

Primljen / Received: 29.10.2024.

Ispravljen / Corrected: 22.4.2025.

Prihvaćen / Accepted: 2.6.2025.

Dostupno online / Available online: 10.9.2025.

Mehanizam propadanja betona ojačanog vlaknima uslijed korozije na osnovi analize na makrorazini i mikrorazini

Autori:



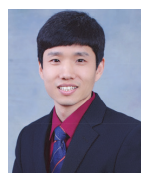
Ya Yin, dipl.ing.građ.
18801259880@163.com



Prof.dr.sc. **Lan Qiao**
lanqiao@ustb.edu.cn



Mr.sc. **Linbo Song**, dipl.ing.rud.
1325016164@qq.com



Prof.dr.sc. **Qingwen Li**
qingwenli@ustb.edu.cn
Autor za korespondenciju



Miao Miao, dipl.ing.građ.
15837090872@163.com



An Luo, dipl.ing.građ.
281041645@qq.com

Sveučilište za znanost i tehnologiju u Pekingu
Fakultet za inženjerstvo resursa i sigurnosti

Prethodno priopćenje

Ya Yin, Lan Qiao, Linbo Song, Qingwen Li, Miao Miao, An Luo

Mehanizam propadanja betona ojačanog vlaknima uslijed korozije na osnovi analize na makrorazini i mikrorazini

U ovome istraživanju sustavno su ispitani mehanički odziv i mikrostrukturne značajke betona ojačanoga polipropilenskim vlaknima s unaprijed oblikovanim pukotinama, pod simuliranim uvjetima korozije u laboratoriju i na terenu. Osmišljeno je šest scenarija korozije na osnovi betonske mješavine razreda C40. Kombinacijom mehaničkih ispitivanja, digitalne korelacije slike (DIC) i mikrostrukturne analize utvrđeno je da sadržaj polipropilenskih vlakana od 0,3 mas. % znatno poboljšava tlačnu čvrstoću i smanjuje poprečnu deformaciju, dok prekomjerni udio vlakana dovodi do pogoršanja svojstava uslijed povećane poroznosti. Veće koncentracije korozivnih tvari uzrokovala su smanjenje modula elastičnosti, iako je mreža vlakana ublažila degradaciju krutosti. Unaprijed oblikovane pukotine potaknule su širenje mješovitih pukotina tipa I–II, pri čemu su jaki korozivni uvjeti znatno povećali gustoću mikropukotina i ubrzali pojavu kritičnih zona deformacije. Mikrostrukturna analiza pokazala je da korozija uzrokovana ionima $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ razgrađuje kalcij-silikat-hidrat (CSH) gel, pri čemu nastaju gips, etringit i Friedelova sol. Rezultati ovog istraživanja predstavljaju teorijsku podlogu za projektiranje konstrukcija otpornih na koroziju i povećanje njihove trajnosti u uvjetima dubokog iskopa, oslanjajući se na integrirane analize na makrorazini i mikrorazini.

Ključne riječi:

beton ojačan vlaknima, propadanje uzrokovano korozijom, unaprijed oblikovane pukotine, mehanička svojstva, digitalna korelacija slika (DIC), mikrostruktura

Research Paper

Ya Yin, Lan Qiao, Linbo Song, Qingwen Li, Miao Miao, An Luo

Corrosion deterioration mechanism of fiber-reinforced concrete based on macro- and micro-scale analysis

This study systematically investigated the mechanical response and microstructural characteristics of polypropylene fiber-reinforced concrete with prefabricated cracks under simulated field and laboratory corrosion conditions. Six corrosion scenarios were designed based on a C40 concrete mix. Through mechanical testing, digital image correlation, and microstructural characterization, we found that a polypropylene fiber content of 0.3 wt% markedly enhances compressive strength and suppresses lateral deformation, while excessive fiber content leads to performance deterioration due to increased porosity. Higher corrosion concentrations induced a decline in the elastic modulus, although the fiber network mitigated stiffness degradation. Prefabricated cracks promoted the propagation of mixed-mode I–II fractures, with severe corrosion environments significantly increasing microcrack density and advancing the onset of critical strain zones. Microstructural analysis revealed that $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ corrosion decomposes C–S–H gel, generating gypsum, ettringite, and Friedel's salt. This study provides a multiscale theoretical foundation for the corrosion-resistant design and service-life prediction of support structures in deep mining from both macro- and microscale perspectives.

Key words:

fiber reinforced concrete, corrosion deterioration, prefabricated cracks, mechanical properties, DIC, microstructure

1. Uvod

S razvojem dubinskog iskorištavanja metalnih ležišta geološke strukture i uvjeti ležišta postajali su sve složeniji [1]. Povećanje naprezanja tla, dotoka podzemnih voda, iznenadnih proboja vode te intenzivnog procjeđivanja kroz stijenske stijene stvara vrlo zahtjevne uvjete za pojavu korozije pod velikim naprezanjima. Kao posljedica toga okolne stijene i potporne konstrukcije neprestano su izložene erozivnim učincima vode u rudnicima, pritisku vode, visokim temperaturama i naprezanjima stijena [2]. S vremenom korozivni ioni prodiru u potporne konstrukcije kroz pukotine i nedostatke, potičući složene kemijske reakcije koje uzrokuju propadanje [3, 4]. Na primjer, ioni Cl^- izravno potiču kemijsku koroziju betona, što dovodi do otapanja i faznog prijelaza cementne matrice uz istodobno stvaranje Friedelove soli koja se širi. Ioni SO_4^{2-} potiču nastanak etringita i gipsa, pri čemu dolazi do razvoja unutarnjih naprezanja i posljedičnoga obujamskog širenja. Ioni Mg^{2+} zamjenjuju ione Ca^{2+} u C-S-H gelu, pri čemu nastaje $\text{Mg}(\text{OH})_2$, što dovodi do povećanja poroznosti. Ioni NO_3^- reagiraju s C-S-H gelom stvarajući kalcijev nitrat, koji otapa vezivne faze i time olakšava difuziju iona Cl^- . Ioni HCO_3^- stupaju u reakciju s $\text{Ca}(\text{OH})_2$, pri čemu nastaje topivi kalcijev bikarbonat ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$), što ubrzava razgradnju matrice i pojačava stvaranje pukotina na površini. U tako zahtjevnim uvjetima znatno se smanjuje konstrukcijska cjelovitost trajnih betonskih nosača u rudarskim oknima i tunelima, a s produljenjem uporabnog vijeka i pojačanom pojavom korozije postaju sve izraženiji problemi s trajnošću [5]. Zato je, kao odgovor na složene geološke i inženjerske uvjete specifične za dubinsku eksploataciju metalnih ležišta, neophodno sustavno istražiti mehanizme korozije i degradacije betonskih konstrukcija unutar sustava podgrade pod djelovanjem više istodobnih utjecaja. Uspostavljanje cjelovitog okvira usmjerenog na cijeli životni vijek konstrukcija za tehnologije preventivnog održavanja i sanacije ključno je znanstveno polazište za osiguranje sigurnosti rudarskih radova i promicanje održivog razvoja. U inženjerskoj praksi vlakna se široko primjenjuju kao dodaci betonu u cilju znatnog poboljšanja njegovih fizikalnih i mehaničkih svojstava. Učinkovito ispunjavaju unutarnje defekte, čime se povećavaju gustoća, nepropusnost i otpornost na koroziju [6, 7]. Natarajan i sur. [8] pokazali su da uzorci betona s udjelima staklenih vlakana od 0,09 % i 0,06 % postižu najveću čvrstoću na savijanje, odnosno na posmik. Shi i sur. [9] primijenili su dva ekološki prihvatljiva vlaknasta materijala: reciklirana čelična vlakna iz automobilskih guma (engl. *recycled tire steel fibers* - RTSF) i kokosova vlakna (engl. *coconut fibers* - CF). RTSF vlakna primarno su pridonijela otpornosti na nastanak i širenje pukotina, dok su kokosova vlakna poboljšala žilavost materijala. Nguyen i sur. [10] ispitali su ponašanje betona s polipropilenskim vlaknima (engl. *polypropylene fibers* - PF) izloženog sulfatnoj koroziji i izmjeni ciklusa sušenja i vlaženja. Mikroskopske analize pokazale su da učinak premošćivanja koji ostvaruju vlakna znatno povećava otpornost betona na koroziju i djelovanje zamrzavanja. Vođeno zahtjevima inženjerske prakse, ovo istraživanje usmjereno je na poboljšanje trajnosti betonskog

sustava podgrade u rudarskim oknima. Polazno je primijenjena betonska mješavina s terena, u koju su inovativno dodana polipropilenska vlakna kao funkcionalni dodatak. Provedeno je sustavno eksperimentalno ispitivanje s promjenjivim udjelima vlakana, koje je obuhvatilo dugotrajna ispitivanja uranjanja, mehaničku analizu i karakterizaciju mikrostrukture u cilju detaljnog istraživanja mehanizama kojima polipropilenska vlakna poboljšavaju otpornost betona na koroziju.

Kao znatan čimbenik koji ograničava dugoročnu nosivost podgradnih konstrukcija u stijenama okna izdvojio se problem nastanka pukotina u spojevima, uzrokovanih izvođenjem u segmentima, odnosno nemonolitnom gradnjom. Dosadašnja istraživanja pokazala su da su nastanak i širenje unutarnjih oštećenja i mikropukotina glavni uzroci konstrukcijskog sloma [11, 12]. Osim toga prolazna udarna opterećenja nastala inženjerskim zahvatima poput miniranja dodatno ubrzavaju razvoj i prodor pukotina, čime se znatno narušava ukupna stabilnost nosive konstrukcije [13]. Zato je cilj ovog istraživanja bio ispitati utjecaj spojeva i pukotina na čvrstoću potpornih konstrukcija preko prethodno oblikovanih pukotina. U području istraživanja betona provedena su brojna ispitivanja različitih geometrijskih parametara pukotina, pri čemu su postignuti znatni rezultati [15, 16]. Xue i sur. [17] analizirali su svojstva sloma betona s unaprijed izrađenim zarezima pod cikličkim opterećenjem. Yang i sur. [18] proučavali su ponašanje betona s polivinil-alkoholnim vlaknima pri dinamičkom lomu uz prisutnost prethodno oblikovanih pukotina. Iako su polipropilenska vlakna pokazala znatne prednosti u poboljšanju otpornosti betona na koroziju i povećanju njegove trajnosti, mehanizmi kojima ta vlakna utječu na otpornost betona s unaprijed oblikovanim pukotinama još uvijek nisu dovoljno razjašnjeni na mikrorazini. Osim toga mehanizmi međudjelovanja između obrazaca korozijske degradacije u betonu s pukotinama izrađenom u laboratorijskim uvjetima i onih koji se javljaju u stvarnim rudarskim okruženjima još uvijek nisu u cijelosti razjašnjeni, što otežava izravnu primjenu laboratorijskih rezultata u inženjerskoj praksi.

Ovo istraživanje usmjereno je na beton za potporu okna u rudniku zlata Shaling, pri čemu se ispituje otpornost na koroziju betona ojačanog polipropilenskim vlaknima s unaprijed oblikovanim pukotinama, izloženog jednako agresivnim uvjetima korozije u stvarnim rudarskim i laboratorijski simuliranim okruženjima. Optimalna količina polipropilenskih vlakana određena je na temelju stvarnog sastava betonske mješavine s terena. Osmišljeno je šest različitih uvjeta korozije: referentna skupina bez vlakana izložena koroziji, kontrolna skupina s vlaknima bez izlaganja koroziji, skupina uronjena u *in situ* uvjetima te tri skupine izložene ubrzanoj koroziji pri ekvivalentnim koncentracijama od 1×, 3× i 6×. Provedena su opsežna makroskopska mehanička ispitivanja, a za analizu karakteristika širenja pukotina u predgotovljenome betonu ojačanome vlaknima pri jednoosnome tlačnom opterećenju primijenjena je metoda digitalne korelacije slike (engl. *Digital Image Correlation* - DIC). Za promatranje razvoja mikrostrukturne morfologije primijenjen je skenirajući elektronski mikroskop (engl. *Scanning Electron Microscopy* - SEM), dok je za kvantitativnu analizu obrazaca stvaranja produkata korozije poput Friedelove soli i gipsa

upotrijebljena rendgenska difrakcija (engl. *X-ray Diffraction* – XRD). Ovo istraživanje otkriva mehanizme djelovanja vlakana i propadanja uslijed korozije s makroskopske i mikroskopske razine, pružajući ključne parametre i teorijsku osnovu za projektiranje potpornih konstrukcija otpornih na koroziju u rudnicima s visokom razinom saliniteta. Također služi kao tehnička smjernica za definiranje radnih uvjeta za ubrzana laboratorijska ispitivanja korozije.

2. Izrada pilot-programa

2.1. Odabir materijala i određivanje sastava mješavine

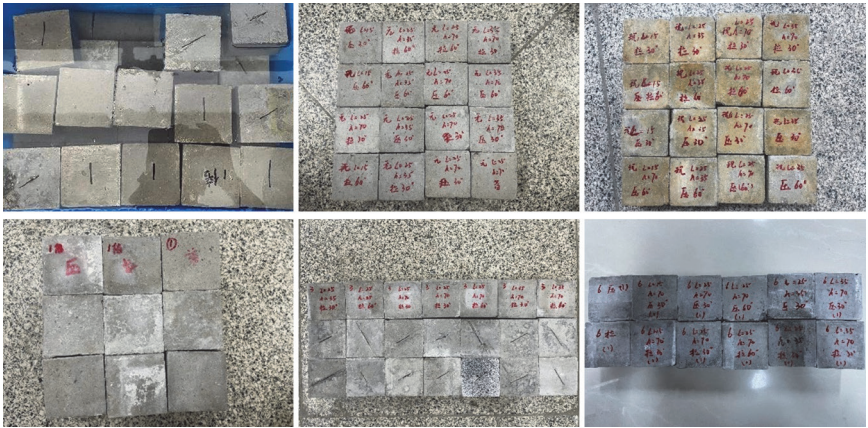
U ovom je istraživanju primijenjen sastav betona za podgrade okna kao osnova za pripremu uzoraka betona ojačanog vlaknima razreda C40. Omjeri sastojaka betona razreda C40 koji se upotrebljava u stvarnoj konstrukciji podgrade prikazani su u tablici 1. Vodocementni omjer iznosio je 0,32, s konzistencijom slijeganjem od 190 mm. Tlačne čvrstoće nakon 7 i 28 dana pri uobičajenim uvjetima njege bile su 40,6 MPa odnosno 51,3 MPa. Udio pijeska iznosio je 42 %, a gustoća betona 2421 kg/m³. Primijenjen je portlandski cement (PO 42,5). Sitni agregat bio je prirodni riječni pijesak dobre granulacije (zona II.), s prividnom gustoćom od 2400 kg/m³, nasipnom gustoćom od 1540 kg/m³ i modulom finoće 2,89. Krupni agregat sastojao se od šljunka dviju različitih frakcija: 5 do 10 mm i 10 do 25 mm, s prividnim gustoćama od 2670 kg/m³ i 2700 kg/m³ te gustoćama zbijenog materijala od 1510 kg/m³ i 1540 kg/m³, pomiješanih u omjeru 1 : 1. Primijenjena su polipropilenska vlakna u obliku snopova monofilamenata promjera 30 – 80 mikrona, duljine 6 mm, gustoće 0,91 kg/m³, modula elastičnosti 4,8 GPa i vlačne čvrstoće 486 MPa. Vlakna su djelomično zamijenila fini pijesak u udjelima od 0,1, 0,2, 0,3, 0,4 i 0,5 % mase. Za pripremu uzoraka upotrijebljena je obična vodovodna voda, u skladu sa standardom za uporabu vode u betonu (JGJ63–2006).

2.2. Korozivni uvjeti i unaprijed oblikovane pukotine

Kako bi se istražili učinci degradacije betona s vlaknima u uvjetima visoke razine saliniteta, ovo se istraživanje temeljilo na

izvješćima o kvaliteti vode iz četiriju rudarskih okna. Koncentracije klorida u uzorcima vode iznosile su od 8,5 × 10³ mg/L do 11,0 × 10³ mg/L, koncentracije sulfida od 40 mg/L do 60 mg/L, dok su pH-vrijednosti bile u rasponu od 6,5 do 8, što upućuje na gotovo neutralne uvjete. Radi osiguranja točnosti eksperimenta, u laboratoriju pripremljena je ekvivalentna 1× otopina za uranjanje, temeljena na koncentracijama klorida i sulfata izmjerenima u spremniku vode glavnog okna (na dubini od 1100 m). Točnije, otopina sadržava koncentracije kloridnih i sulfatnih iona od 9,57 × 10³ mg/L odnosno 56 mg/L. Radi simulacije ekvivalentnih i ubrzanih korozijskih učinaka stvarnog okružja, pripremljene su otopine s 3× i 6× koncentracijom korozivnih tvari, koje su uspoređene s nekorozivnim uvjetima i uranjanjem u vodu s terena. Budući da je eksperiment ponajprije bio usmjeren na utjecaj kloridnih i sulfatnih iona na degradaciju uzoraka, otopine su pripremljene isključivo s NaCl i Na₂SO₄ kako bi se isključio utjecaj drugih potencijalno korozivnih iona. Dugotrajna ispitivanja uranjanjem provedena su na terenu i u laboratoriju, s razdobljem uranjanja od 120 dana, pri čemu su kao referentne kontrolne skupine postavljeni uzorci bez vlakana u ekvivalentnim 1× korozivnim uvjetima te uzorci s vlaknima u nekorozivnim uvjetima.

Ukratko, u ovom su istraživanju definirani sljedeći eksperimentalni uvjeti: uzorci bez vlakana izloženi ekvivalentnoj 1× koroziji, uzorci s vlaknima u nekorozivnim uvjetima, uranjanje na licu mjesta te ubrzana korozija pri koncentracijama od 1×, 3× i 6×. Radi jednostavnijeg prikaza i analize podataka, tih je šest uvjeta u nastavku teksta označeno s A1, A2, A3, A4, A5 i A6. Specifični parametri navedeni su u tablici 2., a fotografije uzoraka prikazane su na slici 1.



Slika 1. Fotografije šest skupina uzoraka (A1 – A6)

Tablica 1. Određivanje sastava betona za podgrade u oknima

Naziv materijala	Cement	Pijesak	Krupni agregat	Voda
Parametarski	PO 42,5	Modul finoće 2,8 Udio muljevitih čestica 2,6 %	Veličina zrna 5 do 25 mm Udio muljevitih čestica 0,6 %	Prirodna voda
Količina materijala ((kg/m ³): cement, pijesak, krupni agregat, voda = 496, 712, 982, 231				
Omjer mase: cement : pijesak, krupni agregat, voda = 1 : 1,44, 1,98, 0,47				

Tablica 2. Eksperimentalni uvjeti

Opis stanja	ID	Veličina uzorka [mm]	Veličina pukotine [mm]	Broj uzoraka				NaCl/(g·L ⁻¹)	Na ₂ SO ₄ /(g·L ⁻¹)
				Tlak	Vlak	Posmik	Mikrostruktura		
Bez vlakana, 1x ekvivalent korozije	A1	70,7×70,7×70,7	70,7×20×1	3	3	3	prah	15,84	0,09
Ojačano vlaknima, nema korozije	A2	70,7×70,7×70,7	70,7×20×1	3	3	3	prah	-	-
Uranjanje na licu mjesta (in situ)	A3	70,7×70,7×70,7	70,7×20×1	3	3	3	prah	-	-
Uranjanje u laboratorijskim uvjetima, koncentracija 1x	A4	70,7×70,7×70,7	70,7×20×1	3	3	3	prah	15,84	0,09
Uranjanje u laboratorijskim uvjetima, koncentracija 3x	A5	70,7×70,7×70,7	70,7×20×1	3	3	3	prah	47,51	0,27
Uranjanje u laboratorijskim uvjetima, koncentracija 6x	A6	70,7×70,7×70,7	70,7×20×1	3	3	3	prah	95,02	0,54

Kako bi se analizirali oblici sloma uzoraka s unaprijed oblikovanim pukotinama pod različitim korozijskim uvjetima uranjanja, za izradu pukotina upotrijebljen je visokoprecizni 3D pisač (XYZ Printing Da Vinci 3,0), pri čemu su dimenzije pukotina iznosile 70,7 × 20 × 1 mm. Pisač ima promjer mlaznice od 0,4 mm i preciznost ispisa od 0,1 mm. Radi na principu modeliranja nanošenjem rastopljenog materijala (engl. *fused deposition modeling* - FDM), pri čemu upotrebljava polilaktičnu kiselinu (PLA) kao materijal za ispis te uzorke izrađuje postupnim nanošenjem slojeva.

2.3. Plan ispitivanja

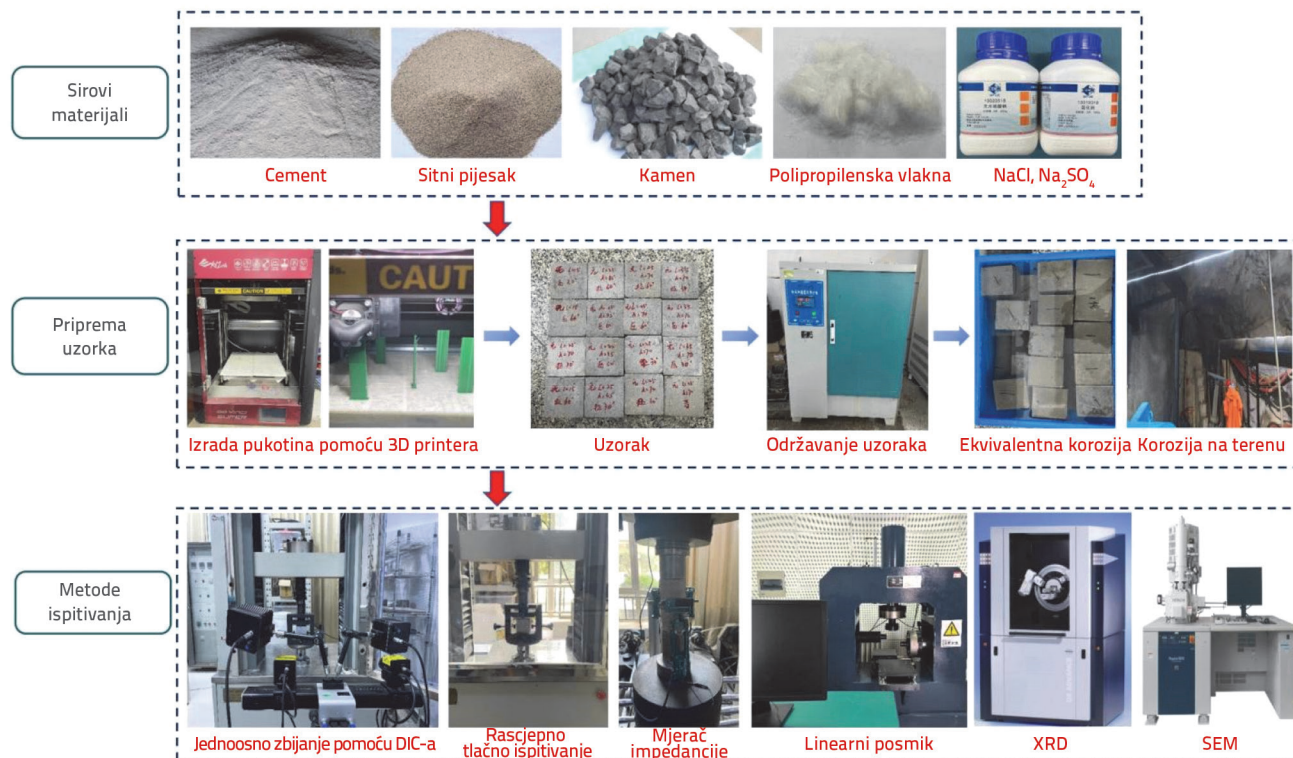
Eksperimentalna shema primijenjena u ovome istraživanju prikazana je na slici 2., a postupak pripreme uzoraka s unaprijed oblikovanim pukotinama jest sljedeći:

- Prije ugradnje betona unutar plastičnoga kalupa postavlja se čvrsti model pukotine izrađen 3D ispisom (dimenzija 70,7 × 20 × 15 mm), pri čemu unutarnje dimenzije kalupa iznose 70,7 × 70,7 × 70,7 mm.
- Prije ugradnje betona sitni i krupni agregat potrebno je osušiti u skladu s normom Metode ispitivanja za vlaknima ojačan beton (CECS 13-2009), kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela vlakana u uzorku i spriječilo njihovo zgrudnjavanje.
- Prema unaprijed određenim omjerima mješavine, prvo se fini pijesak i cement miješaju na suho 60 sekundi, zatim se u miješalicu dodaju vlakna i nastavlja se miješati još 60 sekundi.

- Voda se polako ulijeva uzduž unutarnje stijenke miješalice, uz nastavak miješanja u trajanju od 60 sekundi. Na kraju se postupno dodaje prethodno vagani šljunak i miješa još 90 sekundi. U slučaju zgrudnjavanja tijekom miješanja miješalicu treba odmah zaustaviti, grudice ručno razbiti lopaticom, a zatim ponovno pokrenuti miješanje.
- Kako bi se omogućilo jednostavno vađenje iz kalupa, potrebno je ravnomjerno nanijeti sredstvo za odvajanje na model pukotine i unutarnje stijenke kalupa. Nakon miješanja svježi se beton ulijeva u kalup u slojevima, pri čemu je važno da je pukotina pravilno centrirana i postavljena pod kutom od 30°, što se provjerava pomoću kutomjera, kako bi se spriječilo pomicanje tijekom vibriranja. Ostruže se višak morta, a ostatak prekrije plastičnom folijom kako bi se dovršila ugradnja. Nakon vezivanja uzorka pažljivo se uklanja 3D model pukotine. Nakon 48 sati uzorci se vade iz kalupa i stavljaju u klimatsku komoru uz stalnu temperaturu i vlagu, gdje ostaju 28 dana. Potom se provode eksperimentalna ispitivanja.

Metode ispitivanja jesu sljedeće:

- **Ispitivanje mehaničkih svojstava:** Ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće provedena su pomoću uređaja za tlačno ispitivanje WHY-2000Z s mikroračunalnim upravljanjem, u skladu s Tehničkim propisom za primjenu vlaknima ojačanog betona (JGJ/T 221-2010). Brzine opterećenja iznosile su 0,5 MPa/s i 0,05 MPa/s. Ispitivanja izravnog posmika provedena su u skladu sa Standardom za geotehničke metode ispitivanja (GB/T 50123-2023). Uzorci su postavljeni u posmičnu kutiju



Slika 2. Program ispitivanja

(dimenzioniranu za uzorke veličine 70,7 mm), uz pozorno poravnavanje ravnine smicanja kako bi se smanjilo granično trenje. Normalna naprezanja primjenjivana su u fazama, pri čemu je svaka faza trajala 10 minuta. Nakon toga provedeno je horizontalno smicanje pod stalnom brzinom (0,5 mm/min), sve dok nije došlo do sloma.

- **Ekstenzometar:** Za mjerenje Poissonova omjera uzoraka (Φ50 mm × 100 mm) upotrebljava se obodni ekstenzometar. Gornja i donja površina uzorka brušene su prije opterećivanja kako bi ravnost bila manja od 0,5 mm, odstupanje dimenzija unutar ±0,03 mm, a odstupanje od okomitosti unutar ±0,25°. Tijekom mjerenja Poissonova omjera opterećenje je primjenjivano brzinom od 100 N/s, sve dok nije postignuto 80 % tlačne čvrstoće, nakon čega je brzina smanjena na 0,005 mm/min radi zaštite ekstenzometra.
- **Sustav DIC:** Za promatranje širenja pukotine primijenjena je tehnologija DIC-a velike brzine. Za snimanje primijenjen je sustav brzih kamera Photron FASTCAM Nova S12 s dvije sinkronizirane jedinice, rezolucije 1280 × 1024 piksela i brzinom snimanja od 10.000 slika u sekundi. Kamere su bile opremljene Nikon objektivima 24–70 mm f/2.8, postavljenima na žarišnu duljinu od 50 mm i otvor blende f/8.0. Snimanje je izvedeno s udaljenosti od 700 mm od kockastih uzoraka dimenzija 70,7 mm. Podaci su obrađeni primjenom računalnog programa XTDIC Analyzer Pro 2024, s veličinom podskupa od 31 × 31 piksela, veličinom koraka od 5 piksela i Green-Lagrangeovim izračunima deformacije. Točnost je osigurana kalibracijom pomoću kalibracijske ploče s mrežom 12 × 9

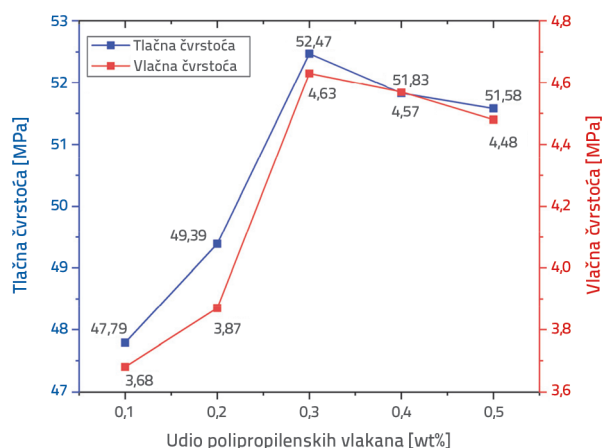
(RMS pogreška = 0,012 piksela) te održavanjem konstantne temperature okoline od 22 ± 0,5 °C.

- **Mikroskopska analiza pomoću SEM-a:** Dijelovi betona uzeti nakon mehaničkih ispitivanja sušeni su do konstantne mase u električnome termostatskom sušioniku na 60 °C. Svježe lomne površine presvučene su zlatom metodom naprašivanja, a mikrostrukturna morfologija kamenog dijela promatrana je pomoću pretražnoga elektronskog mikroskopa Hitachi S4800 (SEM).
- **XRD ispitivanje:** Dijelovi betona preostali nakon mehaničkih ispitivanja sušeni su u vakuumske sušioniku na 45 °C, a zatim samljeveni u prah čestica manjih od 0,08 mm. Za analizu mineralnog sastava primijenjen je rendgenski difraktometar Bruker D8 Advance. Brzina skeniranja iznosila je 4 °/min, uz korak od 0,02° u difrakcijskome načinu rada, pri čemu je skenirani raspon obuhvaćao kutove od 5° do 80°.

2.4. Preliminarno ispitivanje

Glavni cilj preliminarnog ispitivanja bio je utvrditi optimalan udio polipropilenskih vlakana u betonu kako bi se osigurala znanstvena osnova za kasnija ispitivanja otpornosti na koroziju. U ovome istraživanju uzorci betona s pet različitih udjela vlakana sustavno su podvrgnuti ispitivanjima tlačne čvrstoće. Rezultati su prikazani na slici 3. Analiza je pokazala da odgovarajući udio polipropilenskih vlakana znatno poboljšava tlačnu čvrstoću betona. Međutim, pri prekoračenju određene granične količine vlakana dolazi do smanjenja tlačne čvrstoće. Udio vlakana od

0,3 mas. % utvrđen je kao optimalan. Ta se pojava uglavnom pripisuje učinku zgrudnjavanja uslijed prekomjerne količine vlakana u betonskoj matrici, što dovodi do povećane poroznosti i neravnomjerne raspodjele, a time i do smanjenja gustoće i ukupne čvrstoće betona. Prethodna istraživanja betona ojačanoga polipropilenskim vlaknima navode različite optimalne udjele poput 0,05 %, 0,3 % i 0,8 % [19], što se može objasniti razlikama u svojstvima materijala, sastavu betonske mješavine, eksperimentalnim uvjetima, metodama ispitivanja i kriterijima procjene. Na temelju rezultata ovog istraživanja konačno je određen optimalan udio polipropilenskih vlakana u betonu u iznosu od 0,3 mas. %. Naknadna istraživanja usredotočit će se na analizu mehanizama propadanja betona s pukotinama pod djelovanjem različitih korozivnih uvjeta, s težištem na makroskopskoj i mikroskopskoj razini.



Slika 3. Tlačna i vlačna čvrstoća betona s različitim udjelima vlakana

3. Rezultati

3.1. Analiza čvrstoće

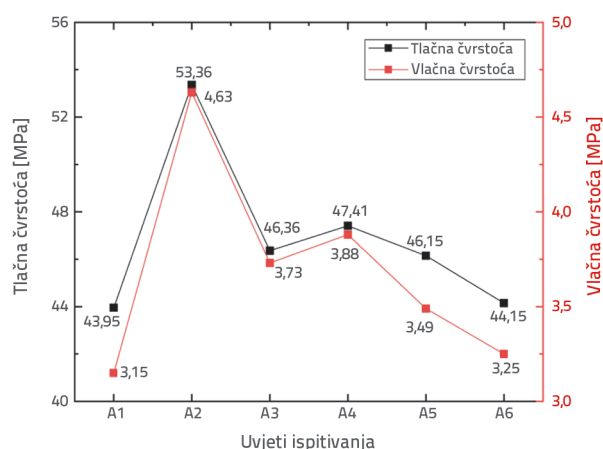
3.1.1. Tlačna i vlačna čvrstoća

Mehanička ispitivanja uzoraka provedena pod različitim eksperimentalnim uvjetima dala su rezultate tlačne i vlačne čvrstoće prikazane na slici 4. Tlačna čvrstoća uzoraka A1 i A4 porasla je s 43,95 MPa na 47,41 MPa (povećanje od 7,87 %), što upućuje na to da dodatak vlakana znatno poboljšava otpornost uzoraka na koroziju. Međutim, tlačna čvrstoća uzorka A2 iznosila je 53,56 MPa, dok su uzorci A3, A5 i A6 u korozivnim uvjetima pokazali smanjene vrijednosti tlačne čvrstoće: 46,36 MPa, 46,41 MPa i 44,15 MPa. Analiza je pokazala da različiti uvjeti uranjanja u korozivne otopine različito utječu na tlačnu čvrstoću, pri čemu je opći trend smanjenje čvrstoće s porastom koncentracije korozivne otopine.

Prodor iona Cl^- i SO_4^{2-} u uzorke pokreće složene kemijske reakcije koje dovode do stvaranja ekspanzivnih spojeva, uzrokujući naprezanja uslijed širenja te pojavu različitih oblika pukotina unutar uzoraka [20]. Posebno je važno istaknuti da je tlačna

čvrstoća uzorka A3 bila nešto manja u odnosu na uzorak A4, što se vjerojatno može pripisati višoj prosječnoj temperaturi podzemne vode (40 °C) u usporedbi s laboratorijskom temperaturom (23 °C), što utječe na brzinu prodiranja korozivnih iona u uzorak te time na stupanj oštećenja i degradacije materijala [21].

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće pokazali su da su uzorci ojačani vlaknima imali veću vlačnu čvrstoću u odnosu na uzorke bez vlakana. Vlačne čvrstoće uzoraka pod četiri različita uvjeta korozijskog uranjanja imale su redoslijed $A4 > A3 > A5 > A6$. S porastom koncentracije korozivne otopine dolazi do postupnog smanjenja vlačne čvrstoće uzoraka. Općenito gledajući, dodatak vlakana znatno je poboljšao vlačnu čvrstoću i otpornost uzoraka na koroziju.

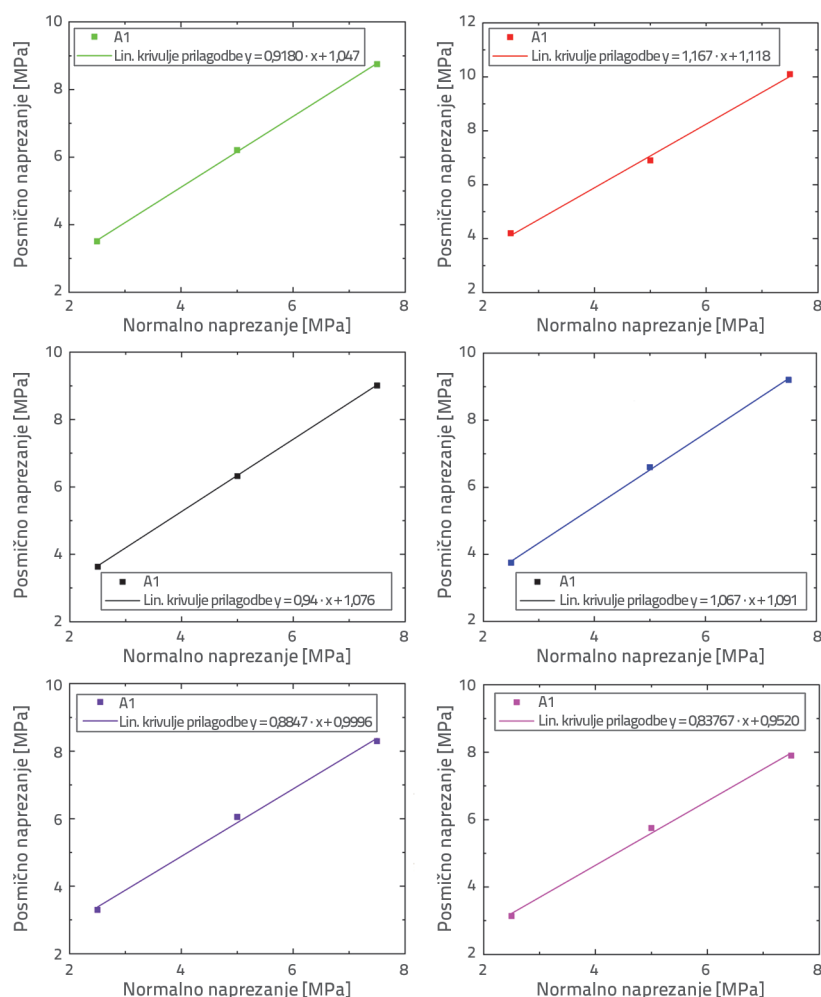


Slika 4. Tlačna i vlačna čvrstoća uzoraka pri različitim uvjetima ispitivanja

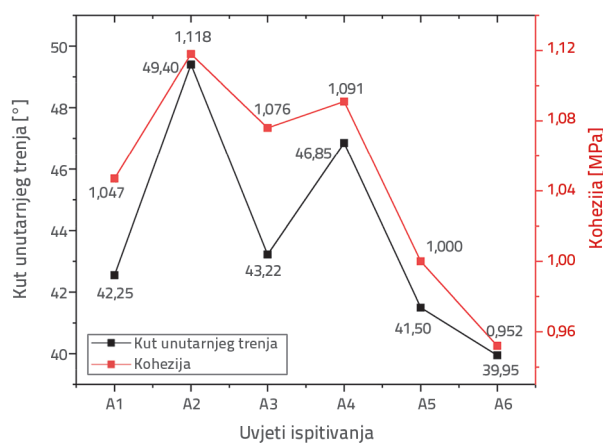
3.1.2. Kohezija i kut unutarnjeg trenja

Za određivanje parametara posmične čvrstoće betonskih uzoraka pod posmičnim opterećenjem upotrijebljeno je ispitivanje izravnim smicanjem, pri čemu su određeni kohezija (c) i kut unutarnjeg trenja (Φ). Φ i c ključni su parametri mehaničkih svojstava materijala koji izravno odražavaju silu trenja između čestica unutar materijala i silu kohezije između susjednih dijelova [22]. Ispitivanje izravnim smicanjem provedeno je na uzorcima pomoću uređaja za izravno smicanje, pri čemu su normalna naprezanja iznosila 2,5 MPa, 5,0 MPa i 7,5 MPa. Nakon obrade i prilagođavanja krivulje eksperimentalnih podataka krivulje naprezanja i deformacije smicanja prikazane su s normalnim naprezanjem (normalno naprezanje) na x-osi i posmičnim naprezanjem na y-osi, a kao što je to prikazano na slici 5.

Na osnovi Mohr-Coulombova kriterija dobivene su vrijednosti Φ i c za uzorke, a kao što je to prikazano na slici 6. Usporedba uzoraka A3 i A4 pokazuje da oba imaju znatno veće vrijednosti kuta unutarnjeg trenja (Φ) i kohezije (c) u odnosu na uzorak A1, što upućuje na to da hrapavost površine i nepravilni oblik vlakana omogućuju bolje međusobno usijecanje s česticama, čime se povećava trenje između čestica. Pod utjecajem temperature



Slika 5. Krivulje prilagodbe rezultata ispitivanja izravnim smicanjem uzoraka u različitim ispitnim uvjetima



Slika 6. Kut unutarnjeg trenja i kohezija uzoraka pod različitim uvjetima ispitivanja

okoline Φ i c A3 su niži od onih A4. S gledišta toplinskoga gibanja molekula, porast temperature pojačava molekularnu aktivnost, mijenja toplinski koeficijent materijala, slabi međučestične veze,

što u konačnici dovodi do smanjenja kohezije i pada kuta unutarnjeg trenja (Φ). Nakon izlaganja korozivnim uvjetima zabilježen je silazni trend vrijednosti kuta unutarnjeg trenja (Φ) i kohezije (c). U usporedbi s uzorkom A4, uzorak A5 pokazao je izraženije pogoršanje, dok je kod uzorka A6 smanjenje svojstava bilo relativno blaže, što upućuje na to da se s porastom koncentracije korozivne otopine brzina degradacije usporava. U okružjima s niskom koncentracijom korozivnih tvari korozijske reakcije relativno su blage i uglavnom zahvaćaju slabije zone na površini uzorka poput pora između čestica i nepravilnosti na površinama vlakana. S porastom koncentracije otopine na površini uzorka stvara se gušći sloj korozijskih produkata koji djeluje kao barijera te smanjuje prodor i utjecaj reakcije na unutarnju strukturu betona.

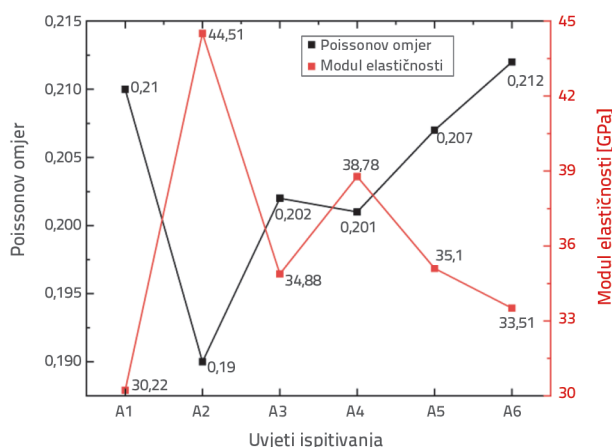
3.2. Analiza Poissonova omjera i modula elastičnosti

Poissonovi omjeri i moduli elastičnosti uzoraka dobiveni su pomoću ekstenzometra, kao što je to prikazano na slici 7. Uzorak A2 imao je najmanji Poissonov omjer, što se može pripisati velikoj vlačnoj čvrstoći i izvrsnoj žilavosti polipropilenskih vlakana. Pri djelovanju vanjskog opterećenja vlakna preuzimaju

dio lateralnih naprezanja, čime usporavaju širenje unutarnjih mikropukotina i razvoj bočne deformacije. Taj učinak djeluje poput mikroskopske "nosive mreže" unutar uzorka, koja pomaže očuvati njegov oblik i dimenzijsku stabilnost. Poissonovi omjeri uzoraka A3 i A4 bili su slični, što upućuje na to da utjecaj temperature okoline na Poissonov omjer nije bio znatan. U korozivnoj otopini ioni kemijski reagiraju s površinskim slojem uzorka, oštećuju zaštitni sloj, povećavaju unutarnju poroznost te slabe čvrstoću veze materijala. Uzorak A6 pokazao je najveći Poissonov omjer, što upućuje na povećanu sposobnost poprečne deformacije. To pokazuje da korozija ne utječe samo na Poissonov omjer, već može imati i vrlo negativan učinak na cjelokupna mehanička svojstva i trajnost uzorka.

Modul elastičnosti važan je parametar za procjenu krutosti materijala te se određuje iz elastične faze dijagrama naprezanje-deformacija. Kao što je to prikazano na slici, uzorak A2 imao je najveći, a uzorak A1 najmanji modul elastičnosti. To se pripisuje utjecaju polipropilenskih vlakana na unutarnju strukturu betona, čime se povećavaju njegova krutost i čvrstoća. Vlakna dodatno ojačavaju i očvršćuju uzorak, poboljšavajući mu otpornost na

deformacije pod opterećenjem i sposobnost apsorpcije energije i smanjenje razine oštećenja. Iako je uzorak A6 imao najmanju vrijednost modula elastičnosti među uzorcima s vlaknima, ona je i dalje bila veća od vrijednosti uzoraka bez vlakana, što potvrđuje da dodatak vlakana učinkovito doprinosi povećanju krutosti i poboljšanju ukupnih mehaničkih svojstava. Vrijednosti modula elastičnosti kod uzoraka A3 i A5 bile su međusobno usporedive. S porastom koncentracije korozivne otopine uočava se postupno smanjenje modula elastičnosti. Međutim, kada korozija dosegne određeni stupanj, stvaranje novih produkata kemijskih reakcija unutar uzorka dovodi do razvoja novih unutarnjih struktura, čime se usporava trend smanjenja modula elastičnosti.

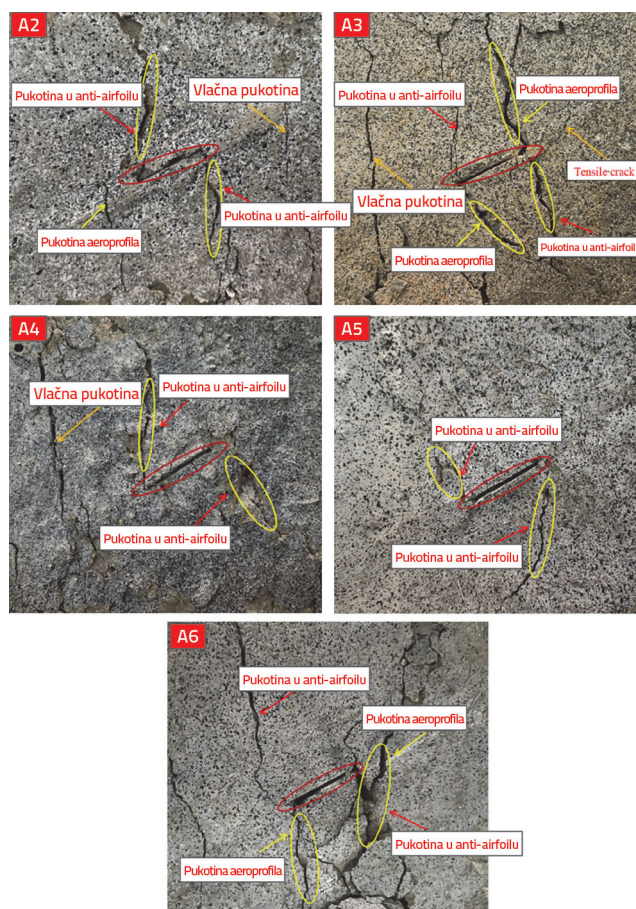


Slika 7. Poissonov omjer i modul elastičnosti uzoraka pri različitim radnim uvjetima

3.3. Makroskopska analiza obrasca oštećenja zasnovana na DIC-u

Uzorci betona ojačanog vlaknima s unaprijed oblikovanim pukotinama (duljina = 15 mm, kut = 30°, dubina = 70 mm) podvrgnuti su ispitivanju tlačne čvrstoće pri jednoosnome opterećenju, a njihovi uzorci loma prikazani su na slici 8. Crveni i žuti krugovi označavaju unaprijed oblikovane pukotine i glavne putove širenja pukotina. Za analizu razvoja pukotina tijekom opterećenja u dubljemu sloju odabrane su četiri karakteristične točke opterećenja (10,0 % Pmax, 48,0 % Pmax, 90 % Pmax i 99,8 % Pmax). Glavne deformacije i smjerovi širenja pukotina u svakoj od karakterističnih točaka dobiveni su obradom DIC podataka te su sažeto prikazani u tablici 3. U početnoj fazi opterećenja (10,0 % Pmax) unutarnje pukotine i nedostaci postupno su se zbijali pod djelovanjem tlaka, pri čemu su glavne deformacije bile male, bez pojave koncentracije naprezanja. S povećanjem opterećenja do 48,0 % Pmax koncentracija naprezanja pojavila se na dnu postojeće pukotine, uz izražene razlike u glavnim deformacijama oko pukotine. Počela su se javljati mikropukotinska područja, iako makroskopske pukotine još uvijek nisu bile vidljive. Nakon što je postignuto opterećenje od 90 % Pmax, vrijednost glavne deformacije znatno je porasla i usmjerila se prema vrhu pukotine, gdje je došlo do koncentracije naprezanja. Time su

se mikropukotine proširile u makroskopske pukotine, a uzorak se približio slomu, pri čemu su naprezanja dosegala 85 % do 90 % najveće čvrstoće. Konačno, pri 99,8 % Pmax u zoni koncentriranog naprezanja nastale su pukotine u obliku krila i protukrilne pukotine, što je dovelo do sloma uzorka. Takav način širenja pukotina odgovara mješovitome mehanizmu sloma tipa I. (otvoreni način) i tipa II. (posmični način), koji je rezultat vlačno-posmičnoga kompozitnog polja naprezanja nastalog uslijed tlačnog opterećenja na unaprijed oblikovane pukotine u betonu pod nagibom od 30°. Putanja širenja pukotine odstupila je od osi početne pukotine. Koncentracija naprezanja na vrhu pukotine izazvala je simetrično ili antisimetrično grananje. Pukotine u obliku krila protezale su se duž smjera najvećega glavnog naprezanja, dok su se protukrilne pukotine formirale pod tupim kutom u odnosu na smjer glavnog naprezanja te su bile spriječene u daljnjemu širenju zbog djelovanja tlačnog zatvaranja. Usporedba obrazaca loma prikazanih na slici s prethodnom analizom pokazuje da koncentracija korozivne otopine znatno utječe na način sloma uzorka. S porastom koncentracije korozivne otopine najveća glavna deformacija javljala se ranije, ranije se dostizala kritična zona deformacije i nastajao je veći broj mikropukotina. Na obrasce širenja pukotina utječu međudjelovanje mehaničkog opterećenja, mikrostruktura materijala i korozija iz okoliša.



Slika 8. Obrasci oštećenja uzoraka s unaprijed oblikovanim pukotinom u različitim ispitnim uvjetima

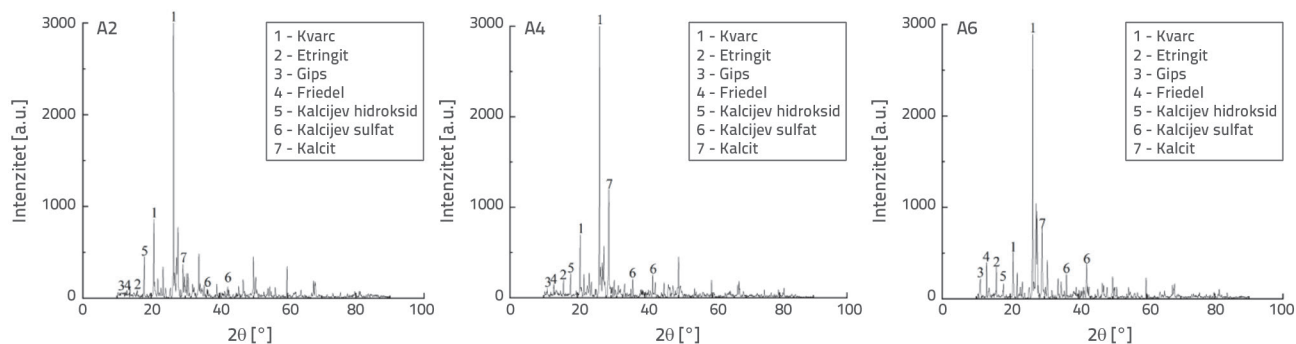
Tablica 3. Oblaci glavnih deformacija betona s vlaknima pri različitim uvjetima ispitivanja

Uvjeti ispitivanja	Točka značajke 1.	Točka značajke 2.	Točka značajke 3.	Točka značajke 4.
A2				
A3				
A4				
A5				
A6				

3.4. XRD analiza faznog sastava

XRD fazne analize uzoraka praha u različitim uvjetima ispitivanja prikazane su na slici 9. Na slici oznaka "1" označava kvarc (SiO_2), koji potječe ponajprije od sitnog agregata poput pijeska i šljunka. "5" predstavlja kalcijev hidroksid (CH), produkt hidratacije cementa. "7" predstavlja kalcijev karbonat (CaCO_3), koji uglavnom potječe od krupnog agregata. Oznake "2" i "3" predstavljaju etringit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$, Aft) i gips ($\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$), nastale reakcijom infiltriranih iona SO_4^{2-} s produktima hidratacije cementa. Oznaka "4" odnosi se na Friedelovu sol ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaCl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$), nastalu reakcijom produkata hidratacije cementa s Cl^- ionima. "6" predstavlja

kalcijev sulfat, koji nastaje reakcijama između kalcijevih iona u cementu i sulfatnih iona koji ulaze u uzorak. Iz XRD krivulje uzorka A2 vidljivo je da u nekorodiranome uzorku ima vrlo malo kloridnih i sulfatnih iona; intenziteti vršaka za CH su viši, dok su oni za Aft, Friedelovu sol i gips znatno niži. Rezultati XRD-a za uzorke A4 i A6 upućuju na pojavu malih količina gipsa i rastućih količina Aft-a i Friedelove soli. CH pokazuje silazni trend, što upućuje na prodiranje kloridnih i sulfatnih iona u uzorak i njihovu reakciju s C-S-H gelom i CH, pri čemu nastaje etringit koji ispunjava pukotine i pore. XRD krivulje za uzorke A4 i A6 upućuju na znatnu razgradnju CH, što potvrđuju SEM snimke koje prikazuju široke unutarnje pukotine nastale djelovanjem ekspanzivnih produkata i obilje bijelih



Slika 9. XRD analiza uzoraka

kristala koji ispunjavaju te pukotine. Vršci za kalcijev sulfat, AFt i gips nastavljaju lagano rasti, što upućuje na postupno nakupljanje tih faza, iako njihov porast nije izrazito istaknut. Nasuprot tome, porast intenziteta Friedelove soli bio je znatno izraženiji, što upućuje na to da je stupanj njezina nastajanja u uzorku veći u odnosu na AFt i gips, skrećući pozornost na to da kloridni ioni djelomično inhibiraju stvaranje sulfatnih soli [23]. Nadalje, povećana količina Friedelove soli, gipsa i etringita posredno je povezana s pojačanom razgradnjom produkata hidratacije cementa, što dovodi do većeg broja defekata poput pora i pukotina te posljedično slabi vezu između cementne matrice i agregata.

3.5. Analiza mikrostrukture pomoću SEM-a

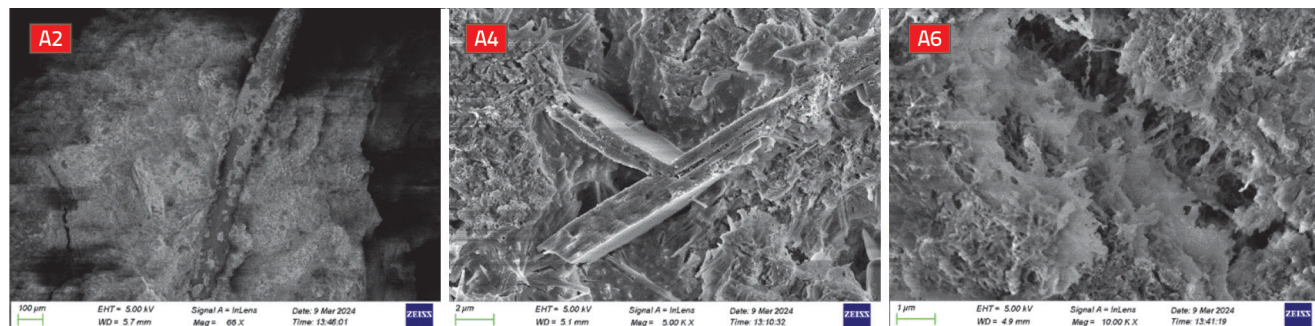
Snimke SEM-a betona ojačanog vlaknima pri različitim ispitnim uvjetima prikazane su na slici 10. Mikrostrukturna obilježja uzorka A2 pokazuju da su prije korozije nastali produkti hidratacije cementa u betonu u obliku ljuskastog i pahuljastog C-S-H gela te tankih, pločastih kristala $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Vlakna su bila dobro povezana s cementnom matricom, bez vidljivih znakova odvajanja ili raslojavanja, čime su učinkovito doprinijela mehaničkome ojačanju uzorka. Odgovarajuća količina polipropilenskih vlakana poboljšala je strukturu uzorka, smanjila unutarnju poroznost i ispunila pukotine kako bi uzorak bio gušći. Pod djelovanjem vanjskog opterećenja polipropilenska vlakna premošćuju okolne agregate i cementne komponente, sprječavajući nastanak i širenje mikropukotina i makropukotina, čime se optimiraju fizikalno-mehanička svojstva uzorka i poboljšava njegova

otpornost na koroziju. Zbog niskih intenziteta difrakcijskih vrhova Friedelove soli i gipsa SEM analiza nije ih registrirala u uzorku.

Povećanjem koncentracije korozivne otopine mikrostrukturna obilježja uzorka A4 upućuju na ozbiljna unutarnja oštećenja uzoraka. Kloridni i sulfatni ioni postupno su reagirali s produktom hidratacije cementa C-S-H gelom. U unutrašnjosti uzorka pojavile su se različite količine igličasta i štapičasta etringita, gipsa i Friedelove soli, pri čemu su ti proizvodi bili pretežno koncentrirani unutar unutarnjih pukotina i šupljina. Mikrostruktura uzorka A6 pokazuje da s daljnjim povećanjem koncentracije korozivne otopine dolazi do širenja mikropukotina i mikropora te njihova pretvaranja u erozijske jame većih dimenzija. Osim znatnih količina etringita unutar tih udubina zabilježene su velike nakupine stupastih i pločastih kristala gipsa. Uzorak je pokazivao izraženije unutarnje pukotine, pri čemu uvećani prikazi nisu omogućili opažanje morfologije etringita i gipsa zbog intenzivnog obavljanja velikim količinama bijelih kristala natrijeva sulfata i natrijeva klorida. To upućuje na to da se pri šestostrukome povećanju koncentracije korozivne otopine velika količina agresivnih iona infiltrira u uzorak te kristalizira unutar strukturnih nesavršenosti.

4. Zaključak

U ovom je istraživanju ispitana otpornost betona ojačanog polietilenskim vlaknima na koroziju u uvjetima prethodno oblikovanih pukotina, i to u simuliranim terenskim i



Slika 10. SEM mikrografija uzorka

laboratorijskim korozijskim uvjetima. Eksperimentalni plan obuhvatio je šest skupina ispitnih scenarija:

- beton bez vlakana pri ekvivalentnoj $1\times$ koroziji (A1)
- beton s vlaknima bez izloženosti koroziji (A2)
- *in situ* uvjeti (A3)
- uranjanje u laboratorijskim uvjetima, koncentracija $1\times$ (A4)
- uranjanje u laboratorijskim uvjetima, koncentracija $3\times$ (A5)
- uranjanje u laboratorijskim uvjetima, koncentracija $6\times$ (A6).

Analizirana su mehanička svojstva ispitnih uzoraka betona, odnosno tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća i posmična čvrstoća, te ponašanje materijala pri oštećenju i slomu pod uvjetima prethodno formiranih pukotina. Uz to provedena je mikroskopska analiza mehanizama oštećenja metodama XRD i SEM. Doneseni su sljedeći zaključci.

Najbolja mehanička svojstva betona razreda C40, namijenjenog za potporne konstrukcije okomitog okna, postignuta su dodatkom 0,3 mas.% polipropilenskih vlakana. Prekomjerna količina vlakana dovodi do stvaranja pora i neujednačene raspodjele, što negativno utječe na zbijenost i čvrstoću betona. Mehanička ispitivanja pokazala su da su vlaknima ojačani uzorci (A3 i A4) imali bolja svojstva od uzorka koji ne sadržava vlakna (A1), i to u pogledu tlačne i vlačne čvrstoće, unutarnje kohezije i kuta unutarnjeg trenja. Povećanjem koncentracije korozivne otopine postupno se smanjuju navedeni parametri, ali je to smanjenje izraženije od A1 do A4, dok se od A4 prema A6 smanjenje ublažava. Uzorak A2 imao je najmanji Poissonov omjer i najveći modul elastičnosti, što upućuje na to da polipropilenska vlakna smanjuju poprečno deformiranje i povećavaju krutost. S povećanjem koncentracije korozivne otopine Poissonov omjer raste, a modul elastičnosti postupno se smanjuje, no uz ublaženu stopu smanjenja.

Oblik sloma betona s prethodno oblikovanim pukotinom pri jednoosnom tlačnom opterećenju, analiziran metodom digitalne korelacije slike (DIC), pokazao je dosljedne obrasce oštećenja. Način širenja pukotine bio je mješovitog tipa, kombinirajući

pukotinu tipa I. (otvaranje) i tipa II. (posmik). Takav oblik pucanja posljedica je prethodno oblikovane pukotine (nagiba 30°) unutar betona, pri čemu je pukotina podvrgnuta kombiniranome polju naprezanja vlak-posmik uslijed tlačnog opterećenja. Povećanjem koncentracije korozivne otopine zabilježeni su veća glavna deformacijska naprezanja, ranije dostizanje kritičnih graničnih deformacija te ranija pojava većeg broja mikropukotina.

Analiza faznog sastava (XRD) i mikrostrukture (SEM) pokazala je da polipropilenska vlakna poboljšavaju unutarnju strukturu uzoraka, djelujući kao učinkovito ojačanje. S porastom koncentracije korozivne otopine dolazi do postupne razgradnje C-S-H gela i kalcijeva hidroksida (CH), dok se istodobno povećavaju količine gipsa, Friedelove soli i etringita. Povišene temperature uranjanja dodatno ubrzavaju razgradnju cementne matrice i doprinose razvoju većih unutarnjih oštećenja strukture. Stvaranje Friedelove soli sprječava nastajanje etringita i gipsa, što upućuje na to da kloridni ioni djelomično ometaju djelovanje sulfatnih iona.

Ovo istraživanje pruža opsežne eksperimentalne podatke i teorijsku podlogu za analizu otpornosti na koroziju betona ojačanog vlaknima u uvjetima prethodno oblikovanih pukotina. Buduća istraživanja mogu dodatno proširiti područja primjene takvog betona, optimirati sastav i tehnologiju pripreme te poboljšati njegovu trajnost i pouzdanost. S gledišta provedbe ispitivanja, metode A1 i A2 relativno su jednostavne jer uključuju kontrolne uzorke bez dodatka vlakana odnosno s vlaknima, uz minimalno izlaganje koroziji. S druge strane, metoda A3 znatno je složenija zbog provođenja procesa uranjanja u stvarnim terenskim uvjetima.

Zahvala

Ovo je istraživanje sufinancirano sredstvima Nacionalne zaklade za prirodoslovna istraživanja u Kini (brojevi projekata: 52274107, 52204091 i 52374113), projektom Izvrsnog tima mladih istraživača centralnih sveučilišta (FRF-EYIT-23-01) te Programom Beijing Nova (20230484242).

LITERATURA

- [1] Wang, Y., Wu, A., Yang, J., et al.: Progress and prospective of the mining key technology for deep metal mines, *Chinese Journal of Engineering*, 45 (2023) 8, pp. 1281–1292.
- [2] Cai, M., Tan, W., Wu, X., et al.: Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines, *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 31 (2021) 11, pp. 3409–3421.
- [3] Zhu, J., Zhang, Q., Chen, Y., et al.: Progress of Study on Erosion-corrosion, *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 34 (2014) 3, pp. 199–210.
- [4] Li, J., Qiao, J., Fu, X., et al.: Research Progress on Material/Structure and Mechanical Properties of Energy-absorbing Bolt Used in Ground Anchorage, *Materials Reports*, 33 (2019) 9, pp. 1567–1574.
- [5] Sun, L.: Study on failure mechanism and control of high stress and soft rock roadway support, *Coal Engineering*, 50 (2018) 12, pp. 46–49.
- [6] Guo, X.: Study on Tensile Properties of Polypropylene Fiber Concrete, *Journal of Xi'an Technological University*, 41 (2021) 6, pp. 644–648.
- [7] Liang, N., Dai, J., Liu, X., et al.: Experimental study on the fracture toughness of concrete reinforced with multi-size polypropylene fibres, *Magazine of Concrete Research*, 71 (2019) 9, pp. 468–475.
- [8] Natarajan, S., Murugesan, A., Dhanapal, J., Narayanan, A.: Glass fiber reinforced ultra-high strength concrete with silica fume, *GRAĐEVINAR*, 74 (2022) 10, pp. 849–856, <https://doi.org/10.14256/JCE.3431.2021>
- [9] Shi, H., Shi, Z., Zhang, B., Chen, H.: Investigating the effect of green hybrid fibre on toughening and mechanical properties of iron-tailing sand concrete, *GRAĐEVINAR*, 76 (2024) 10, pp. 931–942, <https://doi.org/10.14256/JCE.4042.2024>

- [10] Nguyen, H., Kinnunen, P., Carvelli, V., et al.: Durability of ettringite-based composite reinforced with polypropylene fibers under combined chemical and physical attack, *Cement and Concrete Composites*, 102 (2019), pp. 157-168.
- [11] Fan, L.F., Wu, Z.J.: Evaluation of stress wave propagation through rock mass using a modified dominate frequency method, *Journal of Applied Geophysics*, 132 (2016), pp. 53-59.
- [12] Ding, X., Xiao, X., Wu, D., et al.: Study on failure of brittle solids with circular hole and internal crack based on 3D-ILC, *Materials Reports*, 35 (2021) 18, pp. 18096-18103.
- [13] Kušter Marić, M., Ivanović, A., Fusić, M., et al.: Experimental Investigation of the Explosion Effects on Reinforced Concrete Slabs with Fibers, *Buildings*, 14 (2024) 4, pp. 1080.
- [14] Wu, X., Fang, H., Pan, J., et al.: Experimental study on dynamic mechanical failure characteristics of concrete specimens with cracks of different angles, *Journal of Vibration and Shock*, 43 (2024) 4, pp. 142-149+189.
- [15] Fang, Z., Zhang, Q., Niu, L., et al.: Experiment on evolution law of strain field and temperature field of cracked concrete, *Science Technology and Engineering*, 21 (2021) 34, pp. 14726-14733.
- [16] Dayyani, M., Mortezaei, A., Rouhanimanesh, M. S., Marnani, J. A.: Performance of reinforced engineered cementitious composite square columns, *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 31-21, <https://doi.org/10.14256/JCE.3503.2022>
- [17] Xue, X., Liu, H.: Fracture Characteristics Test of Precast Concrete Cracks Under Cyclic Loading, *Safety in Coal Mines*, 50 (2019) 11, pp. 72-75.
- [18] Yang, G., Li, F., Zhang, Z., et al.: Experimental Study on Dynamic Fracture Process of Polyvinyl Alcohol Fiber Concrete, *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 42 (2023) 2, pp. 454-462.
- [19] Luo, Y., Yu, F.: A Review of Research on Fiber-Reinforced Concrete, *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 42 (2024) 10, pp. 122-124.
- [20] Ding, Q., Gao, Y., Hou, W., et al.: Influence of Cl⁻ Concentration on Corrosion Behavior of Reinforced Concrete in Soil, *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 41 (2021) 5, pp. 705-711.
- [21] Yang, Y., Tan, K., Qin, Y.: Review of Research on the Influencing Factors of Chloride Ion Diffusion in Concrete, *Materials Reports*, 35 (2021) 13, pp. 13109-13118.
- [22] Cong, Y., Kong, L., Zheng, Y., et al.: Experimental study on shear strength of concrete, *Concrete*, (2015) 5, pp. 40-45.
- [23] Geng, O., Sun, Q., Li, D.: Study on Inhibitory Effect of Chlorine Salt on Sulfate Corrosion of Recycled Concrete, *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 37 (2020) 6, pp. 108-116.