

# VHODNÝ TVAR ZKUŠEBNÍCH TĚLES PRO AUTOMATICKÉ VYHODNOCOVÁNÍ ZACELOVÁNÍ TRHLIN

Jakub Žák, \*

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

## ABSTRAKT

Pro výzkum zacelování trhlin v betonu v důsledku autogenního hojení, vlivem příměsí sekundární krystalizace nebo mikroorganismů je potřeba velké množství zkušebních těles s velkým množstvím trhlin. Nejvhodnější metoda hojení trhlin může být stanovena jen na základě zkoumání trhlin při různých okrajových podmínkách. Vhodným materiálem pro tyto účely je textilní beton (TRC) s netkanou polypropylenovou textilií. Zkušební vzorky TRC mohou obsahovat mnoho různých trhlin, a to i při malých rozměrech. Tvorba trhlin je možná ohybovým namáháním vzorků. Pro možnost využití automatizace vyhodnocování trhlin je tedy nutné vyrobit zakřivená zkušební tělesa a trhliny vytvořit jejich narovnáním.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Textilní beton • TRC • Autogenní hojení • Tvorba trhlin • Vývoj trhlin

## ABSTRACT

A large number of test specimens with a large number of cracks are needed for research of cracks healing in concrete due to autogenous healing, secondary crystallization admixtures or microorganisms. The most suitable method of crack healing can only be determined by examining cracks under different boundary conditions. A suitable material for this purpose is textile concrete (TRC) with non-woven polypropylene textile. TRC test specimens can contain many different cracks, even with small dimensions. The development of crack is possible by bending the samples. In order to be able to use automation of crack evaluation, it is therefore necessary to produce curved test specimens and create cracks by straightening them.

## KEYWORDS

Textile reinforced concrete • TRC • Autogenous healing • Crack creation • Crack development

## 1. ÚVOD

V současné době se začalo objevovat větší množstvím odborných studií a článků zabývajících se autogenním hojením betonu (Edvardsen 1999, Žáková a Žák 2019), využitím přísad způsobujících sekundární krystalizaci za účelem zacelování trhlin (Rahhal et al. 2009, Pazderka a Hájková 2016, Pazderka 2016, Pazderka a Hájková 2017), a dokonce zacelováním trhlin pomocí mikroorganismů (Žáková et al. 2019, Ryparová 2020). Hlavním cílem je zajistit co největší trvanlivost konstrukce tím, že se zamezí infiltraci vody do objektu. V laboratořích se daří funkčnost těchto přísad prokázat, ale v reálných konstrukcích se nedaří dosáhnout optimální účinnosti, ať už se při snaze o efektivní zacelování trhlin využívají přísady, mikroorganismy a nebo přirozené autogenní hojení betonu. Je tedy potřeba přesněji definovat optimální okrajové podmínky, které je možné aplikovat na reálnou konstrukci. Účinnost otaření reaguje na různé teploty, vlhkosti, či kombinaci dalších složek betonu. Z toho vyplývá, že je proto nutné vyrobit velké množství vzorků a při zkoušení je vystavovat různým podmínkám.

Tento příspěvek se zabývá možností výroby betonových vzorků vhodných ke zkoumání velkého množství trhlin při různých podmínkách. Vychází přitom z předchozích zkušeností s výrobou vzorků z textilního betonu (Žák et al. 2021). Cílem je získat malý vzorek s velkým množstvím trhlin o různých šířkách. Důraz je však kladen na možnost automatizace vyhodnocování výsledků. Zároveň by vzhledem k množství zkoumaných kombinací podmínek a přísad měla být při výrobě vzorků ideálně co nejmenší spotřeba materiálu. Textilní beton s netkanou polypropylenovou textilií se osvědčil jako vhodný materiál. Není sice vhodným materiálem pro nosné konstrukce, ale díky schopnosti velkého přetváření, při kterém vzniká velké množství malých trhlin, umožňuje při malém objemu zkušebních vzorků efektivně zkoumat zacelování trhlin v betonu. Díky tomu ani zkušební nádoby s kontrolovanými okrajovými podmínkami, do kterých budou vzorky uloženy, nemusí nezabírají mnoho prostoru a je možné zkoumat velké množství vzorků současně.

Zkušební vzorky pro automatizované vyhodnocování je ale navíc potřeba navrhnout tak, aby jediným úkonem, který musí pracovník vykonat, bylo vložení vzorku do zkušebního přístroje.

---

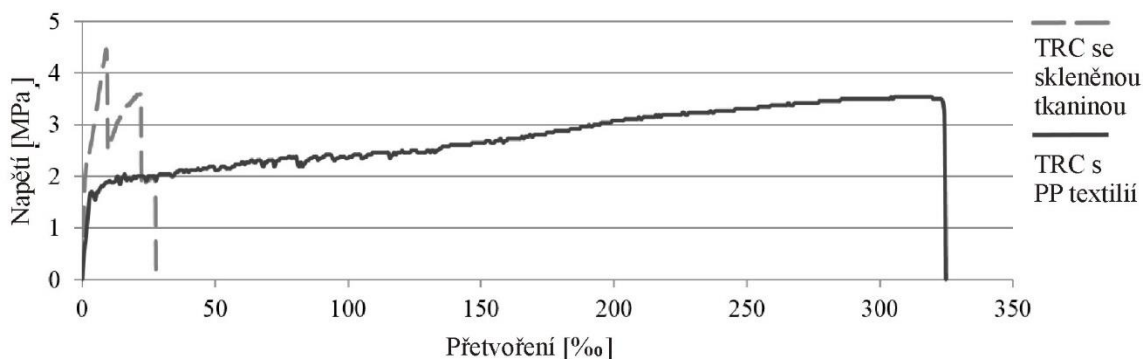
\* Školitel: prof. Ing. Petr Štemberk, Ph.D., D.Eng.

## 2. MATERIÁLY A METODY

Textilní beton je vyráběn vrstvením cementové směsi a výztužných textilií. Textilie může být zhotovena z různých materiálů. Vhodné je alkalivzdorné sklo, uhlíková vlákna, nebo různé plasty (polypropylen, polyethylen, aj.). Pro výzkum trhlin se ukázal jako nejvhodnější materiál polypropylenová netkaná textilie. Zkušební těleso s netkanou polypropylenovou textilií (Obrázek 1) vykazuje oproti tělesu se skleněnou tkaninou nižší výslednou pevnost, ale jeho přetvárné možnosti jsou výrazně větší (Obrázek 2).



Obrázek 1: Zkušební tělesa z TRC.



Obrázek 2: Pracovní diagram zkušebních těles z textilních betonů při zkoušce pevnosti v jednoosém tahu.

### 2.1. Tvorba trhlin ve vzorcích z textilního betonu

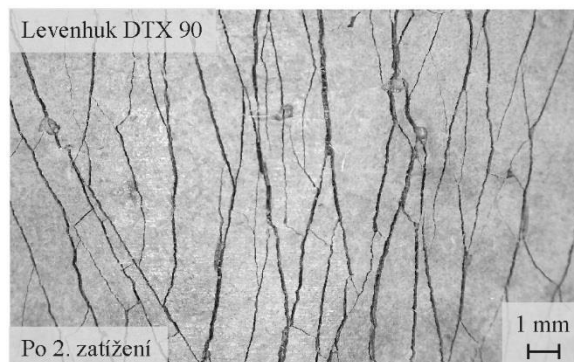
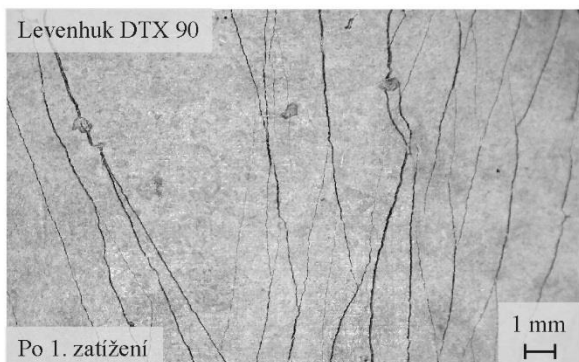
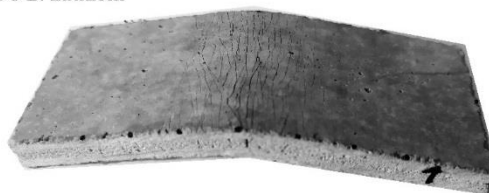
Trhliny ve vzorcích mohou být vytvořeny tahovým nebo ohybovým namáháním. Ve vzorcích zatížených tahovým zatížením vzniknout trhliny v celé oblasti mezi kleštinami, kterými je zkušební vzorek upevněn. Není tedy možné využít celé délky vzorku. Druhé úskalí tohoto vytváření trhlin je fakt, že trhliny se po odtížení vzorku uzavírají a vzorek je celkově náchylný na deformace vlivem již pouhé manipulace s ním.

Bylo by tedy nutné vzorek zafixovat v nataženém stavu, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků. Oproti tomu vícevrstvé vzorky vystavené ohybovému namáhání zůstávají po odtížení zdeformované a mají dostatečnou tuhost, aby při běžné manipulaci nedocházelo k náhodné deformaci. Trhliny lze navíc vytvořit v libovolné části vzorku a podle velikosti deformace je možné přesně definovat šířku zkoumaných trhlin (Obrázek 3). Hlavní nevýhodou těchto vzorků je časově náročné vyhodnocování vzhledem k zakřivení vzorku.

Po 1. zatížení



Po 2. zatížení

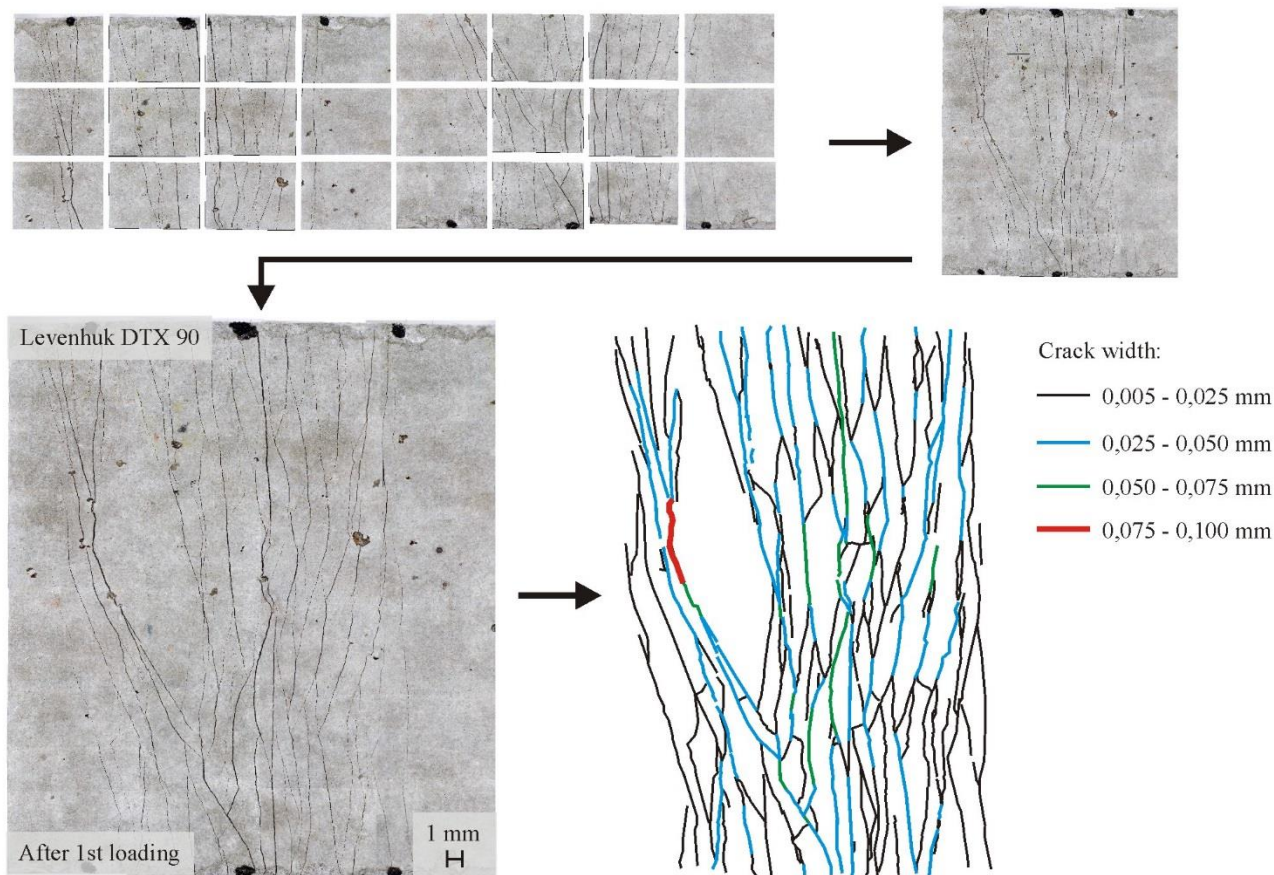


Obrázek 3: Rorvoj trhlin po opakovaném zatěžování zkušebního vzorku.

Při betonáži se často využívají dvě směsi cementové malty. K infiltraci polypropylenové netkané textilie je nutné využít jemnozrnnou maltu nejlépe s kamenivem velikosti maximálně 0,25 mm. Mezivrstvy je možné vyrobit ze směsi s hrubším kamenivem. Přesto není možné využít hrubé kamenivo, které se běžně v konstrukčních betonech vyskytuje. Výzkum na vzorcích z textilního betonu by tedy měl být v závěru ověřen zkouškami na reálné směsi.

## 2.2. Vyhodnocování šířky trhlin

Vyhodnocování šířky trhlin je prováděno pomocí digitálního mikroskopu. Povrch zkušební vzorku je nasnímán po částech, které jsou následně složeny dohromady. Na záznamu celého povrchu jsou následně vyhodnoceny šířky i délky všech trhlin (Obrázek 4).



Obrázek 4: Postup automatizované vyhodnocování vzorků.

Vyhodnocování trhlin na zkušebním tělese zatíženým ohybovým namáháním je velmi časově náročné vzhledem k trvalé deformaci vzorku. Při pořizování snímků je nutné snímat povrch v kolmém směru. K tomu je nutné zkušební

těleso nebo mikroskop nejen posouvat, ale i natáčet (Obrázek 5). Po každém posunu a natočení vzorku je nutné mikroskop znovu zaostřit a kalibrovat. Tyto operace jsou velmi časově náročné. Navíc zaostřená a tudíž i použitelná část snímku je menší než při snímání rovného vzorku.



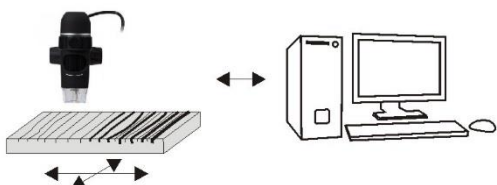
Obrázek 5: Vyhodnocování zakřiveného vzorku.

### 3. VÝSLEDKY A DISKUSE

Ze získaných zkušeností vzešel návrh zkušební vzorku, který bude vhodný pro automatizované vyhodnocování velkého množství vzorků.

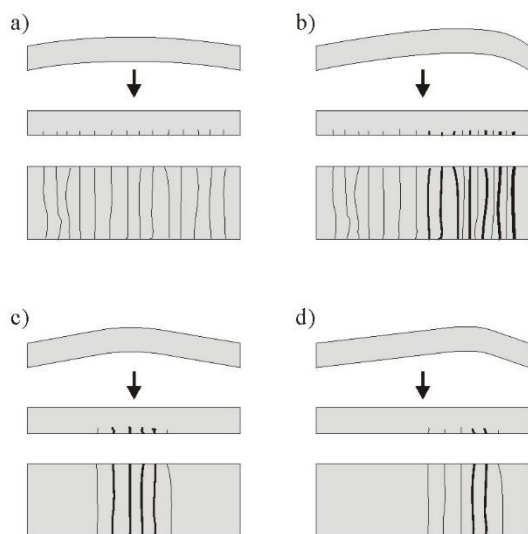
Pro možnost automatizovaného vyhodnocování je nutné zajistit, aby mikroskop pořídil snímky v pravidelném rastru a v odpovídající kvalitě. Pak je možné vzorek automaticky celý nasnímat, automaticky nechat složit snímky dohromady i automaticky vyhodnotit velikosti a délky trhlin. Je tedy nutné, aby při posunu vzorku nedocházelo k rozostření záznamu nebo nutnosti nové kalibrace. Toho lze dosáhnout vyhodnocováním výsledků na rovném vzorku. Rovný vzorek je pak uložen na křížový stůl a jeho posun a snímání je ovládáno softwarově pomocí krokových motorů (Obrázek 6).

Hlavním požadavkem na takový vzorek je rovinnost při snímání. Aby měl zkušební vzorek trhliny v rovném stavu je nutné vyrobít ho v stavu zakřiveném. Tvar vzorku při výrobě definuje množství a velikost trhlin. Není tedy možné velikost trhlin definovat dodatečně při zatěžování, ale ztrátu této výhody výrazně převyšují výhody automatizovaného vyhodnocování.



Obrázek 6: Automatizace vyhodnocování výsledků.

Pokud je požadavek vyhodnocovat trhliny nějaké konkrétní šířky, vzorky je vhodné vyrobít tak, aby střednice kopírovala kružnici vhodného poloměru. Pokud je ale požadavek na zastoupení různých šířek trhlin, je nutné vyrobít vzorek s proměnnou křivostí. Dokonce je možné vyrobít vzorek, který má trhliny pouze na konkrétní části (Obrázek 7).



Obrázek 7: Vhodné tvary zkušebních těles:

a) tvar pro užší rozmezí šířek trhlin; b) tvar pro široké rozmezí šířek trhlin; c-d) tvar pro lokální vznik trhlin.

### 4. ZÁVĚR

V tomto příspěvku je popsáno využití textilního betonu s netkanou polypropylenovou textilií k výrobě vzorků pro výzkum a popis trendů vývoje trhlin a procesu autogenního hojení trhlin v betonu. Největší výhodou vzorků z textilního betonu je možnost zkoumat velké množství trhlin na relativně malé ploše. Další výhodou popsaných vzorků je menší množství spotřebovaného materiálu, menší nároky na skladovací prostory a po skončení experimentu i menší množství odpadu než při zkouškách na velkých zkušebních tělesech.

Hlavním přínosem je návrh tvaru vzorku pro automatizované vyhodnocování, pomocí kterého lze uvedeným postupem generovat velké množství dat z velkého množství sad identických vzorků, které budou vystavovány různým okrajovým podmínkám. Tím pak bude možné přesněji definovat podmínky pro využívání přísad podporujících autogenní hojení betonu ve stavební praxi.

### PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří Českému vysokému učení technickému v Praze, které tuto práci finančně podporovalo v rámci projektu SGS21/044/OHK1/1T/11.

### Reference

- Edvardsen C (1999) Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. *ACI Materials Journal* **96** 448–54
- Žáková, H., & Žák, J. (2019). Using of TRC for research of crack evolution and the effect of autogenous healing. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **596** 012045
- Rahhal V et al. (2009) Scheme of the Portland cement hydration with crystalline mineral admixtures and other aspects Silicates *Industriels* **74** 347-52
- Pazderka J and Hájková E (2016) Crystalline Admixtures and Their Effect On Selected Properties Of Concrete *Acta Polytechnica* **56** 306–11
- Pazderka J (2016) Concrete with Crystalline Admixture for Ventilated Tunnel against Moisture *Key Engineering Materials* **677** 108–13
- Pazderka J and Hájková E (2017) The speed of the crystalline admixture's waterproofing effect in concrete *Key Engineering Materials* **722** 108-12
- Žáková, H.; Pazderka, J.; Ryparová, P.; Rácová, Z. (2019) Effect of Bacteria *Bacillus pseudofirmus* and Fungus *Trichoderma reesei* on Self-healing Ability of Concrete. *Acta Polytechnica* **21** 42-45
- Ryparová, P.; Tesárek, P.; Schreiberová, H.; Prošek, Z. (2020) The effect of temperature on bacterial self-healing processes in building materials. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **726** 012012
- Žák, J., Frantová, M. a Štemberk, P. (2021) Design and production of samples suitable for testing of autogenous healing of concrete *AIP Conference Proceedings* **2322**, 020035