

## Uticaj $Al_2O_3$ čestica na žilavost hibridnog kompozita sa EVA matricom ojačanog UHMWPE vlaknima

JELENA R. ZEC, Univerzitet u Beogradu,

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

NATAŠA Z. TOMIĆ, Univerzitet u Beogradu, Inovacioni centar

Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

MARIJA M. VUKSANOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

RADMILA M. JANČIĆ HEINEMANN, Univerzitet u Beogradu,

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 678.7.017

DOI: 10.5937/tehnika1803319Z

*Cilj ovoga rada je ispitivanje mehaničkih svojstava hibridnih kompozita sa polimernom matricom, matrice kopolimera etilena i vinil-acetata (EVA), polietilenskih vlakana ultra visoke molarne mase (UHMWPE) i čestica na bazi aluminijum oksida. Komercijalne nanočestice aluminijum oksida i čestice aluminijum oksida dobijene sol-gel tehnikom korišćene su kao punioci u udelu od 1, 3 i 5 mas. %. Infracrvena spektroskopija sa Furijeovom transformacijom (FTIR) i skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) korišćene su za ispitivanje hemijske strukture i mikrostrukture hibridnih kompozita, datim redom. Ispitivanje na zatezanje pokazalo je povećanje modula elastičnosti i zatezne čvrstoće dobijenih hibridnih kompozita. Rezultati ispitivanja uzoraka pokazali su da najbolja mehanička svojstva i žilavost materijala pokazuje hibridni kompoziti sa 1 mas. % mikronskih čestica aluminijum oksida.*

**Ključne reči:** UHMWPE,  $Al_2O_3$  ojačanja, EVA matrica, hibridni kompoziti, mehanička svojstva

### 1. UVOD

Kopolimer etilena i vinil-acetata (EVA) se dobija kopolimerizacijom monomera etilena i vinil-acetata sa različitim udelima acetatnog monomera [1]. Ovi kopolimeri, zbog karakteristika obrade, imaju široku primenu u biomedicini, prehrambenoj, građevinskoj, transportnoj i kablovskoj industriji. Takođe se koriste kao lepkovi, električna izolacija, zaštita od korozije, hidroizolacija itd. [2, 3].

EVA kopolimeri se koriste i u kombinaciji sa različitim vrstama materijala kao što su drvo, guma, metal, staklo i polimeri [4, 5]. Svojstva EVA kopolimera zavise od sadržaja svakog komonomera. Povećanje sadržaja vinil-acetatnih segmenata u EVA kopolimeru smanjuje temperaturu topljenja i stepen kristaliničnosti, dok niži sadržaj vinil-acetatnih grupa povećava temperaturu ostakljivanja ( $T_g$ ) [6, 7].

Da bi se dobio kompozit sa poboljšanim mehaničkim svojstvima kao što su zatezna čvrstoća, tvrdoća, Jungov modul elastičnosti ili žilavost, polimerne matrice se kombinuju sa različitim neorganskim puniocima [8]. Neorganski punioci mogu biti čestice cirkonijum oksida ( $ZrO_2$ ), titanijum oksida ( $TiO_2$ ), kaolin, čestice aluminijum oksida ( $Al_2O_3$ ), ugljenična vlakna, ugljenične nanocevi [9].

Materijali koji se često koriste u kompozitima su polietilenska vlakna sa veoma visokom molarnom masom (UHMWPE). Njihova osnovna svojstva su otpornost na habanje, hemijska inertnost, čvrstoća, visoka otpornost na udar, žilavost, zatezna čvrstoća [10]. Mane ovih vlakana su njihova nepolarnost (što otežava vezivanje sa matricom) i loša termička otpornost. Koriste se u kombinaciji sa epoksidnim smolama, koje su termoizolacione ali imaju nisku otpornost na udar i malu žilavost. Ove slabosti epoksidnih smola mogu se prevazići uvođenjem UHMWPE vlakana kao ojačanja [11].

Aluminijum-oksidi pojavljuju se u nekoliko kristalnih oblika, ali korund je najpoželjniji za ojačanje kompozitnih materijala kada se žele poboljšati mehanička i

Adresa autora: Jelena Zec, Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, Karnegijeva 4

e-mail: jelenazec@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 15.03.2018.

Rad prihvaćen: 13.04.2018.

termička svojstva polimera. Sitnije čestice aluminijum oksida mogu poboljšati mehanička svojstva kompozita čak i u dodatku malih količina čestica. Ispitivanja su pokazala da čak i dodatak čestica u udelima 0,15, 0,50 i 1,50 mas. % povećava modul elastičnosti kompozita. Kod zatezne čvrstoće pokazalo se da mala količina dodatih čestica ne utiče značajno na razlike između nanokompozita i čiste matrice [12]. Sa druge strane, pokazalo se da savojna čvrstoća i modul elastičnosti zavise od udela punioca [13].

U slučaju EVA/ $Al_2O_3$  kompozita, čestice utiču na povećanje zatezne čvrstoće nanokompozita do određenog udela, dok sa daljim povećanjem udela čestica dolazi do smanjenja zatezne čvrstoće zbog aglomerisanja čestica [14-16].

Cilj ovog rada je ispitivanje uticaja veličine i strukture čestica aluminijum oksida na žilavost hibridnih kompozita na bazi EVA matrice ojačanih UHMWPE vlaknima.

## 2. EKSPERIMENTALNI DEO

Polietilenska vlakna, korišćena kao ojačanje, su UHMWPE – DSM Dyneema, Holandija (SK75; prečnika 20 mm; gustine  $0,970 \text{ gcm}^{-3}$ ). Kao polimerna matrica izabran je komercijalni EVA kopolimer (Elvax<sup>®</sup>410) proizvođača DuPont<sup>™</sup>, koji sadrži 18 mas. % vinil-acetata. Toluena (proizvođača Zorka Šabac) korišćen je kao rastvarač. Nanočestice aluminijum oksida ( $\gamma$  faza, prečnika  $<50 \text{ nm}$ ) nabavljene su od proizvođača Sigma Aldrich, USA.

Mikronske čestice ojačanja sintetizovane su polazeći od aluminijum hidroksi hlorida (Locron L)  $Al_2(OH)_5Cl \cdot 2,5 H_2O$ , kompanije Clariant Company. Za pripremu je korišćena sol-gel tehnika: destilovana voda i aluminijum hidroksi hlorid ( $Al_2(OH)_5Cl \cdot 2,5H_2O$ ) mešani su na magnetnoj mešalici dok se sav aluminijum hidroksi hlorid nije rastvorio. Kada je smeša u potpunosti rastvorena (sol), izlivena je u petri šolju i ostavljena da gelira. Dobijena smeša mlevena je u avanu sa tučkom i prah je kalcinisan na  $900^\circ\text{C}$ , tokom dva sata. U daljem radu, oznake za nano aluminijum oksidne čestice su n- $Al_2O_3$ , a za mikro aluminijum oksidne čestice su  $\mu$ - $Al_2O_3$ .

Hibridni kompoziti su dobijeni impregnacijom UHMWPE vlakana rastvorenom smešom matrice. Rastvor za impregnaciju je dobijen dispergovanjem 1, 3 i 5 mas. % čestica u toluenu u ultrazvučnom kupatilu tokom jednog sata. Zatim je u smešu dodat EVA kopolimer i zagrejana je na  $60^\circ\text{C}$  do potpunog rastvaranja, kako bi se dobio 20 mas. % rastvor polimera u toluenu. UHMWPE vlakna su impregnisana na specijalno dizajniranoj aparaturi, održavajući temperaturu rastvora za impregnaciju na  $60^\circ\text{C}$  [17, 18]. Dizna za izvlačenje kompozita je imala dimenzije  $0,4 \times 1,5 \text{ mm}$ . Po izlasku

iz dizne kompoziti su osušeni i ohlađeni, nakon čega su namotavani na kalem za transport. Dobijeni hibridni kompoziti sa dodatkom 1, 3 i 5 mas. % n- $Al_2O_3$  i  $\mu$ - $Al_2O_3$  čestica su obeležavani datim redom kao što sledi: UHMWPE/EVA /1-n- $Al_2O_3$ ; UHMWPE/EVA/3-n- $Al_2O_3$ ; UHMWPE/EVA/5-n- $Al_2O_3$ ; UHMWPE/EVA-/1- $\mu$ - $Al_2O_3$ ; UHMWPE/EVA/3- $\mu$ - $Al_2O_3$ ; UHMWPE/EVA /5- $\mu$ - $Al_2O_3$ .

Testovi su izvedeni na jednosopnoj Furijeovoj transformaciji infracrvene spektroskopije korišćenjem Nicolet 6700 spektrometra (Thermo Scientific) u modu sa oslabljenom totalnom refleksijom (eng. attenuated total reflectance - ATR) sa jednim skokom od  $45^\circ\text{F}$  Golden Gate ATR sa dodatim dijamantskim kristalom, elektronski hlađen sa DTGS detektorom. Spektri su dobijeni od 64 snimanja na rezoluciji od  $4 \text{ cm}^{-1}$ , ispravljeni ATR. Nicolet 6700 FT-IR spektrometar je opremljen OMNIC softverom koji snima spektre u opsegu talasnih dužina od  $2,5 \mu\text{m}$  to  $20 \mu\text{m}$  (i.e.,  $4000 \text{ cm}^{-1}$  to  $500 \text{ cm}^{-1}$ ).

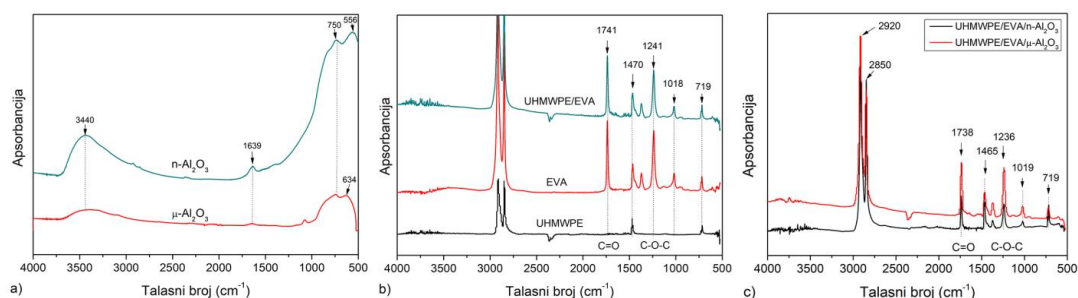
Raspodela veličina čestica je određena laserskim analizatorom (PSA) Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Ltd., UK).

Morfologija kompozita ispitana je pomoću skenirajućeg elektronskog mikroskopa (FE-SEM), MIRA3 TESCAN, koji radi na  $20 \text{ kV}$ .

Zatezna čvrstoća uzoraka merena je pomoću servo-hidrauličke mašine za testiranje INSTRON 1332 (Instron Ltd., USA) sa kontrolnom elektronikom FASTtrack 8800. Brzina zatezanja je  $5 \text{ mm min}^{-1}$ . Svi uzorci su iste dužine i za ispitivanje su korišćeni po tri uzorka i izračunata je srednja vrednost.

## 3. REZULTATI

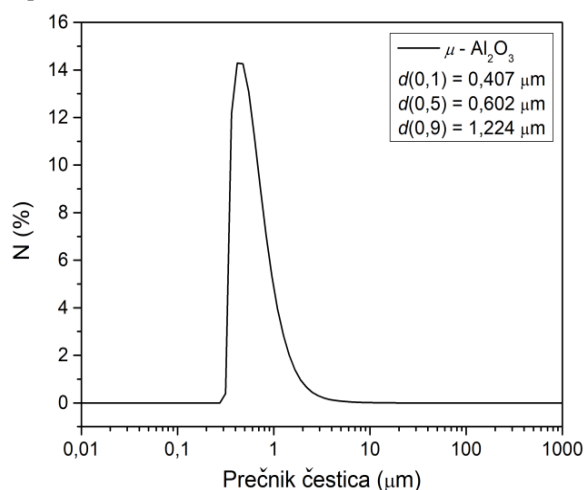
Hemijska struktura čestica i kompozita ispitana je pomoću FTIR spektroskopije kako bi se ispitalo prisustvo funkcionalnih grupa koje mogu dovesti do uspostavljanja međumolekulskih interakcija. Dobijeni spektri prikazani su na slici 1. FTIR identifikuje hemijske veze organskih i neorganskih uzoraka stvarajući infracrveni apsorpcioni spektar. Karakteristični pikovi za n- $Al_2O_3$  i  $\mu$ - $Al_2O_3$  (slika 1a) na  $3300 \text{ cm}^{-1}$  i  $1638 \text{ cm}^{-1}$  pripisani su prisustvu hidroksilnih grupa ( $-O-H$ ). Značaj hidroksilnih grupa se ogleda u uspostavljanju međumolekulskih interakcija sa matricom hibridnog kompozita, tj. acetatnih grupa EVA kopolimera. Značajna količina hidroksilnih grupa na površini komercijalnih nanočestica n- $Al_2O_3$  može doprineti uspostavljanju većeg broja međumolekulskih dipol-dipol interakcija sa EVA matricom. Prema detaljnoj analizi uticaja kristalne strukture  $Al_2O_3$  čestica na svojstva kompozita, pojava  $\alpha$  kristalne faze u  $\mu$ - $Al_2O_3$  može dovesti do značajnog poboljšanja mehaničkih svojstava kompozita [19].



Slika 1 - FTIR spektri za konstituente i hibridne kompozite: a)  $n-Al_2O_3$  i  $\mu-Al_2O_3$ , b) UHMWPE vlakna, EVA matrica i kompozit UHMWPE/EVA i c) hibridni kompoziti UHMWPE/EVA/ $n-Al_2O_3$  i UHMWPE/EVA/ $\mu-Al_2O_3$

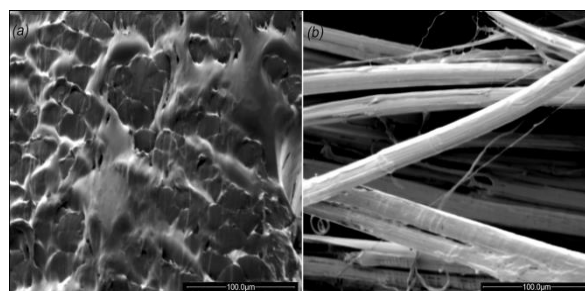
Karakteristični pikovi za UHMWPE/EVA (slika 1b) se mogu videti na spektru usled vibracija C-H etilenske veze polimernih lanaca na  $2940\text{ cm}^{-1}$ , karbonilne C=O grupe na  $1741\text{ cm}^{-1}$  i estarske C-O-C grupe na  $1241\text{ cm}^{-1}$ . FTIR spektri za hibridne kompozite, tj. UHMWPE/EVA/ $n-Al_2O_3$  i UHMWPE/EVA/ $\mu-Al_2O_3$  (slika 1c) pokazuju karakteristične pikove na  $1236$ ,  $1465\text{ cm}^{-1}$  koji se odnose na prisustvo C-O-C koji potiču od acetatne grupe polimerne matrice EVA kopolimera. Na  $1738\text{ cm}^{-1}$  javlja se prisustvo karbonilne C=O grupe, dok se na  $2850$  i  $2920\text{ cm}^{-1}$  javlja vibracija C-H grupa kojima doprinosi kako prisustvo UHMWPE vlakana tako i EVA matrice [17].

Raspodela prečnika  $\mu-Al_2O_3$  čestica data je na slici 2. Prema analizi može se videti da 10% čestica ima prečnik ispod  $0,407\text{ }\mu\text{m}$ , 50% ispod  $0,602\text{ }\mu\text{m}$  i 90% ispod  $1,224\text{ }\mu\text{m}$ . Raspodela veličina čestica pokazuje da se na ovaj način dobijaju submikronske čestice aluminijum oksida sa jednim segmentom u nanometarskom domenu. Submikronska dimenzija čestica može osigurati značajan efekat ojačanja hibridnih kompozita [17].



Slika 2 - Raspodela prečnika  $\mu-Al_2O_3$  čestica

Kako bi se ispitala kompatibilnost/kvašenje UHMWPE vlakana i EVA matrice, ispitana je mikrostruktura kompozita UHMWPE/EVA na poprečnom preseku kao i nakon testa na zatezanje, slika 3.



Slika 3 - FE-SEM slike kompozita UHMWPE/EVA: a) poprečni presek i b) lom nakon testa na zatezanje

Poprečni presek UHMWPE/EVA koji se vidi na slici 3a pokazuje da su uspostavljeni dobri procesni parametri čime je postignuto efikasno kvašenje UHMWPE vlakana i njihov pravilan raspored unutar matrice. Na slici 3a mogu se uočiti tragovi sečenja, što je karakteristično za elastomerni EVA kopolimer sa veoma niskom temperaturom ostakljivanja, koji tokom sečenja prati trag sečiva. Ovakvo svojstvo EVA kopolimera doprinosi lakom procesiranju i oblikovanju kompozita UHMWPE/EVA. Slika 3b pokazuje da i nakon loma kompozita, EVA kopolimer parcijalno ostaje na površini UHMWPE vlakana. Ova pojava pokazuje delimičnu kompatibilnost matrice i vlakana gde dolazi do uspostavljanja hidrofobnih interakcija između nepolarnih etilenskih segmenata EVA matrice i površine UHMWPE vlakana.

Ispitivanje uticaja dodatka punioca na mehanička svojstva i na mikrostrukturu hibridnih kompozita, izvedeno je ispitivanjem uzoraka na zatezanje, a zatim i analizom loma kompozita. Dobijena mehanička svojstva hibridnih kompozita prikazana su u tabeli 1.

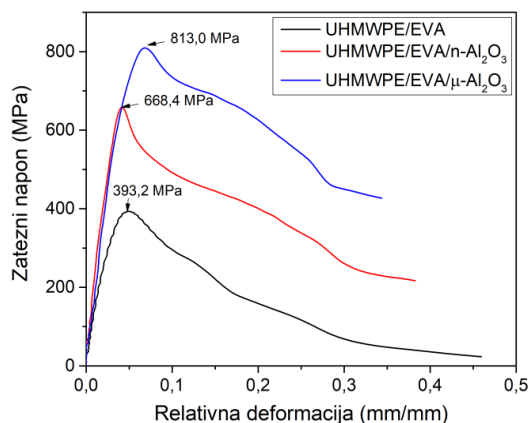
Rezultati u tabeli 1 pokazuju značajna poboljšanja mehaničkih svojstava UHMWPE/EVA kompozita sa dodatkom punioca na bazi aluminijum oksida. Dodatak komercijalnih nanočestica  $n-Al_2O_3$  pokazuje poboljšanje zatezne čvrstoće sa većim udelom čestica. Sa 5 mas. % hibridni kompozit UHMWPE/EVA/5- $n-Al_2O_3$  pokazuje povećanje zatezne čvrstoće od 81,0% u odnosu na UHMWPE/EVA kompozit. Hibridni kompozit sa dodatkom sintetisanih čestica  $\mu-Al_2O_3$

pokazuje bolja mehanička svojstva, čak i u poređenju sa nanočesticama.

Tabela 1. Mehanička svojstva hibridnih kompozita iz testa na zatezanje.

Sastav uzoraka	Zatezna čvrstoća $\sigma_m$ , (MPa)	Modul elastičnosti $E_t$ , (GPa)
UHMWPE/EVA	410,0	12,5
UHMWPE/EVA /1-n- $Al_2O_3$	668,4	22,1
UHMWPE/EVA /3-n- $Al_2O_3$	728,0	20,5
UHMWPE/EVA /5-n- $Al_2O_3$	742,3	15,1
UHMWPE/EVA /1- $\mu$ - $Al_2O_3$	813,0	21,5
UHMWPE/EVA /3- $\mu$ - $Al_2O_3$	774,4	21,2
UHMWPE/EVA /5- $\mu$ - $Al_2O_3$	728,4	21,1

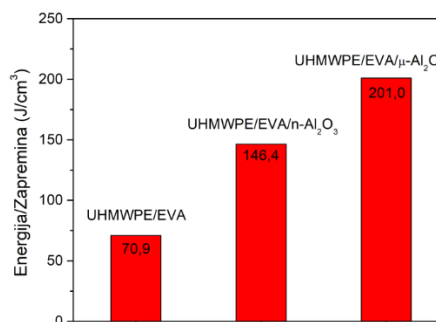
Sa dodatkom 1 mas. %  $\mu$ - $Al_2O_3$  čestica hibridni kompozit UHMWPE/EVA/1- $\mu$ - $Al_2O_3$  pokazuje povećanje zatezne čvrstoće u odnosu na UHMWPE/EVA za čak 98,0%. Ako se pogleda modul elastičnosti, može se primetiti da se kod hibridnih kompozita dobija povećanje što ujedno oslikava i povećanje krutosti materijala. Kako bi se vizuelno stekao utisak o poboljšanju mehaničkih svojstava, na slici 4 se prikazuje uporedni dijagram zavisnosti zateznog napona od relativne deformacije uzoraka sa dodatkom 1 mas. % čestica punioca.



Slika 4 - Dijagram zatezne čvrstoće hibridnih kompozita sa 1 mas.% aluminijum oksidnih čestica.

Prema rezultatima prikazanim na slici 4, vidi se da najveću zateznu čvrstoću imaju hibridni kompoziti UHMWPE/EVA sa  $\mu$ - $Al_2O_3$ . Nagibi dijagrama (modul elastičnosti) slični su za hibridne kompozite UHMWPE/EVA/1-n- $Al_2O_3$  i UHMWPE/EVA/1- $\mu$ - $Al_2O_3$  dok su oba povećana u odnosu na UHMWPE/EVA za 76,8% i 72,0%, respektivno. Za kompozitne materijale

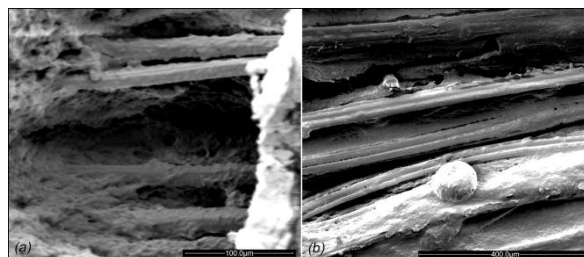
ojačane UHMWPE vlaknima, pravi izazov predstavlja dodatno povećanje žilavosti materijala. Da bi okarakterisala žilavost kompozita, koristi se apsorbirana energija po zapremini uzorka koja se određuje kao površina ispod dijagrama napon-deformacija (slika 4). Rezultati apsorbirane energije nakon ispitivanja zatezanjem dati su na slici 5.



Slika 5 - Apsorbirana energija hibridnih kompozita sa 1 mas. % aluminijum oksidnih čestica nakon ispitivanja zatezanjem

Na osnovu dobijenih rezultata vidi se da se apsorbirana energija kod hibridnih kompozita UHMWPE/EVA/1-n- $Al_2O_3$  povećava 106, 5%, a kod kompozita UHMWPE/EVA/1- $\mu$ - $Al_2O_3$  to povećanje ide do 183,5%.

Kako bi se videli mehanizmi koji vladaju prilikom opterećivanja hibridnih kompozita, ispitivana je mikrostruktura preloma nakon ispitivanja na zatezanje, slika 6.



Slika 6 - FE-SEM slike kompozita UHMWPE/EVA sa 1 mas. %: a) n- $Al_2O_3$  i b)  $\mu$ - $Al_2O_3$

Na prelomu kompozita UHMWPE/EVA/1-n- $Al_2O_3$  (slika 6a) se može videti krt lom matrice što oslikava udeo matrice u ulozi nosioca opterećenja. Reljefna struktura matrice ukazuje na tendenciju čestica da stvaraju agregate što se može videti po opadanju svojstava sa povećanjem udela čestica u kompozitu. Nešto žilaviji lom je prisutan kod UHMWPE/EVA/1- $\mu$ - $Al_2O_3$  kompozita što govori o povećanoj žilavosti ovog materijala.

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazani su eksperimentalni rezultati za hibridne kompozite UHMWPE/EVA sa nano i mikro česticama aluminijum oksida. Napravljeni su kompoziti sa 1, 3 i 5 mas. % česticama bazi aluminijum

oksida. Rezultati zatezanja dobijeni za hibridne kompozite sa aluminijum oksidnim česticama pokazuju da  $\mu-Al_2O_3$  imaju bolju zateznu čvrstoću od  $n-Al_2O_3$ . Sa dodatkom 1 mas. %  $n-Al_2O_3$  i  $\mu-Al_2O_3$  čestica, modul elastičnosti hibridnih kompozita u odnosu na UHMWPE/EVA se povećava za 76,8% i 72,0%, datim redom. Žilavost, procenjena putem apsorbovane energije iz testa na zatezanje, se kod hibridnog kompozita UHMWPE/EVA/1- $n-Al_2O_3$  povećava za 106, 5%, a kod kompozita UHMWPE/EVA/1- $\mu-Al_2O_3$  to povećanje ide čak i do 183,5%. Rezultati ovog rada pokazuju da se pažljivim odabirom čestičnih ojačanja može uticati na ciljane svojstva materijala.

#### ZAHVALNICA

Ovo istraživanje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije u okviru projekta TR 34011.

#### LITERATURA

- [1] Razavi-Nouri M. and Karami M, Effect of rubber content on morphology and thermal and rheological behaviors of acrylonitrile-butadiene rubber/poly(ethylene-co-vinyl acetate)/organoclay nanocomposites, *Polymer*(United Kingdom) Vol. 55, No.26, pp. 6940–6947, 2014.
- [2] Cavodeau F, Sonnier R, Otazaghine B, et al. Ethylene-vinyl acetate copolymer/aluminium trihydroxide composites: a new method to predict the barrier effect during cone calorimeter tests, *Polymer Degradation and Stability* Vol. 120, pp. 23–31, 2015.
- [3] El Hage R, Viretto A, Sonnier R, et al. Flame retardancy of ethylene vinyl acetate (EVA) using new aluminum-based fillers, *Polymer Degradation and Stability* Vol. 108, pp. 56–67, 2014.
- [4] Chalykh A, E, Stepanenko V. Y, Shcherbina A. A, et al. Adhesive properties of ethylene and vinyl acetate copolymers, *Polymer Science, Series D*, Vol. 2, No.1, pp. 8–15, 2009.
- [5] Sviridenok A. I, Zharin A. L, Krautsevich A. U, et al. The effect of high-dispersion fillers on adhesive and frictional properties of ethylene-vinyl acetate copolymer, *Journal of Friction and Wear*, Vol. 35, No. 4, pp. 255–262, 2014.
- [6] Shi X. M, Zhang J, Jin J, et al. Non-isothermal crystallization and melting of ethylene-vinyl acetate copolymers with different vinyl acetate contents, *EXPRESS Polymer Letters*, Vol. 2, No. 9, pp. 623–629, 2008.
- [7] Soto Puente J. A, Fatyeyeva K, Marais S, et al. Multifunctional hydrolyzed EVA membranes with tunable microstructure and water barrier properties, *Journal of Membrane Science*, Vol. 480, pp. 93–103, 2015.
- [8] Kango S, Kalia S, Celli A, et al. Surface modification of inorganic nanoparticles for development of organic-inorganic nanocomposites – A review, *Progress in Polymer Science*, Vol. 38, No.8, pp. 1232–1261, 2013.
- [9] Chang B. P, Md. Akil H and Bt. Md. Nasir R. Comparative study of micro - and nano-ZnO reinforced UHMWPE composites under dry sliding wear, *Wear*, Vol. 297, No. 1-2, pp. 1120–1127, 2013.
- [10] Hsieh A. J, Chantawansri TL, Hu W, et al. New insight into the influence of molecular dynamics of matrix elastomers on ballistic impact deformation in UHMWPE composites, *Polymer* (United Kingdom), Vol. 95, pp. 52–61, 2016.
- [11] Chand N, Dwivedi U. K and Sharma M. K, Development and tribological behaviour of UHMWPE filled epoxy gradient composites, *Wear*, Vol. 262, No. 1–2, pp. 184–190, 2007.
- [12] Opelt C. V, Becker D, Lepienski C. M, et al. Reinforcement and toughening mechanisms in polymer nanocomposites – Carbon nanotubes and aluminium oxide, *Composites Part B*, Vol. 75, pp. 119–126, 2015.
- [13] Wetzel B, Rosso P, Hauptert F, et al. Epoxy nanocomposites – fracture and toughening mechanisms, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, No. 16, pp. 2375–2398, 2006.
- [14] Chee C. Y, Song N. L, Abdullah L. C, et al. Characterization of mechanical properties: low density polyethylene nanocomposite using nanoalumina particle as filler, *Journal of Nanomaterials*, Vol. 2012, pp. 1-6, 2012.
- [15] Jin B, Zhang W, Sun G, et al. Fabrication and characterization of ethylene-vinyl acetate copolymer/ $Al_2O_3$  nanocomposites, *Journal of Ceramic Processing Research*, Vol. 8, No.5, pp. 336–340, 2007.
- [16] Baskaran R, Sarojadevi M and Vijayakumar CT. Unsaturated polyester nanocomposites filled with nano alumina, *Journal of Materials Science*, Vol. 46, No. 14, pp. 4864–4871, 2011.
- [17] Zec J, Tomic N, Zrilic M, Markovic S, Stojanovic D. and Jancic-Heinemann R, Processing and characterization of UHMWPE composite fibres with alumina particles in poly(ethylene-vinyl acetate) matrix, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, pp 1–20, 2017.
- [18] Tomic N. Z, Medjo BI, Stojanovic D. B, et al. A rapid test to measure adhesion between optical fibers and ethylene-vinyl acetate copolymer (EVA), *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 68, pp. 341–350, 2016.

- [19]Lazouzi G, Vuksanović M. M, Tomić N. Z, Mitrčić M, Petrović M, Radojević V, Jančić Hainemann R, Optimized preparation of alumina based fillers for tuning composite properties, *Ceramics International*, Vol. 44, pp. 7442-7449, 2018.

## SUMMARY

### EFFECT OF $Al_2O_3$ PARTICLES ON THE TOUGHNESS OF HYBRID COMPOSITE WITH EVA MATRIX AND UHMWPE FIBERS AS REINFORCEMENT

*The aim of this paper is to investigate the mechanical properties of hybrid composites with the polymer matrix of the copolymer of ethylene and vinyl acetate (EVA), ultra high molecular weight polyethylene fibers (UHMWPE) and particles based on aluminum oxide. Commercial aluminum oxide nanoparticles and aluminum oxide particles obtained by sol-gel technique were used as fillers in a proportion of 1, 3 and 5 wt. %. Infrared spectroscopy with Fourier Transformation (FTIR) and Scanning Electron Microscopy (SEM) were used to test the chemical structure and microstructure of hybrid composites, respectively. The tensile test showed an increase in the modulus of elasticity and the tensile strength of the obtained hybrid composites. The results of the sample testing showed that the best mechanical properties and toughness of the material shows hybrid composites with 1 mass. % micron particles of aluminum oxide.*

**Key words:** UHMWPE,  $Al_2O_3$  reinforcements, EVA matrix, hybrid composites, mechanical properties