

Факултет Технолошко-металуршки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/208

(Број захтева)

20.06.2017

(Датум)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ**за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитет", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ Ивана (Милорад) Радовић

(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму **Инжењерство материјала**

пријавио је докторску дисертацију под називом: **Хибридни нанокompозитни материјали са ефектом самозалечења**

из научне области: **Технолошко инжењерство**

Универзитет је дана 30.1.2017 својим актом под бр. 61206-136/2-17 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Хибридни нанокompозитни материјали са ефектом самозалечења

Име и презиме ментора: др Весна Радојевић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 23.02.2017. одлуком факултета под бр. 35/35, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Петар Ускоковић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Радмила Јанчић Хајнеман	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
3.	Др Душица Стојановић	виши научни сарадник	Инжењерство материјала	ТМФ
4.	Др Јелена Ламовец	виши научни сарадник	Инжењерство материјала	ИХТМ

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 29.03.2017.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 01.06.2017.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној 01.06.2017.

одлуком факултета под бр. 35/194, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Петар Ускоковић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Радмила Јанчић Хајнеман	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
3.	Др Душица Стојановић	виши научни сарадник	Инжењерство материјала	ТМФ
4.	Др Јелена Ламовец	виши научни сарадник	Инжењерство материјала	ИХТМ

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА

- Прилози:
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

На основу чл. 40. Статута Факултета, чл. 40. Правилника о докторским студијама Универзитета у Београду и чл. 52. Правилника о докторским студијама Факултета, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета одржаној 01.06.2017. године, донета је

О Д Л У К А

о усвајању Извештаја комисије за оцену докторске дисертације

Усваја се Извештај комисије за оцену докторске дисертације, у саставу: др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Душица Стојановић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Јелена Ламовец, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Хибридни нанокомпозитни материјали са ефектом самозалечења“** коју је поднела **Ивана Радовић**, дипл. инж. технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Иване Радовић, под називом **„Хибридни нанокомпозитни материјали са ефектом самозалечења“** Одлуком 02 број: 61206-136/2-17 од 30.01.2017. године.

Верификација научних доприноса:

Kategorija M22

1. **Radovic, I.M.**, Stojanovic, D.B., Kojovic, A., Petrovic, M., Uskokovic, P.S., Radojevic, V.J., Aleksic R.R.: Electrospun Poly(Styrene) Fibers as a Protection for the First and the Second Generation Grubbs' Catalyst, -*Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, ISSN: 0360-2559 (**IF 1.511**, Polymer science, 47/85) DOI: 10.1080/03602559.2016.1260734
2. **Radovic, I.M.**, Stojanovic, D.B., Kojovic, A., Petrovic, M., Uskokovic, P.S., Radojevic, V.J., Aleksic R.R.: Healing efficiency of polystyrene electrospun nanofibers with Grubbs catalyst in thermosetting composite, -*Journal of Composite Materials*, 2016 (**IF 1.242**, Materials Science, Composites 11/25) DOI: 10.1177/0021998316681832

Докторска дисертација и извештај комисије о оцени докторске дисертације били су на увиду јавности 30 дана пре усвајања извештаја и примедби није било.

Наставно-начно веће оцењује да је докторска дисертација у складу са одобреном темом и да наводи садржани у Извештају потврђују да су се стекли услови за одбрану докторске дисертације.

Одлуку доставити: председнику Комисије, Већу научних области техничких наука Универзитета, Служби за наставно-студентске послове, Библиотеци и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

На основу чл. 40. Статута Факултета, чл. 40. Правилника о докторским студијама Универзитета у Београду и чл. 52. Правилника о докторским студијама Факултета, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета одржаној 01.06.2017. године, донета је

О Д Л У К А

о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације Иване Радовић, дипл. инж., са темом под називом „**Хибридни нанокompозитни материјали са ефектом самозалечења**“, у саставу:

1. Др Петар Ускоковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет
2. Др Радмила Јанчић-Хајнеман, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет
3. Др Душица Стојановић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет
4. Др Јелена Ламовец, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију.

Одлуку доставити: члановима Комисије, студенту, Служби за наставно-студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Ђорђе Јанаћковић

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata Ivane Radović

Odlukom br. 35/35 od 23.02.2017. godine, imenovani smo za članove Komisije za pregled i ocenu doktorske disertacije kandidata Ivane Radović, dipl. inž. tehnologije pod naslovom

Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja

Posle pregleda dostavljene Disertacije i drugih pratećih materijala i razgovora sa Kandidatom, Komisija je sačinila sledeći

R E F E R A T

1. UVOD

1.1. Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- **Školske 2009/10** godine kandidat Ivana Radović, dipl. inž. tehnologije je upisala Doktorske akademske studije na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, profil Inženjerstvo materijala.
- **Školske 2016/17** godine kandidat Ivana Radović, dipl. inž. tehnologije je nakon isteka roka za završetak doktorskih akademskih studija, ponovo upisala treću godinu Doktorskih akademskih studija na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, profil Inženjerstvo materijala
- **08. 11. 2016.** Kandidat Ivana Radović, dipl. inž. tehnologije je predložila temu doktorske disertacije pod nazivom: "Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja"
- **24. 11. 2016.** na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka (br. 35/504 od 24.11.2016.) o imenovanju članova Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata Ivane Radović, dipl. inž. pod naslovom "Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja"
- **29. 12. 2016.** na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka o prihvatanju teme doktorske disertacije pod naslovom "Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja", a za mentora je imenovana dr Vesna Radojević, Odluka br. 35/651 od 28.01.2016.
- **30. 01. 2017.** Veće naučnih oblasti tehničkih nauka donosi odluku po kojoj daje saglasnost na predlog teme "Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja" kandidata Ivane Radović, dipl. inž., Odluka br. 61206-136/2-17 od 30.01.2017.
- **23. 02. 2017.** Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu doktorske disertacije Ivane Radović, dipl. inž. pod naslovom "Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja"

Odluka br. 35/35 od 23.02. 2016. Komisija za ocenu doktorske disertacije je za predsednika izabrala dr Petra Uskokovića, red. prof.

1.2. Naučna oblast disertacije

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu. Mentor je dr Vesna Radojević, redovni profesor TMF, uža naučna oblast Inženjerstvo materijala, koja je na osnovu dosadašnjih objavljenih radova i iskustava kompetentna da rukovodi izradom ove doktorske disertacije.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Kandidat Ivana M. Radović, diplomirani inženjer tehnologije, rođena je 19.2.1980. godine u Kovinu. Osnovnu školu završila je u Kovinu, a srednju u Pančevu. Studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu Smer organska hemijska tehnologija i polimerno inženjerstvo, završila je 2009. godine sa prosečnom ocenom 8,14. Diplomski rad pod naslovom „Fizičko-mehanička svojstva kompozitnog materijala poli(metilmetakrilat)-bizmut silicijum oksid” odbranila je na Katedri za konstrukcije materijale sa ocenom 10. Školske 2009/10 godine, upisala je doktorske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu, smer Inženjerstvo materijala. Ispite doktorskih studija, predviđene planom i programom nastave, položila je sa prosečnom ocenom 10. Završni ispit odbranila je 2011. godine sa ocenom 10. U skladu sa Zakonom o visokom obrazovanju, školske godine 2016/17 upisala je ponovo doktorske akademske studije, treću godinu na profilu Inženjerstvo materijala. Završila je obuku za eksperta za čistiju proizvodnju u okviru projekta Centra za čistiju proizvodnju Srbije, u saradnji sa UNIDO 2014. godine.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1. Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija kandidata Ivane Radović, dipl. inž. tehnologije pisana je na srpskom jeziku i sadrži 172 strane A4 formata, 118 slika, 13 tabela i 288 literaturnih navoda. Doktorska disertacija sadrži sledeća poglavlja: *Rezime* (na srpskom i engleskom jeziku), *Uvod*, *Teorijski deo* (Definicija i klasifikacija kompozitnih materijala; Hibridni nanokompozitni materijali; Funkcionalni agensi samozalečenja u kompozitnim materijalima sa efektom samozalečenja; Procesiranje i karakterizacija kompozitnih materijala sa efektom samozalečenja), *Eksperimentalni deo* (Procesiranje, karakterizacija, mehanička svojstva i efikasnost samozalečenja kompozita na bazi epoksida), *Zaključak*, *Literatura*, *Biografija* i *Prilozi*. Prilozi sadrže izjavu o autorstvu, izjavu o istovetnosti štampane i elektronske verzije rada i izjavu o korišćenju.

2.2. Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U uvodnom delu je prikazan predmet, sadržaj i cilj doktorske disertacije. Predmet ove doktorske disertacije obuhvata istraživanja u oblasti procesiranja i karakterizacije hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja nakon mehaničkog oštećenja. Izvedena je sinteza i karakterizacija nanomodifikovanih hibridnih kompozitnih materijala sa efektom samozalečenja na bazi epoksida. Kompoziti sa epoksidnom matricom predstavljaju materijale visokih performansi kod kojih se mogu dizajnirati specifična svojstva zavisno od primene. U toku eksploatacije kompozitni materijali trpe kontinuirana i ciklična mehanička opterećenja kao i termičke fluktuacije koji mogu dovesti do pojave oštećenja u strukturi. Zbog, vrlo često, teške dostupnosti za reparaciju, pojavila se potreba za istraživanjima u pravcu dizajniranja kompozitnih

materijala sa mogućnošću samozalečenja (eng. Self-healing materials). Mada su tek u okviru razvojnih istraživanja, svojstvo samozalečenja igra veliku ulogu u primeni kompozitnih materijala u oblasti automobilske i avio-industrije, energetici, elektronici, kao i biomedicini i stomatologiji.

U Teorijskom delu je u prvom poglavlju dat pregled dosadašnjih saznanja o strukturi i klasifikaciji kompozitnih materijala s polimernom matricom. Struktura kompozita koja se sastoji od polimerne matrice i diskontinualne faze koja uglavnom ima funkciju poboljšanja mehaničkih svojstava može se modifikovati tako da se ostvare i poboljšaju neka druga funkcionalna svojstva kompozita, kao na primer, toplotna, akustična, električna, magnetna, optička i druga. U okviru ovog dela prikazan je pregled kompozitnih materijala prema vrsti matrice, kao i prema obliku diskontinualne faze.

U drugom poglavlju predstavljeni su hibridni nanokompozitni materijali, kod kojih se interakcije između strukturnih elemenata odvijaju na molekulskom, odnosno, nanometarskom nivou. Obično je jedna komponenta neorganskog, a druga organskog porekla. Prednosti hibridnih materijala nastalih od neorganskih i organskih jedinjenja je kombinovanje njihovih različitih svojstava u jednom materijalu. Veliki broj mogućih kombinacija učinio je ovo polje izuzetno atraktivnim, jer je procesiranjem hibridnih materijala moguće obezbediti multifunkcionalnost i proširiti primenu materijala u oblastima u kojima se ranije nisu koristili. Poslednjih decenija, kao akademski i industrijski predmet izučavanja nameću se takozvani *pametni* materijali (inteligentni funkcionalni materijali), koji na inteligentan način adaptiraju svoju funkcionalnost spoljašnjim uslovima, pa nalaze primenu od aeronautike do komercijalnih proizvoda. Stvaranjem pametnih hibridnih materijala pored poboljšane funkcionalnosti, povećava se i njihova radna stabilnost jer je interakcijama na molekulskom nivou redukovano razdvajanje faza pri opterećenju.

Treće poglavlje obuhvata prednosti i nedostatke kompozitnih materijala, različite uzroke oštećenja i loma, kao i vrstu loma. Nedostatak plastičnih deformacija rezultuje stvaranjem mikroprrslina koje nisu vidljive golim okom, ali prouzrokuju iznenadni lom. Njihova heterogena priroda na mikroskali se takođe ispoljava kao slabost. U slučaju kompozita ojačanih vlaknima, otpornost na udar je visoka samo u smeru orijentacije vlakana, u ostalim smerovima, materijal je podložan oštećenjima i pri slabom naprezanju. Polimerna vlakna popuštaju na visokim radnim temperaturama, ili oksidišu na atmosferskim uslovima. Navedena oštećenja formiraju se duboko u strukturi praveći poteškoće u otkrivanju i popravljanju. Jednom kada se formiraju prsline, mehanička svojstva i struktura kompozitnih materijala sistemski nepovratno degradiraju, što na kraju dovodi do nepredviđenog loma, ugrožavajući sigurnost korisnika materijala. Stoga se fokus u razvoju kompozita ojačanih vlaknima polako okreće dobijanju materijala koji ne zahtevaju ručne popravke.

U četvrtom poglavlju dat je pregled dosadašnjih istraživanja u oblasti kompozitnih materijala sa efektom samozalečenja. Opisana je uloga pojedinih konstituenata kompozitnih materijala sa efektom samozalečenja. Pored poboljšanja mehaničkih svojstava, punioci ili dodati funkcionalizovani modifikatori, mogu korigovati i druga svojstva kompozita kao što su termička i optička svojstva, antimikrobna svojstva ili svojstvo samozalečenja. Za dobra fizička i mehanička svojstva kompozitnog materijala izuzetno je važno da se ostvari veza između matrice i vlakana. Urea-formaldehid obezbeđuje jake interakcije između ojačanja u vidu staklenih vlakana i epoksidne matrice. Dobro vezivanje omogućava fleksibilnoj organskoj matrici da prenese naprezanje kojim je materijal izložen tokom eksploatacije na neorganska vlakna. Problem pucanja matrice i raslojavanja kompozita predstavlja značajan ekonomski problem zbog popravki i zamena materijala koje iziskuju velike troškove. Kao odgovor na ovaj izazov, razvijene su tehnike samozalečenja sa ciljem produžavanja životnog veka materijala na bazi epoksida. Slično biološkim sistemima, materijali sa efektom samozalečenja pokazuju sposobnost automatskog oporavka i adaptacije uslovima, za razliku od tradicionalnih kompozita. Na ovaj način, očekuje se da će bezbednost i pouzdanost materijala biti povećana, uz smanjenje troškova održavanja i popravki. S obzirom na atraktivnost ovih materijala, kako sa naučne, tako i sa industrijske strane, ova oblast se poslednje dve decenije ubrzano razvija, rezultujući brojnim relevantnim istraživanjima i rezultatima. Efekat samozalečenja se omogućava ugrađivanjem izolovanih nosača monomera i katalizatora u kompozit, koji u kontaktu

izazivaju reakciju polimerizacije. U okviru ovog poglavlja dat je pregled mogućnosti dobijanja nanokompozitnih polimernih vlakana. Njihovo dobijanje postavlja niz zahteva u pogledu kvaliteta polaznog materijala, korišćenja najpogodnije metode dobijanja vlakana uniformnog prečnika i najpovoljnijih fizičko-mehaničkih svojstava za postizanje visokog stepena samozalečenja. Takođe, izveden je literaturni pregled savremenih dostignuća u ovoj problematici, kao i metode procesiranja i karakterizacije.

Eksperimentalni deo je organizovan u šest celina. Prva celina obuhvata pregled primenjenih materijala za sintezu hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja na bazi epoksida. Za polimernu matricu izabran je komercijalni epoksid na bazi diglicidil etra bisfenola A (DGEBA). Kao ojačanje je korišćen netkani mat staklenih vlakana, prethodno tretiranih urea-formaldehidnom smolom. Druga, treća četvrta i peta celina obuhvataju procesiranje i sintezu strukturnih elemenata hibridnih materijala, ako i procesiranje hibridnih nanokompozitnih materijala. Izvedeno je procesiranje spoljašnjih hibridnih nanokompozita sa efektom samozalečenja ugradnjom staklenih kapilara punjenih rastvorima aktivnih agenasa za samozalečenje (Grabsovog katalizatora prve generacije i monomera diciklopentadiena). Grabsov katalizator je rastvoren zasebno u dve rastvarača, dihlormetanu i toluenu. U pravcu daljeg istraživanja i poboljšanja efekta samozalečenja kao nosači različitih katalizatora (Grabsovog katalizatora prve generacije – G2 i Grabsovog katalizatora druge generacije – G2) upotrebljena su elektropredena vlakna poli(stiren)a (PS). U ovim hibridnim materijalima se monomer nalazi u jezgro-omotač mikrokapsulama, koje su dobijene *in situ* polimerizacijom. Omotač je sačinjen od poli(urea-formaldehid)a (PUF), dok se u jezgru nalazi monomer diciklopentadien (DCPD). U šestoj celini su opisane metode korišćene za karakterizaciju polaznih konstituenata i procesiranih kompozitnih materijala.

U okviru poglavlja Rezultati i diskusija izdvojene su dve celine: a) Sinteza i karakterizacija hibridnih nanokompozita ugradnjom ugradnjom staklenih kapilara sa aktivnim agensima za samozalečenje (Grabsovog katalizatora prve generacije i monomera diciklopentadiena), kao i diskusija o uticaju procesnih parametara na fizičko-mehanička svojstva kompozita; b) Sinteza i karakterizacija kompozita ugradnjom elektropredanih PS vlakana sa inkorporiranim katalizatorima (G1 i G2) i mikrokapsula punjenih monomerom DCPD. Druga celina je podeljena na pet poglavlja: 1) Sinteza i karakterizacija jezgro-omotač DCPD-PUF mikrokapsula; 2) Inkorporacija G1 i G2 u PS vlakna tehnikom elektropredenja, kao i diskusija o uticaju procesnih parametara i sadržaja različitih katalizatora na morfologiju formiranih vlakana; 3) Efikasnost samozalečenja hibridnih nanokompozita sa PSG1 vlaknima nakon udara kontrolisanom energijom; 4) Efikasnost samozalečenja hibridnih nanokompozita sa PSG2 vlaknima nakon udara kontrolisanom energijom; 5) Efikasnost samozalečenja pri različitim temperaturnim režimima.

U prvom delu je uočeno da vrsta korišćenog rastvarača prirastvaranju G1 utiče na mehanička svojstva dobijenog hibridnog kompozita, kao i na efikasnost samozalečenja. Stabilnost katalizatorima u različitim rastvaračima, kao i polimerizacija diciklopentadiena na mestu preloma praćeni su FTIR analizom. Mehanička svojstva i efikasnost samozalečenja praćeni su udarom kontrolisane energije. Polimerizacijom DCPD u prisustvu G1 i otparavanjem isparljivog dihlormetana na sobnoj temperaturi, ostvarena je efikasnost samozalečenja od 60%. Kod uzoraka sa G1 u toluenu, primećena je niža efikasnost, 40%, usled nemogućnosti formiranja dovoljne količine polimera na mestu preloma. Dobijeni rezultati ukazuju na mogućnost dizajniranja mehaničkih svojstava izborom rastvarača.

U prvom poglavlju drugog dela ispitni su morfologija i sastav sintetisanih mikrokapsula. FESEM analiza je potvrdila sferičan i pravilan oblik mikrokapsula, dok je FTIR analizom potvrđeno prisustvo diciklopentadiena u mikrokapsulama. U drugom poglavlju je uočen veliki uticaj sternih i polarnih efekata G1 i G2 na njihovu stabilnost tokom procesa elektropredenja, kao i na dispergovanje u PS vlaknima. *Ab initio* modelima napravljenim na osnovu strukture oba katalizatora, ustanovljena je velika razlika u dipolnom momentu između dva katalizatora, što je rezultovalo različitim tendencijama ka umešavanju sa slabo polarnim PS tokom procesa elektropredenja. Takođe, izračunate Konolijeve površine i površine dostupne rastvaraču pokazuju veću sklonost G1 ka rastvaranju i interakciji sa PS. Kao rezultat ovih uticaja, G1 je pokazao bolju

disperziju u PS vlaknima u poređenju sa G2. FESEM analizom je ispitivana morfologija vlakana dobijenih različitim protocima rastvora i različitim sadržajem G1 i G2, i utvrđeni su optimalni procesni parametri za dobijanje vlakana cilindričnog oblika, glatke površine i uniformne disperzije katalizatora. FTIR analizom je potvrđena stabilnost G1 i G2 u elektroprednim vlaknima. U trećem poglavlju je utvrđena jaka pozitivna korelacija između masene koncentracije agenasa samozalečenja u hibridnom nanokompozitnom materijalu i efikasnosti samozalečenja. Pronađena je njihova optimalna koncentracija i postignuta je efikasnost od 90%. FESEM analizom vizuelno je potvrđeno formiranje polimera na mestu preloma, kao i visoka pokrivenost nastale prsline. FTIR analizom je potvrđena polimerizacija DCPD na mestu loma. Termogravimetrijskom analizom utvrđeno je da sistem sa PS vlaknima i PUF mikrokapsulama obezbeđuje uniformnu disperziju agenasa po čitavom materijalu. U četvrtom poglavlju je utvrđeno da sistem sa G2 u elektroprednim PS vlaknima pokazuje nešto nižu efikasnost samozalečenja, 72%, što potvrđuje nešto slabiju disperziju G2 u elektroprednim vlaknima. Peto poglavlje obuhvata termičko tretiranje prethodno odabranog najefikasnijeg materijala – hibridni materijal više koncentracije sa G1 u PS vlaknima. Ustanovljeno je da je najviša efikasnost, preko 111%, nakon jednog ciklusa zagrevanja i hlađenja, verovatno kao posledica naknadnom umrežavanja polimerizovanog DCPD na mestu loma.

U Zaključku su ukratko sumirani svi dobijeni rezultati u ovoj doktorskoj disertaciji i iznet je njihov značaj za pravce razvoja i primene materijala sa efektom samozalečenja. Poglavlje Literatura obuhvata 288 navoda iz oblasti istraživanja i pokriva sve delove disertacije.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

Ojačanje polimerne matrice vlaknima otvorilo je nove horizonte za strukturne primene polimernih kompozita. Vlakna imaju visoku specifičnu čvrstoću, krutost i module elastičnosti i služe kao nosači opterećenja u kompozitu. Polimerni kompoziti sa epoksidnom matricom našli su primenu u avio- i auto-industriji. S obzirom na to da strukturni kompozitni materijali koji se koriste u delovima automobila i aviona mogu usled oštećenja direktno ugroziti na ljudske živote, ulaže se veliki napor u sprečavanju incidenata sa katastrofalnim ishodom. Do sada je predložen i izučen veliki broj pravaca u razvoju kompozitnih materijala sa efektom samozalečenja, uglavnom baziranih na inkorporaciji katalizatora i monomera u epoksidnu matricu. Problem u svim sistemima predstavlja efikasna zaštita katalizatora od umreživača epoksidnog prekursora koji izaziva njegovu deaktivaciju. Drugi problem je otežana disperzija katalizatora po matrici, usled nekompatibilnosti organometalnog katalizatora i polimerne matrice. Polimerna nanovlakna mogu obezbediti efikasnu zaštitu katalizatora prilikom skladištenja i procesiranja kompozita, kao i uniformnu disperziju katalizatora u polimernoj matrici. Na taj način se može poboljšati efikasnost procesa samozalečenja.

U toku izrade ove disertacije istražene su mogućnosti procesiranja hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja poboljšanih mehaničkih i funkcionalnih svojstava. Ovo je ostvareno na dva načina: 1) rastvaranjem katalizatora i ubacivanjem u staklene kapilare, što omogućava olakšan dotok katalizatora do mesta loma, kao i zaštitu katalizatora tokom procesiranja; 2) inkorporacijom katalizatora u polimerna nanovlakna tehnikom elektropredenja, što pored uniformne disperzije i efikasne zaštite tokom procesiranja, omogućava i skladištenje katalizatora u ovom obliku. Nakon literaturnog pregleda, utvrđeno je da ova dva pristupa nisu ispitivana u epoksidnim matricama. Takođe, ispitivanjem struktura korišćenih katalizatora, napravljeni su teorijski modeli kojima su objašnjene razlike u njihovom ponašanju tokom procesa elektropredenja, i koji su u skladu sa rezultatima eksperimenata. Ovakav pristup procesu elektropredenja omogućava efikasno planiranje budućih eksperimenata jer omogućava pronalaženje najpogodnijeg sistema čestica-polimer-rastvarač bez trošenja resursa. Povoljna disperzija katalizatora omogućila je smanjenje neophodne količine katalizatora za uspešno samozalečenje za red veličine u odnosu na prethodna istraživanja. Poređenjem efikasnosti samozalečenja procesiranih hibridnih nanokompozitnih materijala sa efikasnostima materijala publikovanih do trenutka

završetka ove disertacije, utvrđeno je da se ovaj sistem svrstava u isti rang sa znatno komplikovanijim i skupljim sistemima.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U doktorskoj disertaciji je citirano 288 literaturnih navoda koja se odnose na istaživanja vezana za problematiku savremenih kompozitnih materijala s polimernom matricom. Literaturni pregled je obuhvatio veliki broj publikovanih naučnih radova iz oblasti: savremenih kompozitnih materijala na bazi epoksida, različitih polimernih i kompozitnih materijala sa efektom samozalečenja, metoda dobijanja kompozita i hibridnih nanokompozita, i savremenih metoda za karakterizaciju, termičkih, optičkih i mehaničkih svojstava kompozita, uticaja sinteze kao i nanomodifikacije na termička i mehanička svojstva polimernih kompozita. U okviru disertacije dat je potpun kritički literaturni pregled po pojedinim poglavljima fenomena koji su istraživani kao i poređenja dobijenih rezultata sa slično publikovanim rezultatima.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

U istraživanjima u okviru ove doktorske disertacije korišćene su savremene tehnike karakterizacije materijala u svim fazama eksperimentalnih istraživanja. U početnim istraživanjima izvedena je karakterizacija polaznih konstituenata. Stabilnost katalizatorima u različitim rastvaračima, kao i ostvarene veze tokom procesa samozalečenja ispitani su primenom FTIR spektroskopije. Termička svojstva dobijenih kompozita i samozalečenih prslina ispitana su primenom termogravimetrijske analize. Morfologija sintetisanih mikrokapsula, elektropredenih polimernih vlakana sa inkorporiranim katalizatorima, kao i mesta zalečenja nakon preloma hibridnim materijala, ispitana je skenirajućom elektronskom mikroskopijom visoke rezolucije (FESEM). Mehanička svojstva kao i efekat samozalečenja su ispitivana metodom udara kontrolisane energije. Na ovaj način je bilo moguće, merenjem apsorbovanih energija udara pre i posle zalečenja kvantitativno izraziti i korelistai stepen zalečenja.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

S obzirom na tešku dostupnost reparaciji, kao i rizike koje nosi njihovo oštećenje u avio- i automobilske industriji i vetrogeneratorima, rezultati ove disertacije predstavljaju značajan doprinos u pravcu razvoja hibridnih materijala sa efektom samozalečenja. Izvedeno je procesiranje i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja na bazi epoksida sa modifikacijom u dva pravca. U prvoj fazi istraživanja je omogućena i upoređena primena Grabsovog katalizatora prve i druge generacije koji pokazuju visoku aktivnost i selektivnost u reakcijama polimerizacije baziranim na otvaranju prstena i reakciji metateze. Procesiranjem ovih katalizatora jednostavnom tehnikom elektropredenja, napravljeni su sistemi koji omogućavaju visoku efikasnost samozalečenja u hibridnim nanokompozitnim materijalima. U drugoj fazi istraživanja ispitana je termička efektivnost procesa samozalečenja.

Rezultati prikazani u ovoj disertaciji omogućavaju dalji napredak u dizajniranju kompozitnih materijala sa proširenim opsegom primene strukturnih kompozitnih materijala.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalni naučni rad

U toku izrade doktorske disertacije, kandidat je potpuno osposobljen da samostalno i kritički napravi literaturni pregled, pripremi i realizuje eksperimente, kao i da analizira dobijene rezultate. Tokom izrade doktorske disertacije je ovladao je brojnim tehnikama koje se koriste za procesiranje i karakterizaciju hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja.

Kandidat poseduje sve kvalitete neophodne za naučno-istraživački rad i samostalnu prezentaciju dobijenih rezultata.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Rezultati dobijeni u ovoj doktorskoj disertaciji daju značajan doprinos razumevanju uticaja vrste, koncentracije nanočestica katalizatora, nanovlakana i hibridnih agenasa kao i procesnih parametara na termička i mehanička svojstva dobijenih hidridnih nanokompozitnih materijala sa polimernom matricom.

Naučni doprinos rezultata istraživanja ostvarenih u okviru ove doktorske disertacije je sledeći:

- Prvi put je primenjen sistem za samozalečenje sa elektropredenim vlaknima od polistirena sa Grabsovim katalizatorom u epoksidnoj matrici
- Razvijena je metoda sinteze vlakana od polistirena sa katalizatorom
- Nov način zaštite Grabsovog katalizatora od deaktivacije što produžava radni vek materijala
- Ostvorena je visoka efikasnost samozalečenja uz smanjenje neophodne količine katalizatora za red veličine u poređenju sa do sada primenjenim sistemima
- Razvijen je teorijski model struktura korišćenih katalizatora kojima su objašnjene razlike u njihovom ponašanju tokom procesa elektropredenja, i koji su u skladu sa rezultatima eksperimenata
- Uspostavljena je korelacija između procesnih parametara i postignutih mehaničkih, termičkih i funkcionalnih svojstava dobijenih hibridnih nanokompozita

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Predmet ove doktorske disertacije obuhvata istraživanja u oblasti sinteze i karakterizacija hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja na bazi epoksida. Intenzivna su istraživanja u oblasti kompozita sa polimernom matricom, koji su predmet disertacije, gde se tradicionalno slabe strane polimera (niske vrednosti parametara mehaničke čvrstoće i loša termostabilnost) značajno poboljšavaju primenom nano, mikro i hibridne modifikacije. Posebno su detaljno istražene mogućnosti inkorporacije različitih katalizatora u polimer tehnikom elektropredenja, kao i procesiranje hibridnih kompozita sa efektom samozalečenja. Detaljno je proučena fenomenologija polimerizacije agenasa samozalečenja na mestu stvaranja prsline, čime je omogućen duži životni vek materijala.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Iz disertacije je do sada objavljeno pet radova: dva rada u istaknutom međunarodnom časopisu kategorije M22 i tri saopštenja kategorije M34.

Kategorija M22

1. **Radovic, I.M.**, Stojanovic, D.B., Kojovic, A., Petrovic, M., Uskokovic, P.S., Radojevic, V.J., Aleksic R.R.: Electrospun Poly(Styrene) Fibers as a Protection for the First and the Second Generation Grubbs' Catalyst, *-Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2016, ISSN: 0360-2559 (IF 1.511, Polymer science, 47/85) DOI: 10.1080/03602559.2016.1260734
2. **Radovic, I.M.**, Stojanovic, D.B., Kojovic, A., Petrovic, M., Uskokovic, P.S., Radojevic, V.J., Aleksic R.R.: Healing efficiency of polystyrene electrospun nanofibers with Grubbs catalyst in thermosetting composite, *-Journal of Composite Materials*, 2016 (IF 1.242, Materials Science, Composites 11/25) DOI: 10.1177/0021998316681832

Kategorija M 34

1. **Radović I.**, Radojević V., Uskoković P.S., Stojanović D.B., Kojović A., Aleksić R.: “Electrospun Core-shell Fibers for Self-healing of Thermoplastic Polymer Composite”, - *Programme and The Book of Abstracts of The Fifteenth Annual Conference YUCOMAT 2013*, Herceg Novi, Montenegro, 2013, p. 118.
2. **Radović I.**, Radojević V., Uskoković P.S., Stojanović D.B., Kojović A., Aleksić R.: “Core-shell fibers for composite materials with self-healing ability”, - *Program and the Book of Abstracts of The Twelfth Young Researchers’ Conference - Materials Science and Engineering*, Belgrade, Serbia, 2013, p. 43.
3. **Radović I.**, Radojević V., Uskoković P.S., Stojanović D.B., Petrović M., Aleksić R.: “Self-healing fiber-reinforced composite”, -*Programme and The Book of Abstracts of The Seventeenth Annual Conference YUCOMAT 2015*, Herceg Novi, Montenegro, 2015, p. 68.

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Rezultati istraživanja u okviru doktorske disertacije Ivane Radović doprinose povećanju nivoa znanja o strukturi i svojstvima hibridnih nanokompozitnih materijala sa efektom samozalečenja putem dizajniranja i nanomodifikacije strukture.

Pregledom doktorske disertacije, Komisija je konstatovala da podneta doktorska disertacija ima sve neophodne sadržaje i rezultate, kao i da je izloženi materijal sistematizovan i dobro organizovan. Predmet i ciljevi istraživanja su jasno navedeni, ostvareni rezultati i doprinos istraživanja su verifikovani kroz odgovarajući broj naučnih publikacija.

Komisija predlaže Nastavno-naučnom veću TMF-a da prihvati ovaj Referat i da se doktorska disertacija Ivane Radović, dipl. inž. tehnologije, pod naslovom “Hibridni nanokompozitni materijali sa efektom samozalečenja” prihvati i uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu, te nakon završetka procedure, pozove kandidata na usmenu odbranu doktorske disertacije pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 27.03.2017.

ČLANOVI KOMISIJE

.....
Prof. dr Petar Uskoković, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški
fakultet

.....
Prof. dr Radmila Jančić-Hajneman, redovni profesor
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški
fakultet

.....
dr Dušica Stojanović, viši naučni saradnik
Univerziteta u Beogradu, Tehnološko-metalurški
fakultet

.....
dr Jelena Lamovec, viši naučni saradnik
Univerziteta u Beogradu, Institut za hemiju, tehnologiju
i metalurgiju

