

Využití recyklovaného betonu při výrobě nových stavebních materiálů

Jan TREJBAL, Zdeněk PROŠEK, Pavel TESÁREK, Jan VALENTIN

*Katedra mechaniky a Katedra silničních staveb, Fakulta stavební, České vysoké učení
technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6 Dejvice, Česká republika
e-mail: jan.trejbald@fsv.cvut.cz*

Souhrn

Poslední dobou je vyvíjen tlak na omezení skládkování odpadů. Hledají se řešení, jak produkci odpadu zmírnit nebo jak jej znovu využít. Tento trend postihuje i stavebnictví, které je značným producentem inertních odpadů především z demolic betonových konstrukcí. Recyklace této suroviny je limitována kvůli svým heterogenním vlastnostem. Vyššího aplikačního potenciálu ovšem dosahuje jemně mletý beton. Může být využit jako plnivo či dokonce jako částečná náhrada hydraulického pojiva při výrobě nových stavebních materiálů. Tato práce shrnuje možnosti jeho využití a dokazuje, že aplikace betonového recyklátu přináší řadu nejen ekologických, ale i ekonomických a technických benefitů.

Klíčová slova: recyklovaný beton, jemně mleté plnivo, vláknobeton, kompozitní materiál

Úvod

Nadměrná produkce odpadu různého původu je globálním jevem, který se týká všech průmyslových odvětví. Zmíněný problém značně postihuje i stavebnictví. Odhaduje se, že tento obor po celém světě ročně vyprodukuje 3 až 10 miliard tun stavební suti, v České republice je to kolem 3,5 milionů. Z těchto důvodů státní a státy sdružující autority nařizují omezení produkce odpadů a jejich skládkování; dále apelují na jejich zpětné využití – recyklaci [1,2]. Problematikou „konstrukčního a demoličního“ (C&D) odpadu se od roku 1976 intenzivně zabývá Mezinárodní unie laboratoří pro zkoušení a výzkum materiálů a struktur (RILEM), která sdružuje přes 70 států. Jedním z jejich hlavních cílů je objevit a podpořit nové cesty k efektivní recyklaci C&D [3,4]. Podobné cíle si kladou i organizace působící v USA. Jedná se o FHA (Federal Highway Association) či ACI (American Concrete Institute) [5,6]. Někteří členové posledně zmíněné organizace byli zodpovědní za založení Komise 555 – Beton s recyklovaným materiálem, která v roce 2001 vydala publikaci Odstranění a zpětné využití již hydratovaného betonu (původní název: Removal and Reuse of Hardened Concrete). Zmíněný dokument se stal cenným zdrojem informací v oblasti recyklace betonu a dopomohl k rychlejšímu rozvoji recyklačních technik [7].

Navzdory snahám výše uvedených a jim podobných institucí, státy Evropské Unie dodnes vykazují velmi nekonzistentní výsledky v oblasti recyklace C&D odpadu; zatímco kupříkladu Rakousko, Dánsko, Německo, Holandsko či Velká Británie zpětně využijí 50-70 % této suroviny (některé zdroje uvádějí až 90 %), Itálie a Francie za nimi se svým maximálně 20% podílem recyklací značně zaostávají. Pro ilustraci dodejme, že České republice náleží cca 40 % [3,8,9]. EU z politických a ekologických důvodů navrhuje, aby veškeré členské státy od roku 2024 úplně zakázaly skládkování inertních odpadů, mezi něž se C&D bezesporu řadí [1,2]. Toto nařízení urychluje výzkum a vývoj nových stavebních materiálů, které obsahují recyklované suroviny. Zmíněný trend je velmi zřetelný v oblasti recyklace betonu. Mimo jiné i vzhledem k tomu, že cca 90 % objemu C&D se skládá právě z odpadního betonu a zdiva [3]. Jen na území EU se ročně zdemoluje přibližně 50 milionů tun betonových konstrukcí [10].

Odpadní beton může být použit jako vstupní surovina pro výrobu:

- Recyklovaného kameniva.
- Mikro-mletého betonového recyklátu.

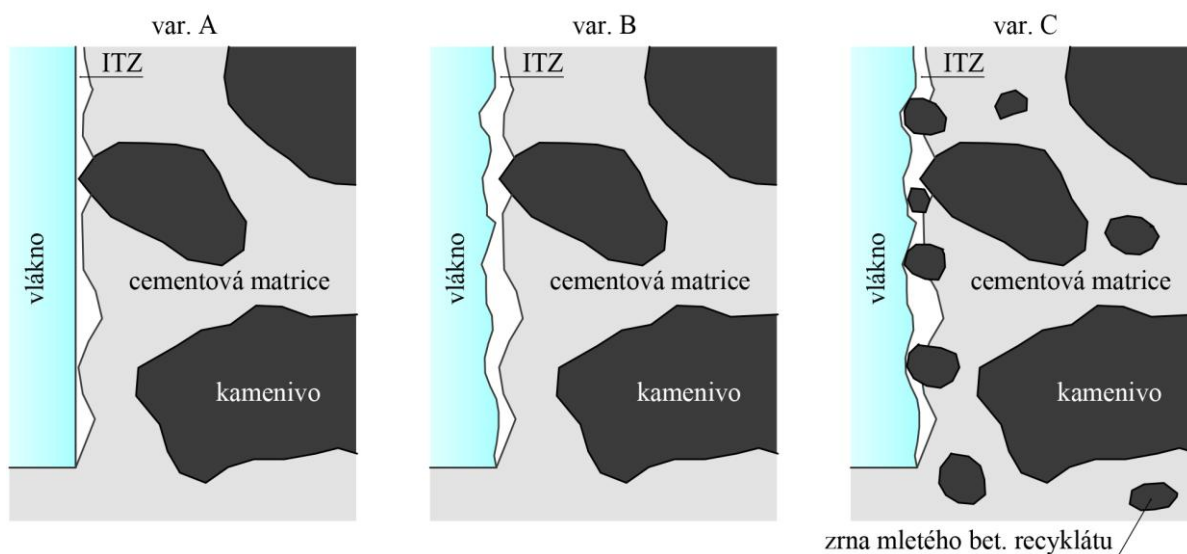
Recyklované kamenivo se již v technické praxi pozemního stavitelství běžně využívá pro výrobu nového betonu. Mezi jeho nevýhody patří především různorodá nasákavost a tvar jednotlivých zrn, horší mrazuvzdornost a potenciál výskytu různých nečistot. Výsledný produkt tak často mývá o něco horší mechanické vlastnosti a životnost oproti srovnatelnému produktu z primárních surovin [10-12].

Další zmíněnou možností recyklace betonu je jeho jemné mletí pomocí vysokorychlostních mlýnů (velikost jednotlivých zrn nepřevyšuje 0,25 mm) a následné využití jako mikro-plniva do nových betonových výrobků. Mikro-plnivo se v kompozitních materiálech s cementovou matricí využívá k redukcí negativních účinků přebytečné záměsové vody a k zajištění spojitosti křivky zrnitosti i v těch nejmenších frakcích. Jeho aplikace lze nalézt při výrobě malt, lehčených betonových bloků, ale i vysokohodnotných betonů atd. [12,14,15]. Množství využitého betonového odpadu je ale v tomto případě příliš nízké. Některé studie ovšem poukazují na to, že až 10 % cementových zrn obsažených v recyklátu nepostihla hydratace. Pomocí popisovaného mletí jsou tato zrna obnažena, díky čemuž může být dodatečně využit jejich pojivový potenciál [13-16]. Pokud je ovšem cement nahrazen, byť jen částečně, jemně mletým betonový recyklátem, výsledný produkt vždy vykazuje jasné zhoršení svých mechanických vlastností. Proto se obecně uvádí, že by hmotnostní obsah recyklátu neměl převýšit cca 15 % cementu [17,18]. Z uvedeného vyplývá, že využití jemně mletého betonového recyklátu ve formě mikro-plniva nebo částečné náhrady pojiva, má své limity.

Použití této suroviny, ač v opět v malém množství, lze nacházet ve vláknových kompozitních materiálech a cementovou matricí a polymerní výztuží. Jak je všeobecně známo, polymerní výztuž ve většině případů obtížně interaguje s cementovou matricí. Důvodem je jednak její obtížná smáčivost vodou (která je přítomná v cementové pastě) a jednak hladkost povrchů, která nezajistí dostatečnou fyzikální vazbu s okolím. Synergické spolupůsobení jednotlivých fází tak není zajištěno, což má za důsledek neefektivní využití jejich mechanického potenciálu [19]. Právě zrna betonového recyklátu mohou zajistit požadovanou mezifázovou adhezi. Pro toto tvrzení v databázích odborné literatury neexistují důkazy – je nutné jej experimentálně ověřit. Pro tyto účely jsme provedli testy soudržnosti mezi polypropylenovými makro-vlákný a cementovou matricí, která obsahovala již několikrát zmiňovaný mletý betonový recyklát.

Princip zvýšení fyzikální soudržnosti mezi polymerními vlákny a cementovou matricí

Obrázek níže (Obr. 1) zachycuje teoretický princip zvýšení soudržnosti mezi povrchem polymerového vlákna a cementové matrice pomocí zrn jemně mletého betonového recyklátu. Varianta A ukazuje běžnou praxi, a sice porézní strukturu přechodové zóny (ITZ) mezi hladkým povrchem vlákna a okolní cementovou matricí. Nabízí se povrch vlákna jemně zdrsnit, aby bylo zvýšeno tření při jeho vytahování z matrice. Tento přístup, který znázorňuje varianta B, fyzikální soudržnost sice zvýší, nicméně je-li vlákno obtížně smáčivé vodou, zóna ITZ bude stále porézní, tedy neschopná přenášet smykové síly. Pokud se ovšem použije upravené vlákno a jemně mletý betonový recyklát současně, soudržnost mezi těmito materiály musí být zlepšena. Poslední popisovaný jev zachycuje varianta C. Z ní je patrné, že póry v ITZ vyplňují jednotlivá zrna recyklátu, která tvoří mechanické zámky. Tyto klíny omezují vzájemný pohyb vlákna a matrice a tedy zvyšují jejich fyzikální soudržnost.

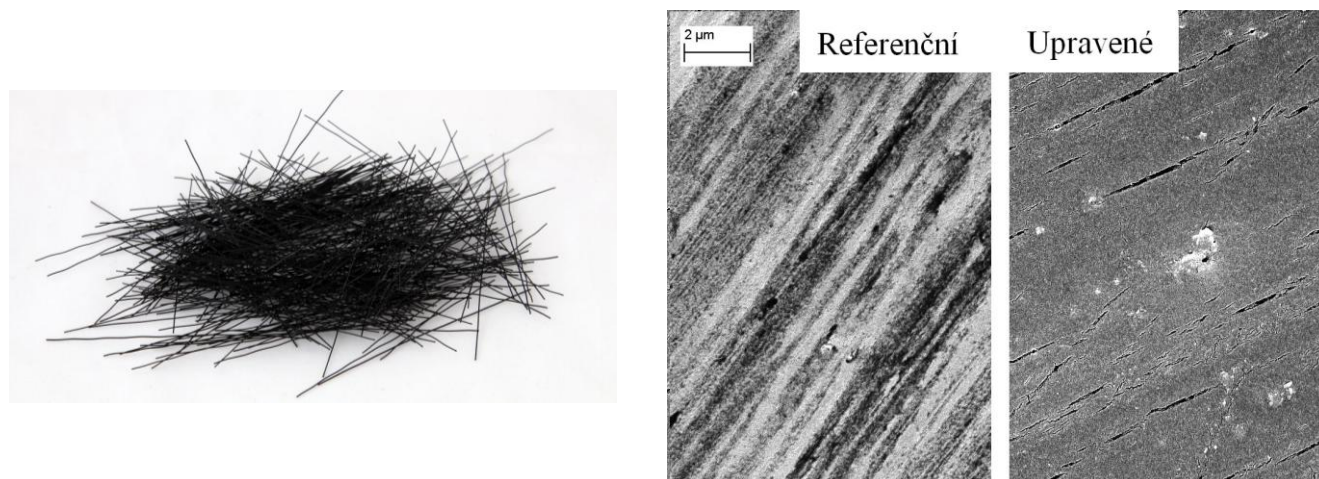


Obr. 1: Princip zvýšení soudržnosti mezi polymerovým vláknem a cementovou matricí.

Použité materiály

Vlákna

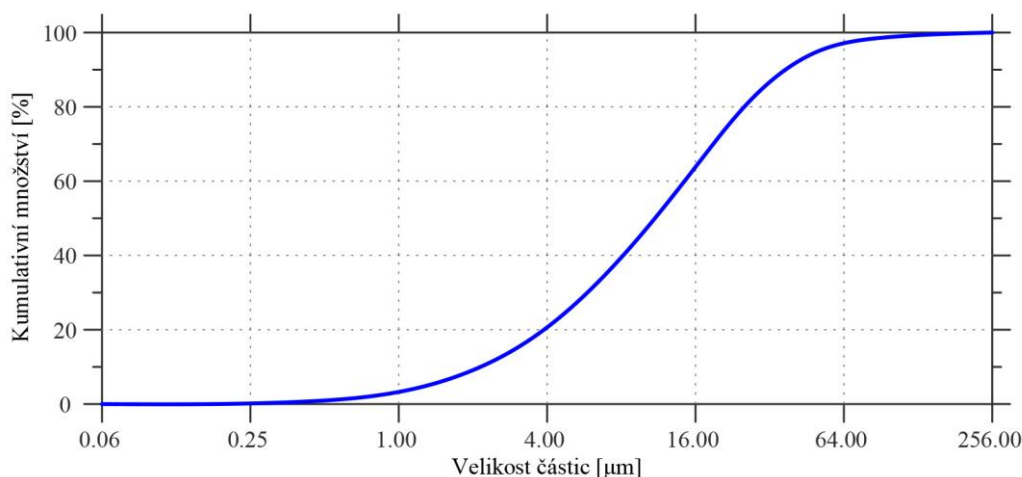
Pro účely experimentu byla použita polypropylenová vlákna Spokar. Jejich průměr je 0,305 mm, objemová hmotnost cca 900 kg/m³, Youngův modul pružnosti 6,1 GPa, tahová pevnost 440 MPa, prodloužení na mezi únosnosti 8 % [20]. Požita byla ve dvou variantách – referenční a povrchově naleptaná kvůli zvýšení hrubosti jejich povrchu. Modifikována byla plazmatickým výbojem v kyslíkové atmosféře po dobu 480 sekund dle [19]. Zachycena jsou na obrázku níže, ukázány jsou i 10k× zvětšené snímky povrchů z elektronové mikroskopie, které dokazují změnu morfologie naleptaných povrchů (Obr. 2).



Obr. 2: Fotografie použitých vláken (vlevo) a snímky ze SEM (vpravo).

Cementová tělesa

Z cementové pasty (CEM I 42,5 R) byla vyrobena zkušební tělesa pro testy její soudržnosti s polymerovými vlákny – tzv. pull-out testy. Každé těleso o rozměru 25 × 20 × 30 mm obsahovalo vždy pouze jedno vlákno, které bylo kotveno v délce 30 mm a procházelo jeho střednicí (Obr. 4). Vodní součinitel byl 0,4 a 0,41 v případě směsi obsahující pouze cement, resp. směsi obsahující 30 hm. % betonového jemně mletého recyklátu. Recyklát pocházel ze železničních pražců (PB2 a SB8). Odpadní beton byl namlet technologií vysokorychlostního mletí firmou LAVARIS s. r. o. Křivka zrnitosti recyklátu je na obrázku níže (Obr. 3). Z ní je patrné, že všechna zrna jsou menší než průměr použitého vlákna. Specifická plocha povrchu zrn je 412 m²/kg, měřena byla Blainovou metodou.



Obr. 3: Křivka zrnitosti mletého betonového recyklátu.



Obr. 4: Zkušební těleso pro pull-out testy.

Pull-out testy

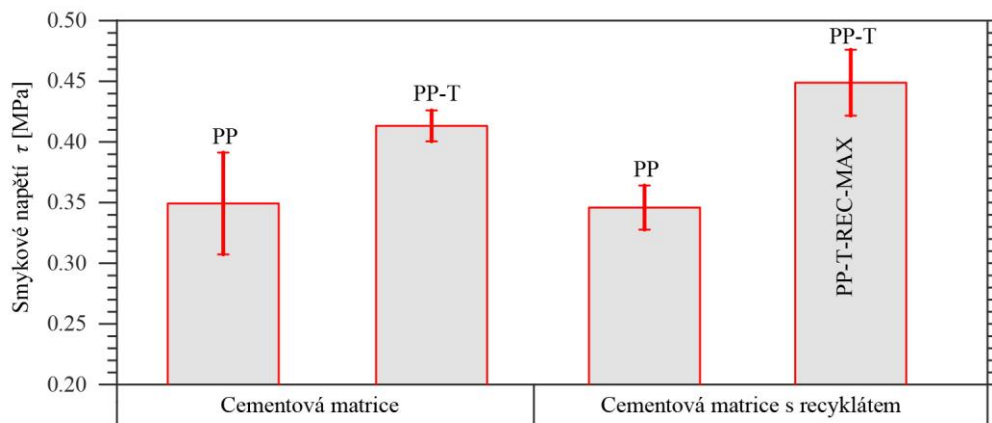
Cementová tělesa byla ukotvena do čelisti v zatěžovacím lisu Web Tiv Ravestein FP 100, zatímco volný konec vlákna byl po upnutí do pohyblivé části stroje vytahován z objemu tělesa ven. Experiment byl řízen posunem při konstantní rychlosti 2 mm/min. Sledována byla závislost posunu volného konce vlákna proti své původní poloze a síly, která tomuto posunu vzdorovala. Ze získaných dat byla vypočtena maximální mezifázová smyková napětí (z maximální síly změřené během zatěžování) a tatáž napětí ale při posunu volného konce vlákna o 3,5 mm. Tato hodnota posunu byla zvolena na základě technické normy ČSN EN 14845-2. Výpočet proběhl dle rovnice (1), která je uvedena níže:

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{C_f l_e} \quad \text{a} \quad \tau_{3.5} = \frac{F_{3.5}}{C_f l_e} \quad (1)$$

Kde $F_{\max}$ a $F_{3.5}$ reprezentují maximální sílu a sílu potřebnou k povytažení vlákna o 3,5 mm. C_f je obvod vlákna a l_e je jeho kotevní délka.

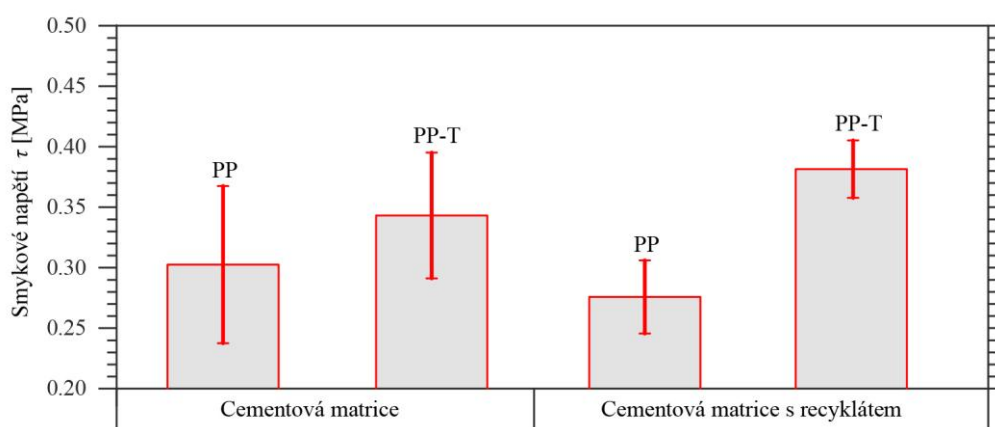
Výsledky

Pull-out testy potvrdily naši domněnku o pozitivním vlivu zrn jemně mletého betonového recyklátu na soudržnost mezi povrchově zdrsňenými polymerovými vlákny a cementovou matricí. Ukázalo se ovšem, že k dosažení silné mezifázové fyzikální vazby mezi těmito dvěma materiály je nezbytné, aby vlákna byla zdrsňena; do vzniklých poškození se dostanou zrna recyklátu, která vytvoří mezi matricí a vláknem adhezní klínky. V opačném případě, kdy by byla použita vlákna referenční (charakteristická svými hladkými povrchy), má přítomnost zrn recyklátu nulový efekt na soudržnost.



Obr. 5: Maximální mezifázová smyková napětí.

Jak ukazuje obrázek výše (Obr. 5), maximální smykové napětí mezi referenčním vláknem a čistě cementovou matricí bylo cca 0,35 MPa. Tatáž hodnota byla zjištěna v případě, kdy cementové těleso obsahovalo navíc 30 % betonového recyklátu. K navýšení smykového napětí došlo až v případě, kdy byla použita zdrsňená vlákna v kombinaci s čistě cementovou matricí (nárůst téměř na 0,42 MPa). Dle očekávání, úplně nejlepší soudržnosti bylo dosaženo až při kombinaci zdrsňené vlákno / matrice s obsahem cementového recyklátu, kdy bylo vypočteno smykové napětí o hodnotě 0,45 MPa, což je nárůst o cca 10 % oproti shodné kombinaci, ovšem bez použití recyklátu. O prakticky shodných trendech vypovídá i obrázek níže (Obr. 6), který zachycuje výsledky smykových napětí při posunu volného konce vlákna o 3,5 mm. I v tomto případě bylo nejvyšší soudržnosti dosaženo při použití povrchově upraveného vlákna a cementové matrice s betonovým recyklátem. Zatímco toto napětí u referenčního vlákna a čistě cementové matrice bylo cca. 0,3 MPa, v případě zdrsňeného vlákna a též matrice bylo zvýšeno na cca 0,35 MPa. Nejvyšší hodnoty – 0,38 MPa – bylo dosaženo u upravených vláken a matrice s obsahem recyklátu.



Obr. 6: Mezifázová smyková napětí při posunu volného konce vlákna o 3,5 mm.

Závěr

Tato práce se věnovala zvýšení soudržnosti mezi polypropylenovými vlákny Spokar o průměru 0,305 mm a cementovou matricí (CEM I 42,5 R, w/c 0,40-0,41). Zlepšování fyzikální interakce mezi těmito dvěma materiály bylo založeno na leptání povrchů vláken (zdrsňení) pomocí plazmatického výboje v kyslíkové atmosféře a na použití jemně mletého betonového recyklátu, jehož zrna měla vytvořit adhezní klínky v mezifázové oblasti. Hmotnostní obsah recyklátu byl 30 % cementu. Změna soudržnosti byla experimentálně ověřována pomocí tzv. pull-out testů, při kterých byla z cementové matrice vytahována jednotlivá vlákna, přičemž byla sledována síla, která tomuto posunu vzdorovala. Ukázalo se, že:

- Použitím recyklátů jako příměsí do cementové matrice nebyla zvýšena její soudržnost s referenčními vlákny (oproti čistě cementové matrici).
- Povrchově upravená vlákna vykazala větší soudržnost s cementovou matricí oproti referenčním vláknům, a to až o 15-20 %.
- Nejlepší soudržnost byla zjištěna při použití povrchově upravených vláken a cementové matrice s betonovým recyklátem (nárůst o dalších cca 10 % oproti čistě cementové matrici).

Poděkování

Autoři textu děkují Ministerstvu průmyslu a obchodu za finanční podporu tohoto výzkumu v rámci programu FV20503, dále Českému vysokému učení technickému v Praze za podporu v rámci projektu

SGS16/201/OHK1/3T/11. Dále děkují firmě LAVARIS s. r. o. za technickou podporu při výzkumu a firmě Spokar a. s. za poskytování materiálů.

Literatura

- [1] Škopán, M.: Sborník konferenčních příspěvků Recycling 2015. Vensen, 2015, p. 19-27.
- [2] Schepper, M., Snellings, R., Buysser, K., Driessche, I., Belie, N.: The hydration of cement regenerated from completely recyclable concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 60, 2014, p. 33-41.
- [3] Lauritzen, E.K.: Recycling concrete – an overview of development and challenges, *International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 2004, p. 297-305.
- [4] online, dostupné z: <https://www.rilem.net/>
- [5] online, dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/>
- [6] online, dostupné z: <https://www.concrete.org/>
- [7] ACI Committee 555: Removal and reuse of hardened concrete (ACI 555R-01), American Concrete Institute, Farmington Hills, 2001.
- [8] Růžička, V.: Lightweight blocks based on recycled concrete, 2011, CTU in Prague.
- [9] Cabral, A.E.B.: Eco-efficient concrete, 2013, Woodhead Publishing Limited.
- [10] Hansen, T.C.: Recycling of demolished concrete and masonry, *RILEM Report 6*, 1992, Taylor & Francis
- [11] Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M.: Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete, *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, p. 735-742.
- [12] Jianzhuang, X., Jiabin, L., Zhang, Ch.: Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading, *Cement and Concrete Research*, vol. 6, 2005, 1187-1194.
- [13] Topič, J., Prošek, Z.: Properties and microstructure of cement paste including recycled concrete powder, *Acta Polytechnica*, vol. 57, 2017, p. 49-57.
- [14] Topič, J., Trejbal, J., Plachý, T., Prošek, Z.: Relationship between compressive strength and Young's modulus of cement paste with recycled concrete powder, *Key Engineering Material*, vol. 722, 2017, p. 254-259.
- [15] Evangelista, L., Brito, J.: Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates, *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, 2007, p. 397-401.
- [16] Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, Informační centrum ČKAIT, 2005, Praha.
- [17] Kim, Y.J., et al.: Utilization of waste concrete powder as a substitution material for cement, *Construction and Building Materials*, vol. 30, 2012, 500-504.
- [18] Lidmila, M., et al.: Utilization of recycled fine-ground concrete from railway sleepers for production of cement-based binder, *Conference on Experimental Stress Analysis*, 2014, p. 323-326.
- [19] Trejbal, J., et al.: Interface enhancement between polymeric macro-fibers and cement matrix by plasma treatment, *Conference Nanocon*, 2017.
- [20] Hlůžek, R.: Analýza a modifikace přechodových zón mezi vláknitou výztuží a cementovou maticí, Diplomová práce, 2018, ČVUT v Praze.

