



Prethodno priopćenje/Preliminary communication

Primljen/Received: 31. 10. 2019.

Prihvaćen/Accepted: 12. 12. 2019.

ODREĐIVANJE I KVANTIFICIRANJE UNUTARNJEG PONAŠANJA CEMENTNIH MATRIČNIH KOMPOZITA POMOĆU SENZORA S OPTIČKIM VLAKNIMA

Saidi Mohamed

Laboratorij za kompozitne materijale za izgradnju (LMC2), Sveučilište u Lyonu 1, Francuska, mohamed.saidi@univ-lyon1.fr

Gabor Aron

Laboratorij za kompozitne materijale za izgradnju (LMC2), Sveučilište u Lyonu 1, Francuska, aron.gabor@univ-lyon1.fr

Sažetak: Tekstilom ojačani cementni matrični kompoziti (TOCMK) smatraju se jednom od tehnika za ojačanje i popravak građevinskih objekata. Uporaba ovih kompozita je razvijena zbog njihovih visokih mehaničkih svojstava u pogledu vlačne čvrstoće. Zbog toga je mehaničko ponašanje TOCMK-a bilo predmet nekoliko eksperimentalnih i numeričkih studija i istraživanja kako bi se utvrdili parametri koji upravljaju njegovim ponašanjem. Međutim, ove studije se provode pomoću mjernih tehnika kojima se procjenjuje stanje naprezanja i deformacije na površini TOCMK-a. Ponašanje i unutarnje interakcije se izvode pristupima mehanike kontinuuma i loma.

Ovaj rad obuhvaća integriranje optičkog vlakna u kompozit kako bi se izmjerile unutarnje deformacije matrice i tekstila. Dobiveni rezultati se uspoređuju sa zakonom smjesa, koji u ovom trenutku ostaje hipoteza koja nije eksperimentalno potvrđena.

Ključne riječi: cementni matrični kompozit, unutarnje mehaničko ponašanje, senzor s optičkim vlaknima, zakon smjesa, unutarnja deformacija, interakcija između vlakna i matrice

IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION OF THE INTERNAL BEHAVIOUR OF CEMENTITIOUS MATRIX COMPOSITES USING AN OPTICAL FIBRE SENSOR

Abstract: Textile Reinforced Cementitious Matrix Composite (TRCMC) are considered one of the techniques for strengthening and repairing of civil engineering structures. The use of these composites was developed due to their high mechanical properties in terms of tensile strength. As a result, the mechanical behaviour of TRCMC has been the subject of several experimental and numerical studies and investigations to establish the parameters governing its behaviour. However, these studies are conducted using measurement techniques that evaluate the strain and stress state on the surface of the TRCMCs. Behaviour and internal interactions are deduced using continuum and failure mechanics approaches.

This work consists of integrating an optical fibre into the composite in order to measure the internal strain of the matrix and the textile. The results obtained are compared to the law of mixtures, which remains at this moment a hypothesis that has not been experimentally validated.

Key words: cementitious matrix composite, internal mechanical behaviour, optical fibre sensor, law of mixtures, internal strain, fibre-matrix interaction



1. Uvod

Materijali tekstilom ojačanih cementnih matričnih kompozita (TOCMK, engl. TRCMC - Textile Reinforced Cementitious Matrix Composite) sve se češće koriste za popravak i ojačanje sustava građevinskih komponenti konstrukcija. Analiza mehaničkog ponašanja TOCMK-a radi se različitim tehnikama mjerenja općenito usmjerenim na površinu uzoraka, poput ekstenzometara, korelacije digitalnih slika (DIC), linearnog davača pomaka, lasera itd. [1–3]. Iz tih mjerenja, unutarnje interakcije ovih kompozita se izvode pristupima mehanike kontinuuma i loma, što je omogućilo postavljanje hipoteza i modela koji opisuju moguće mikro-mehaničke parametre koji upravljaju interakcijama između ojačanja i matrice TOCMK-a.

Zahvaljujući geometrijskim i ekstenzometrijskim prednostima ispitivanja raspodijeljenim optičkim vlaknima (mali promjer, fleksibilnost, lakoća, preciznost, milimetarska prostorna rezolucija, osjetljivost, itd.), ova metoda mjerenja se koristi u nekoliko područja, uključujući građevinarstvo. Ona se koristi kao sredstvo za procjenu stanja zgrada [4,5], i bila je predmet nekoliko studija, uključujući praćenje ponašanja u jezgri betonskih konstrukcija [6].

Što se tiče proučavanja mehaničkog ponašanja kompozita, uporaba optičkih vlakana kao senzora deformacija bila je predmet nekoliko eksperimentalnih ispitivanja [7], osobito Braggova rešetka. Kompoziti s matricama polimera ojačanim tekstilom, kao što su polimer ojačan vlaknima [8] i termoplastični matrični kompoziti [9], proučavani su pomoću optičkih vlakana. Međutim, do sada je na cementno-matričnim kompozitima provedeno samo nekoliko eksperimentalnih studija s ovim sensorima i s optičkim vlaknima.

Cilj ove studije je eksperimentalno utvrditi unutarnje ponašanje tekstilom ojačanih cementnih matričnih kompozita na temelju lokalnih mjerenja u jezgri ispitivanog materijala. U tu svrhu se za dobivanje lokalnog mehaničkog ponašanja matrice i tekstilnog ojačanja, prije i poslije pucanja, kao raspodijeljeni senzori deformacije ugrađeni u jezgru TOCMK kompozita koriste raspodijeljena optička vlakna za ispitivanje temeljeno na načelu Rayleighovog povratnog raspršenja [10]. Dobiveni rezultati uspoređuju se s pretpostavkama zakona smjesa kako bi se ispitala njegova valjanost.

2. Materijali i struktura eksperimenta

2.1. Materijali

2.1.1 Cementna matrica

Kako bi se olakšala priprema, smanjila geometrijska oštećenja uzoraka TOCMK-a i izbjeglo oštećivanje optičkog vlakna, koristi se etringitna, tekuća i samopolagajuća cementna matrica. Mehaničke karakteristike sintetizirane su u tablici 1.

2.1.2 Tekstilno ojačanje

Tekstilna armatura korištena u ovom ispitivanju je staklena mreža otporna na lužine, površinske mase 525 g/m² i veličine mreže 5×5 (mm²). U tablici 1. prikazane su glavne mehaničke karakteristike ovog tekstila na temelju karakterizacijskih ispitivanja provedenih u laboratoriju.

Tablica 1. Mehanička svojstva korištene matrice i tekstilnog ojačanja¹

Materijal	$\sigma_{\text{tlak.max}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{vlak.max}}$ (MPa)	$\epsilon_{\text{tlak.max}}$ ($\mu\text{m/m}$)	$\epsilon_{\text{vlak.max}}$ ($\mu\text{m/m}$)	E_c tlak (MPa)	E_t vlak (MPa)
Matrica	40	4.5	3000	400	13000	14000
Tekstil	-	520	-	1.5	-	35000



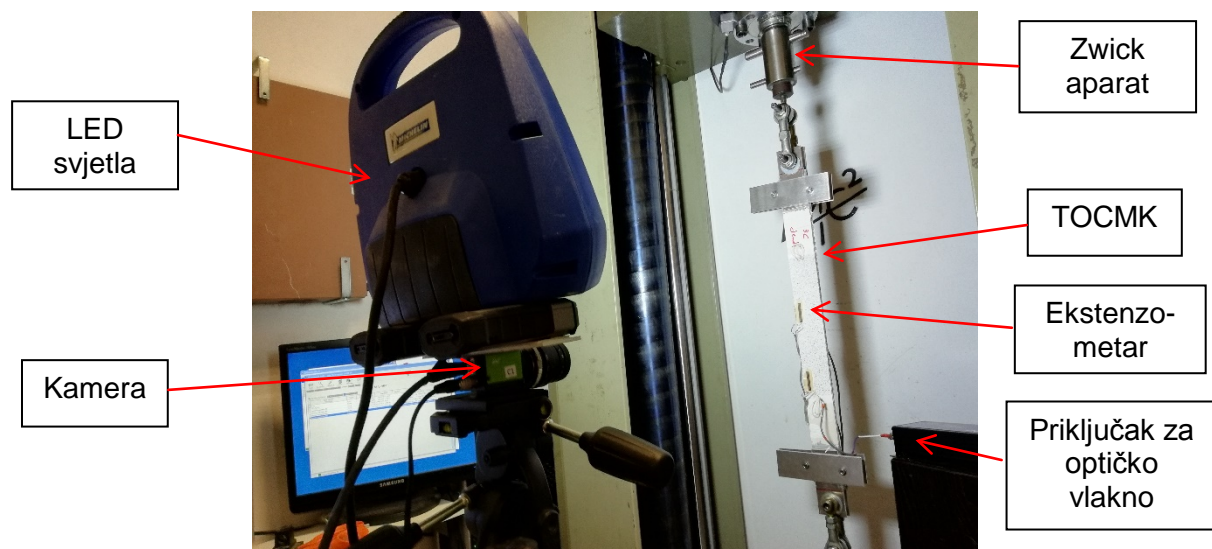
2.1.1. Postavka eksperimenta

2.1.2. Vlačni aparat

Ispitivanje na vlak, proučavano u ovom radu, provodi se pomoću univerzalnog ispitnog stroja Zwick prikazanog na slici 1., maksimalnog kapaciteta 65 kN, opremljenog sensorima opterećenja i pomaka. Cjelina je povezana s računalom koje omogućava programiranje ispitivanja i prikupljanje rezultata. Ispitivanje se kontrolira pomakom, brzinom od 0,1 mm/min.

2.1.3. Prikupljanje podataka optičkih vlakana

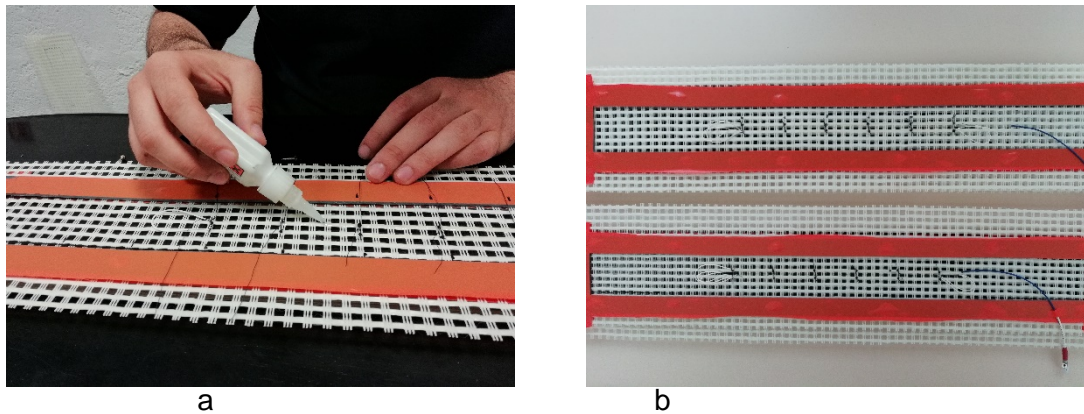
U ovom radu se kao uređaj za prikupljanje podataka iz optičkog vlakna koristi ODISI-B LUNA (Optical Distributed Sensor Interrogator). Potonji se temelji na OFDR-Rayleighovom načelu. Za uklanjanje rezidualnih deformacija i trenutnu vizualizaciju rezultata moguće je na početku ispitivanja kalibrirati optičko vlakno. Za naše je ispitivanje prostorna rezolucija je 2,6 mm u cijelom rasponu optičkog vlakna (2 m), s učestalošću snimanja od 2 Hz.



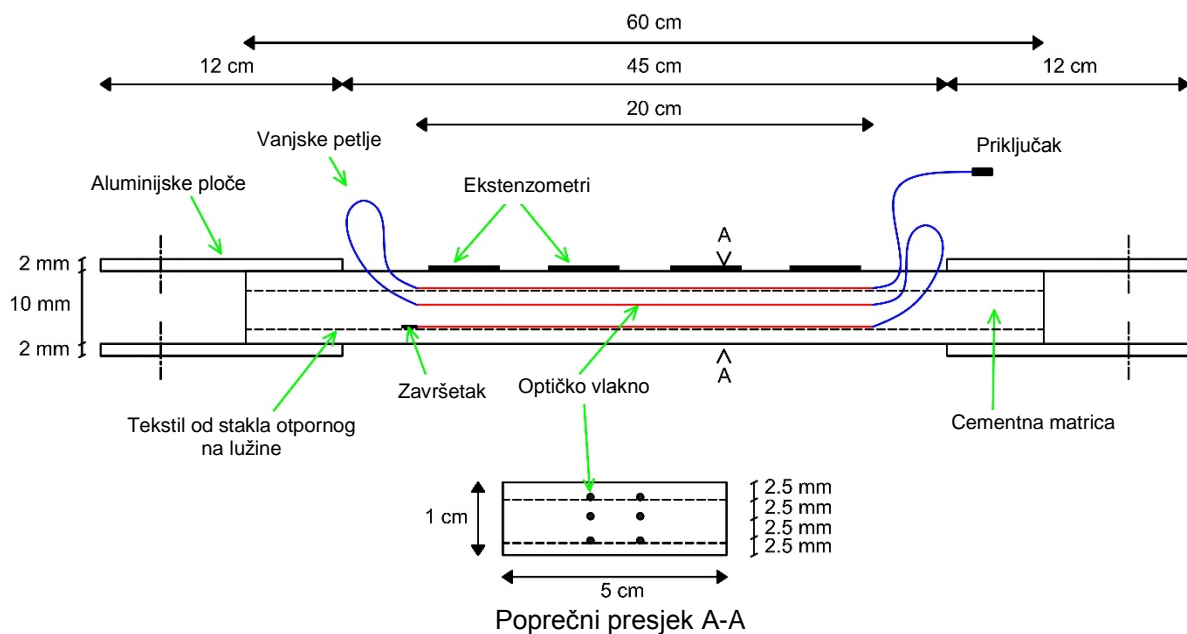
Slika 1. Eksperimentalni protokol za vlačni pokus TOCMK-a s optičkim vlaknima1

2.1.4. Priprema uzoraka

Priprema uzoraka sastoji se u formiranju pravokutnog PVC kalupa dimenzija dužine 60 cm, širine 5 cm i visine 1 cm. Posebno se vodi računa da se optičko vlakno postavi na sredinu matrice i na tekstil, kao što je prikazano na slici 2-a. Nakon što se pripremi kalup i postavi tekstil s optičkim vlaknom (slika 2-b), lijeva se cementna matrica. Nakon vađenja iz kalupa, dvije aluminijske ploče se lijepe na oba kraja uzoraka za vlačno ispitivanje (slika 3.). Detalji pripreme (umetanje i učvršćivanje optičkog vlakna, lijevanje matrice ...) su prikazani na [11,12].



Slika 2. Pozicioniranje optičkog vlakna: (a) lijepljenje na tekstilnu armaturu; (b) uzorci spremni za lijevanje matrice2



Slika 3. Okvirni dijagram TOCMK-a s položajem optičkog vlakna3

3. Rezultati i rasprava

Rezultati iz optičkog vlakna prikazani su na slikama 4. i 5. Prvi prikazuje krivulju deformacije i naprezanja za tekstil i matricu, dok drugi prikazuje razvoj polja deformacije uzduž uzorka.

3.1. Zona prije pucanja

U skladu s literaturom, zona prije pucanja pokazuje kvazilinearno ponašanje u pogledu naprezanja i deformacije. Ponašanje matrice i tekstila u ovoj zoni je gotovo identično, i vrijednosti deformacija zabilježene za obje komponente za dano naprezanje su gotovo identične.

Kako bi usporedili eksperimentalne rezultate s vrijednostima dobivenim primjenom zakona smjesa, autori su odlučili raditi na osnovi Youngovog modula E_1 zone prije pucanja. Rezultati su ukratko prikazani u tablici 2. Ova tablica pokazuje da postoji 4,68% razlike između eksperimentalnih rezultata i zakona smjesa. Ova razlika se može objasniti

geometrijskim nesavršenostima uzorka, koje utječu na vrijednost površine poprečnog presjeka, a time i na naprezanje kompozita, a zatim i modula E_1 .

Zaključno, u skladu s ovim eksperimentalnim rezultatima, zakon smjesa se može primijeniti u prvoj zoni ponašanja TOCMK kompozita, pod uvjetom da su geometrijske karakteristike uzorka kontrolirane na najbolji mogući način i da su mehanička svojstva matrice i tekstila što preciznije poznata.

Tablica 2. Usporedba eksperimentalne vrijednosti E_1 i one izračunate zakonom smjesa²

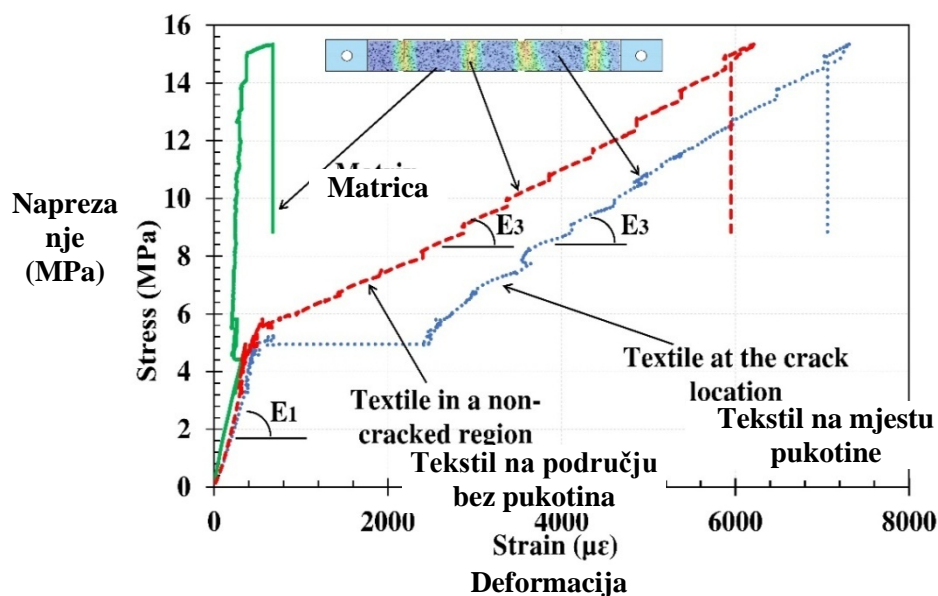
Koeficijent ojačanja V_f (%)	E_m matrice (MPa)	E_f tekstila (MPa)	Eksperimentalna vrijednost E_1 (MPa)	Zakon smjesa E_1 (MPa)	Razlika (%)
4.8	14000	35000	14336	15008	4.68

3.2. Zona poslije pucanja

Osvrćući se na rezultate prikazane na slici 4., može se vidjeti da u području poslije pucanja TOCMK-a, tekstil preuzima svu silu primijenjenu tijekom ove faze opterećivanja, dok matrica ostaje zategnuta, ali se njena deformacija više ne povećava, ili je čak zabilježeno i neznatno smanjenje. Ovi nalazi su u skladu s pretpostavkama zakona smjesa u vezi s ponašanjem ove zone. Osim toga, na mjestu pukotine (slika 5.) tekstilno ojačanje preuzima puno opterećenje primijenjeno na kompozit, pa matrica u tom momentu više nema svoj doprinos, što objašnjava veliku deformaciju tekstilnog ojačanja zabilježenu na mjestu pukotine.

Za usporedbu vlačnog ponašanja tekstila u jezgri TOCMK-a u zoni nakon pucanja, s vlačnim ponašanjem samog tekstila, u tablici 3. dan je sažet pregled usporedbe vrijednosti Youngovih modula. Obratite pažnju da se za dobivanja Youngovog modula ojačanja u jezgri TOCMK-a (E_{3f}), modul kompozita E_3 dijeli s koeficijentom ojačanja V_f .

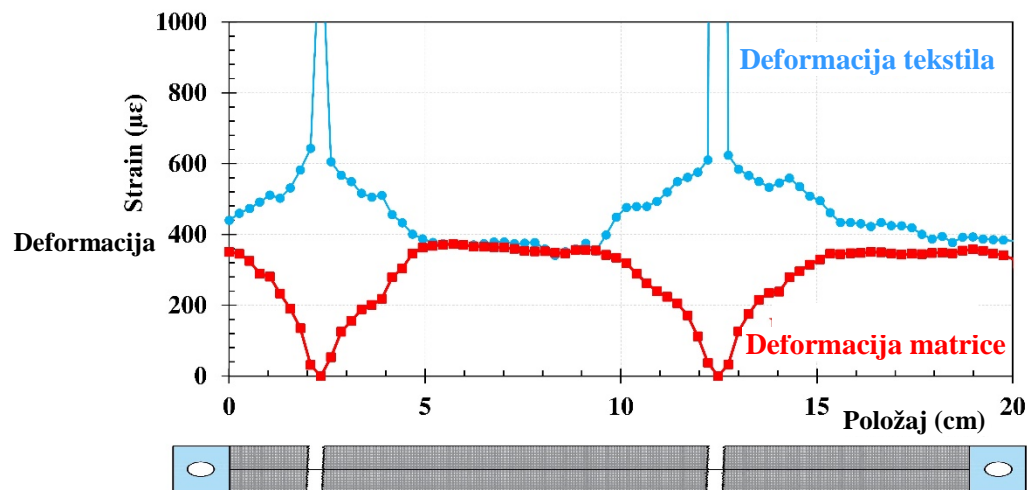
Iz ovih rezultata se može potvrditi da u trećoj zoni tekstil preuzima cjelokupno opterećenje primijenjeno tijekom ove faze. Ovoj sili se dodaje sila nanosena tijekom prethodnih faza kako bi činila ukupno opterećenje tekstila. S druge strane, matrica općenito zadržava vrijednost deformacije nakon nastanka posljednje pukotine. Osim toga, kao što je spomenuto u nekoliko studija [1,13], ovo ponašanje objašnjava porast otvora pukotina uočen tijekom faze nakon pucanja, kao što je prikazano na slici 6.



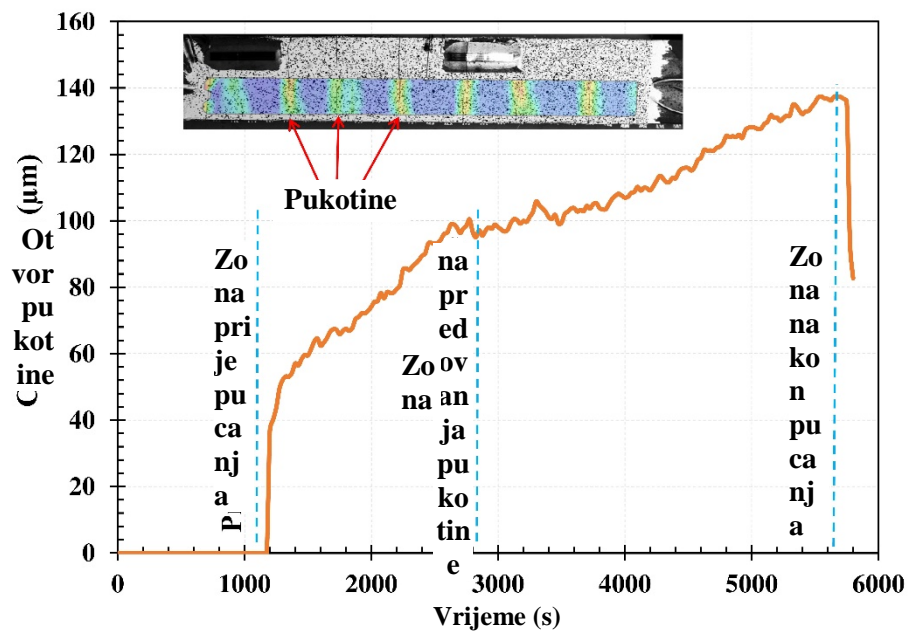
Slika 4. Eksperimentalni rezultati unutarnjeg lokalnog ponašanja matrice i tekstila⁴

Tablica 3. Usporedba između eksperimentalne vrijednosti E_3 i one izračunate zakonom smjesa³

Koeficijent ojačanja V_f (%)	E_m matrice (MPa)	E_f tekstila (MPa)	Pokusna vrijednost E_3 (MPa)	$E_f = E_3 / V_f$ (MPa)	Razlika (%)
4.8	14000	35000	1700	35417	1.17



Slika 5. Raspodjela deformacija matrice i tekstilnog ojačanja duž TOCMK-a tijekom napredovanja pukotina⁵



Slika 6. Razvoj otvora pukotina tijekom ispitivanja TOCMK-a na vlak⁶



4. Zaključak

U ovom radu se govori o lokalnom vlačnom ponašanju tekstilom ojačanih cementnih matričnih kompozita (TOCMK) u eksperimentalnim uvjetima, koristeći raspodijeljena optička vlakna kao senzore deformacije ugrađene u jezgri ovih kompozita.

Zahvaljujući prednostima mjerenja deformacija ovom novom tehnikom, tijekom ispitivanja na vlak TOCMK-a ponašanje matrice i tekstila je izmjereno, određeno i uspoređeno s pretpostavkama mehanike kompozita. U nastavku su navedeni glavni rezultati:

- U zoni prije pucanja TOCMK-a, mehaničko ponašanje matrice i tekstilnog ojačanja su približno identični, karakterizirani gotovo linearnom krutošću. Dokazana je valjanost zakona smjesa u ovoj zoni i potvrđena je hipoteza savršene veze matrice i tekstila.
- U zoni nakon pucanja, tekstil preuzima gotovo ukupno nanoseno opterećenje, a matrica ostaje zategnuta, zadržavajući svoju deformaciju koju je pretrpjela u prethodnim fazama. Ovi rezultati potvrđuju valjanost pretpostavki zakona smjesa. Uz to, pomažu u razumijevanju povećanja otvora pukotina u ovoj zoni.
- Za određivanje i kvantificiranje mikro mehaničkih parametara koji opisuju mehanizme prijenosa opterećenja, kao što su duljina prijenosa opterećenja, raspodjela posmičnog naprezanja, zaostalo naprezanje itd., kao mogućnost bilo bi mudro koristiti mjerenje optičkim vlaknima

5. Literatura

1. Caggegi, C., Lanoye, E., Djama, K., Bassil, A. & Gabor, A.: *Tensile behaviour of a basalt TRM strengthening system: Influence of mortar and reinforcing textile ratios*, Compos. Part B Eng, 2017, 130, 90–102.
2. Contamine, R.: *Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier: application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant*, Université Claude Bernard - Lyon I-France, 2011.
3. Promis, G., Gabor, A. & Hamelin, P.: *Analytical modeling of the bending behavior of textile reinforced mineral matrix composite beams*, Compos. Struct., 2011, 93, 792–801.
4. Henault, J.-M.: *Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure réparties de déformation: application à un câble à fibre optique noyé dans le béton*, Université Paris-Est-France, 2013.
5. Rao, Y.: *Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors*, Opt. Lasers Eng, 1999, 31, 297–324.
6. Tixier, A., Rospars, C., Dufour, F., Khadour, A. & Masson, B.: *Analyse des déformations par fibres optiques le long de l'interface acier-béton dans un essai push-in*, in 31èmes Rencontres de l'AUGC, 2013.
7. Bruno, L.: *Mechanical characterization of composite materials by optical techniques: A review*, Opt. Lasers Eng., 2018, 104, 192–203.
8. Kim, S.-W.: *Characteristics of strain transfer and the reflected spectrum of a metal-coated fiber Bragg grating sensor*, Opt. Lasers Eng., 2017, 96, 83–93.
9. De Baere, I., Luyckx, G., Voet, E., Van Paepegem, W. & Degrieck, J.: *On the feasibility of optical fibre sensors for strain monitoring in thermoplastic composites under fatigue loading conditions*, Opt. Lasers Eng., 2009, 47, 403–411.
10. Soller, B. J., Gifford, D. K., Wolfe, M. S. & Froggatt, M. E.: *High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies*, Opt. Express, 2005, 13, 666.
11. Saidi, M. & Gabor, A.: *Use of distributed optical fibre as a strain sensor in textile reinforced cementitious matrix composites*, Measurement, 2019, 140, 323–333.
12. Saidi, M. & Gabor, A.: *Experimental analysis of the tensile behaviour of textile*

Određivanje i kvantificiranje unutarnjeg ponašanja cementnih matičnih kompozita pomoću senzora s optičkim vlaknima



reinforced cementitious matrix composites using distributed fibre optic sensing (DFOS)

technology, Constr. Build. Mater., 2019, 230, 117027.

13. Contamine, R., Si Larbi, A. & Hamelin, P.: *Contribution to direct tensile testing of textile reinforced concrete (TRC) composites*, Mater. Sci. Eng. A, 2011, 528, 8589–8598.