

Tatjana HARAMINA, Tomislav JELAVIĆ*, Tomislav ŠOLIC*,
Marko KATALINIĆ, Ana PILIPOVIĆ

Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

*Institut IGH d.d., Institut za materijale i konstrukcije (Laboratorij IGH)

Analiza mogućnosti recikliranja diskontinuiranih E-staklenih vlakana

UDK 666.1:658.567

Izvorni znanstveni rad / Original scientific paper

Primljeno / Received: 7. 4. 2011.

Prihvaćeno / Accepted: 9. 11. 2011.

Sažetak

Pri tkanju staklenih vlakana obrezuju se rubovi širine od 40 do 60 mm i bacaju na odlagališta otpada. Ti se rubovi sastoje od rovinga koji su povezani s nekoliko okomito orijentiranih pamučnih niti. Radi smanjivanja količine otpada analizirana je mogućnost recikliranja tako nastalih diskontinuiranih E-staklenih vlakana. Istraživanje nije usmjereno na konkretan proizvod, nego na mogućnost pripreme kompozita s dodanim vlaknima. Ispitane se mogućnosti pripreme i utjecaj vlakana na svojstva sintetskih organskih polimera, betona, morta i asfalta.

KLJUČNE RIJEČI:

asfalti
betoni
kompoziti
mortovi
polimeri
recikliranje
staklena vlakna

KEY WORDS:

asphalt
concrete
composites
glass fibres
mortar
polymers
recycling

Analysis of recycling possibilities of discontinuous E-glass fibres

Summary

By interweaving direct rovings, 40–60 mm wide edges of the fabrics are being cut as waste. With the aim of reducing waste accumulation, several possibilities of recycling discontinuous E-glass fibres have been studied. The intention of the study was not to develop a particular product, but to test the possibilities of materials preparation when discontinuous glass fibres are added. The fibres are added to synthetic organic polymers, concrete, mortar and asphalt and their influence on materials properties was tested.

Uvod / Introduction

Gospodarenje otpadom vrlo je važno pitanje sa stajališta gomilanja otpada na odlagalištima i zdravlja ljudi. Pogotovo ako je riječ o opasnom otpadu,

koji treba odložiti na siguran i ekonomski prihvatljiv način. Staklena vlakna u Republici Hrvatskoj tek su 2009. svrstana u neopasni otpad *Uredbom o izmjenama i dopunama Uredbe o kategorijama, vrstama i klasifikaciji otpada s katalogom otpada i listom opasnog otpada* (NN 39/09) te je zato trebalo riješiti pitanje gospodarenja otpadom nastalim pri proizvodnji staklenih vlakana. Budući da više ne pripadaju u skupinu opasnog otpada, trošak gospodarenja tim otpadom za proizvođače se smanjio, ali su odlagališta i dalje opterećena proizvodnim otpadom.

Tijekom proizvodnje staklenih vlakana i tkanja 20–25 % vlakana završava kao otpad. Manja količina takvih vlakana stavlja se u peć i tali te oblikuje u staklena zrna, dok u većini slučajeva taj otpad završava na odlagalištima.¹

Pri tkanju rovinga rubni dijelovi tkanine sastoje se samo od osnovne pa se stoga oni obrezuju, čime nastaju trake širine od 40 do 60 mm iz poprečno orijentiranih vlakana povezanih pamučnim koncem (slika 1).



SLIKA 1 – Otpad od staklenih vlakana

FIGURE 1 – Glass fibres waste

Radi smanjivanja količine otpada u proizvodnji analizirana je mogućnost recikliranja diskontinuiranih staklenih vlakana nastalih u tvrtki *Kelteks* d.o.o. S obzirom na velik opseg proizvodnje, otpad generiran u toj tvrtki može se smatrati reprezentativnim na razini Republike Hrvatske. Količina otpada ovisi o količini proizvodnje, a doseže i do 300 t/god. Otpad se sastoji od vlakana različite debljine i duljine.

Staklena vlakna / Glass fibres

U tvrtki *Kelteks* d.o.o. najčešće korištena E-staklena vlakna su alumino-borosilikatna stakla s masenim udjelom alkala manjim od 1 %, a namijenjena su općem ojačanju. Prema deklaraciji proizvođača, vlakna s manje od 150 g/m² imaju minimalni udio stakla od 85 %, a maksimalni udio organskih spojeva 15 %. Vlakna s više od 150 g/m² imaju minimalni udio stakla 90 %, a ostatak su organski spojevi. Vlakna su obrađena adhezivom na bazi silana te su pogodna za izradu kompozita s poliesterskom matricom.

E-stakla na odlagalištima su inertna i dugoročno se neće razgraditi. Prema deklaraciji proizvođača, debljina vlakana veća je od 3 μm te se zbog toga ne mogu nataložiti u plućima. Ipak, općenito treba smanjiti količinu otpada na odlagalištima, posebno zbog toga što su ova vlakna iritantna u dodiru s kožom, pogotovo sa sluznicom.

Osnovni problem kod ovakvih diskontinuiranih nejednakih vlakana jest to što ne postoji proizvodni postupak pravljenja kompozita ojačanih već izrezanim vlaknima. Kada se koriste rezana vlakna, ona se režu na mjestu iz kontinuiranih niti na željenu duljinu te se prikladnim pištoljima nanose na pripremljenu površinu. Do sada su istraživanja provedena uglavnom samo na recikliranim dotrajanim kompozitnim proizvodima na bazi sintetskih organskih polimera ojačanih staklenim vlaknima, a ne na otpadnim staklenim vlaknima nastalima u proizvodnji. Tako se u^{2,3} uspoređuje krutost i čvrstoća izvornih i recikliranih staklenih vlakana. Krutost je jednaka u oba ispitna tijela, dok je rastezna čvrstoća niža u ispitnom tijelu s recikliranim staklenim vlaknima. Razlika između vlakana koja se recikliraju iz kompozita i onih koja nastaju kao otpad u pripremi rovinga je u njihovoj toplinskoj prošlosti.

Staklena vlakna mogu se upotrebljavati za ojačanje ne samo plastike nego i betona, estriha, mortova i asfalta. Vlakna se dodaju kako bi se poboljšala mehanička svojstva betona i asfalta te spriječio nastanak, odnosno širenje napuklina koje se javljaju tijekom dulje upotrebe. Neka su istraživanja pokazala da upotreba otpada E-stakla u betonima ima mnogo ekonomskih i tehničkih prednosti. No takva stakla treba samljeti u sitne čestice, što zahtijeva dodatnu operaciju mljevenja.⁴ Jedan od glavnih problema upotrebe staklenih vlakana u cementnim smjesama je alkalna reakcija (e. *alkali-silica reactioni*, ASR).

Ispitivanja⁴ su pokazala povišenje pritisne čvrstoće ispitnog tijela s 40 % (maseni) E-stakla do 17 %, 27 % i 43 % u razdoblju od 28, 91 i 365 dana.

Eksperimentalni dio / Experimental part

Upotrijebljene tvari i materijali / Matters and materials used

Recikliranje je smisljeno samo ako takav postupak ne opterećuje okoliš više od odlaganja na otpad. Iz tog se razloga nastojalo minimizirati in-

tervenciju u vlakna. Vlakna nisu kemijski tretirana, već se samo odvajao pamuk od stakla i skraćivana su mehanički na duljinu od 5 do 35 mm. Tako dobivena kratka vlakna korištena su kao dodatak različitim materijalima te su iz dobivenih smjesa pripremljena ispitna tijela.

Materijali matrice:

- poliesterska smola na bazi ortoftalne kiseline, Cray Valey, Francuska
- poli(oksimetilen) (POM) *BASF Hostaform N 2320-patural*
- polietilen visoke gustoće (PE-HD) *BASF MG 9641*
- staklenim vlaknima ojačan poliamid 6 (PA 6-GF30), *BASF*
- za pripremu mortova korišten je cement oznake *CEM I 42,5 R*, proizvođač *CEMEX Hrvatska d.d.* uz agregat (uobičajen građevinarski izraz za drobljeni kamen ili šljunak riječnog podrijetla koji se separira u frakcije različitih veličina zrna) maksimalnog zrna $D_{\text{max}} = 4 \text{ mm}$ proizvođača *VELKOM d.o.o.* s nalazišta Novo Čiče. Svi sastojci ispitivanih mortova definirani su u tablici 2.

Za pripremu betona korištena je ista vrsta cementnog praha, proizvođača *CEMEX Hrvatska d.d.*, oznake *CEM I 42,5*, s vodocementnim omjerom 0,55 i uz sastav agregata:

- 0/4 mm (37 %), *Pelješac, drobljeni Viadukt*
- 8/16 mm (30 %) i 16/32 mm (33 %), prirodni prani i separirani *Keter*.

Upotrijebljene tvari i materijali potrebni za pripremu asfalta navedeni su u poglavlju o asfaltnim mješavinama zbog složenije pripreme uzoraka.

Pregled postupaka pripreme ispitnih tijela prikazan je u tablici 2.

Poliesterska smola s vlaknima izvorne duljine / Polyester resin with the original fibre length

Proizvodnja ovoga kompozita logičan je izbor zato što su staklena vlakna pripremljena za dobro povezivanje s poliesterskom smolom te nije potrebna nikakva pretpriprema vlakana. Bez ikakve intervencije u duljinu vlakana pokušao se načiniti homogen proizvod.

Problem je kod ovakve pripreme nehomogenost tvorevine čak i u laboratorijskim uvjetima. Vlakna se grupiraju i grudaju. Postupak je ocijenjen kao neprikladan za pravljenje proizvoda. Moguće je tek ispunjavanje manjih oštećenja na gotovim proizvodima ili sljepljivanje nekih proizvoda.

TABLICA 1 – Sastojci ispitivanih mortova

TABLE 1 – Ingredients of tested mortars

Sastojak / Ingredient		Oznaka laboratorijskog morta / Masa (kg) za 1 m ³ morta <i>Laboratory mortar mark / Mass (kg) per 1 m³ of mortar</i>		
		LB 054/10	LB 055/10	LB 058/10
Cement <i>Cement</i>	CEM I 42,5 R <i>CEMEX Hrvatska d.d.</i>	650,00	650,00	650,00
Voda <i>Water</i>	iz vodovoda <i>from water supply line</i>	240,50	240,50	240,50
Dodatak <i>Additive</i>	staklena vlakna <i>Woven roving</i>	--	1,50	4,00
	superplastifikator <i>REOMATRIX 230</i> superplasticizer <i>REOMATRIX 230</i>	6,50	6,50	6,50
Agregat <i>Aggregate</i>	<i>Velkom d.o.o.</i> frakcija 0 - 4 mm <i>fraction 0 - 4 mm</i>	1394,66	1393,08	1390,44
vodocementni omjer <i>water-cement ratio,</i> v/c		0,37	0,37	0,37

TABLICA 2 – Pregled postupaka pripreve ispitnih tijela
TABLE 2 – Overview of preparation procedures of specimens

	Matrica / Matrix	Ojačavalo / Reinforcement	Postupak pripreve / Preparation process
1.	Poliesterska smola <i>Polyester resin</i>	E-vlakna, otpad izvorne duljine <i>E-fibre, waste in original length</i>	Ručno polaganje / <i>Hand depositing</i>
2.	Poliesterska smola <i>Polyester resin</i>	E-vlakna, rezana / <i>E-fibre, chopped</i>	Ručno lijepljenje / <i>Hand bonding</i>
3.	Poliesterska smola <i>Polyester resin</i>	E-vlakna, naneseo štrcanjem / <i>E-fibre, sprayed</i>	Dodirni postupak štrcanjem <i>Hand spraying</i>
4.	Poli(oksimetilen) (POM) / <i>Poly(oxy methylene)</i>	E-vlakna, rezana, ~10 – 20 mm <i>E-fibre, chopped, ~10 – 20 mm</i>	Injekcijsko prešanje <i>Injection moulding</i>
5.	Polietilen visoke gustoće (PE-HD) <i>High density polyethylene</i>	E-vlakna, rezana, ~ 0 – 20 mm <i>E-fibre, chopped, ~10 – 20 mm</i>	Injekcijsko prešanje <i>Injection moulding</i>
6.	Beton / <i>Concrete</i>	E-vlakna, izvorne duljine <i>E-fibre, waste in original length</i>	U laboratorijskoj miješalici <i>Laboratory mixer</i>
7.	Beton / <i>Concrete</i>	E-vlakna, ručno rezana, ~ 10 – 20 mm <i>E-fibre, hand chopped, ~10 – 20 mm</i>	U laboratorijskoj miješalici <i>Laboratory mixer</i>
8.	Mort / <i>Mortar</i>	E-vlakna, izvorne duljine <i>E-fibre, waste in original length</i>	U laboratorijskoj miješalici <i>Laboratory mixer</i>
9.	Mort / <i>Mortar</i>	E-vlakna, ručno rezana, ~10 – 20 mm <i>E-fibre, hand chopped, ~10 – 20 mm</i>	U laboratorijskoj miješalici <i>Laboratory mixer</i>
10.	Bitumen (asfalt) <i>Bitumen (asphalt)</i>	E-vlakna, izvorne duljine, agregat kamena <i>E-fibre, waste in original length, stone aggregate</i>	Laboratorijski / <i>Laboratory</i>
11.	Bitumen (asfalt) <i>Bitumen (asphalt)</i>	E-vlakna, ručno rezana, ~ 10 – 20 mm, agregat kamena <i>E-fibre, hand chopped, ~10 – 20 mm, stone aggregate</i>	Laboratorijski / <i>Laboratory</i>

Lijepljeni spojevi / Adhesive joints

Spojna mjesta mogu biti unaprijed određena spajanjem (tj. montažom) dvaju dijelova ili slučajna mjesta na oštećenjima nastala tijekom upotrebe proizvoda (pri lomljenju). U drugom slučaju treba najprije odrediti dužinu spoja i zatim popuniti napuklinu određenom smjesom smole i ojačavala.⁵

Lijepljeni spojevi rabe se za spajanje tankih kompozita kada se u vijčanom spoju javljaju prevelika naprezanja ili kada se pričvršćivanjem dodatnim elementima povećava ukupna masa cijelog proizvoda. Lijepljeni spoj mora omogućiti prijenos opterećenja s jednoga na drugi dio lijepljenog dijela, a to ovisi o obliku spojnog mjesta te o svojstvima ljepila. Ljepilo mora izdržati visoka lokalna opterećenja na krajevima spojnih dijelova (u slučaju preklopnih spojeva).⁶

Lijepljeni spojevi ispitani su prema normi *ASTM D 3163* (slike 2 i 3). Spajani su kruti materijali s jednim preklomom. Lijepljene pločice dimenzija su 125 · 25 · 4 mm, preklopni spoj duljine je 25 mm, a debljina ljepila (poliesterska smola + staklena vlakna) 0,2 mm. Spajane su međusobno pločice od poli(metil-metakrilata) (PMMA), zatim sustav PMMA – drvo (vodootporna šperploča, brodograđevna klasa, AW 100) i sustav PMMA – laminat od poliesterske smole ojačane rovingom od staklenih vlakana.

Ispitna tijela rastezana su na kidalici brzinom od 7 mm/min te je promatrano mjesto na kojem ona pucaju. Budući da ispitna tijela nisu pucala u spoju (slika 4), sila pucanja ovisna je o slabijem materijalu u spoju. Iz tog razloga iznos sile je irelevantan, odnosno ovisi o poprečnom presjeku (25 · 4 mm²) i čvrstoći epruveta. Da su se pločice razdvajale u spoju, sila bi bila bitan podatak.

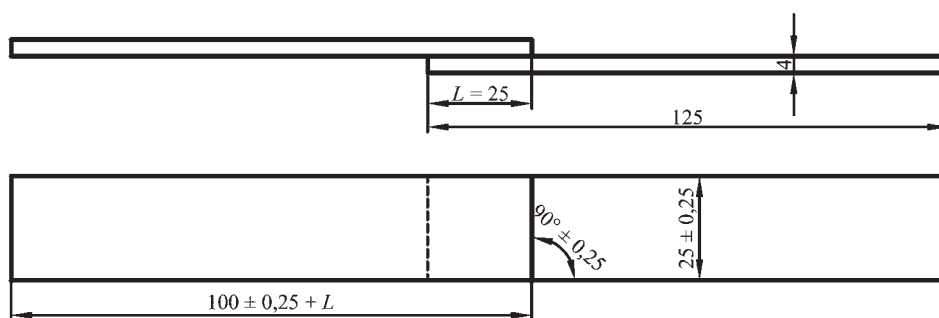
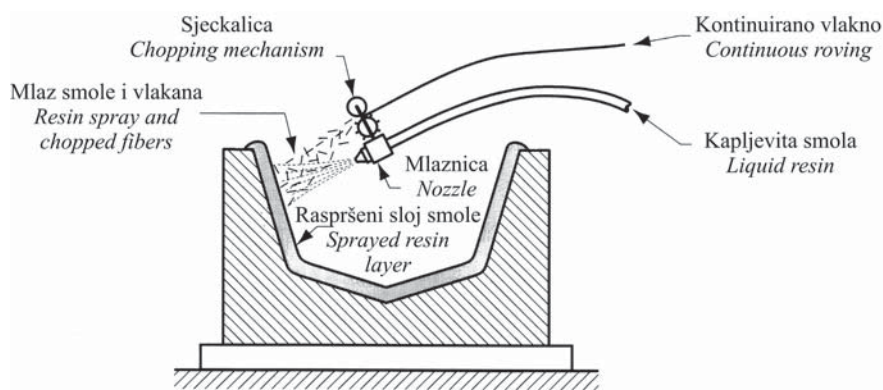
Dodirni postupak štrcanjem / Hand spraying

Jedan od mogućih postupaka ponovne upotrebe otpadnih staklenih vlakana je pravljenje kompozita dodirnim postupkom štrcanjem (slika 5). Postupak se sastoji od nanošenja smjese smole i isjeckanih staklenih vlakana na kalup s pomoću stlačenog zraka. Smola se nalazi u dva spremnika, u jednome pomiješana s umreživalom, u drugome s ubrzavalom. Te se dvije smjese štrcaju odvojeno iz dvostrukog pištolja, a istodobno se štrca i vlakno, pa se sve te komponente spoje i očvršćuju tek na površini kalupa. Pri tome se uključine zraka moraju istiskivati valjkom.⁹ Za matrice uglavnom se upotrebljavaju poliesteri, dok se kao ojačavalo isključivo upotrebljava stakleni roving. Ovaj se postupak primjenjuje za pravljenje kada, broдика i sličnih proizvoda.

U eksperimentu je kao matrica upotrijebljena poliesterska smola na bazi ortoftalne kiseline, a kao ojačavalo staklena vlakna duljine 5 do 35 mm.



SLIKA 2 – Konfiguracija lijepljenog spoja
FIGURE 2 – Configuration of adhesive joint

SLIKA 3 – Dimenzije ispitnog tijela⁷FIGURE 3 – Dimensions of test specimen⁷SLIKA 4 – Pucanje lijepljenih spojeva⁸FIGURE 4 – Fracture of adhesive joints⁸SLIKA 5 – Dodirni postupak štrcanjem¹⁰FIGURE 5 – Hand spraying¹⁰

Tako izrađenim kompozitima određen je maseni udio vlakana (tablica 3), izmjerena su savojna mehanička svojstva (tablica 4) te je analizirana duljina i raspored, odnosno usmjerenost vlakana.

Savojna svojstva određena su pri sobnoj temperaturi, brzinom ispitivanja od $v = 7$ mm/s, prema normi HRN EN ISO 178:2008. Primijenjeno je trotočkasto ispitivanje, tj. ispitno tijelo oslonjeno je na dva oslonca i opterećeno na sredini silom F .

Mehanička svojstva kompozita izrađenih na ovaj način znatno su bolja od svojstava čiste poliesterske smole¹¹, a zbog slučajno (statistički) orijentiranih staklenih vlakana usporediva su sa svojstvima kompozita ojačanim matom. Ipak, ona ovise o više parametara, među ostalim o povezanosti vlakana i matrice, odnosno tretiranju vlakana i dodacima¹², uspješnosti pripreme smjesa, udjelu šupljina u kompozitu, brzini umreživanja, temperaturi itd. Prema^{11,13} savojna čvrstoća kompozita nastalih naštrcavanjem staklenih vlakana (35 – 40 % masenog udjela) iznosi 175 MPa. Savojni

TABLICA 3 – Maseni udio ojačavala u kompozitu načinjenom štrcanjem

TABLE 3 – Mass percentage of reinforcement in a hand sprayed composite

Ispitno tijelo Test specimen	Maseni udio ojačavala Mass percentage of reinforcement, %
1	41,2
2	44,3
3	43,8
4	43,7
5	41,4
Prosječna vrijednost Average value	42,9
Standardna devijacija S Standard deviation S	1,45

TABLICA 4 – Savojna mehanička svojstva kompozita ojačanih staklenim vlaknima duljine oko 15 mm
 TABLE 4 – Flexural mechanical properties of composites reinforced with glass fibre of about 15 mm length

Ispitno tijelo / <i>Test specimen</i>	Savojna čvrstoća <i>Flexural strength, σ_f / MPa</i>	Savojni modul elastičnosti <i>Flexural modulus, E_f / MPa</i>
1	177	5152
2	148	5743
3	183	7237
4	162	6586
5	184	6256
Prosječna vrijednost <i>Average value</i>	171	6195
Standardna devijacija <i>S</i> <i>Standard deviation S</i>	15	796

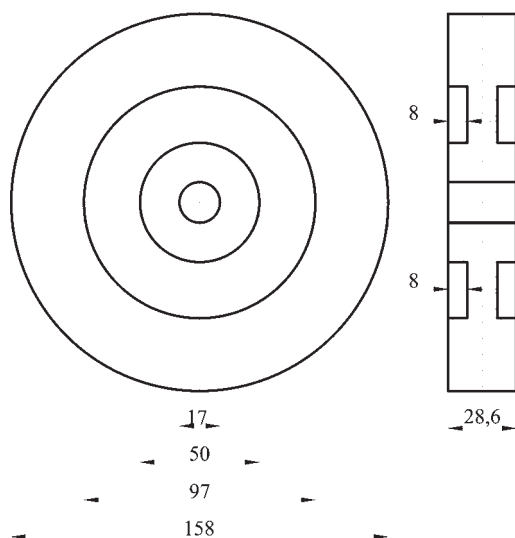
modul elastičnosti iznosi 8 000 MPa. Savojna čvrstoća u ovom radu analiziranih kompozita usporediva je s vrijednostima iz literature, dok je savojni modul elastičnosti 22 % niži.

Mikroskopskom analizom nije primijećena preferirana orijentacija vlakana, odnosno ona su slučajno (statistički) raspoređena, ali je ipak ustanovljeno dosta veliko rasipanje rezultata pri određivanju mehaničkih svojstava, posebno kod savojnog modula elastičnosti, odnosno krutosti.

Otpadna staklena vlakna nastala u proizvodnji duljine su do 60 mm. Čak i kada bi se na krajeve tkalačkih stanova ugradili noževi koji bi otpadna vlakna usitnili, trenutačno ne bi bilo moguće vlakna nanositi ovim postupkom zbog toga što nije poznat postupak nanošenja već izrezanih vlakana.

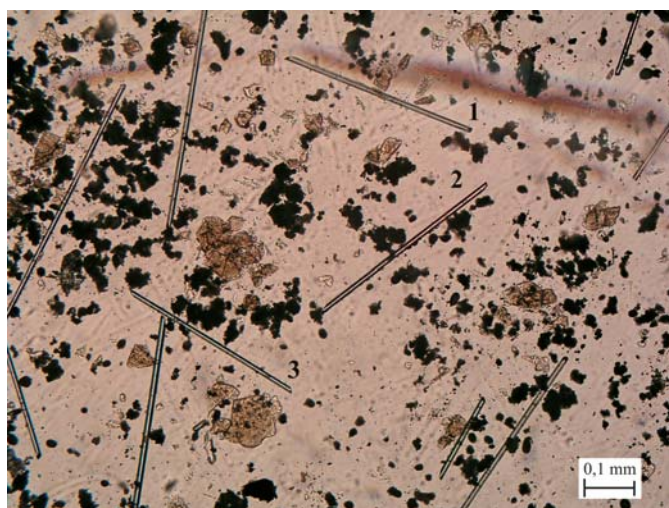
Injekcijsko prešanje mješavine plastomernoga granulata i staklenih vlakana / Injection moulding of a mixture of thermoplast granules and glass fibres

Jedna od mogućnosti upotrebe kratkih vlakana bila je priprava kompozitnog poluproizvoda za izradu zupčanika (slika 6), s plastomernom matricom uz dodatak recikliranih staklenih vlakana. Kompozit je izrađen postupkom injekcijskog prešanja na ubrizgavalici *ENGEL ES 250*, a vlakna su prethodno ručno odvojena od pamuka i izrezana na duljinu od oko 15 mm. Kao matrica koristili su se poli(oksimitilen) (POM) i polietilen visoke gustoće (PE-HD).



SLIKA 6 – Oblik i dimenzije gotovog poluproizvoda
 FIGURE 6 – Shape and dimensions of semi-finished products

Žarenjem je određen udio vlakana u poluproizvodima (slika 7). Tako jednostavnim postupkom vlakna gotovo da uopće ne prolaze u kalup te je udio vlakana zanemariv (oko 0,04 %). Istodobno s tim postupcima načinjeni su poluproizvodi istog oblika od komercijalnoga granulata poliamida u koji su već umiješane sitne čestice stakla. Struktura tako izrađenih kompozita ujednačena je, odnosno čestice stakla ujednačene su veličine i jednoliko su distribuirane u proizvodu (slika 8). Nije poznato da netko u Republici Hrvatskoj proizvodi takav granulirani. Prenamjena postojećih sustava znatno je otežana zbog visoke tvrdoće stakla u usporedbi s tvrdoćom plastomera te potencijalnog oštećenja dijelova stroja.



SLIKA 7 – Ostaci žarenja uzorka kompozita s osnovom od POM-a pod svjetlosnim mikroskopom. Žarenjem se organski dio razgradi te ostaje samo anorganski dio u materijalu. U mikrografiji kompletnoga kompozitnog materijala ima premalo vlakana da bi se uopće vidjela.

FIGURE 7 – The remains of glowing of the POM-based composite under the light microscope. Glowing causes decomposition of the organic part, and the inorganic material remains. The micrograph of the complete composite material shows lack of fibres.

Umješavanje čestica prije granuliranja dobro je rješenje, međutim potrebno je dodatno istraživanje bi li uopće, odnosno u kojim polimernim matricama i u kojim uvjetima došlo do jednolikog miješanja s obzirom na to da se miješaju organski i anorganski sastojci.

Beton / Concrete

Zbog krhkosti i niske rastezne čvrstoće betona pri opterećenju dolazi do pojave napuklina. Posljedice raspucavanja betona su: estetski nedostaci na površini i u strukturi betona, povišenje permeabilnosti i sniženje ostalih mehaničkih svojstava. Na kraju očvršćivanja, zbog hidriranja, povisuju se krutost, rastezna čvrstoća i istezanje.¹⁴ Do sada su se istraživanja najviše

temeljila na miješanju cementne mješavine s polipropilenskim vlaknima i staklenim vlaknima postojanima na lužine, tzv. AR-staklenim vlaknima (e. *alkali resistant glass fibres*). U radovima^{14,15} AR-staklena vlakna smanjila su širenje napuklina u betonima za 50 - 70 % u usporedbi s betonom bez staklenih vlakana te povisila savojnu čvrstoću.



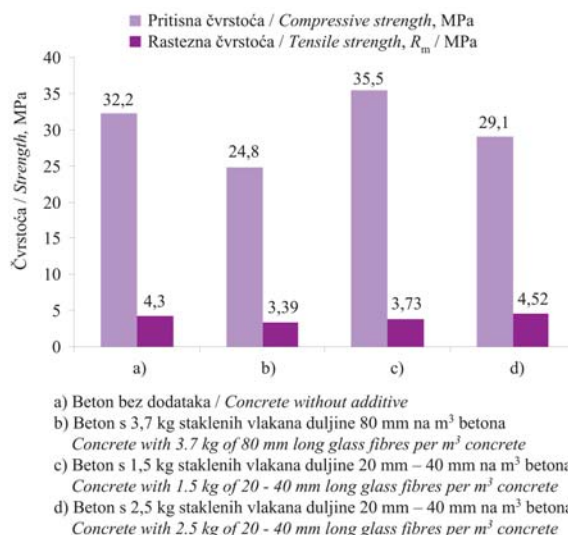
SLIKA 8 – Mikrografija poliamida s dodanim česticama staklenih vlakana

FIGURE 8 – Micrograph of polyamide with glass fibre particles

U Laboratoriju za beton i opeku Instituta IGH d.d. napravljeni su betonski uzorci s umiješanim otpadnim staklenim vlaknima izvorne duljine od –80 mm te ručno rezanima na duljinu od 20 mm do 40 mm. Uzorci su pripremljeni u laboratorijskoj miješalici. Staklena vlakna zapetljavaju se u miješalici te otežavaju miješanje cementne smjese. Ispitna tijela uzeta su pri temperaturi od 23 °C i vlažnosti od 50 % do 60 %. Svojstva betona s umiješanim staklenim vlaknima uspoređena su sa svojstvima betona bez dodanih vlakana (tablica 5). Na ispitnim tijelima nakon 28 dana određena je pritisna čvrstoća prema normi HRN EN 12390-3:2009, gustoća prema HRN EN 12390-7:2009, savojna čvrstoća prema HRN EN 12390-5:2009 i pritisni modul elastičnosti prema normi ISO 6784:1982. Na temelju rezultata ispitivanja savojne čvrstoće određena je rastezna čvrstoća.

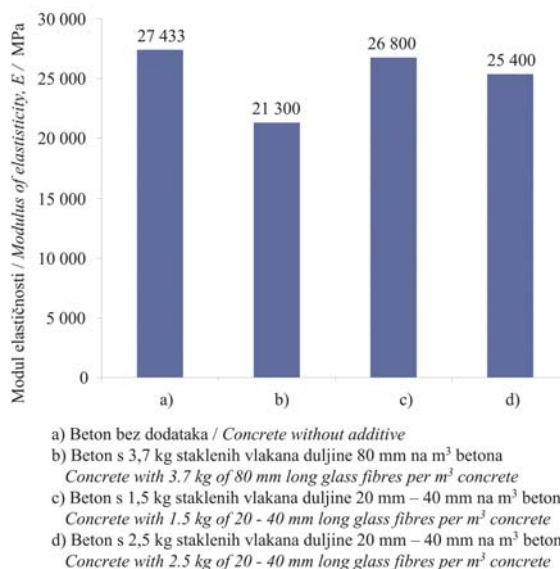
Nije primijećena veća razlika ni u jednom svojstvu važnom za betone (slike 9 i 10).

Budući da je riječ o otpadnim vlaknima koja ne poboljšavaju svojstva betona, imalo bi smisla umiješati ih u betone samo u slučaju ekonomske isplativosti. U građevinarstvu je uobičajeno upotrijebiti staklena vlakna za pravljenja betona, međutim ta vlakna moraju biti postojana na lužine



SLIKA 9 – Pritisna i rastezna čvrstoća s različitim udjelom staklenih vlakana u betonu

FIGURE 9 – Compressive and tensile strength with different content of glass fibres in concrete



SLIKA 10 – Pritisni modul s različitim udjelom staklenih vlakana u betonu

FIGURE 10 – Compression modulus with different content of glass fibres in concrete

TABLICA 5 – Mehanička svojstva betona bez staklenih vlakana i s otpadnim staklenim vlaknima

TABLE 5 – Mechanical properties of concrete without glass fibres and with glass fibres waste

	Beton bez dodataka Concrete without additives	Beton s 3,7 kg staklenih vlakana duljine 80 mm na m³ betona / Concrete with 3.7 kg of 80 mm long glass fibres per m³ of concrete	Beton s 1,5 kg staklenih vlakana duljine 20 – 40 mm na m³ betona / Concrete with 1.5 kg of 20 – 40 mm long glass fibre per m³ of concrete	Beton s 2,5 kg staklenih vlakana duljine 20 – 40 mm na m³ betona / Concrete with 2.5 kg of 20 – 40 mm long glass fibre per m³ of concrete
Pritisna čvrstoća, MPa Compressive strength, MPa	32,2	24,8	35,5	29,1
Gustoća / Density, ρ / kg/m³	2350	2230	2350	2330
Rastezna čvrstoća / Tensile strength, R _m / MPa	4,3	3,39	3,73	4,52
Pritisni modul elastičnosti Compressive modulus, E / MPa	27 433	21 300	26 800	25 400

(AR-staklena vlakna). Obična staklena vlakna osjetljiva su na lužine te u reakciji nastaju gelovi, zbog čega dolazi do promjene volumena te se iz tog razloga mogu očekivati lokalna naprezanja u materijalu. Ispitna tijela analizirana u ovom radu nisu pokazala degradaciju svojstava u intervalu od 28 dana.

Mortovi / Mortars

Miješanjem AR-staklenih vlakana s mortovima snižava se skupljanje i širenje napukline, ali ne povisuje rastezna čvrstoća¹⁶, no nije poznato kako na mortove djeluju staklena vlakna koja nisu postojana na alkalne reakcije.

Mortovi su ispitani u *Laboratoriju za betone i opeku Instituta IGH d.d.* Kako bi se odredio utjecaj staklenih vlakana na svojstva svježega i očvrstnutog morta pripremljene su tri mješavine morta: referentna mješavina u koju nisu dodana staklena vlakna, mješavine s udjelom 1,5 kg staklenih vlakana na 1 m³ betona i s udjelom od 4 kg vlakana na 1 m³ betona (tablica 6). Kako bi se staklena vlakna mogla ugraditi u mješavinu morta, trebalo ih je odvojiti od tekstilnoga konca i skratiti rezanjem na ~15 – 20 mm. Ispitivanje je provedeno prema normama: *HRN EN 1015-6:2000 – Gustoća svježeg morta*, *HRN EN 1015-7:2000 – Udio pora*, *HRN EN 1170-6:2004 – Upijanje vode i određivanje gustoće u suhom stanju*, *HRN EN 1170-4:2004 – Savojna čvrstoća* i *HRN EN 12390-3:2009 – Pritisna čvrstoća*.

Sve tri mješavine izrađene su s vodocementnim omjerom 0,37. Upotrijebljen je cement *CEMI 42,5 R* i agregat maksimalnog promjera zrna $D_{max} = 4$ mm. Miješanje morta izvedeno je pri temperaturi od 20 ± 2 °C i relativnoj vlažnosti od 60 ± 10 %. Nakon ugradbe uzorci su njegovani 24 sata u kalupima u vlažnoj komori relativne vlažnosti (r. h. > 95 %) 25 pri temperaturi od 20 ± 2 °C. Nakon 24 sata uzorci su raskalupljeni i sljedećih šest dana čuvani u vlažnoj komori (r. h. > 95 %) pri temperaturi od 20 ± 2 °C. Nakon sedam dana iz uzoraka su rezana ispitna tijela, koja su zatim skladištena u vodi pri temperaturi od 20 ± 2 °C.

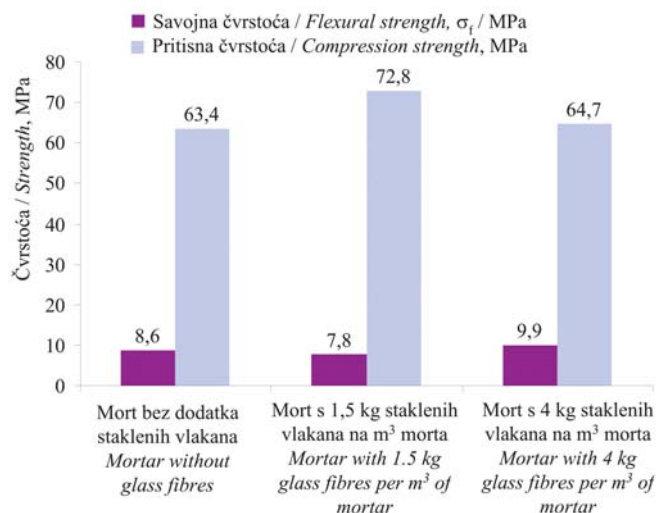
Iz slike 11 može se zaključiti da savojna čvrstoća raste s dodatkom od 4 kg staklenih vlakana po m³ morta te pritisna čvrstoća s dodatkom od 1,5 kg staklenih vlakana po m³ morta tek neznatno. Za daljnje ispitivanje treba povećati udio staklenih vlakana i odrediti količinu koja dovodi do signifikantnog poboljšanja svojstava.

Asfaltne mješavine / Asphalt mixtures

Staklena vlakna u asfaltu se primjenjuju u prvom redu zbog visoke čvrstoće i postojanosti na gorenje. Istezanje vlakana je samo 3 – 4 %, omekšavaju pri temperaturi od 815 °C i čvrstoća se snižava pri temperaturama višim od 315 °C. Dodavanjem staklenih vlakana u mješavinu asfalta povisuje se čvrstoća. Dodatkom staklenih vlakana može se povisiti cijena izgradnje, ali sniziti cijena održavanja.^{17,18}

Svrha šireg aspekta ovog istraživanja jest saznati mogu li se dodavanjem staklenih vlakana u asfaltne mješavine unaprijediti neka od njihovih svoj-

stava vezanih za trajnost i otpornost završnih asfaltnih slojeva izvedenih od mješavina asfalt-betona s dodanim staklenim vlaknima. Mikroarmiranje betona različitim vrstama vlakana (čelična, polipropilenska itd.) vrlo se uspješno i učestalo koristi u praksi, a mreže od staklenih vlakana za armiranje asfalta i drugih materijala standardno se upotrebljavaju u sanacijama dotrajalih (raspucanih) asfaltnih kolnika. Dodavanjem vlakana u smislu mikroarmiranja asfaltne mješavine trebala bi se povisiti rastezna čvrstoća mješavina, odnosno svojstva koja proizlaze iz poboljšane otpornosti na rastezna naprezanja.



SLIKA 11 – Usporedba savojne i pritisne čvrstoće morta s različitim udjelom staklenih vlakana

FIGURE 11 – Comparison of flexural and compression strength of mortar with different content of glass fibres

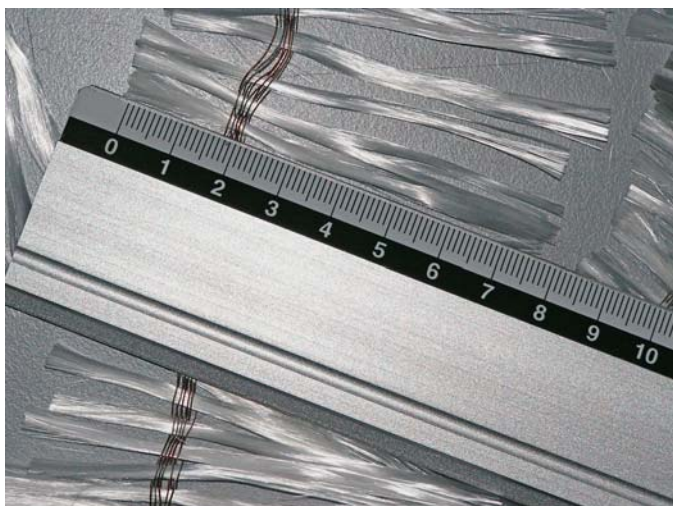
U *Odjelu za tehnologiju i kvalitetu prometnih konstrukcija Instituta za materijale i konstrukcije (Institut IGH d.d.)* pripremljena je mješavina asfalt-betona tipa *AB IIE* od kamenog materijala eruptivnog podrijetla uz dodatak punila karbonatnog podrijetla. U tako pripremljenu mješavinu kamenog materijala (bez dodanog bitumena kao veziva) dodavana su, uz ručno miješanje, staklena vlakna u izvornoj duljini od oko 45 mm do 80 mm (slika 12).

Na taj način pripremljena suha mješavina nema homogenu strukturu jer su se vlakna vrlo neravnomjerno rasporedila u mješavini međusobno se spajajući u snopiće (slika 13). Rezanje vlakana na približno 22 mm (duljina približna onoj koja se prema nekim istraživanjima pokazala optimalnom^{19,20}) također nije dalo bolje rezultate. Niti dodavanje tako rezanih vlakana u vezivo, prije miješanja s kamenom smjesom, nije rezultiralo kvalitetnije homogeniziranim uzorkom.

Vlakna su zatim dodana u gotovu zagrijanu, unaprijed pripremljenu mješavinu asfalt-betona. U tu svrhu upotrijebljena je mješavina asfalt-

TABLICA 6 – Utjecaj staklenih vlakana na svojstva svježega i očvrstnutog morta
TABLE 6 – Effect of glass fibres on the properties of fresh and hardened mortar

	Mort / Mortar		
	Udio staklenih vlakana / Glass fibres fraction, kg/m ³		
	0	1,5	4,0
Gustoća svježeg morta / Density of fresh mortar ρ / kg/m ³	2310	2290	2290
Udio pora / Pores fraction, %	5,2	4,6	1,4
Upijanje vode uranjanjem / Water absorption by immersion c / %	8,28	7,67	8,46
Gustoća u suhom stanju / Density in dry state, ρ_d / kg/m ³	2049	2030	2101
Savojna čvrstoća / Flexural strength, σ_f / MPa	8,6	7,8	9,9
Pritisna čvrstoća / Compressive strength, MPa	63,4	72,8	64,7

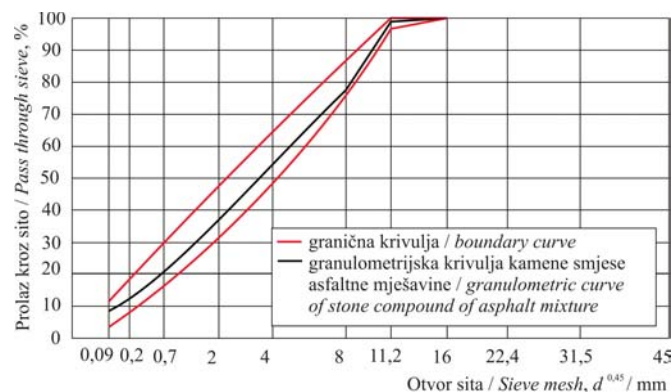


SLIKA 12 – Staklena vlakna izvorne duljine
FIGURE 12 – Glass fibres of original length



SLIKA 13 – Skupljanje vlakana u snopiće prilikom miješanja
FIGURE 13 – Clustering of fibre bundles during mixing

betona tipa *AB IIE* pripremljena na asfaltnoj bazi od frakcioniranoga kamenog materijala eruptivnog podrijetla i cestograđevnog bitumena 50/70. Granulometrijski sastav mješavine prikazan je na slici 14. Iz nje se vidi da se granulometrijska krivulja potpuno uklapa u granične krivulje za navedeni tip asfalt-betona.²¹ Mješavina je zagrijana na temperaturu od 160 °C u strojnoj miješalici te je u nju dodano 0,3 % masenog udjela staklenih vlakana duljine 22 mm.



SLIKA 14 – Granulometrijski sastav asfaltna mješavine
FIGURE 14 – Granulometric composition of asphalt mixture

Usporedno je ispitano ispitno tijelo iz originalne mješavine (bez dodatka vlakana) kako bi se mogle na analiziranim svojstvima asfaltna mješavine pratiti eventualne promjene. Za svaki uzorak pripremljeno je na Marshall nabijaču po pet ispitnih tijela (slika 15) prema normiranom postupku navedenom u.²²



SLIKA 15 – Ispitno tijelo promjera oko 101,5 mm asfaltna mješavine s vlaknima

FIGURE 15 – A sample of an asphalt mixture with fibres with the diameter of approx. 101.5 mm

Rezultati laboratorijskih ispitivanja prikazani su u tablici 7.

Na osnovi provedenih ispitivanja može se pretpostaviti da su vlakna utjecala na gustoću mješavine. Za iste mase ispitnih tijela podjednakih promjera (101,5 mm) postignute su više visine kod ispitnih tijela s dodatnim vlaknima za otprilike 2 % u odnosu na mješavinu bez vlakana. Sukladno tomu kod ispitnih tijela s vlaknima zabilježeno je sniženje gustoće od otprilike 1,5 %. Također, povećao se udio šupljina u ispitnom tijelu, i to za otprilike 21 % u odnosu na udio šupljina mješavine bez vlakana. Gustoća same asfaltna mješavine dodavanjem vlakana nije se mijenjala, što je i bilo očekivano s obzirom na podjednaku gustoću vlakana (2,63 g/cm³) i asfaltna mješavine (2,5 g/cm³).

Rastezna čvrstoća ispitnih tijela s dodatnim vlaknima pri temperaturi od 20 °C povisuje se za ~4 % u odnosu na ona bez vlakana.

Ispitivanje modula krutosti provedeno je pri temperaturama od 5 °C, 20 °C i 35 °C. Pri temperaturi ispitivanja od 5 °C ispitna tijela s dodatnim vlaknima bilježe blag pad modula krutosti, dok je pri temperaturi ispitivanja od 20 °C zabilježen prirast modula od 10 %. Treba spomenuti da moduli krutosti izmjereni pri temperaturi ispitivanja od 35 °C u tablici nisu prikazani jer više od 50 % ispitnih tijela s dodatnim vlaknima nije zadovoljilo uvjet homogenosti, što se može pripisati visokoj temperaturi pri kojoj su ispitna tijela kondicionirana tijekom ispitivanja.

S obzirom na prirodu ispitivanja modula krutosti u građevinarstvu djelovanjem pulsirajuće sile po obodu plašta ispitnog tijela, može se reći da se pri takvom dinamičkom opterećenju asfalti s dodatnim vlaknima ponašaju malo bolje od onih bez vlakana. Ispitivanjem modula krutosti postignuti rezultati pokazuju porast od 10 – 15 % na ispitnim tijelima s dodatnim vlaknima u odnosu na ona bez vlakana. Dodavanjem otpadnih staklenih vlakana mogu se, dakle, postići niže cijene asfaltiranja prometnica. Potrebna je, međutim, detaljnija analiza asfalta pri dinamičkom opterećenju. Udio dodanih vlakana u analiziranim uzorcima je nizak zbog ograničenja kod pripreme (stvaranje nakupina, nehomogenost). Za postizanje većeg udjela vlakana te bolje raspodjele i raspršenosti treba pronaći bolji način njihove pripreme.

TABLICA 7 – Rezultati ispitivanja asfalta

TABLE 7 – Test results for asphalt

	Bez vlakana <i>Without fibres</i>		S dodatkom 0,3 % mase vlakana <i>With 0.3 % mass of fibres</i>	
Masa / <i>Mass, m / g</i> <i>HRN EN 12697-6</i>	1250,4		1249,3	
Visina / <i>Height, mm</i> <i>HRN EN 12697-29</i>	65,3		66,6	
Gustoća asfaltnoga ispitnog tijela / <i>Density of asphalt specimen,</i> $\rho / \text{kg/m}^3$ <i>HRN EN 12697-6</i>	2406		2371	
Gustoća asfaltne mješavine / <i>Density of asphalt mixture, $\rho / \text{kg/m}^3$</i> <i>HRN EN 12697-5</i>	2574		2573	
Udio šupljina / <i>Void content (vol%)</i> <i>HRN EN 12697-8</i>	6,5		7,9	
Modul krutosti* / <i>Stiffness modulus, MPa</i> <i>HRN EN 12697-26; postupak D / process D</i>	5 °C	20 °C	5 °C	20 °C
	15 274	5698	14 944	6290
Posredna rastezna čvrstoća / <i>Indirect tensile strength, MPa</i> <i>HRN EN 12697-23</i>	20 °C		20 °C	
	1,89		1,97	

Jedan način razvija tvrtka *LDV Ingenierie* iz Francuske. Njihova se vozila upotrebljavaju u cestogradnji za nanošenje sloja staklenih vlakana pri izgradnji novih ili sanaciji već postojećih prometnica (slika 16).

SLIKA 16 – Nanošenje sloja vlakana na asfalt²³FIGURE 16 – Fibre coating on asphalt²³

Sloj staklenih vlakana ima u prvom redu ulogu spriječiti širenje napuklina u asfaltu, što je jedan od većih problema u cestogradnji. Sloj s vlaknima ne smije biti završni zbog mogućeg proklizavanja vozila. Prema tvrdnji proizvođača, desetogodišnja primjena na prometnicama u Njemačkoj i Francuskoj pokazala je njihovu izvrsnu izdržljivost. U Hrvatskoj takav postupak još nema tržište. Kod tog postupka problem je što se vlakna izvlače kontinuirano i režu na duljinu od 60 mm te onda rasipavaju po površini, pa već izrezana otpadna vlakna nisu prikladna za nanošenje.

Kako se i pretpostavljalo na osnovi^{19,20}, pokazalo se da staklena vlakna imaju karakteristiku velike specifične površine, zbog koje vežu bitumen na sebe i time mijenjaju količinu i kvalitetu bitumenskog morta u mješavini, što je rezultiralo povećanim šupljinama, a što bi se moglo povezati s povišenim modulom krutosti.

* Prema normi ispitno tijelo opterećeno je s 5 impulsa sile dovoljne da deformira ispitno tijelo za 5 μm . Ispitni je valjak pri tome polegnut i kontinuirano opterećen uzduž plašta.

Rasprava / Discussion

Otpad od staklenih vlakana u obliku kakav se pojavljuje pri proizvodnji tkanina moguće je iskoristiti u kombinaciji s poliesterskom smolom za zakrpavanje manjih oštećenja i lijepljenje različitih vrsta materijala (ispitano na PMMA, drvu i laminatu s poliesterskom matricom – sve kombinacije). Ipak, riječ je o prevelikoj količini da bi se smatrala rješavanjem problema otpada, odnosno potencijalni korisnici uglavnom su tvrtke koje se već bave izradom kompozita te imaju i iz vlastite proizvodnje otpad od staklenih tkanja.

Šira upotreba u kombinaciji s poliesterskom smolom bila bi moguća kada bi se razvio i postupak štrcanja ovakvih vlakana. Ograničenje za razvoj postupka jest činjenica da su vlakna različite debljine i duljine.

Umješavanje vlakana u betone i mortove opravdano je isključivo ekonomski i ekološki, dok bitan utjecaj na svojstva nije primijećen. Ni nakon 28 dana nije primijećen utjecaj alkalne reakcije na betone i mortove. Ipak, potrebno je ispitati smjese s većim udjelom vlakana te nakon duljeg razdoblja.

U cestogradnji je primjena staklenih vlakana moguća. Na temelju provedenih ispitivanja može se zaključiti da je dodavanje 0,3 % masenog udjela staklenih vlakana u prethodno pripremljenu mješavinu asfalt-betona tipa *AB IIE* utjecalo na gotovo sva fizičko-mehanička svojstva, u odnosu na ispitna tijela pripremljena iz mješavine bez dodanih vlakana. Uz poboljšanje modula krutosti, iskustvo tvrtke *LDV* pokazalo je da sloj vlakana sprječava širenje napuklina.

U daljnjem istraživanju bit će potrebno u laboratorijski kontroliranim uvjetima pripremiti mješavine s različitim udjelima dodanih vlakana i sukkladno tomu modificiranim količinama bitumenskog veziva. U prvom redu treba povećati udio vlakana. Ispitna tijela iz tako pripremljenih mješavina trebaju zadovoljiti osnovna propisana fizičko-mehanička svojstva²⁰ kako bi se mogli analizirati postignuti rezultati. S obzirom na to da se u domaćoj cestogradnji ne koriste uređaji poput kamiona za nanošenje vlakana, recikliranje otpada na ovaj način može se očekivati tek dugoročno.

Zaključak / Conclusion

Kratka staklena vlakna poznata su kao ojačavalo u pripravi kompozita. Neovisno o tome je li riječ o matrici od organskoga sintetskoga polimera ili asfaltu, kontinuirana se vlakna prikladnim metodama usitnjavaju u strojevima za distribuciju vlakana i nanose na pripremljenu reaktiv-

nu površinu stvarajući na taj način sloj po sloj kompozita. Poznata je uspješna primjena na taj način ojačanih poliesterskih smola i asfalta. U ovom radu provedena ispitivanja radi zbrinjavanja, odnosno recikliranja vlakana koja su mehanički usitnjena prije ulaska u stroj za distribuciju pokazala su potrebu modificiranja postojećih postupaka pripreme na taj način ojačanih materijala. Novim bi se postupcima ovakva vlakna mogla primijeniti za ojačavanje poliesterskih smola i asfalta. Iako se vlakna u kombinaciji s poliesterskom smolom mogu lako koristiti kao ljepilo ili za sanaciju oštećenja, širu primjenu osigurala bi tek modifikacija postojećih postupaka.

Kod betona i mortova potrebna su dugoročna dodatna ispitivanja radi utvrđivanja mogućih alkalnih reakcija zbog dodavanja staklenih vlakana.

Zahvala / Acknowledgment

Rad je proizšao iz znanstvenog projekta Uspostavna potpora - Dinamička mehanička analiza polimera i kompozita, provedenoga uz potporu Hrvatske zaklade za znanost. Autori zahvaljuju Zakladi na potpori.

LITERATURA / REFERENCES

- Bobkova, N. M., Ermolenko, N. N., Kotyak, G. F.: *The re-use of waste in the production of continuous glass fibre*, Glass and Ceramics, 25(1968)3, 162-163.
- Feih, S., Boiocchi, E., Mathys, G., Mathys, Z., Gibson, A. G., Mouritz, A. P.: *Mechanical properties of thermally-treated and recycled glass fibres*, Composites: Part B, 42(2011), 350-358.
- Zheng, Y., Shen, Z., Ma, S., Cai, C., Zhao, X., Xing, Y.: *A novel approach to recycling of glass fibers from nonmetal materials of waste printed circuit boards*, Journal of Hazardous Materials, 170(2009), 978-982.
- Chen, C. H., Huang, R., Wu, J. K., Yang, C. C.: *Waste E-glass particles used in cementitious mixtures*, Cement and Concrete Research, 36(2006), 449-456.
- Hart-Smith, L. J.: *Bolted and Bonded Joints*, ASM Handbook, ASM Handbook, Vol. 21, Composites, Ohio, 2002., 620-632.
- Campbell, F. C.: *Secondary Adhesive Bonding of Polymer-Matrix Composites*, ASM Handbook, Vol. 21, Composites, Ohio, 2002., 620-632.
- ASTM D3163 - 01(2008): *Standard Test Method for Determining Strength of Adhesively Bonded Rigid Plastic Lap-Shear Joints in Shear by Tension Loading*.
- Hart-Smith, L. J., Heslehurst, R. B.: *Designing for Repairability*, ASM Handbook, Vol. 21, Composites, Ohio, 2002., 872-884.
- Čatić, I.: *Proizvodnja polimernih tvorevina*, Društvo za plastiku i gumu, Biblioteka polimerstvo – serija zelena, Zagreb, 2006.
- Akovali, G.: *Handbook of Composite Fabrication*, RAPRA Technology LTD, Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, UK, 2001.
- Ehrenstein, G. W.: *Faserverbund – Kunststoffe*, Carl Hanser Verlag, Muenchen, Wien, 2006.
- Varga, Cs., Miskolczi, N., Bartha, L., Lipóczy, G.: *Improving the mechanical properties of glass-fibre-reinforced polyester composites by modification of fibre surface*, Materials and Design, 31(2010), 185-193.
- Andresen, F. R.: *Open Moulding: Hand Lay-Up and Spray-Up*, ASM Handbook, Vol. 21, Composites, Ohio, 2002., 450-456.
- Barluenga, G., Hernández-Olivares, F.: *Cracking control of concretes modified with short AR glass fibers at early age. Experimental results on standard concrete and SCC*, Cement and Concrete Research, 37(2007), 1624-1638.
- Mirza, F. A., Soroushian, P.: *Effects of alkali-resistant glass fiber reinforcement on crack and temperature resistance of lightweight concrete*, Cement & Concrete Composites, 24(2002), 223-227.
- Messan, A., Ienny, P., Nectoux, D.: *Free and restrained early-age shrinkage of mortar: Influence of glass fiber, cellulose ether and EVA (ethylene-vinyl acetate)*, Cement & Concrete Composites, 33(2011), 402-410.
- Mahdi Abtahi, S., Sheikhzadeh, M., Mahdi Hejazi, S.: *Fiber-reinforced asphalt-concrete – A review*, Construction and Building Materialism, 24(2010), 871-877.
- Majoryl, L.: *Introductory textile science*, 5th ed. Holet, Rinehart and Winston Pub., 1986.
- Jahromi, S. G., Khodaii, A.: *Carbon fiber reinforced asphalt concrete*, The Arabian Journal for Science and Engineering, 33(2008)2B
- Mahrez, A., Karim, M. R.: *Fatigue and deformation properties of glass fiber reinforced bituminous mixes*, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 6(2005), 997-1007.
- Opći tehnički uvjeti za radove na cestama*, HC i HAC, Zagreb, 2001.
- Roberts, F. L., Kandahl, P. S., Brown, E. R., Lee, D. Y., Kenedy, T. W.: *Vruće asfaltna mješavine* (hrvatsko izdanje), Hrvatski savez građevinskih inženjera, Zagreb, 2003.
- Lariviere – Doublard: *Prezentacija tehnologije primjene staklenih vlakana za održavanje asfaltna površine (Introducing Glass Fibres into Carriageway maintenance)*, LDV Ingenierie, Institut IGH, 18. 10. 2010.

DOPISIVANJE / CONTACT

Doc. dr. sc. Tatjana Haramina
Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5
HR-10000 Zagreb, Hrvatska / Croatia
E-pošta / E-mail: tharamina@fsb.hr

VIJESTI

Upravljanje cjeloživotnim ciklusom proizvoda – novi specijalistički poslijediplomski studij na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu pokrenut je novi smjer specijalističkog studija *Upravljanje cjeloživotnim ciklusom proizvoda*, koji traje dva semestra. Studij nosi 60 ECTS bodova. To je rezultat TEMPUS-ova projekta IVJPCR 144959 *Mreža poslijediplomskog i kontinuiranog obrazovanja u području upravljanja cjeloživotnim ciklusom proizvoda održivom proizvodnjom* (e. *Master Studies and Continuing Education Network for Product Lifecycle Management with Sustainable Production, MAS-PLM*).

Polaznici novoga specijalističkog poslijediplomskog studija upoznat će se s novom paradigmom razvoja, planiranja i upravljanja životnim ciklusom proizvoda te će steći potrebna stručna znanja iz spomenutih područja. Polaznicima će se omogućiti ovladavanje upravljanjem cjeloživotnim ciklusom proizvoda primjenom suvremene računalne podrške, Siemensova programskog paketa *PLM Software – Teamcenter*, s pomoću kojega će rješavati realne probleme i uvoditi se u timski i samostalan rad.

Više informacija na www.plm-fsb.hr i www.master-plm.net te na e-adresi plm@fsb.hr.