřejmé z obr. 6. Důležitou okolností je, že je prokázána „skoro“ lineární závislost mezi napětím a přetvořením až do stavu poškození. Tento fakt svědčí o křehkém chování kontaktu. Všechny vzorky prokazují, že křehké chování lze považovat za obecný jev, při nejmenším pro materiály, které byly užity v uvedených testech. Na druhou stranu po dosažení vrcholové hodnoty se začne projevovat houževnatost spoje překvapivě vysoká, nedojde tedy ke kolapsu, jako například u klasické trhliny. Všechny vzorky vykazují podobné chování výjma šestého, jehož vrcholová hodnota je podstatně nižší než u ostatních. Rozptyl průběhu v reziduální zóně (poškození) je podstatně větší než u předvrcholového chování. To je nejspíše dáno náhodným způsobem rozpojování vláken od matrice. Tento jev bude vždy náhodný, dokonce v případě betonových matic lze očekávat zcela rozdílné chování, neboť textura betonu je velmi silně nehomogenní a neizotropní.

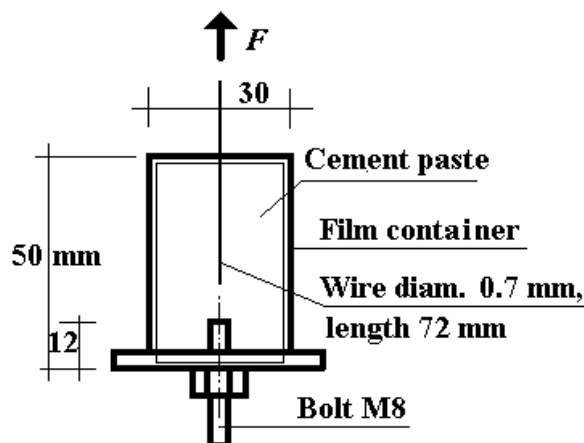


Obr. 2. Testovací přístroj

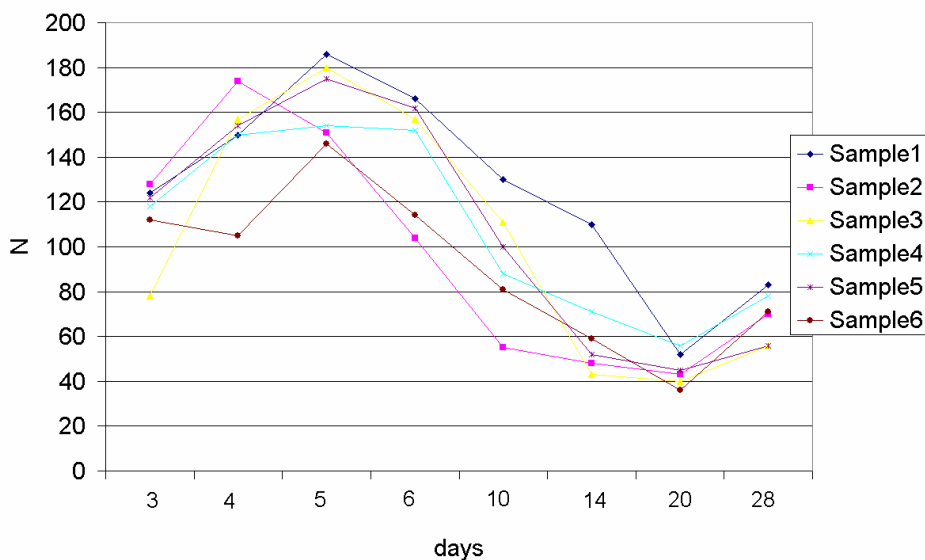
## 5. Ramanova mikrospektroskopie cementu – mezifázová zóna

Jak bylo řečeno výše, je zcela zřejmé, že mechanické chování, zvláště pak únosnost, jsou zásadně ovlivněny chováním na kontaktu mezi vlákny a matricí. Tato přechodová mezivrstva je sice ve většině matematických modelů uvažována jako nekonečně tenká, ale ve skutečnosti tvoří vrstvu o sice malé, ale konečné tloušťce. Znamená to tedy, že existuje plocha v okolí vlákna, ve které lze sledovat zcela odlišné morfologické rysy, chemické složení a také termomechanické vlastnosti. Všechny tyto položky se mění v čase, a to nejen během tuhnutí a tvrdnutí betonu, ale i v průběhu delšího času. Tento fakt je prokázán mnoha experimenty, ale

není studován v tomto článku. Sledování uvedených změn je nutno uvažovat aspoň na mikroúrovni. Rozsah mechanických, chemických, tepelných a morfologických vlastností je nutné sledovat od nanometrů po mikrometry. Mezi velmi účinné metody sledování chemických a mechanických změn v materiálu patří Ramanova spektroskopie, která byla užita na sledování změn napjatostního pole a zároveň chemických vlastností v přechodové vrstvě. Ukazuje se, že vlastnosti v blízkosti vláken jsou zcela odlišné od vlastností více vzdálených od vláken. Ramanova spektroskopie je dnes poměrně rozšířená a existuje poměrně velké množství publikací, které by si zasloužily citovat. Jelikož však tento článek není přehledová odkazujeme čtenáře na providera sciencedirect.

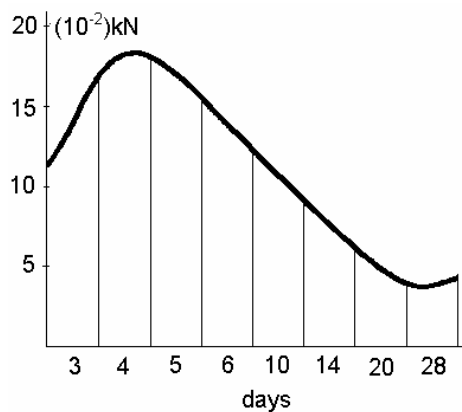


Obr. 3. Schema kontejneru pro pullout testy

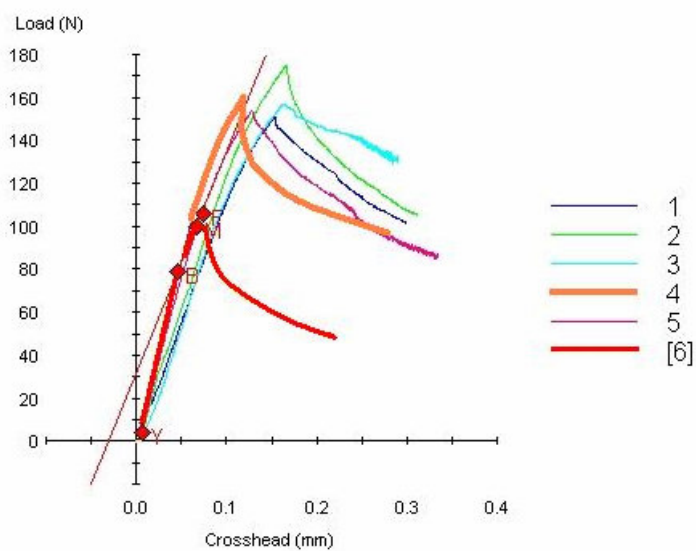


Obr. 4. Přípustné síly pro šest vzorků vzhledem k času tuhnutí betonu

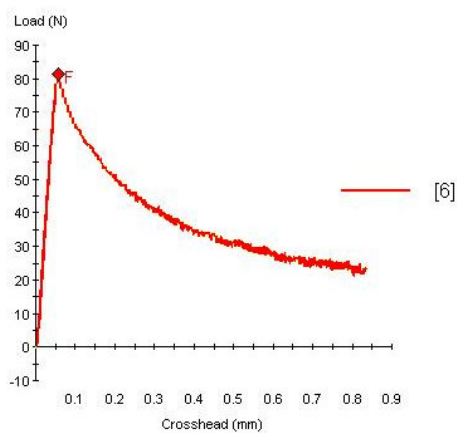




Obr. 5. Výsledné průměry přípustných sil vzhledem k času tuhnutí betonu



Obr. 6. Diagram pullout síly – posuv vlákna v čele vzorků

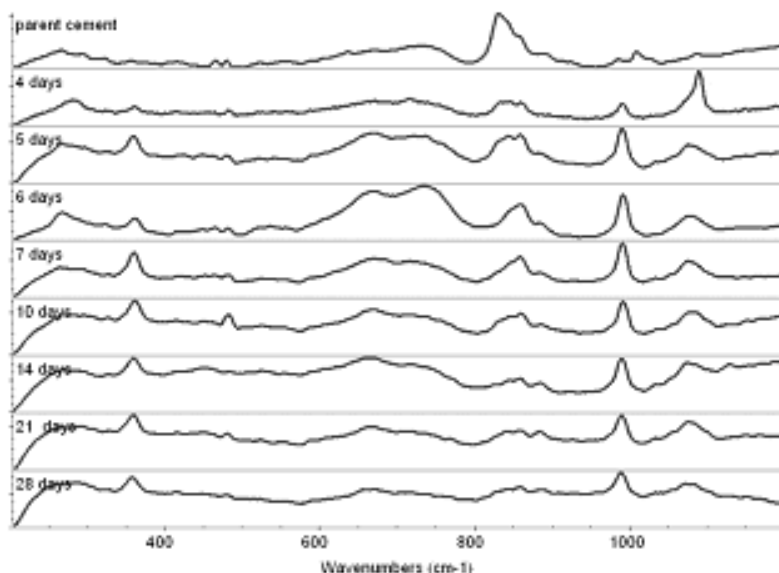


Obr. 7. Diagram pullout síly – posuv vlákna v čele 6. vzorku

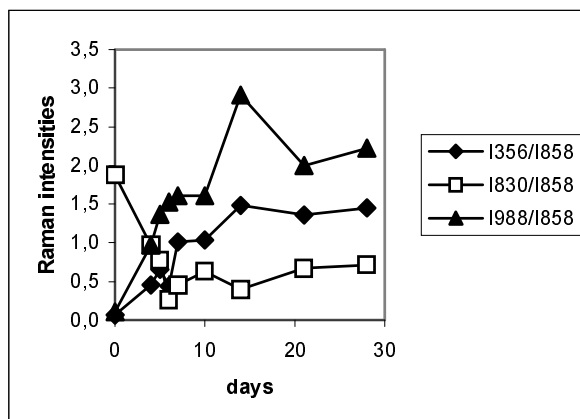
Upozorníme pouze na některé jevy, které byly pozorovány v přechodové zóně a které si zaslouží pozornost. V betonovém kompozitu, který absolvoval 28 dní proces tvrdnutí, je v přechodové zóně bohatý obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , obzvláště ve velké blízkosti ocelového vlákna, kde je také velmi porézní na rozdíl od mikrostruktury v okolí bodů vzdálených od vláken. Vrstva bohatá na  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  je silná kolem 1  $\mu\text{m}$  podobná duplexnímu filmu navrženému v (Snitka, Ulcinas & Mizariene, 1998). Ramanova spektroskopie byla použita při pullout testech z důvodů sledování mechanických vlastností spojení vláken a matrice. Bylo shledáno, že přirozeně vlastnosti spojení jsou řízeny, ovlivňovány efekty tření a kotvení (soudržnosti). Připomeňme, že byla zkoušena přímá vlákna.

Postup reakcí v přechodové vrstvě byl sledován pomocí poměrné intenzity ve vrcholech Ramanova spektra, spojených s  $\text{C}_3\text{S}$  a oxidem vápíku. Z množiny těchto dat se ukazuje, že hydratační mechanismus se významněji projeví asi za 13 hodin.

Z Ramanovy mikrospektroskopie byly vyvozeny i chemické přehledy při monitorování Portlandského cementu použitého pro popisované experimenty. Hydratace cementu byla sledována v průběhu 28 dní v okolí ocelových vláken a také ve větší vzdálenosti od vláken. Bylo vybráno pět mikrometrických kroků pro mapování oblasti 450 x 450 micrometrů. Dále byl vypočítán průměr z množiny měřených zobrazení spekter. Proces hydratace je reprezentován řadou chemických rovností popisujících hydrataci hlavních cementových fází  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  a  $\text{C}_4\text{AF}$  (zde užitá nomenklatura pro cement je následující:  $\text{C}=\text{CaO}$ ,  $\text{S}=\text{SiO}_2$ ,  $\text{H}=\text{OH}$ ,  $\text{A}=\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{F}=\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\hat{\text{S}}=\text{SO}_4$ ). Pro analýzu hydratace, zvláště výskytu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a ettringitu ( $\text{C}_6\text{A} \hat{\text{S}}_3\text{H}_{32}$ ) se Ramanova mikrospektroskopie ukazuje jako velmi vhodná. Například na obr. 8 je ukázáno Ramanovo spektrum hydratace Portlandského cementu v hladinách od 0 do 28 dní. Zřetelně se ukazuje stoupající intenzita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v pásmu  $357 \text{ cm}^{-1}$ , pásmo ettringitu  $988 \text{ cm}^{-1}$ , klesání obsahu  $\text{C}_3\text{S}$  v pásmu  $828 \text{ cm}^{-1}$  a  $\text{C}_2\text{S}$  v pásmu  $858 \text{ cm}^{-1}$ . Jako vnitřní standard byla užitá intenzita belitu  $\text{C}_2\text{S}$  v pásmu  $858 \text{ cm}^{-1}$ . Změna některých minerálů v průběhu tuhnutí a tvrdnutí je vykreslena na obr. 9.



Obr. 8. Ramanovy spektra během hydratace Portlandského cementu v období 0 až 28 dní



Obr. 9 Změny relativní bohatosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $I_{356}/I_{858}$ ),  $\text{C}_3\text{S}$  ( $I_{830}/I_{858}$ ) a ettringitu ( $I_{988}/I_{858}$ ) v závislosti na počtu dní hydratace.

Porovnáním průměrných spekter měřených v blízkosti hranice ocelového vlákna do vzdálenosti 500 mikrometrů a spekter měřených ve větší vzdálenosti ukazují, že největší strukturální změny probíhají v prvních čtrnácti dnech cementové hydratace. Stupeň hydratace cementu v přechodové vrstvě je zřetelně nižší, než ve větší vzdálenosti od vláken, jak je vidět z menší koncentrace  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a ettringitu.

## 6. Výsledky řešení – sdružené modelování

Jak bylo řečeno výše, u klasických kompozitů je přílnavost matrice ke vláknům dána výrobou za vysokých teplot a následným schlazením na pokojovou teplotu. Rozdílné koeficienty tepelné roztažnosti matrice a vláken způsobí zmíněný jev. Jinak je to u betonu a oceli, kde koeficienty roztažnosti jsou stejné. Přílnavost je způsobena dehydratací betonu. Míra přílnavosti je určena z následující úvahy. Napišme konstituční rovnice pro matrici takto:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{L}(\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}} - \boldsymbol{\mu}), \quad \sigma_i = \sigma_i^{\text{ext}} + P_{ij}\varepsilon_j^{\text{pl}} + R_{ij}\mu_j \quad (6)$$

kde  $\boldsymbol{\sigma}$  a  $\boldsymbol{\varepsilon}$  jsou tenzory po řadě napětí a deformace ve vektorovém tvaru,  $\mathbf{L}$  je matice pružnostních konstant,  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{pl}}$  je plastická deformace a  $\boldsymbol{\mu}$  je vlastní deformace;  $\sigma_i^{\text{ext}}$  je napětí od vytahovací síly (externího zatížení) v bodě  $i$ ,  $P_{ij}$  a  $R_{ij}$  jsou příčinkové matice dávající do vztahu napětí v bodě  $i$  a plastické deformace a vlastní deformace v bodě  $j$ ,  $\varepsilon_j^{\text{pl}}$  je plastická deformace v bodě  $j$  a  $\mu_j$  je vlastní deformace v bodě  $j$ . Budeme předpokládat, že působí pouze vlastní deformace v příčném směru. Porovnáním posuvu na čele vlákna z mechanických zkoušek a z numerických výpočtů obdržíme potřebnou vlastní deformaci, tj. můžeme odhadnout přílnavost a zpátky porovnat s výsledky z Ramanovy spektroskopie. V našem případě byla zjištěna vlastní deformace 0.003, což odpovídá napětí odpovídá celkovému napětí 120 N. Z Ramanovy spektroskopie vychází pro jednotlivé vzorky od 100 do 180 N.

## 7. Závěr

Předložená studie se zabývá zjišťováním chování mezifázové vrstvy, jejím numerickým modelováním a experimentálními způsoby zjišťování mechanických a chemických vlastností. Využívá se přístrojů typických pro zjišťování mechanických vlastností materiálu při pullout testech a Ramanovy spektroskopie, umožňující získat chemické a napjatostní stavy v bodě. Numerické simulace přináší penaltové formulace kontaktního problému, které se ukazují rychlejší pro výpočty na počítači. Navíc se využívá techniky Analýzy transformačního pole, která urychluje i materiálově nelineární výpočty.

V této studii je předložena možná metodologie, jak sledovat mechanické a chemické chování betonů, cementových past a omítek v okolí vláken. V předloženém článku jsme se zaměřili na případ podstatně tužších vláken než je matrice, takže se očekávají největší změny v textuře v mezifázové vrstvě v době tuhnutí i v době po zatvrdnutí. Na poměrně jednoduchém příkladu bylo ukázáno, jak je možné postupovat ve smyslu sdruženého modelování.

## 7. Poděkování

Tento příspěvek byl finančně podporován GA AVČR, projekt číslo IAA2119402: Stavby napětí a deformace v konstrukcích a konstrukčních prvcích užitím sdruženého modelování. První autor byl též finančně podporován projektem CIDEAS. Poděkování patří i Dr. Padevětovi a p. Bittnarovi z ČVUT, Fakulty stavební, za provedení a zpracování výsledků z mechanických zkoušek. Také Ing. Machovič z VŠCHT zaslouží poděkování za provedení studie pomocí Ramanovy spektroskopie. P. Kalousek z ČVUT připravil vzorky v kontejnerech.

## 8. Literatura

- Altan, B.S. & Subnash, G. (1996) A nonlocal formulation based on a novel averaging scheme applicable to nanostructured materials. *Mechanics of Materials* **35**, pp. 281-294.
- Balagru P.N. & Shah S.P. (1992) *Fiber reinforced cement composites*, New York, McGraw-Hill.
- Peled, A., Guttman, H. & Bentur, A. (1992) Treatment of polypropylene fibers to optimize their reinforcing efficiency in cement composites. *Cem. Concr. Compos.* **14**, pp. 227-85.
- Procházka, P. (2001) Homogenization of linear and of debonding composites using BEM. *Engineering Analysis with Boundary Elements* **25**, pp. 753-769.
- Procházka, P. & Šejnoha, M. (1995) Development of debond region of lag model. *Computers & Structures* **55**, 2, pp. 249-260.
- Snitka, M., Ulcinas, A. & Mizariene, V. (1998) *Characterization of materials with nanomechanical properties by force modulation and phase imaging atomic force microscopy with soft cantilevers*. *Materials Characterization* **48**, pp. 147 – 152.
- Sundararajan, S., Bhutan, B., et al. (1993) Ultramicroscopy, **91**, pp. 111- 118.