Trajnost polimera armiranih vlaknima u betonskim konstrukcijama

Kalman, Tanja; Bjegović, Dubravka; Sigmund, Vladimir

Source / Izvornik: **Građevinar, 2010, 62, 613 - 621**

Journal article, Published version
Rad u časopisu, Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:133:023383

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

GRAĐEVINSKI I ARHITEKTONSKI FAKULTET OSIJEK
Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

Repository / Repozitorij:

Repository GrAFOS - Repository of Faculty of Civil Engineering and Architecture Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

UDK 624.012.4+678.7:699.88 *Primljeno 26. 2. 2009.*

Trajnost polimera armiranih vlaknima u betonskim konstrukcijama

Tanja Kalman, Dubravka Bjegović, Vladimir Sigmund

Ključne riječi

polimeri armirani vlaknima, trajnost, betonske konstrukcije, korozija, mehaničke karakteristike, uvjeti okoliša

T. Kalman, D. Bjegović, V. Sigmund *Pregledni rad*

Trajnost polimera armiranih vlaknima u betonskim konstrukcijama

Polazi se od toga da je uporaba polimera armiranih vlaknima za armiranje betonskih elemenata moguće sredstvo za sprječavanje korozije. Primjena polimernih šipki za nove ili oštećene konstrukcije zahtijeva poznavanje mehaničkih karakteristika i trajnosti materijala pri dugotrajnom izlaganju uvjetima okoliša. Dan je pregled rezultata dosadašnjih istraživanja i spoznaja o ponašanju i karakteristikama polimernih materijala, kao i o interakcijskim mehanizmima utjecaja na trajnost.

Key words

fibre reinforced polymers, durability, concrete structures, corrosion, mechanical properties, environmental conditions

T. Kalman, D. Bjegović, V. Sigmund *Subject review*

Durability of fibre-reinforced polymers in concrete structures

The paper starts with assertion that the use of fibre-reinforced polymers for reinforcement of concrete elements is a technique quite possible for corrosion prevention. The use of polymer bars for new or damaged structures requires knowledge of mechanical properties and durability of material subjected to long-term exposure to environmental conditions. An overview is given about current research results and knowledge gained on the behaviour and properties of polymer materials, and also about interaction mechanisms of consequence for durability.

Mots clés

polymères renforcés de fibres, durabilité, structures en béton, corrosion, propriétés mécaniques, conditions environnementales

T. Kalman, D. Bjegović, V. Sigmund *Ouvrage de syntèse*

Durabilité des polymères renforcés de fibres dans les structures en béton

L'ouvrage commence par l'assertion que l'emploi des polymères renforcés de fibres pour le renforcement des éléments de béton est une technique tout-à-fait possible pour la prévention de corrosion. L'utilisation des barres de polymère pour les structures nouvelles où endommagées nécessite une connaissance des propriétés mécaniques et de la durabilité du matériau exposé à l'influence prolongée de l'environnement. Un aperçu est donné sur les résultats des recherches faites et sur les connaissances obtenues concernant le comportement et les propriétés des matériaux en polymère, et aussi sur les mécanismes d'interaction considérés importants pour la durabilité.

Ключевые слова

полимеры армированные волокнами, долговечность, бетонные конструкции, коррозия, механические характеристики, условия окружающей среды

Т. Калман, Д. Бьегович, В. Сигмунд *Обзорная работа*

Долговечность полимеров, армированных волокнами, в бетонных конструкциях

Авторы исходят из того, что применение полимеров, армированных волокнами, для армирования бетонных элементов, является возможным средством предотвращения коррозии. Для использования полимерных стержней в новых или поврежденных конструкциях необходимо знание механических характеристик и сведений о долговечности материала при длительном воздействии условий окружающей среды. Приведен обзор результатов проведенных до настоящего времени исследований и полученных данных о поведении и характеристиках полимерных материалов, а также интеракционных механизмов, влияющих на долговечность.

Schlüsselworte

faserbewehrte Polymere, Dauerhaftigkeit, Betonkonstruktionen, Korrosion, mechanische Eigenschaften, Umweltbedingungen

T. Kalman, D. Bjegović, V. Sigmund *Übersichtsarbeit*

Dauerhaftigkeit von faserbewehrten Polymeren in Betonkonstruktionen

Man geht von der Tatsache aus dass die Anwendung von faserbewehrten Polymeren für die Bewehrung von Betonelementen ein mögliches Mittel fur Korrosionsverhinderung ist. Die Anwendung von Polymerstäben für neue oder beschädigte Konstruktionen verlangt Kenntnis der mechanischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit des Materials bei lagdauernedem Aussetzen den Umweltbedingungen. Vorgelegt ist eine Übersicht der Ergebnisse bisheriger Untersuchungen und die Erkenntnis über Verhalten und Eigenschaften der Polymermateriale, sowie über die interaktiven Mechanismen des Einflusses auf Korrosion.

Autori: **Tanja Kalman**, dipl. ing. građ., Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet;
prof. dr. sc. **Dubravka Bjegović**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet;
prof. dr. sc. **Vladimir Sigmund**, dipl. ing. građ., Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Građevinski fakultet

1 Uvod

Polimeri armirani vlaknima - PAV (*FRP - fibre reinforced polymers*) predstavljaju kompozitni materijal sastavljen od polimerne osnove tzv. matrice, armirane organskim ili anorganskim vlaknima određenih omjera duljine i debljine koja su međusobno povezana smolama. U usporedbi s konvencionalnim armaturnim čelikom polimeri armirani vlaknima imaju nedvojbene prednosti: veliku vlačnu čvrstoću, izvrsnu otpornost na koroziju, malu obujamsku masu [1].

Karakteristike kompozitnog materijala izravno ovise o njegovim komponentama: vlaknima, sustavu matrice, području međusloja i orijentaciji vlakana.Vlakna imaju vrlo male dimenzije poprečnog presjeka pa se ne mogu samostalno uporabiti u inženjerskoj praksi, osim ako nisu dio sustava matrice. Istovremeno vlakna primarno daju krutost i čvrstoću polimerima armiranim vlaknima.

Matrica međusobno povezuje vlakna i pri tomu prenosi naprezanja među vlaknima i ujedno ih štiti od utjecaja iz okoliša. Polimerne matrice, termoplastična i termostabilna, razlikuju se po promjeni svojstava pri djelovanju povišenih temperatura. Termostabilne matrice (epoksidna, poliesterska i vinilesterska) ne omekšavaju pri povišenju temperature za razliku od termoplastičnih i najčešći su tip matrica u PAV-u. Epoksidna matrica ima izvrsnu korozijsku otpornost. Poliesterska matrica ima umjerenu čvrstoću i slabu otpornost na vanjske utjecaje. Vinilesterska matrica ima bolje mehaničke karakteristike i trajnost nego poliesterska matrica i jeftinija je od epoksidne [2].

vlaknima (PAUV *engl. CFRP*) i aramidnim vlaknima (PAAV *engl. AFRP*).

Ugljična su vlakna najskuplja, ali i najtrajnija i najboljih mehaničkih karakteristika. Aramidna se vlakna što se tiče trajnosti, ne mogu uspoređivati s ugljičnim, ali su zbog velike apsorpcije energije i velike vlačne čvrstoće prihvatljiva za određene primjene. Staklena su vlakna najjeftinija i najviše u uporabi u građevinarstvu, ali nasuprot tomu imaju najmanju trajnost i modul elastičnosti [2].

Tablica 1. Usporedba karakterističnih mehaničkih veličina čelika i polimera armiranim vlaknima [4]

	Vlačna čvrstoća ($\times 10^6$ N/m^2)	Modul elastičnosti ($\times 10^9$ N/m^2)	Gustoća (kg/dm^3)
PASV	483 -1600	35 - 51	1,25 – 2,1
PAUV	600 – 3690	120 - 580	1,5 – 1,6
PAAV	1720 - 2540	41 - 125	1,25 – 1,4
Čelik	483 - 690	200	7,9

Prednosti su PAV-a prema armaturnom čeliku: velika vlačna čvrstoća u smjeru vlakana, otpornost na koroziju, velika otpornost na zamor, mala masa (oko 1/5 mase čelika), mala toplinska i električna provodljivost (staklena i aramidna vlakna).

Nedostaci su mala posmična čvrstoća, mali modul elastičnosti, osjetljivost polimerne matrice i vlakana na djelovanje ultraljubičastog zračenja, osjetljivost staklenih vlakana na vlažnost, osjetljivost pojedinih staklenih i aramidnih vlakana na alkalni okoliš, osjetljivost na visoke temperature ovisno o tipu matrice [4].



Slika 1. Staklena, ugljična i aramidna vlakna u polimernim šipkama

Temperatura staklišta (T_g – *glass transition temperature*) termostabilnih matrica predstavlja mjerilo degradacije i funkcija je kemijskog sastava matrice. Ako polimer ima čvrstu molekularnu strukturu, vrijednost T_g bit će visoka. Ako se temperatura staklišta smanjuje, dolazi do degradacije koja rezultira raskidanjem veza unutar mrežne strukture matrice, a to uzrokuje smanjenje mehaničkih karakteristika, osobito čvrstoće i krutosti matrice [3].

U građevinarstvu su najčešće u uporabi polimeri armirani staklenim vlaknima (PASV *engl. GFRP*), ugljičnim

Osim što se za nove konstrukcije rabe kao armaturne šipke, natege za prednapinjanje ili trake, polimeri armirani vlaknima se također rabe za sanacije i nadogradnju već postojećih građevina u obliku ojačanja, gotovih pročeljnih oblika itd.

Zbog širokog spektra primjene ovi su kompozitni materijali izloženi različitim uvjetima okoliša, pri čemu je potrebno pravilnim odabirom umanjiti gubitak njihovih mehaničkih i fizikalnih karakteristika tijekom uporabnog vijeka građevine.

2 Dosadašnja istraživanja trajnosti polimera armiranih vlaknima

Trajnost se može definirati kao sposobnost materijala ili konstrukcije pri kojoj početna svojstva ostanu nepromijenjena tijekom vremena. Kod polimera armiranih vlaknima trajnost će se promatrati kroz tri skupine djelovanja: utjecaji vanjskog okoliša, utjecaji betona kao okoliša i vremenski ovisni utjecaji.

Promjene mehaničkih karakteristika, kao što su modul elastičnosti, vlačna čvrstoća i čvrstoća prianjanja, glavni su pokazatelji degradacije i smanjenja trajnosti PAV-a.

2.1 Djelovanje vanjskog okoliša

Djelovanja vanjskog okoliša (djelovanje topline i požarna otpornost, ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja, relativna vlažnost zraka i utjecaj ultraljubičastog zračenja) obilježena su s mnogo kemijskih i fizikalnih promjena, ali samo neki od njih mogu znatno utjecati na smanjenje trajnosti PAV-a.

2.1.1 Djelovanje topline

Jedan je od najvažnijih utjecaja okoliša varijacija toplinskih uvjeta. U polimernom kompozitu karakteristike matrice su više izložene promjenama zbog povećanja temperature nego sama vlakanca [5]. Temperatura staklišta matrice (T_g) predstavlja ključni parametar jer izravno definira promjene i smanjenje mehaničkih karakteristika. Modul elastičnosti i vlačna čvrstoća šipke od polimera armiranih vlaknima smanjuju se povećanjem temperature uz utjecaj djelovanja konstantnog opterećenja.

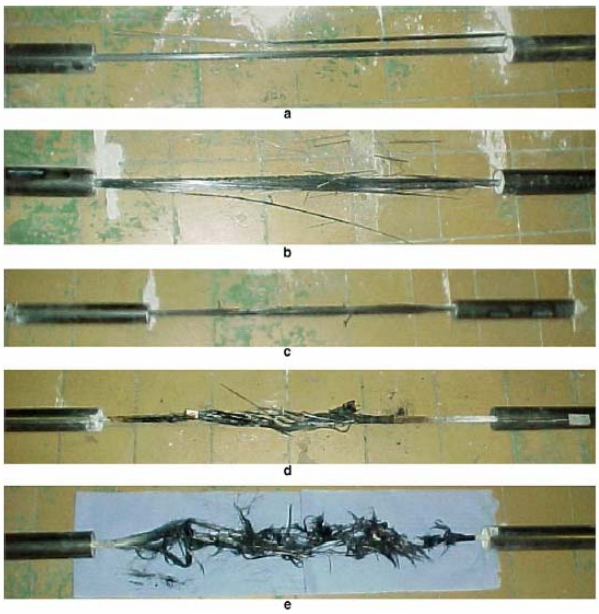
Promjene temperature između 30 °C i 40 °C, koje predstavljaju trajno ciklično opterećenje u vijeku trajanja konstrukcije, mogu izazvati znatne promjene u čvrstoći i krutosti većine vlakana. Smanjenje kapaciteta nosivosti pri povišenim temperaturama nastaje zbog modifikacije karakteristika matrice koja za posljedicu ima slabljenje veze vlakance – matrica, pri čemu se limitira učinkovitost čvrstoće vlakanaca.

Pri promjenama temperatura okoliša koje djeluju na betonsku konstrukciju (od -20 °C do +60 °C), smanjenje modula elastičnosti je zanemarivo za polimere s ugljičnim vlaknima, dok je kod staklenih i aramidnih moguće znatnije smanjenje.

Izlaganje temperaturi od 0 °C dovodi do očvršćivanja matrice, nastanka mikropukotina u matrici i degradacije veze vlakno-matrica.

Toplinski učinci mogu rezultirati mikropukotinama između armature od PAV-a i betona zbog različitih toplinskih koeficijenata materijala.

Djelovanje vrlo visokih temperatura može izazvati potpuni gubitak nosivosti i razaranje armaturnih šipki od PAV-a, kako je prikazano na slici 2., za razliku od ugljičnih vlakana kod kojih značajnija oštećenja nastaju već pri temperaturi od 100 °C.



Slika 2. Prikaz sloma ugljične PAV šipke pri različitim temperaturama: 20 °C; b) 100 °C; c) 200 °C; d) 400 ° C; e) 600 °C [8]

Tablica 2. Mehaničke karakteristike PAV-a pri temperaturnim promjenama izražene preostalim vrijednostima vlačne čvrstoće i modula elastičosti [6], [7]

Istraživač	Tip vlakana u polimeru	Uvjeti okoliša	Preostala vlačna čvrstoća	Preostali modul elastičnosti	Napomena
Kobayashi (1988.) [7]	svi	-10 °C do 60 °C	70 %- 80 %	70 %-80 %	-
Uomoto (1996.) [7]	staklena	40 °C	40 %	-	NaOH, 120 dana
Chen (2005.) [6]	staklena	20 °C	95 %	-	120 dana
Chen (2005.) [6]	staklena	40 °C	97 %	-	70 dana
Chen (2005.) [6]	staklena	6 °C	71	-	70 dana

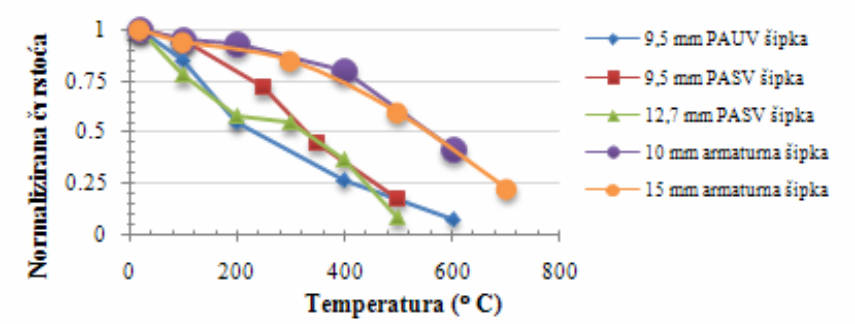
Visoke temperature mogu promijeniti strukturu materijala ili uzrokovati omekšavanje polimera, pri čemu je nepovoljan učinak visoke temperature izraženiji kod matrice nego kod vlakana.

Osnovno mjerilo požarne otpornosti preuzima matrica koja već pri 150 °C – 200 °C počinje omekšavanje, odnosno topljenje, što uzrokuje znatno smanjenje čvrstoće i krutosti kompozitnog materijala.

Temperatura pri kojoj dolazi do topljenja odnosno omekšavanja polimera

jest temperatura staklišta (T_g). Premašajem temperature staklišta modul elastičnosti polimera naglo se smanjuje zbog promjena u molekularnoj strukturi. Vrijednost T_g ovisi o tipu matrice, ali najčešće iznosi od 65 °C do 120 °C. U kompozitnom materijalu vlakna koja imaju bolje toplinske karakteristike od matrice mogu i dalje prenositi opterećenje duž svoje osi, međutim vlačne se karakteristike smanjuju zbog smanjenja u prijenosu opterećenja između vlakana i matrice.

Vlakna su u većoj ili manjoj mjeri otporna na visoke temperature, i to aramidna do 200 °C, staklena od 300 °C do 500 °C i ugljična u neoksidirajućem okolišu od 800 °C do 1000 °C [9].



Slika 3. Smanjenje normalizirane vlačne čvrstoće pri različitim temperaturama za PAV i armaturne čelične šipke [8]

Pri visokim temperaturama karakteristike veze između polimera armiranih vlaknima i betona naglo se smanjuju. Primjena ovih materijala ne preporučuje se kod konstrukcija kojima je požarna otpornost osnova konstrukcijske cjelovitosti.

Pri temperaturi od 100 °C ispitivanjima na armaturnim šipkama i šipkama od PIV-a koja je proveo Wang [8] utvrđeno je da sve vrste šipki zadržavaju svoju početnu čvrstoću do 75 % vrijednosti. Najveća razlika u iznosu preostale čvrstoće vidljiva je pri djelovanju temperature od 400 °C, pri kojoj konvencionalne armaturne šipke zadržavaju 75 %, dok šipke od PAV-a samo prosječnih 30 % početne vlačne čvrstoće.

2.1.2 Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja

U većini građevinskih konstrukcija armiranobetonski su elementi izloženi velikom broju ciklusa zamrzavanja i odmrzavanja koji često u kombinaciji s vodom i ionima klora dovode do degradacije veze između vlakana i matrice i razaranja same površine matrice. Pri ubrzanom prodoru vodene otopine dolazi do nastanka i širenja pukotina u matrici, pri čemu ona postaje lomljiva.

Utjecaj ciklusa limitiran je na površinu PAV-a i zanemariv je ako nije u kombinaciji s materijalima ili učincima koji mogu dodatno uzrokovati naprezanje u ciklusu.

Ciklusi zamrzavanja i odmrzavanja nemaju izravnog utjecaja na vlakna, nego na samu matricu i područje između matrice i vlakana, što se vidi na rezultatima preostale vlačne čvrstoće (tablica 3.). U kombinaciji s povećanom relativnom vlažnosti zraka brže uzrokuju širenje mikropukotina i degradaciju mehaničkih karakteristika armature od PAV-a.

Tablica 3. Mehaničke karakteristike PAV-a pri ciklusima zamrzavanja i odmrzavanja izražene preostalim vrijednostima vlačne čvrstoće i modula elastičnosti [6],[7]

Istraživač	Tip vlakana u polimeru	Uvjeti okoliša	Preostala vlačna čvrstoća	Preostali modul elastičnosti	Napomena
Uomoto (1996.) [7]	staklena	-20 °C do 15 °C	92 %	-	-
Chen (2005.) [6]	staklena	-20 °C do 20 °C	104 %	-	300 ciklusa, NaCl

2.1.3 Relativna vlažnost zraka (RH)

Kada su izloženi vlažnom zraku ili vodi, mnogi polimerni materijali apsorbiraju vlagu na površini kompozita i difuziraju je do matrice. Velika apsorpcija vode u kompozitima može rezultirati znatnim smanjenjem čvrstoće i krutosti [5].

Sve matrice apsorbiraju vlagu, pri čemu postotak apsorpcije ovisi o strukturi matrice, stupnju mogućeg oštećenja matrice i temperaturi. Dva su osnovna učinka koja uzrokuje vlaga: plastičnost i sniženje temperature staklišta T_g. Dugotrajno izlaganje vlazi može uzrokovati degradaciju čvrstoće kompozita. U slučaju staklenih vlakana polimera, degradacija nastaje izdvajanjem iona iz vlakana. Vlaknima je u tom slučaju potrebna zaštita adekvatne matrice. Aramidna vlakna apsorbiraju vlagu pri čemu se smanjuje posmična i tlačna čvrstoća [3].

Kombinacija relativne vlažnosti zraka i temperature često se uzima u obzir da bi se utvrdio kombinirani učinak na kompozitni materijal.

2.1.4 Ultraljubičasto (UV) zračenje

UV zračenje primarno djeluje na površinu kompozita, pri čemu izravno utječe na sustav matrice. Iako vlakna nisu izravno izložena sunčevu djelovanju, utjecaj UV

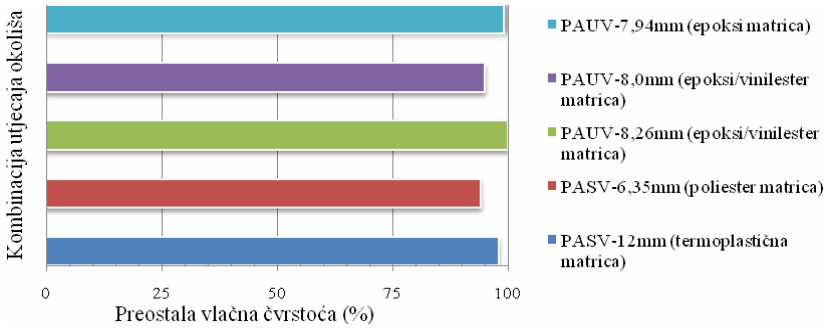
zračenja uzrokuje pukotine u matrici koje mogu propustiti kemikalije u kompozitni materijal i dovesti do degradacije mehaničkih karakteristika.

Ispitivanje izlaganjem ultraljubičastom zračenju pokazalo je kod polimernih šipki s armiranim vlaknima smanjenje vlačne čvrstoće otprilike 13 % nakon 2500 sati izlaganja, smanjenje 8 % za šipke sa staklenim vlaknima nakon 500 sati izlaganja i nepromijenjenu vlačnu čvrstoću za šipke s ugljičnim vlaknima. Rezultati ispitivanja pri kombinaciji izlaganja UV zrakama i vlažnosti s dodatnim opterećenjem i bez njega pokazali su smanjenje početnih vrijednosti vlačne čvrstoće od 0 % – 20 % za ugljična vlakna, 0 % – 30 % za aramidna i 0 % - 40 % za staklena vlakna polimernih šipki [9].

Polimerni materijali podliježu degradaciji ako su izloženi UV zračenju između 290 i 400 nanometara zbog razbijanja kemijskih veza. Učinak ultraljubičastog zračenja djeluje na površinu do dubine od približno 10 mikrometara [5].

UV utjecaji često su relativno zanemarivi za mehaničke karakteristike takvih materijala iako neke matrice mogu pokazati znatan gubitak elastičnosti i površinsku eroziju. Najškodljiviji utjecaj nije izravno oštećenje koje nastaje zbog UV zraka, jer je ograničeno na površinu materijala, nego je potencijalno povećavanje prodora vlage u području oštećenja matrice.

Polimerni materijali koji su ugrađeni u beton nisu izloženi djelovanju UV zračenja, ali je potrebno obratiti pozornost na njihovo skladištenje prije ugradnje u betonsku konstrukciju.



Slika 4. Vrijednosti preostale vlačne čvrstoće pri kombinaciji djelovanja okoliša (tablica 4.) za šipke od PAV-a [10]

Tablica 4. Pregled kombinacije utjecaja okoliša na šipke od PAV-a [10]

Ciklusi	Temperatura (°C)	Broj ciklusa	UV zračenje
Zamrzavanje - odmrzavanje	-18;4	200	Ne
Velika temperature	16;49	600	Da
Velika vlažnost RH (60 % - 100%)	16	160	Da
Velika vlažnost RH (60 % - 100%)	27	160	Da
Velika vlažnost RH (60 % - 100%)	38	160	Da

Micelli [10] proveo je eksperimentalna ispitivanja na polimernim šipkama armiranim staklenim i ugljičnim vlaknima pri kombinaciji djelovanja temperaturnih promjena, velike vlažnosti i UV zračenja (tablica 4.). Kombinirano djelovanje utjecaja okoliša nije izazvalo značajno smanjenje vlačne čvrstoće ispitanih uzoraka polimernih šipki (slika 4.).

2.2 Djelovanje betona kao okoliša

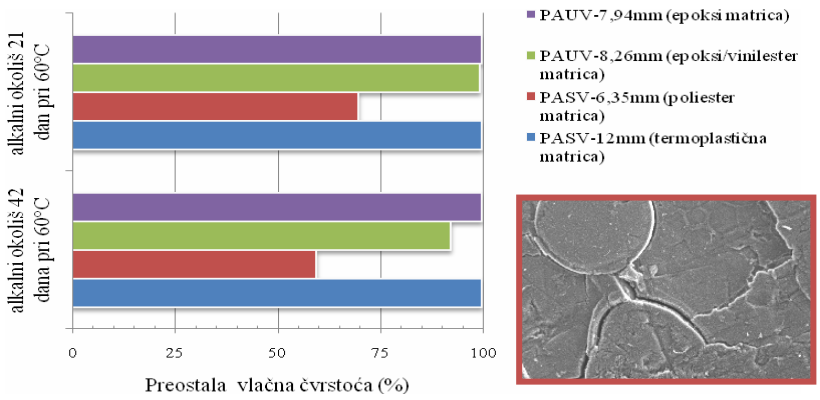
2.2.1 Alkalni okoliš

Najvažniji problem korozije čelika u betonu jest u izravnoj vezi s karbonatizacijom koja nastaje u ovisnosti o vodocementnom omjeru, vrsti cementa, očvršćivanju, koncentraciji CO_2 i raspucavanju.

Alkalni ioni djeluju vrlo agresivno na staklena vlakna čime uzrokuju smanjenje čvrstoće i krutosti. To je osobito izraženo pri hidrataciji cementa u betonu pri čemu dolazi do povećanja pH vrijednosti (pH13,5). Pri tome alkalni spojevi mogu prodrijeti u kompozit i uzrokovati razaranje vlakana i oštećenje matrice zbog kemijskog udara i razvoja produkta hidratacije. Ti učinci izazivaju smanjenje vlačne čvrstoće, čiju degradaciju može ubrzati djelovanje povišene temperature.

Vodene otopine s visokim pH vrijednostima smanjuju vlačnu čvrstoću i krutost polimernim šipkama sa staklenim vlaknima. Visoke temperature i dulje vrijeme izlaganja dovode do ubrzane degradacije. Alkalni utjecaji mogu znatno umanjiti karakteristike staklenih vlakana ako nisu zaštićeni primjerenim matricama. Eksperimentalni su podaci pokazali da karakteristike matrice znatno utječu na trajnost armature od polimera, npr. šipke sa staklenim vlaknima bit će osjetljive na alkalni okoliš ako se nalaze u poliesterskoj matrici (slika 5.) koja ne daje adekvatnu zaštitu za razliku od vinilesterne koja će pružiti primjerenu zaštitu. Ugljična vlakna ne mogu apsorbirati tekućine i otporna su na utjecaj soli i alkalija.

Prema tipu staklenih vlakana smanjenje vlačne čvrstoće iznosi od 0 % – 75 %, dok je smanjenje krutosti od 0 % – 20 %. U slučaju polimernih šipki s ugljičnim vlaknima, smanjenje čvrstoće i krutosti iznosi 0 % – 20 %, ovisno o tipu uporabljene matrice. Pri povišenoj temperaturi u alkalnom okolišu smanjenje vlačne čvrstoće i krutosti polimerne armature s aramidnim vlaknima iznosi 0 % – 20 % [9].



Slika 5. Varijacije čvrstoće u alkalnom okolišu za polimerne šipke i prikaz oštećenja PASV šipke dobiven optičkim mikroskopom [10]

2.2.2 Djelovanje klorida kod konstrukcija u morskom okolišu

Prisutnost klorida kod konstrukcija izloženih morskom okolišu ili solima za odleđivanje mogu izazvati degradaciju armiranobetonskih konstrukcija ubrzavanjem procesa korozije.

Rezultati utjecaja klorida na polimernu armaturu su različiti jer je teško razlučiti učinak razaranja pod utjecajem klorida i degradaciju zbog difuzije vlage i /ili alkalni utjecaj na vlakna. Polimerne su šipke od ugljičnih i aramidnih vlakana neosjetljive na ione klorida. Ispitivanja su pokazala da armatura od PASV-a trpi ozbiljna oštećenja u morskom okolišu [9].

Tablica 5. Djelovanje betona kao okoliša na polimernu armaturu armiranu vlaknima [9]

Djelovanje	Aramidna vlakna	Ugljična vlakna	Staklena vlakna	Parametri utjecaja
Alkalno izlaganje	smanjenje čvrstoće 0 - 20 %	smanjenje čvrstoće 0 - 20 %	smanjenje čvrstoće 0 - 75 %	tip matrice, temperatura, vlačno naprezanje
Izlaganje kloridima	slaba osjetljivost	otporno	osjetljivo	-
Utjecaj vlažnosti	smanjenje mehaničkih karakteristika vlakana	oštećenje matrice	oštećenje matrice	tip matrice, temperatura

2.2.3 Djelovanje vlage

Pri lijevanju betona zbog kemijske reakcije može doći do apsorpcije vode kod polimera armiranih vlaknima koji se rabe kao armatura u betonskim konstrukcijama. Vlaga se apsorbira kapilarno preko mikropukotina ili područja između vlakna i matrice. Utjecaj vlage rezultira povećanjem mase, pri čemu dolazi do plastifikacije matrice i smanjenja temperature staklišta. Fenomen se značajno ističe u slučaju poliesterne matrice i povišene temperature (> 60 °C). Ugljična i staklena vlakna ne mogu apsorbirati vodu, međutim apsorpcija vode u aramidnim vlaknima uzrokuje nepovratno smanjenje vlačne čvrstoće i modula elastičnosti koje iznosi oko 15 % – 25 %. [9]

2.3 Vremenski ovisna djelovanja

2.3.1 Puzanje

Slom zbog puzanja može se definirati kao vlačno naprezanje koje uzrokuje slom nakon određenog vremena izlaganja dugotrajnom opterećenju. Ovaj tip sloma ovisi o tipu vlakana i matrice. Uzimajući u obzir da ugljična i staklena vlakna imaju izvrsnu otpornost na puzanje, kao i da većina polimernih matrica može biti vrlo osjetljiva, puzanje kod polimerne armature može izravno ovisiti o orijentaciji i količini vlakana, kao i o tipu matrice.

Visoke temperature, UV zračenje, alkalni okoliš, ciklusi vlaženja i sušenja, zamrzavanja i odmrzavanja mogu umanjiti veličinu sloma prouzročenog puzanjem i vrijeme do sloma. Eksperimentalnim ispitivanjima na polimernim armaturnim šipkama evidentirana je linearna veza između sloma prouzročenog puzanjem (engl. *creep rupture strength*) i logaritma vremena za razdoblje do 100 sati. Ekstrapoliranjem rezultata do 500000 sati (57 godina) dobiveni su omjeri sloma prouzročenog puzanjem i kratkotrajne čvrstoće šipki koji iznose 0,29 za PASV, 0,47 za PAAV i 0,93 za PAUV [9].

Ispitivanje polimernih armaturnih šipki s ugljičnim i aramidnim vlaknima u epoksidnim matricama na sobnoj temperaturi provedeno je da bi se odredilo vrijeme do sloma koje prikazuje da je ostvareni postotak kratkotrajne čvrstoće nakon 50 godina jednak 79 % za PAUV i 66 % za PAAV. Ispitivanjem armature od staklenih vlakana s vinilesterskom matricom na sobnoj temperaturi evidentiran je slom prouzročen puzanjem jednak 55 % vrijednosti kratkotrajne čvrstoće za ekstrapolirano trajanje od 50 godina. Polimerna armatura s ugljičnim vlaknima pokazuje izvrsno ponašanje pri puzanju, koje na sobnoj temperaturi i relativnoj vlažnosti zraka ostaje manje od vrijednosti od 0,01 % nakon 3000 sati pri vlačnom naprezanju koje iznosi 80 % vrijednosti vlačne čvrstoće. Kod drugih dvaju tipova vlakana deformacije su puno veće, i to 0,15 % – 1 % za PAAV i 0,3 % - 1 % za PASV pri istim uvjetima [9]. Važno je istaknuti da tip matrice u velikoj mjeri određuje ponašanje jer su

termostabilne matrice otpornije na puzanje nego termoplastične [7].

2.3.2 Relaksacija

Fenomen relaksacije armature od polimernih materijala može se definirati kao vremenski ovisno smanjenje naprezanja armaturne šipke koja se nalazi na konstantnoj temperaturi s propisanim inicijalnim opterećenjem što se nanosi da bi se održala konstantna deformacija. Uobičajeno se relaksacija definira nakon milijun sati.

Ispitivanjem utvrđeno je da je relaksacija nakon 1000 sati iznosila 1,8 % – 2 % za natege od PASV-a, 0,5 % – 1 % za natege od PAUV-a i 5 % – 8 % za natege od PAAV-a, dok je estrapolacijom rezultata za predviđeno razdoblje od 50 godina, ovisno o početnom naprezanju, iznosila 4 % - 14%, 2 % - 10% i 11 % - 25 % redom za natege armirane staklenim, ugljičnim i aramidnim vlaknima, kako je prikazano u tablici 5.[9].

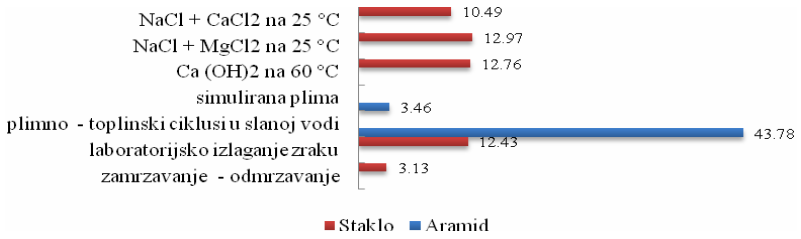
2.3.3 Zamor

Zamor predstavlja degradaciju integriteta materijala izloženog ponavljanim djelovanjima velikog broja ciklusa opterećenja, pri čemu dolazi do smanjenja značajnih mehaničkih karakteristika kao što su čvrstoća i krutost. Ocjena otpornosti na zamor u polimernim materijalima je kompleksna zbog različitih mehanizama oštećenja na različitim lokacijama kompozitnog elementa: pukotine u matrici, slom vlakana,širenje pukotina, zbog čega i same polimerne komponente mogu otkazati pri seriji međusobno ovisnih događaja oštećenja.

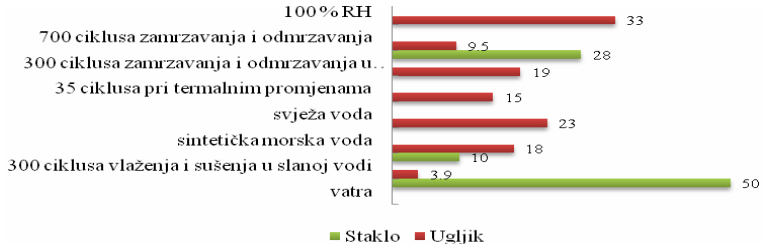
Polimerne šipke armirane staklenim vlaknima mogu izgubiti oko 10 % početne statičke čvrstoće u slučaju cikličnoga vlačnog opterećenja. Ugljični su kompoziti najmanje osjetljivi na zamor. Aramidna vlakna se u slučaju zamora ponašaju vrlo slično staklenim i ugljičnim.

3 Pregled rezultata ispitivanja i faktori smanjenja trajnosti

Pregledom literature [8-10] prikupljeni su podaci o degradaciji čvrstoće polimernih materijala uporabljenih u betonskim konstrukcijama. Smanjenje vlačne čvrstoće izraženo je u postocima prema podacima razvrstanim u 3 skupine: polimerni materijali u betonskim konstrukcijama, polimerni materijali koji se rabe za ojačanje konstrukcijskih elemenata (vanjska uporaba) i materijali sami.



Slika 6. Degradacija vlačne čvrstoće polimernih materijala (%) unutar betonske konstrukcije [8]



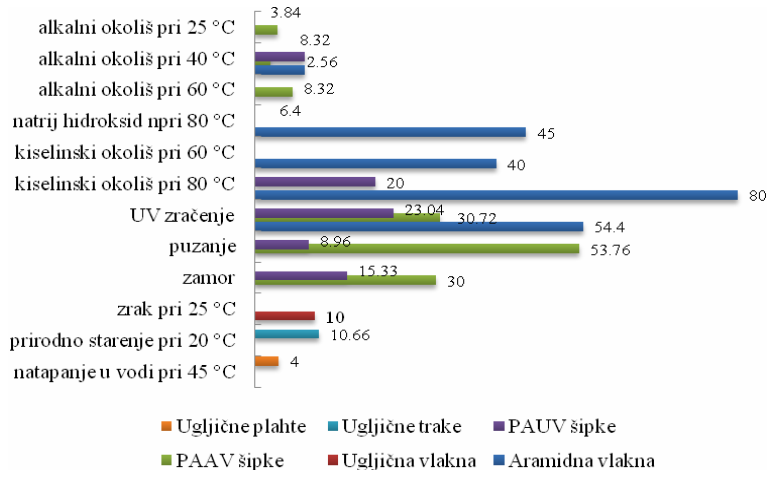
Slika 7. Degradacija vlačne čvrstoće PAV-a (%) za vanjsko ojačanje konstrukcija [8]

Tablica 6. Djelovanje vremenski ovisnih utjecaja na polimernu armaturu armiranu vlaknima [9]

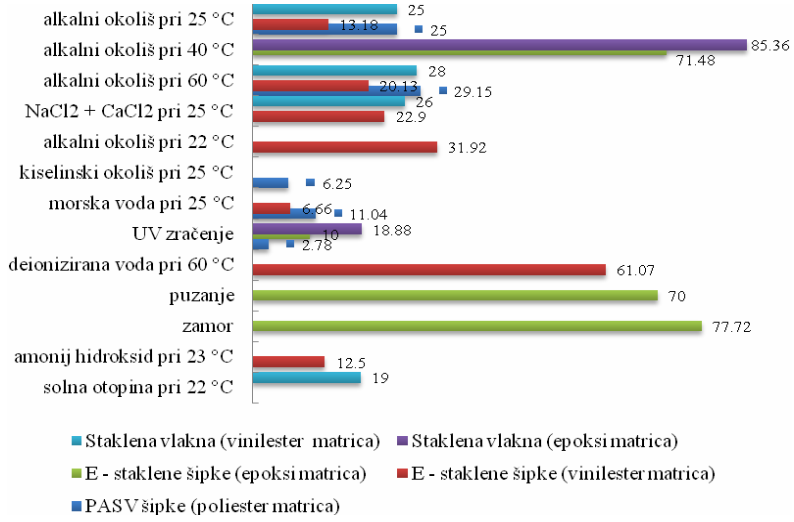
Utjecaji	Aramidna vlakna (%)	Ugljična vlakna (%)	Staklena vlakna (%)	Parametri utjecaja
Deformacija puzanja pri kontinuiranom opterećenju (80 % vlačne čvrstoće nakon 3000 h)	0,15 - 1,0	<0,01	0,3 – 1,0	temperatura, vlažnost (RH)
Čvrstoća sloma pri puzanju nakon otprilike 50 godina	47 - 66	79 - 93	29 - 55	tip matrice, orijentacija vlakana, uvjeti okoliša
Relaksacija 1000 h	5 - 8	0,5 - 1	1,8 - 2	temperatura, početno vlačno naprezanje
Relaksacija 50 godina	11 - 25	2 -10	4 - 14	-

Slika 6. prikazuje degradaciju čvrstoće od 10 % - 12,5 % za armaturu od PASV-a u betonu u morskom i alkalnom okolišu, dok se čvrstoća armature od PAAV u morskom okolišu smanjuje za 4 % – 45 %.

Za vanjsko ojačanje konstrukcija pri uvjetima 100 % relativne vlažnosti zraka ugljična su vlakna pokazala degradaciju do 33 %, dok su za slučaj izlaganja požaru staklena vlakna izgubila čvrstoću u vrijednosti od 50 %. (slika 7.)



Slika 8. Degradacija vlačne čvrstoće PAV-a (%) [8]



Slika 9. Degradacija vlačne čvrstoće PAV-a (%) od staklenih vlakana [11]

Degradacija čvrstoće se u slučaju izlaganja kiselinskom okolišu povećava s povećanjem temperature u slučaju aramidnih vlakana. U alkalnom okolišu šipke od PAAV-a imaju bolju otpornost od aramidnih vlakana. Maksimalna degradacija armature od PAUV-a bila je u slučaju izlaganja UV zrakama (slika 8.).

Tablica 7. Faktori smanjenja trajnosti [12]

Fenomen	Aramidna vlakna	Ugljična vlakna	Staklena vlakna
Degradacija pri djelovanju vanjskog okoliša	0,85	0,88	0,70
Djelovanje konstantnog naprezanja	0,85	0,95	0,9
Granica puzanja	0,30	0,55	0,22
Granica naprezanja za trajno opterećenje	0,70	0,76	0,70

PASV (slika 9.) pokazali su najmanju otpornost na djelovanje vanjskih utjecaja okoliša, kao i utjecaja unutar betonske konstrukcije. Utjecaj primjene adekvatne matrice bitan je osobito kod vrlo oštetljivih staklenih vlakana.

Podaci o faktorima smanjenja skupljeni su iz različitih nacionalnih pravilnika među kojima su i ACI 440.2R-02, ACI 440.1R-03 i drugi. U tablici 7. prikazane su samo srednje vrijednosti faktora smanjenja trajnosti, dok su detaljniji rezultati dostupni u literaturi [12].

4 Zaključak

U radu su sustavno izložena dosadašnja istraživanja na polimerima armiranim vlaknima u području trajnosti materijala.

Ugljična vlakna i armatura od PAUV-a imaju dobre karakteristike trajnosti u slučaju izlaganja vanjskom okolišu i betonu kao okolišu. Neki od rezultata pokazali su smanjenje mehaničkih karakteristika, ali je degradacija nastala u području između vlakana i matrice, odnosno neovisna o samim ugljičnim vlaknima.

Aramidna vlakna i armatura od PAAV-a pokazali su dobro ponašanje u slučaju UV zračenja i kiselinskog okoliša. Problem u slučaju apsorpcije vlage leži u njihovoj organskoj strukturi.

Osim za otpornost na utjecaj zamrzavanja – odmrzavanja, staklena vlakna imaju jako loše karakteristike trajnosti. Dokazano je da najveće razaranje nastaje u slučaju alkalnog okoliša.Odabir tipa matrice jest vrlo važan korak pri definiranju trajnosti vlakana u PAV-a. I u slučaju inertnosti vlakana na uvjete okoliša, kompozitni sustav ne može očuvati čvrstoću zbog svojstava međusloja između matrice i vlakana sve dok je sustav matrice niske kvalitete i ima veliku difuzivnost. Na osnovi istraživanja zaključeno je da vinilesterska matrica ima manju difuzivnost negoli poliesterna, pa samim tim i bolju otpornost na alkalni i kloridni okoliš.

Rezultati eksperimenata pokazali su da će degradacija mehaničkih karakteristika nastati brže i u većem omjeru ako su, osim karakterističnog tipa utjecaja okoliša, polimeri armirani vlaknima izloženi povišenoj temperaturi.

LITERATURA

[1] Beslać, J.; Bjegović, D.; Rosković, R.: *Inovativni materijali i tehnologije u građenju i održavanju betonskih konstrukcija*, Građevinar 57 (2005), 4, 247-255.

[2] Bhise, V. S.: *Strength degradation of GFRP bars,* Thesis for the degree M.Sc., Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA. (2002)

[3] Bank, L.C.; Gentry, T.R.; Barkatt A.: *Accelerated tests Methods to Determine the Long –Term Behavior of FRP Composite Structures: Environmental Effects*, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol.14, pp. 559-587, (1995)

[4] ACI 440R-07 ,(2007) *Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures,* ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

[5] Homam, S. M.: *Durability of fibre reinforced polymers used in concrete structures*, Thesis for the degree M.Sc., University of Toronto, Canada, (2000)

[6] Chen, Y.; Davalos, J. F.; Ray, I.; Kim, H. Y.: *Accelerated aging tests for evaluations of durability performance of FRP reinforcing bars for concrete structures*,Composite Structures 78, pp. 101-111, (2007)

[7] Gonenc, O.: *Durability of Service Life Prediction of Concrete Reinforcing Materials*, Thesis for the degree M.Sc., University of Wisconsin, Madison, (2003)

[8] Wang, Y.C.; Kodur, V.: *Variation of strength and stiffness of fibre reinforced polymer reinforcing bars with temperature*, Cement & Concrete Composites, 27 (2005), pp. 864- 874.

[9] Ceroni, F.; Cosenza, E.; Gaetano, M.; Pecce, M.: *Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members,* Cement & Concrete Composites 28, pp. 857- 868, (2006)

[10] Micelli, F.; Nanni, A.: *Durability of FRP rods for concrete structures*, Construction and Building materials 18, pp. 491-503, (2004)

[11] Uomoto, T.: *Durability Considerations for FRP Reinforcements*, 5th International Conference on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures, Cambridge, UK, pp. 17-32, (2001)

[12] Myers, J. J.; Viswanath, T.: *A Worldwide Survey of Environmental Reduction Factors for Fiber Reinforced Polymers (FRP),* Proceedings of the 2006 StructuresCongress Structural Engineering and Public Safety, St. Louis, Missouri, USA, (2006)