

NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU

Predmet: Referat o urađenoj doktorskoj disertaciji kandidata **Faisal Ali Alzarruga**, master inženjera tehnologije

Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 06. 07. 2018. godine, (Odlukom br. 35/249) određeni smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije **Faisal Ali Alzarruga**, master inženjera tehnologije, pod naslovom:

"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"

"Synthesis and characterisation of dental composite materials reinforced with nanofibers"

Posle pregleda doktorske disertacije kandidata **Faisal Ali Alzarruga**, Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta sledeći

REFERAT

1. UVOD

1.1. Hronologija odobrenja i izrade disertacije

Školske 2011/12 godine kandidat Faisal Ali Alzarrug, master inženjer tehnologije, upisao je doktorske studije na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, studijski program Inženjerstvo materijala..

29.03.2018. Kandidat Faisal Ali Alzarrug je predložio temu doktorske disertacije pod naslovom: **"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"**("Synthesis and characterisation of dental composite materials reinforced with nanofibers")

12.04.2018. na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka br. 35/154 od 12. 04. 2018. o imenovanju člana Komisije za ocenu podobnosti teme i kandidata Faisal Ali Alzarruga, master inženjera tehnologije, pod naslovom **"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"**("Synthesis and characterisation of dental composite materials reinforced with nanofibers")

31.05.2018. na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta, Univerziteta u Beogradu doneta je odluka o prihvatanju teme doktorske disertacije pod naslovom **"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"**("Synthesis and characterisation of dental composite materials reinforced with nanofibers") a za mentore su imenovani dr Petar Uskoković i dr Dušica Stojanović, Odluka br. 35/189 od. 01.06.2018.

25.06.2018. Veće naučnih oblasti tehničkih nauka donelo je odluku o davanju saglasnosti na predlog teme **"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"**("Synthesis and characterisation of dental

composite materials reinforced with nanofibers") kandidata Faisal Ali Alzarruga, master inženjer tehnologije, odluka broj 61206-2539/2-18 LD od 25.06.2018.

06.07.2018. Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta doneta je odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije Faisal Ali Alzarruga, master inženjera tehnologije, pod naslovom **"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"**("Synthesis and characterisation of dental composite materials reinforced with nanofibers") Odluka br. 35/249 od. 06. 07. 2018.

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. Mentori su dr Petar Uskoković, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, i dr Dušica Stojanović, viši naučni saradnik Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, uža naučna oblast Inženjerstvo materijala. Na osnovu dosadašnjih objavljenih radova i rada sa doktorandima kompetentni su da rukovode izradom ove doktorske disertacije.

1.3. Biografski podaci o kandidatu

Faisal Ali Alzarrug rođen je 10.03.1983. u Nalutu, Libija. Diplomirao je medicinsku tehnologiju 2005. na El-Jabel Univerzitetu El Garbi, Libija, Nalut. Školske 2009/2010. godine upisao je a 2011. godine završio master akademske studije na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, studijski program Inženjerstvo materijala. Doktorske studije upisao je školske 2011/2012. godine na Univerzitetu u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet, studijski program Inženjerstvo materijala.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1 Sadržaj disertacije

Doktorska disertacija kandidata **Faisal Ali Alzarruga**, master inženjera tehnologije, napisana je na engleskom jeziku i sadrži 148 stranica A4 formata, 51 sliku, 9 tabela i 256 literaturnih navoda. Doktorska disertacija sadrži sledeća poglavlja: *Apstrakt* (na srpskom i engleskom jeziku), *Uvod*, *Teorijski deo* (Stomatološki materijali i klasifikacija; Svojstva stomatoloških materijala (Mehanička, optička i hemijska; Test biokompatibilnosti ("*in vitro*", "*in vivo*", klinička ispitivanja; Elektropredenje (opis procesa), Procesni parametri, Parametri rastvora, Prirodni i sintetički polimeri koji se koriste u procesu elektropredenja, Primena nanotehnologije u stomatologiji, Nanostrukture u stomatologiji, Optička svojstva kompozita ojačanih polimernim vlaknima); *Eksperimentalni deo* (Upotreba različitih alumina ojačanja za poboljšanje mehaničkih svojstava hibridnih kompozita na bazi akrilata); Karakterizacija antimikrobnih poli (vinil butiral)/titanijum nanovlaknastih kompozita; Poboljšanje mehaničkih svojstava transparentnog poli (metil metakrilat) kompozita ojačanog poli (vinil butiral)/titanijum nanovlaknima;) *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 poglavlju je prikazan pojam i značaj stomatoloških kompozitnih materijala, opis strukture, svojstava i klasifikacija stomatoloških kompozitnih materijala.

Kompozitni materijali s polimernom matricom predstavljaju jednu od najznačajnijih grupa građivnih materijala u stomatologiji. Savremeni dentalni kompozitni materijali se uglavnom sastoje od polimerne matrice i neorganskih ojačanja od čijih odnosa zavise fizičke i hemijske karakteristike kompozita. Pored toga, dodaju se aktivatori i inicijatori polimerizacije, pigmenti, sredstva za bolju aplikaciju i stabilizaciju. Dalji napredak u razvoju ovih materijala vodi ka primeni nanokompozitnih dentalnih materijala. Oni predstavljaju najnoviju generaciju materijala koji svojim karakteristikama (tvrdoća, elastičnost, žilavost) nadmašuju konvencionalne materijale.

Akrilati koji se primenjuju u stomatologiji su još uvek daleko od idealnih u ispunjavanju mehaničkih zahteva za zubne proteze zbog veoma male otpornosti na lom i velike krтости materijala. Naponi da se poboljšaju i mehanička i hemijska svojstva ovih materijala kroz uključivanje ojačanja u vidu mikro ili nančestica na bazi silicijuma detaljno su istraživana proteklih godina. Pored čestica, nanovlakna i viskersi, zbog specifičnog kritičnog odnosa dužina-prečnik koji trpi opterećenje, pokazuju izuzetno dobre rezultate u poboljšanju fizičko-mehaničkih svojstava kompozita. Pored toga, za dobra fizičko-mehanička svojstva kompozitnog materijala takođe je važno da se ostvari veza između matrice i ojačanja. Na taj način se ostvaruje dobar prenos i raspodela opterećenja kod mehaničkih naprezanja. Kao vezujući agensi za ostvarivanje što bolje veze matrica-ojačanje obično su se koristili silani za tretiranje silikatnih čestica, jer su oni trenutno bili mehanički i hemijski pogodni. Tokom vremena oni takođe pokazuju pukotine, koje se javljaju i propagiraju oko čestica punioca. Ovaj nedostatak se javlja kada su stomatološki kompoziti smešteni u vodenom oralnom okruženju zbog hidrolitičke degradacije mikro/nanočestica silicijum-dioksida zasnovanih na reakciji vezivanja sa silanima. Klinički problem korišćenja silana u poboljšanju adhezije ovih kompozitnih materijala je degradacija veza tokom vremena u oralnoj sredini. Dentalni materijal mora posedovati pre svega odgovarajuća mehanička svojstva kao što su tvrdoća, čvrstoća, modul elastičnosti, otpornost na habanje, uključujući toplotno i udarno opterećenje. Važna su takođe i fizičko-hemijska svojstva, poput nerastvorljivosti dentalnog polimera u usnoj šupljini, biološka inertnost, mala apsorpcija vode, neutralni ukus i miris, transparentnost i dimenziona stabilnost. Ovi materijali treba da ispunjavaju i temeljni zahtev za stomatološki materijal, a to je pre svega biokompatibilnost, kao i bakteriološka, fiziološka i patološka svojstva, zatim odgovarajuća adhezivna svojstva sa metalima i porcelanom.

Svojstva kompozita zavise od svojstava konstituenata, sadržaja konstituenata, interakcije konstituenata (sinergistički efekat), raspodele konstituenata, geometrije i orijentacije ojačanja. Step en uticaja dispergovane faze u obliku vlakana na svojstva kompozita zavisi od: a) zapreminskog udela, b) prečnika, c) oblika, d) raspodele i e) orijentacije. Najšire korišćena ojačavajuća, diskontinualna čvrsta faza u kompozitima je u obliku vlakana, što je posledica činjenice da se u mnogim materijalima kada su u obliku vlakana postižu izvanredna fizičko-mehanička svojstva. Oriјentacija diskontinualne faze utiče na izotropiju svojstava materijala. Ojačanje u obliku približno ekvialsijalnih čestica određuje potpunu izotropiju svojstava kompozita. Ako dimenzije čestica nisu identične, kompozit je izotropan samo kad su čestice nasumično orijentisane, kakav je slučaj kod kompozita ojačanih nasumično orijentisanim, kratkim vlaknima. Struktura i svojstva međupovršina između konstituenata u kompozitnom materijalu igraju vrlo bitnu ulogu u određivanju fizičkih i mehaničkih svojstava kompozitnih materijala.

U drugom poglavlju dat je prikaz metode dobijanja vlakana elektropredenjem. Proces elektropredenja (elektrospininga) se zasniva na primeni visokonaponskog električnog polja što omogućuje formiranje mikro ili nano vlakana iz polimernog rastvora ili rastopa. Sistem za elektrospining sastoji se od tri glavne komponente: izvor visokog napona, dizna i uzemljena kolektorska ploča. Na procese elektrospininga utiču različiti parametri, koji se dele na parametre rastvora, procesne parametre i ambijentalne parametre. U parametre rastvora spadaju koncentracija, viskoznost, molarna masa, površinski napon, provodnost, vrsta i isparljivost rastvarača (tačka ključanja). Procesne parametre čine intenzitet električnog polja,

rastojanje između vrha dizne i kolektora, tipovi kolektora, brzina protoka, i oblik dizne. Svaki od ovih parametara značajno utiče na morfologiju vlakana dobijenih elektrospiningom, i odgovarajućim podešavanjem ovih parametara dobijaju se nanovlakna željenih prečnika i morfologije. Pored ovih promenljivih, ambijentalni parametri obuhvataju vlažnost i temperaturu okruženja što igra važnu ulogu u određivanju morfologije i prečnika elektrospredjenih nanovlakana. Metode elektrospininga, ko-elektrospininga i elektrospininga sa više dizni omogućavaju dizajniranje različitih nivoa strukture za formiranje nanovlakana. Potencijalna primena ovakvih vlakana je višestruka: u inženjerstvu tkiva, kao nosači lekova i zarastanje rana, za filtraciju, biosenzore, imobilizaciju enzima, za izradu nanokompozitnih materijala i zaštitne odeće. Dat je i pregled prirodnih i sintetičkih polimera koji se koriste u procesu elektrospredjenja (fibroin svile, hijaluronska kiselina, hitozan, kolagen, želeatin, fibrinogen, i različite vrste kopolimera). U okviru ovog poglavlja data je i primena nanotehnologija u stomatološkim materijalima, uticaj različitih vrsta i oblika ojačanja u vidu nanočestica, nanotuba, nanovlakana i nanosfera, na dobijanje stomatoloških materijala. Zatim su detaljno opisani procesi dobijanja transparentnih polimernih materijala na bazi poli (metil metakrilata) sa ojačanjem u obliku polimernih vlakana poli (vinil butirala).

Eksperimentalni deo je prezentovan u sledeća tri poglavlja:

U trećem poglavlju dat je detaljan prikaz eksperimentalnih istraživanja uticaja uslova sinteze nanokompozita sa različitim oblicima i strukturama alumina ojačanja sa prikazom rezultata karakterizacije i njihovom detaljnom analizom . Ispitana je mogućnost upotrebe elektrospredjenih alumina punioca kao ojačanja za hibridne kompozitne materijale zasnovane na akrilnim stomatološkim materijalima. Ispitan je uticaj veličine i oblika elektrospredjenih alumina ojačanja na mehanička svojstva hibridnih kompozita i izvršeno je poređenje sa dva tipa kompozita dobijenih pomoću industrijskih alumina ojačanja : sferičnih čestica alumine i alumina viskersa. Sva ojačanja su dodata bez modifikacije površine, što čini proces veoma jednostavnim i snižava troškove procesiranja materijala. Utvrđeno je metodama nanoindentacije i dinamičko-mehaničke analize da čestice, viskersi i dobijena alumina vlakna poboljšavaju mehanička svojstva, ali poboljšanje je mnogo više izraženo u slučaju sintetisanih vlakana koja su pokazala bimodalnu raspodelu nakon žarenja na 1100 °C. Koncentracija ojačavajućih punioca varirana je do 5 mas. %. Najbolja svojstva dobijena su dodatkom 3 mas. % alumina vlakana u pogledu mehaničkih svojstava dobijenog kompozita (povećanje modula sačuvane energije 100%, povećanje redukovanog modula elastičnosti 134% i tvrdoće materijala za 158% u odnosu na polazni akrilatni polimer). Na kraju je data uporedna analiza metoda ispitivanja mehaničkih svojstava materijala-dinamičko-mehanička analiza u odnosu na merenja metodom nanoindentacije.

U četvrtom poglavlju ispitivani su uslovi procesiranja na uniformnost, morfologiju i strukturu nanovlakanastih matova od poli (vinil butiral)/titanijum nanokompozitnih vlakana koja su dobijena brzim procesom elektrospredjenja sa 14 dizni. U ovom poglavlju nanočestice (TTNP) i nanotube titanijum-dioksida (TTNT) su korišćeni kao ojačanja u elektrospredjenim nanovlakanima poli (vinil butirala) (PVB/TTNP i PVB/TTNT kompozitna nanovlakna). Ispitana su termo-mehanička svojstva, fotokatalitička oksidaciona efikasnost nakon izlaganja UV zračenju i antibakterijska aktivnost na gram-negativnu bakteriju Ešerihiju koli (*Escherichia coli* ATCC 25922). Kompozitna nanovlakna pokazuju bitno poboljšanje termičkih, mehaničkih i antimikrobnih svojstava sa dodatkom nanoojačanja u vidu titanijum - dioksidnih nanotuba , sa značajnim povećanjem mehaničkih performansi prikazanih u povećanju indentacione tvrdoće od 163%, redukovanog modula elastičnosti za 84% i elastičnom oporavku od 54% u odnosu na čista polimerna vlakna.

U petom poglavlju disertacije dat je detaljan pregled metode dobijanja i karakterizacije novih nanokompozitnih materijala na bazi akrilata. Svrha ovog istraživanja bila je poboljšanje mehaničkih i optičkih svojstava kompozita na bazi akrilata, ojačanih poli (vinil butiral)/titanijumskim nanovlakanima. U ovom poglavlju je izvršeno ispitivanje različitog

sadržaja poli (vinil butiral)/titanijum nanovlakna na mehanička i optička svojstva kompozita, kao i komparativna studija mehaničkih i optičkih svojstava kompozita. Dobijena kompozitna nanovlakna su korišćena kao ojačanja u akrilnom polimeru i pored poboljšanja termomehaničkih svojstava, poboljšana je adhezije između vlakana i matrice kao i žilavost krajnjeg hibridnog kompozita što predstavlja jedan od najvećih nedostataka postojećih akrilnih materijala. Dodatkom 3 mas.% nanočestica žilavost materijala je bitno poboljšana za 55%, dok je dobijeni nanokompozitni materijal zadržao visoku transparentnost između 75-80% u opsegu talasnih dužina svetlosti od 400 do 800 nm.

U poslednjem poglavlju prikazani su modeli sa profilima rasejanja za čist polimer i hibridne kompozite sa različitom koncentracijom titanijumskih ojačanja pomocu *Mie* modela rasejanja. Izračunata je transparentnost ojačanih vlakana i hibridnih akrilnih kompozita u zavisnosti od talasne dužine svetlosti i dat je uporedni prikaz sa izmerenim eksperimentalnim vrednostima. Literatura sadrži navode citirane u disertaciji kao i radove koji su proistekli istraživanjem u okviru ove doktorke disertacije.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1. Savremenost i originalnost

U okviru ove disertacije izvršena je sinteza nanoojačanja u vidu keramičkih alumina vlakana i kompozitnih vlakana sa polimernom matricom sa titanijumskim puniocima, primenom tehnike elektropredenja sa jednom i 14 dizni, zatim njihova ugradnja u akrilatne materijale i na kraju sveobuhvatna karakterizacija. Tehnika brzog razvoja elektropredenja je dostigla intenzivan napredak od devedesetih godina prošlog veka zbog mogućnosti izrade kontinualnih vlakana prečnika na nanometarskoj skali . Uprkos naporima posvećenim istraživanju primene elektropredenih nanovlakana, kao što su separacija, kataliza, nanoelektronika, senzori, pretvaranje/skladištenje energije i biomedicinska upotreba, postoje ograničeni pokušaji primene ovih nanovlakana kao ojačanja u polimernim kompozitima. Elektropredena nanovlakna poseduju mnogobrojne prednosti koje se obično ne javljaju u drugim nanokompozitnim oblicima za ojačavanje , kao što su kontinuitet , raznovrstan izbor materijala, kontrolisani prečnik i struktura , mogućnost lake ugradnje , sposobnost masovne proizvodnje itd. Zbog toga elektropredena nanovlakna imaju veliki potencijal kao napredna ojačanja dentalnih polimernih kompozita sledeće generacije.

Ova doktorska disertacija predstavlja iskorak u istraživanju primenom alumine i kompozitnih nanovlakana sa titanijum dioksidom kao alternativu silikatnim ojačanjima zbog njihove hemijske kompatibilnosti i relativno visoke stabilnost u vodenoj sredini. Uopšteno, alumina a naročito titanijumske nanočestice i nanotube su poželjne u stomatologiji zbog prijatne boje i dobre biokompatibilnosti. Ostala poželjna svojstva kao što su niska toksičnost i visoka stabilnost i efikasnost, kao i dostupnost i niske cene, učinili su titanijumske čestice i nanotube odgovarajućim antimikrobnim aditivom za dentalne materijale.

Originalnost ideje koja je realizovana u okviru istraživanja do kojih se došlo u toku izrade ove doktorske disertacije je zamena klasičnih ojačanja u obliku nanočestica, viskersa aluminijum oksida sa posebno dizajniranim nanoojačanjem koje je dobijeno brzim procesom elektropredenja u obliku bimodalnih alumina nanovlakana. Posebno je ispitana mogućnost primene titanijumskih nanočestica i nanotuba u obliku kompozitnih nanovlakana u akrilnim polimerima što prema detaljnom pregledu do sada nije pronađeno u literaturi.

Takođe su po prvi put prikazani modeli sa profilima rasejanja za čiste polimere i hibridne kompozite sa različitom koncentracijom titanijumskih ojačanja pomoću *Mie* modela rasejanja.

3.2. Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

Tokom izrade doktorske disertacije kandidat **Faisal Ali Alzarrug** sproveo je opsežan pregled relevantne stručne i naučne literature koja obuhvata 256 referenci. Veći deo

pregledane literature objavljen je u vrhunskim međunarodnim časopisima, a obuhvata radove koji se odnose na strukturu, svojstva i primenu dentalnih materijala, kao i radove koji se bave sintezom, svojstvima i primenom elektropredenih nanovlakana. Literaturni pregled obuhvata veliki broj publikovanih naučnih radova iz oblasti nanokompozitnih materijala, metoda dobijanja dentalnih nanokompozita, metoda dobijanja nanokompozitnih vlakana i savremene metode za njihovu karakterizaciju. U okviru literaturnih navoda nalaze se i reference kandidata Faisal Ali Alzarruga, koje su proistekle iz rada na ovoj disertaciji, objavljene u međunarodnim časopisima.

3.3. Opis i adekvatnost primenjenih naučnih metoda

Proces proizvodnje nanovlakana iz različitih materijala, kontrola uređenja nanovlakana u cilju optimizacije strukturnih zahteva i konačno, inkorporacija dodatih komponenata u nanovlakna, su potrebni da bi se formirao kompleksni hijerarhijsko organizovan nanokompozitni materijal. Savremena tehnika proizvodnje nanovlakana, poznata kao elektropredenje, predstavlja potencijal za dizajniranje nanokompozita organizovanih u više nivoa. U okviru ove disertacije korišćen je uređaj za elektropredenje koji se sastoji od metalne dizne, pumpe za precizno doziranje i izvora visokog napona. Korišćene su dve metode elektropredenja-elektropredenje sa jednom diznom i brzo elektropredenje sa jednom i 14 dizni za brzo dobijanje elektropredenog mata.

Priprema polimernih rastvora za izradu prekursora za kompozitna nanovlakna izvedena je na ultrazvučnom uređaju za sonifikaciju sa titanijumskom sondom. Geometrijska svojstva nanovlakana čine prečnik vlakna, raspodela prečnika, orijentacija vlakana i morfologija vlakana (npr. oblik poprečnog preseka i hrapavost površine). Morfologija alumina vlakana, sferičnih nanočestica i viskersa karakterisana je na elektronskom mikroskopu (FESEM). Za određivanje i ispitivanje morfologije uzoraka vlakana i kompozita primenjena je metoda skenirajuće elektronske mikroskopije (SEM) i transmisione elektronske mikroskopije (TEM). Za istraživanja geometrijskih svojstava morfologije formiranih vlakana korišćen je i optički transmisioni mikroskop. Karakterizacija dobijenih ojačanja u vidu kompozitnih nanovlakana ispitana je metodom infracrvene spektroskopije (IR).

Fotokatalitička oksidaciona efikasnost nakon izlaganja UV zračenju i antimikrobna svojstva određena su agar disk difuzionom metodom za detekciju gram-negativne bakterije Ešerihije koli (*Escherichia coli* ATCC 25922).

Uticaj udela ojačanja kao i jačina veze ojačanje-polimer za različite temperature i frekvencije dinamičkih naprezanja ispitani su primenom dinamičko-mehaničke analize (DMA). Pri izradi predložene doktorske disertacije primenjena je specifična metoda za karakterizaciju nanokompozitnih vlakna izradom posebnih alata za karakterizaciju nano i mikro kompozitnih vlakana primenom dinamičko-mehaničke metode. Ispitivanje efekata ojačanja i žilavosti stomatoloških hibridnih kompozitnih materijala sa aspekta nanomehaničkih svojstava istraženo je primenom metode nanoindentacije.

Transparentnost kompozitnih nanovlakana i hibridnih nanokompozitnih materijala ispitana je metodom UV spektroskopije u opsegu talasne dužine svetlosti od 400-800 nm.

3.4. Primenljivost ostvarenih rezultata

Posmatrano na naučnom nivou značaj rezultata do kojih se došlo pri izradi ove doktorske disertacije je potvrda da je zamena nanočestica, nanoviskersa sa keramičkim i kompozitnim nanovlaknima dobar pravac istraživanja i razvoja, jer ovom zamenom se značajno poboljšavaju mehanička, termička, antimikrobna, i optička svojstva a posebno žilavost stomatoloških kompozitnih materijala. Ovim je potvrđena i osnovna hipoteza na kojoj su bila zasnovana istraživanja u okviru ove doktorske disertacije. Ona je zasnovana na mikromehaničkoj i nanomehaničkoj analizi mehanizma ojačavanja polimera kratkim vlaknima prema kojoj odnos granične površine vlakna i zapremine je znatno veći nego što je

to kod čestica sfernog oblika čime se postiže znatno veća mogućnost poboljšanja mehaničkih svojstava ovih kompozitnih materijala.

Rezultati do kojih se došlo pri izradi ove doktorske disertacije predstavljaju solidnu osnovu za nastavak daljih istraživanja u oblasti primene keramičkih i nanokompozitnih vlakana u modifikovanju standardno prihvaćenih receptura kompozitnih stomatoloških materijala. Naučna verifikacija rezultata disertacije potvrđena je objavljivanjem ostvarenih rezultata u uglednim međunarodnim časopisima.

3.5. Ocena dostignutih sposobnosti kandidata za samostalan naučni rad

Analizom i obradom stanja razmatranog problema, korišćenjem aktuelne i referentne literature, prikazanim rezultatima i zaključnim razmatranjima kandidat je pokazao da je sposoban da samostalno rešava istraživačko razvojne probleme i da vlada korišćenim istraživačkim metodama.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1. Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Naučni doprinosi koji su ostvareni u okviru ove doktorske disertacije su sledeći:

- Razvijena je metoda dobijanja keramičkih nanovlakana brzim elektropredenjem iz polimernih prekursora uz naknadnu termičku obradu
- Definisani su optimalni procesni parametri elektropredenja za dobijanje vlakana nano dimenzija metodom elektropredenja sa jednom diznom
- Definisani su optimalni procesni parametri elektropredenja za dobijanje vlakana nano dimenzija metodom elektropredenja sa više dizni (u našem slučaju 14 dizni za ubrzanje procesa elektropredenja i mogućnost komercijalne primene)
- Izvršeno je poređenje ovih metoda elektropredenja u pogledu efikasnosti i dobijanja poboljšanih nanokompozitnih akrilata sa ovim vrstama ojačanja
- Definisani su procesni parametri za dve metode polimerizacije akrilnih polimera i metode poboljšane disperzije ojačanja u dentalnim nanokompozitima
- Uspostavljena je korelacije između procesnih parametara i ostvarenih fizičko-mehaničkih, termičkih i optičkih svojstava
- Izvršena je karakterizacija dobijenih nanokompozitnih akrilnih materijala u pogledu ispitivanja fizičko-mehaničkih i termičkih svojstava, kao i funkcionalnih svojstava za primenu u stomatologiji
- Primenjen je *Mie* model rasejanja za verifikaciju transparentnih dentalnih materijala
- Dizajniran je nov dentalni nanokompozitni materijal sa poboljšanim fizičko-mehaničkim, termičkim i optičkim svojstvima i sa povećanom žilavosti krajnjeg hibridnog kompozita

4.2. Kritička analiza rezultata istraživanja

Sprovedena istraživanja u okviru ove disertacije proistekla su na osnovu širokog spektra aktivnosti koji je uključivao detaljnu analizu literature iz oblasti sinteze i karakterizacije dentalnih kompozitnih materijala. Disertacija razmatra sintezu, strukturu, karakterizaciju i primenu kompozitnih materijala sa polimernom matricom koja je ojačana keramičkim i kompozitnim nanovlaknima za primenu u stomatologiji. Rezultati istraživanja u okviru ove doktorske disertacije izvedeni su sa ciljem: a) sinteze i karakterizacije multifunkcionalnih nanokompozitnih vlakana i b) sinteze i karakterizacije nanomodifikovanih stomatoloških kompozitnih materijala sa poboljšanim svojstvima na bazi akrilnih polimera. Detaljno su prikazane metode sinteze kompozitnih materijala sa keramičkim i kompozitnim nanovlaknima dobijenim elektropredenjem i ustanovljeni su procesni parametri metode elektropredenja sa jednom i više dizni. Svi dobijeni rezultati su pokazali poboljšanje u pogledu mehaničkih, termičkih, i funkcionalnih svojstava kompozita što je dokumentovano u eksperimentalnom delu u okviru ove disertacije.

4.3. Verifikacija naučnih doprinosa

Na osnovu dosadašnjeg rada i pokazanih rezultata tokom izrade disertacije do sada su objavljena dva naučna rada u međunarodnim časopisima kategorije M21 i M22, i saopštenje sa međunarodne konferencije kategorije M34.

M21 Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

1. **Alzarrug F.A** , Dimitrijević M.M, Jančić Heinemann R.M., Radojević V., Stojanović D.B., Uskoković P.S., Aleksić R., The use of different alumina fillers for improvement of the mechanical properties of hybrid PMMA composites, *Materials & Design*, Vol. 86, No. 5, 2015 pp. 575–581. ISSN 0264-1275, (Materials Science, Multidisciplinary (45/271) **IF 2015: 3.997**) doi:10.1016/j.matdes.2015.07.069.

M22 Rad u istaknutom međunarodnom časopisu

1. **Alzarrug, F.A.**, Stojanovic, D. B., Obradovic, V., Kojovic, A., Nedeljkovic, J. M., Rajilic-Stojanovic, M., & Uskokovic, P. S., Multiscale characterization of antimicrobial poly(vinyl butyral)/titania nanofibrous composites, *Polymers for Advanced Technologies*, Vol. 28, No. 7, 2017, pp. 909–914. ISSN 1042-7147 (Polymer Science (33/86) **IF 2016: 1.907**) doi:10.1002/pat.3996

M 34 Rad saopšten na skupu međunarodnog značaja štampan u izvodu

1. **Alzarrug, F.A.**, Stojanovic, D. B., Obradovic, V., Radisavljević A.N., Kojović A.M., Uskoković P.S., Aleksić R.R., Rapid fabrication of antimicrobial poly(vinyl butyral)/titania nanofibers using multi-needle electrospinning, *The Book of Abstracts/The eighteenth annual conference YUCOMAT 2016*, Herceg Novi, Montenegro, September 5-10, 2016, p. 55. <http://www.mrs-serbia.org.rs>

5. ZAKLJUČAK I PREDLOG

Rezultati istraživanja u okviru doktorske disertacije **Faisal Ali Alzarruga**, master inženjera tehnologije, doprinose povećanju nivoa znanja o strukturi i svojstvima hibridnih nanokompozitnih stomatoloških materijala i mogućnostima poboljšanja dizajniranja njihove strukture hibridizacijom oblika, veličine i udela ojačanja na nano skali.

Pregledom doktorske disertacije, Komisija je konstatovala da podneta doktorska disertacija ima sve neophodne sadržaje i da je napisana u skladu sa uobičajenim standardima. Izloženi materijal je sistematizovan i dobro organizovan. Predmet i ciljevi istraživanja su jasno navedeni, ostvareni rezultati i doprinos istraživanja su verifikovani kroz odgovarajući broj naučnih publikacija.

Komisija konstatuje da disertacija ispunjava sve zakonske, formalne i suštinske uslove, kao i sve kriterijume koji se primenjuju prilikom vrednovanja doktorske disertacije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Takođe je konstатовano da doktorska disertacija predstavlja originalni naučni doprinos u oblasti Tehnološko inženjerstvo i užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala. Imajući u vidu kvalitet i obim ostvarenih rezultata, kao i njihov naučni doprinos, Komisija pozitivno ocenjuje doktorsku disertaciju i predlaže Nastavno-naučnom Veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, da doktorsku disertaciju **Faisal Ali Alzarruga** pod naslovom **"Sinteza i karakterizacija dentalnih kompozitnih materijala ojačanih nanovlaknima"** (**"Synthesis and characterisation of dental composite materials reinforced with nanofibers"**), izloži na uvid javnosti, uputi na konačno usvajanje Veću naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu i da nakon završetka procedure pozove kandidata na usmenu odbranu disertacije pred Komisijom u istom sastavu:

U Beogradu, 23. 08. 2018.

ČLANOVI KOMISIJE

.....
Dr Petar Uskoković, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....
Dr Dušica Stojanović, viši naučni saradnik,
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....
Dr Vesna Radojević, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....
Dr Radmila Jančić-Hajneman, redovni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Tehnološko-metalurški fakultet

.....
Dr Ljiljana Brajović, vanredni profesor,
Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet