

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu održanoj 29.11.2012. godine imenovani smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije kandidata mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom

"Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini".

Komisija je pregledala podnetu doktorsku disertaciju i Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu podnosi sledeći

I Z V E Š T A J
o urađenoj doktorskoj disertaciji

1. UVOD

1.1 Naslov i obim disertacije

Doktorska disertacija kandidata mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić (rođene Cvijović) pod nazivom **"Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini"** napisana je na 360 strana, sadrži 197 slika, 37 tabela, 325 navoda literature, listu korišćenih oznaka i skraćenica, rezime na srpskom i engleskom jeziku, kao i biografiju autora.

1.2 Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- 06.09.2007. godine – na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o prihvatanju teme doktorske disertacije mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom "Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini" i za mentora ove doktorske disertacije imenovan je dr Marko Rakin, docent Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.
- 19.10.2007. godine – na sednici Veća naučnih oblasti tehničkih nauka Univerziteta u Beogradu data je saglasnost na predlog teme navedene doktorske disertacije mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom "Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini".
- 20.09.2012. godine – na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu data je saglasnost sa zahtevom koji je podnela mr Ivana Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije za produženje roka za odbranu doktorske disertacije pod nazivom "Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini" i kao rok za odbranu doktorske disertacije dat je 19.10.2013. godine.
- 29.11.2012. godine – na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu doneta je Odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije, pod nazivom "Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini".

1.3 Mesto disertacije u odgovarajućoj naučnoj oblasti

Istraživanja u okviru doktorske disertacije pod nazivom "**Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini**" pripadaju oblasti tehničkih nauka, odnosno užoj naučnoj oblasti Inženjerstvo materijala za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu.

1.4 Biografski podaci o kandidatu

Ivana (Ljubiša) Cvijović-Alagić, devojačko prezime Cvijović, je rođena 09.11.1978. godine u Beogradu. Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu je upisala školske 1997/98. godine, a 2003. godine je diplomirala sa prosečnom ocenom studija 8,27 i ocenom diplomskog rada 10 na smeru Hemijsko inženjerstvo, pod mentorstvom dr Radmile Jančić, docenta Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, i stekla zvanje diplomirani inženjer tehnologije za hemijsko inženjerstvo. Tokom studija (2002. godine), posredstvom međunarodne organizacije za razmenu i stručno usavršavanje studenata tehničkih fakulteta (IAESTE) i kao DAAD stipendista, je boravila tri meseca na Max-Planck Institutu u Düseldorf-u, Nemačka, gde je uradila eksperimentalni deo svog diplomskog rada pod nazivom „Analiza kriterijuma za izbor metalnih materijala u automobilske industriji“.

Poslediplomske studije na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, smer Materijali je upisala školske 2004/2005. godine i položila sve ispite predviđene nastavnim planom sa prosečnom ocenom 10. Magistrirala je 2006. godine pod mentorstvom dr Radoslava Aleksića, redovnog profesora Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, odbranom magistarske teze pod nazivom „Ciklična oksidacija legure na bazi Ti_3Al intermetalnog jedinjenja“ i stekla zvanje magistar tehničkih nauka.

Od 01.06.2004. godine je zaposlena u Laboratoriji za materijale Instituta za nuklearne nauke „Vinča“. Odlukom Naučnog veća Instituta za nuklearne nauke „Vinča“ mr Ivana Lj. Cvijović-Alagić, istraživaču saradniku Instituta za nuklearne nauke „Vinča“, dodeljena je *GODIŠNJA NAGRADA* za rezultate u oblasti osnovnih istraživanja za 2007. godinu u kategoriji mlađih istraživača do 35 godina.

Tokom svog dosadašnjeg stručnog usavršavanja uspešno je završila kurs iz korišćenja numeričkog programskog paketa ABAQUS pod nazivom „ABAQUS - Finite element program for modeling and analysis of the behavior of solids and structures“, koji je 2008. godine realizovan u organizaciji Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Član je DGM (Deutsche Gesellschaft für Materialkunde) društva.

Mr Ivana Lj. Cvijović-Alagić je učestvovala ili učestvuje u realizaciji šest naučno-istraživačkih projekata iz oblasti osnovnih istraživanja (OI) finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije: „Osnovna istraživanja u oblasti legura titana - uticaj mikrostrukture na čvrstoću i plastičnost intermetalnog jedinjenja Ti_3Al “ (ev. br. OI 1966), „Osnovna istraživanja u oblasti kompozita sa metalnom osnovom“ (ev. br. OI 1970), „Sinteza i osobine nanostrukturnih metalnih, intermetalnih i kompozitnih materijala“ (ev. br. OI 142027), „Specijalne teme mehanike loma materijala“ (ev. br. OI 144027), „Uticaj nano i mikrostrukturnih konstituenata na sintezu i karakteristike savremenih kompozitnih materijala sa metalnom osnovom“ (ev. br. OI 172005) i „Mikromehanički kriterijumi oštećenja i loma“ (ev. br. OI 174004); kao i dva projekta bilateralne međunarodne naučno-tehnološke saradnje (sa Republikom Slovenijom i Narodnom Republikom Kinom). Takođe je učestvovala u realizaciji inovacionog projekta „Projektovanje tehnologije izrade filtera od aktivnog uglja za prečišćavanje pijaće vode“ finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki

razvoj Republike Srbije i kompanije „Tehnocon filter d.o.o.“. Kao član projektnog tima radila je i na realizaciji projekta „Nove tendencije u projektovanju i proizvodnji filtera sinterovanog aktivnog uglja“ pod pokroviteljstvom Balkanske ekološke asocijacije B.EN.A. i kompanije „Carlsberg Srbija d.o.o.“.

Do sada je kao autor ili koautor objavila 2 poglavlja u naučnim knjigama, 14 radova štampanih u vrhunskim i istaknutim časopisima međunarodnog značaja, 5 radova u časopisima međunarodnog značaja i časopisima međunarodnog značaja verifikovanih posebnom odlukom, veliki broj radova saopštenih na skupovima međunarodnog i nacionalnog značaja štampanih u celini ili u izvodu i 9 radova u vodećim časopisima nacionalnog značaja i časopisima nacionalnog značaja. Mr Ivana Cvijović-Alagić je i recenzet radova predloženih za štampu u nekoliko vrhunskih međunarodnih časopisa: Surface and Coating Technology, Corrosion Science, Materials Chemistry and Physics, Materials Science and Engineering A i Tribology Letters.

Govori, čita i piše engleski i nemački jezik.

2. OPIS DISERTACIJE

2.1 Struktura i sadržaj disertacije

Doktorska disertacija kandidata mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić pod nazivom **"Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini"** sadrži sedam tematskih celina: *Uvod*, *Teorijski deo* podeljen na sedam poglavlja, *Eksperimentalni postupak i numeričko modelovanje*, *Rezultati*, *Diskusija*, *Zaključci* i *Literatura*. Na početku disertacije je data lista korišćenih oznaka i skraćenica po redosledu pojavljivanja u tekstu, produženi rezime na srpskom i engleskom jeziku, kao i sadržaj disertacije, dok je na kraju disertacije data biografija autora.

2.2 Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

U *Uvodu* disertacije ukazano je na značaj razvoja metalnih implantnih materijala za primenu u biomedicinskom inženjerstvu i potrebu izrade dugotrajnijih ortopedskih implanata, sa posebnim osvrtom na mogućnost poboljšanja funkcionalnih svojstava implantnih legura titana projektovanjem hemijskog sastava i uvođenjem novih proizvodnih postupaka. Naime, zbog složenosti pokreta u ljudskom organizmu ortopedski implanti trpe različita mehanička opterećenja u korozionoj sredini kakvu predstavljaju telesne tečnosti, koja mogu dovesti do oštećenja i loma implanta. Stoga je neophodno da se materijali za izradu ortopedskih implanata, uz biološku inertnost u odnosu na živi organizam i odlično srastanje implanta sa kostima i mišićnim tkivima, odlikuju izuzetnom korozionom postojanošću, dobrim mehaničkim karakteristikama i otpornošću prema habanju i nastanku loma. Iz tog razloga je izbor odgovarajućeg, biokompatibilnog materijala najznačajniji aspekt dizajniranja ortopedskih implanata. Do skoro se rešenju problema pristupalo korigovanjem hemijskog sastava standardnih ili projektovanjem sastava novih implantnih legura titana koje sadrže biokompatibilne elemente. Međutim, da bi se postigla kombinacija svojstava od interesa za proizvodnju različitih implantnih detalja neophodna je stroga kontrola uslova izrade i naknadne termičke odnosno termomehaničke obrade kako bi se obezbedila optimalna mikrostruktura legure, što zahteva multidisciplinarni pristup istraživanjima u ovoj oblasti uz bolje razumevanje mehanizama nastalih oštećenja i numeričko modelovanje ponašanja implantnih legura pri razvoju oštećenja. U ovom poglavlju su opisani najčešći pristupi razvoju mikrostrukture putem optimizacije parametara konvencionalnih postupaka izrade i prerade navedenih legura i istaknut značaj dobijanja sitnozrnih odnosno nanočestičnih legura titana primenom savremenih postupaka

jake plastične deformacije (*engl.* severe plastic deformation, SPD). Obrazlaže se značaj predviđanja ponašanja implantnih legura titana pri oštećenju i lomu za njihov dalji razvoj i primene koncepta kontinualne mehanike oštećenja (*engl.* continuum damage mechanics, CDM), koji se bazira na mikromehaničkom pristupu rešavanja problema oštećenja materijala, u modelovanju razvoja oštećenja ove grupe implantnih legura. Na osnovu prikazanog stanja nauke u predmetnoj oblasti kandidat definiše predmet disertacije i obrazlaže metodologiju ostvarivanja postavljenih ciljeva.

Teorijski deo doktorske disertacije, kroz pregled do sada dostupne stručne literature, daje sveobuhvatni prikaz ponašanja metalnih implantnih materijala, prevashodno legura titana, u uslovima koji pogoduju nastanku oštećenja i loma tokom njihove eksploatacije, ali razmatra i mogućnost poboljšanja njihovih karakteristika primenom savremenih procesnih metoda i mogućnost modelovanja duktilnog loma legura titana primenom metode konačnih elemenata (MKE), kao i predviđanja njihove žilavosti loma primenom mikromehaničkih modela. U prvom poglavlju ovog dela disertacije pregledno su izložena osnovna svojstva biomaterijala i ljudskog organizam kao biološke sredine za biokompatibilne metalne materijale, a dati su i kriterijumi koje biomaterijali moraju ispuniti kako bi njihova primena u biomedicinskom inženjerstvu bila moguća. Drugo poglavlje posvećeno je titanu i legurama titana kao ortopedskim implantnim metalnim materijalima i u okviru ovog poglavlja su predstavljene osnovne prednosti primene komercijalno čistog (CP) titana i legura titana za izradu medicinskih implanata u odnosu na druge biometalne materijale. U okviru trećeg poglavlja teorijskog dela disertacije razmatra se uticaj mikrostrukturnih parametara legura titana na njihova mehanička svojstva, a poseban osvrt je dat na uticaj morfoloških karakteristika mikrostrukture na ponašanje legura $\alpha+\beta$ i β tipa pod dejstvom dinamičkog opterećenja. Peto poglavlje teorijskog dela disertacije razmatra habanje metalnih implantnih materijala koji se nakon hirurške ugradnje u organizam pacijenta nađu u međusobnom kontaktu. Tribološke karakteristike biometalnih materijala izuzetno su bitne sa stanovišta dugotrajnosti ortopedskih implanata, jer je popuštanje i oštećenje zglobnih implanata često zbog čega se 10-20 % ugrađenih implanata mora zameniti već 10 do 20 godina nakon operacije njihove ugradnje. Kako se broj mlađih i životno aktivnijih pacijenata sa dijagnozom zglobnog osteoartritisa stalno povećava, ograničen radni vek ugrađenih zglobnih implanata postaje sve značajniji problem u ortopedskoj hirurgiji, pa je i poboljšanje otpornosti prema habanju ortopedskih zglobnih implanata jedan od prioriteta razvoja savremenih biokompatibilnih metalnih materijala. U šestom poglavlju razmatra se mogućnost razvoja novih legura titana za buduću upotrebu u medicini primenom klasičnih metalurških procesa, ali i primenom SPD postupaka koji obezbeđuju dobijanje submikronskog odnosno nanočestičnog metalnog materijala poboljšane biokompatibilnosti. S obzirom na to da se do sada široko primenjujane komercijalne implantne legure odlikuju nekim neželjenim svojstvima, pre svega visokom vrednošću modula elastičnosti, cilj teorijskih razmatranja obuhvaćenih ovim poglavljem je bio da se definišu smernice daljeg razvoja ove grupe materijala kroz poboljšanje svojstava kako komercijalnih legura tako i legura nove generacije modifikacijom parametara klasičnih metalurških procesa prerade, ali i korišćenjem savremenih tehnologija. Poslednje poglavlje posvećeno je teorijskim osnovama određivanja parametara mehanike loma legura titana primenom MKE i modelovanju žilavosti loma. Opisana je primena MKE u modelovanju duktilnog loma metalnih materijala kroz pregled osnovnih formulacija MKE i primenu MKE u elasto-plastičnoj mehanici loma (EPML) i lokalnom pristupu duktilnom lomu. Takođe su razmatrani postojeći mikromehanički modeli za predviđanje otpornosti prema lomu implantnih legura titana.

U *Eksperimentalnom delu* disertacije prikazane su eksperimentalne tehnike i metode korišćene za izradu, preradu i karakterizaciju odabranih legura titana, kao i metode numeričkog modelovanja njihovog ponašanja pri delovanju mehaničkog opterećenja. Na početku je opisan postupak izbora komercijalne legure Ti-6Al-4V ELI (mas. %) i legure Ti-13Nb-13Zr (mas. %) nove generacije i njihovog dobijanja klasičnim i savremenim SPD postupkom uvijanja pod visokim pritiskom (*engl.* high-pressure torsion, HPT). Detaljno su opisane metode ispitivanja mikrostrukture, triboloških svojstava na makro i mikro nivou u uslovima sa i bez prisustva Ringer-ovog rastvora koji simulira telesne tečnosti, korozione postojanosti u Ringer-ovom rastvoru na sobnoj i temperaturi ljudskog organizma (37 °C), mehaničkog ponašanja pod dejstvom statičkog, udarnog i promenljivog opterećenja, kao i mehanizama različitih vidova oštećenja i loma obe legure titana. Takođe je opisan postupak merenja polja deformacija pri jednoosnom zatezanju i određivanju parametara mehanike loma, numerički proračun krive otpornosti i nastanka duktilnog loma primenom kompletnog Gurson-ovog modela (CGM). Na kraju su prikazani mikromehanički modeli Hahn-a i Rosenfield-a, Krafft-a i Broberg-a primenjeni za predviđanje žilavosti loma ispitivanih legura.

U četvrtom delu disertacije prikazani su *Rezultati* izvedenih multidisciplinarnih ispitivanja i numeričkih proračuna. Dobijeni rezultati su sistematizovani prema načinu izrade (konvencionalni i HPT postupak) i hemijskom sastavu legura u okviru dva podpoglavlja. Za svaku leguru je prvo dat prikaz mikrostrukture nastale tokom primene različitih režima termičke i termomehaničke obrade sa rezultatima ispitivanja tvrdoće u zavisnosti od morfologije mikrostrukture. Rezultati makro triboloških ispitivanja ukazuju na značajan uticaj mikrostrukturnih karakteristika na otpornost prema habanju i trenju konvencionalno izrađenih legura titana, ali i na uticaj normalnog opterećenja i brzine klizanja na dominantan mehanizam habanja a time i na frikciona svojstva i stepen oštećenja legura. Tribološka ispitivanja na mikro nivou pokazala su značajne promene u ponašanju legura kada se ispitivanja odvijaju u prisustvu Ringer-ovog rastvora, ali i usled promene kontaktnog opterećenja i linearne brzine klizanja. Ispitivanja korozione postojanosti konvencionalno izrađenih legura kao rezultat su dala elektrohemijske parametre (korozioni potencijal i gustinu struje korozije) ispitivanih legura određene na osnovu potenciodinamičkih polarizacionih krivih, Bodeo-ve i Nyquist-ove dijagrame, ali i impedansne parametre koji zajedno sa rezultatima rendgenostrukturalne analize daju uvid u prirodu i zaštitna svojstva površinskih slojeva obrazovanih tokom izlaganja legura Ringer-ovom rastvoru. Rezultati korozionih ispitivanja legura titana u prisustvu Ringer-ovog rastvora na temperaturi ljudskog tela prikazani su u vidu promene potencijala otvorenog kola sa vremenom izlaganja ispitivanih legura uslovima koji simuliraju uslove prisutne u ljudskom organizmu, potenciodinamičke polarizacione krive i elektrohemijske parametre (korozioni potencijal, potencijal otvorenog kola i gustinu struje korozije). Ispitivanja pri jednoosnom zatezanju izvedena su kako nakon konvencionalne prerade, tako i nakon HPT deformacije obe ispitivane legure i kao rezultat su dala srednje vrednosti osnovnih zateznih karakteristika (modula elastičnosti, napona tečenja, zatezne čvrstoće, maksimalnog suženja preseka, izduženja pri lomu i eksponenta deformacionog ojačavanja). Osim toga, prikazana su stvarna deformaciona polja i krive stvarni napon-stvarna deformacija (σ - ϵ). Rezultati ocene ponašanja termički obrađene legure Ti-6Al-4V ELI pri udarnom opterećenju dati su u vidu krivih sila-vreme i energija udara-vreme u zavisnosti od mikrostrukture legure, kao i u vidu parametara udarne žilavosti legure (udarna žilavost, energija udara, energija nastanka prsline, energija rasta prsline i udeo žilavog loma u ukupnom lomu). Ispitivanje otpornosti prema rastu zamorne prsline legure Ti-6Al-4V ELI različite mikrostrukture za rezultat je dalo dijagram zavisnosti brzina rasta zamorne prsline-opseg faktora intenziteta napona ($\log da/dN$ - $\log \Delta K$) i parametre rasta zamorne prsline zavisno od uslova termičke

obrade legure Ti-6Al-4V ELI. Rezultati ispitivanja žilavosti loma legure Ti-6Al-4V ELI u stanju nakon izvršene termičke obrade prikazani su u vidu krivih zavisnosti sila-otvaranje prsline ($F-\delta_5$) i sila-otvaranje usta prsline ($F-CMOD$), na osnovu kojih su dobijene krive otpornosti prema rastu prsline ($CTOD-\Delta a$) i vrednosti faktora intenziteta napona K_I . Pregledno su prikazani i rezultati 3D optičkog merenja i modelovanja deformacionog polja u ispitivanoj epruveti. Dijagramom zavisnosti sila-pomeranje napadne tačke sile ($F-v_{LL}$), kao i određenom kritičnom vrednošću faktora intenziteta napona K_{Ic} , ilustrovano je ponašanje toplo valjane legure Ti-13Nb-13Zr tokom ispitivanja žilavosti loma. SEM fraktografskom analizom je sa velikom pažnjom ispitana morfologija površine preloma epruveta legura titana podvrgnutih dejstvu zateznog i udarnog opterećenja, kao i nakon određivanja parametara mehanike loma. Rezultati fraktografske analize su dali uvid u mehanizam loma i ponašanje ispitivanih legura pri lomu pod dejstvom statičkog, udarnog i promenljivog opterećenja. Posebno su izdvojeni rezultati modelovanja i proračuna žilavosti loma obe ispitivane legure u stanju nakon izvršene termičke ili termomehaničke obrade primenom CGM modela lokalnog pristupa u analizi nastanka duktilnog loma i primenom lokalnog pristupa u analizi početka i stabilnog rasta prsline. Osim toga, posebno su izdvojeni i rezultati predviđanja žilavosti loma obe ispitivane legure primenom različitih mikromehaničkih modela. Bitno je istaći da su osim rezultata opsežnih ispitivanja legura Ti-6Al-4V ELI i Ti-13Nb-13Zr dobijenih primenom konvencionalnih metalurških procesa prikazani i rezultati uspešne primene HPT postupka u izradi sitnozrnih legura, kao i rezultati ispitivanja mikrostrukturnih karakteristika, zateznih svojstava i mehanizama loma HPT deformisanih legura.

Posebni deo disertacije čini *Diskusija* dobijenih rezultata. Po svojoj strukturi diskusija u potpunosti prati prikaz rezultata istraživanja. Shodno tome, u okviru ovog dela disertacije je prikazana uporedna analiza rezultata ostvarenih tokom izrade disertacije, kao i uporedna i kritička analiza postignutih rezultata i rezultata dostupnih u savremenoj naučnoj literaturi. U prvom redu sagledan je razvoj mikrostrukture i uticaj parametara termičke i termomehaničke obrade, kao klasičnih metalurških procesa, i parametara HPT deformacije, kao savremenog postupka obrade metalnih materijala, na morfološke karakteristike mikrostrukture ispitivanih legura titana. Zatim je dat kritički osvrt na činjenicu da u određenim uslovima dato mikrostrukturno stanje obezbeđuje superiornost pojedinih svojstava, a u isto vreme nepovoljno utiče na ostala svojstva što predstavlja ozbiljnu poteškoću pri izboru optimalne mikrostrukture legure. Zbog toga je posebno razmatran uticaj mikrostrukturnih parametara ispitivanih legura titana na otpornost ovih legura prema habanju, trenju i koroziji, kao i uticaj mikrostrukture legura na njihova mehanička svojstva i mehaniku loma. Analizi uticaja mikrostrukturnih konstituenata na brzinu i mehanizam makro i mikro habanja posvećena je posebna pažnja, a pažljivo je razmatran i uticaj prisustva Ringer-ovog rastvora u zoni kontakta tribološkog para na mikrotribološke karakteristike komercijalne legure. Razmatranje uticaja morfologije mikrostrukture ispitivanih legura titana na njihovu spontanu oksidaciju u fiziološkom rastvoru i njihovo ponašanje pri anodnoj polarizaciji izloženo je sa posebnom pažnjom. Kao poseban segment diskusije data je i korelacija ponašanja ispitivanih legura pri habanju i koroziji, što je od izuzetnog značaja za buduću primenu ovih legura u medicinske svrhe. Uporedna analiza uticaja mikrostrukturnih karakteristika na mehanička svojstva i parametre mehanike loma odabranih legura titana $\alpha+\beta$ i β tipa data je na osnovu tvrdoće, zateznih karakteristika, udarne žilavosti, brzine rasta zamorne prsline i određenih parametara žilavosti loma (kritične vrednosti $CTOD$ i kritičnog faktora intenziteta napona K_{Ic}). Poseban osvrt dat je na analizu numeričkog proračuna otpornosti prema lomu, nastanku prsline mehanizmom duktilnog loma i njenom stabilnom rastu, kao i na valjanost primenjenih mikromehaničkih modela u analizi žilavosti loma.

Na kraju disertacije izvedeni su *Zaključci* u kojima su koncizno i kritički izneti postignuti rezultati istraživanja i dat je spisak korišćene literature sa navodima radova proisteklih iz istraživanja u okviru ove doktorske disertacije.

3. OCENA DISERTACIJE

3.1 Savremenost, originalnost i značaj

Poboljšanje kvaliteta ljudskog života i produženje radnog i životnog veka čoveka osnovne su preokupacije modernog doba. Stoga je razvoj implantnih materijala za primenu u biomedicinskom inženjerstvu i izradu dugotrajnijih ortopedskih implanata, kao što su veštački kukovi ili zglobne proteze ramena i kolena, od izuzetnog značaja. Naime, funkcionisanje implanata hirurškim putem ugrađenih u ljudski organizam bez oštećenja i bez potrebe za revizionom hirurškom intervencijom, kao i razvoj implantnih materijala sa ciljem produženja radnog veka medicinskih implanata i poboljšanja kvaliteta života pacijenta, osnovna je težnja razvoja savremenih biokompatibilnih metalnih materijala.

Pored dobrih mehaničkih karakteristika, bolje otpornosti prema habanju i trenju, veće korozione postojanosti i otpornosti prema zamoru i prslinama; biomehanička kompatibilnost i osteointegracija materijala implanata su važni kriterijumi njihove upotrebljivosti u ortopedskoj hirurgiji. Najveći problem pri ugradnji implanta predstavlja njegov modul elastičnosti koji treba da je što približniji modulu elastičnosti ljudske kosti kako kost koja je u dodiru sa ugrađenim implantom ne bi trpela strukturna oštećenja. Komercijalna legura Ti-6Al-4V u poređenju sa drugim metalnim implantnim materijalima (nerđajući čelici, Co-Cr-Mo legure) se odlikuje znatno manjim modulom elastičnosti, koji je 4-10 puta veći od modula elastičnosti ljudske kosti. S obzirom na to da je uz bolja mehanička, koroziona i tribološka svojstva poželjnija još niža vrednost modula elastičnosti, vrše se istraživanja u dva pravca. S jedne strane, razvoju novih legura titana se poklanja izuzetna pažnja. Pojavile su se legure Ti-Nb-Zr (TNZ) i Ti-Nb-Zr-Ta (TNZT) β tipa, čija biokompatibilnost i mali modul elastičnosti prevazilaze ova svojstva najviše eksploatisane legure titana Ti-6Al-4V. Pri tome je legura Ti-13Nb-13Zr od posebnog interesa za biomedicinsku primenu, jer se razvojem ove legure postigao najveći efekat u pogledu smanjenja modula elastičnosti. Međutim, postizanje optimalne vrednosti modula elastičnosti legura titana je i dalje od primarnog interesa. S druge strane, istraživanja koja bi omogućila poboljšanje svojstava komercijalne legure Ti-6Al-4V još uvek su veoma aktuelna, jer ponašanje legure pri izlaganju agresivnoj korozivnoj sredini, u uslovima trenja i promenljivog opterećenja veoma zavisi od mikrostrukturnog stanja.

Novija istraživanja su pokazala da se pored optimizacije parametara konvencionalnih postupaka izrade i prerade implantnih materijala dalje poboljšanje funkcionalnih svojstava legura titana može postići uvođenjem novih tehnoloških postupaka dobijanja sitnozrne mikrostrukture. U literaturi ima podataka o ispitivanju mehaničkih svojstava (čvrstoće, plastičnosti i otpornosti na zamor) materijala proizvedenih različitim SPD postupcima. Pri tome se većina tih istraživanja odnosi na čiste metale i jednofazne (model) legure. O dobijanju višefaznih legura primenom SPD postupaka nema mnogo podataka. Tako je od legura titana ispitivana uglavnom legura Ti-6Al-4V. Međutim, podataka o modulu elastičnosti implantnih legura titana sitnozrne mikrostrukture nema.

Iako su vršena brojna istraživanja mehaničkih, korozivnih i triboloških svojstava implantnih legura titana ona i dalje ne gube na aktuelnosti, jer da bi se ispunio zahtev u pogledu potpunog iskorišćenja svojstava implanta ugrađenog u ljudski organizam neophodno je poznavati njegovo ponašanje pri opterećenju u određenim uslovima korozivne sredine. To zahteva detaljnu analizu uticaja kako pojedinih faktora tako i

njihovog međudejstva, što podrazumeva određivanje otpornosti prema trenju, habanju i koroziji, opštih mehaničkih svojstava i parametara mehanike loma zavisno od uticajnih faktora uz poznavanje mehanizama oštećenja koja dovode do degradacije i prevremenog loma implanta. Ovako složen zadatak se ne može izvesti bez detaljnih eksperimentalnih istraživanja i modelovanja posebno za svaku leguru titana uzimajući u obzir njen hemijski sastav, način izrade i naknadne prerade.

U ovoj doktorskoj disertaciji je izvedena takva sveobuhvatna analiza otpornosti prema oštećenju i lomu komercijalne legure Ti-6Al-4V ELI kvaliteta i legure Ti-13Nb-13Zr nove generacije u uslovima koji simuliraju uslove i opterećenja prisutna u ljudskom organizmu. Odabrane legure su podvrgnute različitim uslovima termičke odnosno termomehaničke obrade kako bi se sagledala optimalna mikrostruktura, koja uz što bolju otpornost prema koroziji i habanju obezbeđuje minimalni modul elastičnosti i zadovoljavajuću otpornost prema rastu prsline i lomu. Izborom odgovarajućih parametara konvencionalne termomehaničke obrade dobijena je martenzitna mikrostruktura, koja obezbeđuje najmanji do danas poznati modul elastičnosti legure Ti-13Nb-13Zr uz slabija mehanička i tribološka svojstava u odnosu na leguru Ti-6Al-4V ELI, ali zadovoljavajuća za datu namenu. Osim toga, oksidni filmovi koji se stvaraju na površini ove legure u kontaktu sa fiziološkim rastvorom omogućava bržu osteointegraciju. Znatno viši nivo čvrstoće i uporediva plastičnost uz izvesno pogoršanje biokompatibilnosti je, pak, postignut HPT postupkom plastične deformacije koji nije našao veću primenu u dobijanju legura titana zbog njiove male deformabilnosti, iako se primenom ovog postupka može postići veći efekat nego drugim SPD postupcima. Prvi put HPT postupak je primenjen u ovoj disertaciji za izradu legure Ti-13Nb-13Zr čime je pokazano da se pravilnim izborom parametara HPT postupka i polazne mikrostrukture legura može dobiti implantni materijal izuzetne kombinacije mehaničkih svojstava. To se potvrdilo i na primeru legure Ti-6Al-4V ELI gde je usitnjavanjem mikrostrukture postignuta bolja kombinacija čvrstoće i plastičnosti uz gotovo dva puta manji modul elastičnosti.

Takođe, u ovoj doktorskoj disertaciji je primenjen CGM model lokalnog pristupa duktilnom lomu u numeričkoj analizi početka rasta prsline i njenog stabilnog rasta, koji se uglavnom koristi u numeričkim proračunima otpornosti prema lomu čelika i legura aluminijuma, i pokazano je da se ovim modelom bez eksperimentalnog određivanja kritične vrednosti parametra oštećenja sa odgovarajućom veličinom KE i uzimanjem u obzir zastupljenost krtog loma može opisati ponašanje pri lomu legura titana. Proverom valjanosti razvijenih mikromehaničkih modela za predviđanje žilavosti loma je pokazano da su modeli koji uzimaju u obzir samo mehaničke parametre neprihvatljivi. Osim toga, pojedini modeli koji obuhvataju i mikrostrukturne parametre su modifikovani u skladu sa eksperimentalno određenim uticajem koji ti parametri imaju na otpornost prema lomu legura titana.

3.2 Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U doktorskoj disertaciji je citirano 325 literaturnih navoda, koji su tokom izrade disertacije poslužili kao dobra teorijska osnova da se sagleda stanje u interesnim naučnim oblastima, formulišu ciljevi i smernice ispitivanja i prikaže aktuelnost odabrane problematike u naučnim krugovima. Autocitati, korišćeni tokom izrade i pisanja disertacije, posebno naglašavaju aktuelnost odabrane teme i ostvarenih rezultata istraživanja u svetu. Na osnovu svega navedenog, kao i na osnovu obrazloženja predložene teme doktorske disertacije, uočava se adekvatno poznavanje predmetne oblasti istraživanja i aktuelnog stanja u ovoj naučnoj oblasti u svetu.

3.3 Analiza primenjenih naučnih metoda i njihova adekvatnost za sprovedeno istraživanje

U toku istraživanja obuhvaćenih ovom doktorskom disertacijom, koja su imala za cilj ispitivanje otpornosti biokompatibilnih legura titana prema oštećenju i lomu, primenjen je veliki broj savremenih eksperimentalnih i numeričkih naučno-istraživačkih metoda.

Za ispitivanje su odabrane dve legure titana: Ti-6Al-4V legura ELI kvaliteta i nekomercijalna legura Ti-13Nb-13Zr. Obe legure su izrađene konvencionalnim tehnološkim postupkom, koji je podrazumevao dobijanje legure nove generacije željenog sastava metodom topljenja i livenja, ali i termičku obradu legure Ti-6Al-4V ELI i termomehaničku preradu legure Ti-13Nb-13Zr. Osim toga, ispitivane legure su podvrgnute i savremenom SPD postupku tokom kojeg je primenom HPT metode uspešno dobijena sitnozrna mikrostruktura obe legure.

Za ispitivanje mikrostrukture legura titana u stanju nakon konvencionalnog postupka izrade, ali i za određivanje gubitka materijala do kojeg dolazi usled habanja tokom makro triboloških ispitivanja legura merenjem širine traga habanja obrazovanog na kontaktnoj površini bloka primenjena je svetlosna mikroskopija (SM). U cilju određivanja relevantnih geometrijskih parametara mikrostrukture i proračuna udela faza prisutnih u mikrostrukтури ispitivanih legura izvršena je stereološka analiza korišćenjem „Leica Application Suite v3.4“ programskog paketa i primenom linearne metode pri različitim uvećanjima svetlosnog mikroskopa. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM) je primenjena kako bi se izvršila mikrostrukturna karakterizacija ispitivanih legura u stanju nakon konvencionalnog i HPT postupka izrade. Osim toga, SEM analiza je primenjena pri ispitivanju tragova habanja nastalih na kontaktnoj površini bloka tokom makro i mikro triboloških ispitivanja kako bi se odredio mehanizam habanja legura, ali i ispitivanje morfologije preloma i određivanje mehanizma loma tokom ispitivanja mehaničkog ponašanja legura pod dejstvom statičkog, udarnog i promenljivog opterećenja.

Difrakcija rendgenskih zraka (*engl.* x-ray diffraction, XRD) je primenjena kako bi se izvršila identifikacija faza prisutnih u mikrostrukтури ispitivanih legura u stanju nakon konvencionalnog i HPT postupka izrade, ali i da bi se definisala priroda produkata habanja nastalih tokom triboloških ispitivanja i priroda površinskih slojeva nastalih kao posledica korozionih ispitivanja legura.

Makro tribološka ispitivanja legura su izvršena upotrebom kompjuterski podržanog tribometra „blok–disk“ kontaktne geometrije u prisustvu Ringer-ovog rastvora na sobnoj temperaturi, dok je merenjem mikrotvrdoće po Vickers-u (HV_m) određeno u kojoj meri uslovi makro habanja utiču na dubinu prostiranja plastično deformisanog sloja u površinskoj zoni bloka neposredno ispod traga habanja. Mikro tribološka ispitivanja su izvedena na kompjuterski vođenom nanotribometru sa „kuglica-blok“ kontaktnom geometrijom u uslovima sa i bez prisustva Ringer-ovog rastvora na sobnoj temperaturi.

Potenciodinamička elektrohemijska metoda i metoda spektroskopije elektrohemijske impedancije (SEI) su primenjene kako bi se ispitala koroziona postojanost ispitivanih legura u sredini koja simulira uslove prisutne u ljudskom organizmu zavisno od mikrostrukturnog stanja konvencionalno izrađenih legura i kako bi se odredili elektrohemijski parametri, priroda i karakteristike oksidnih slojeva prisutnih na korodiranoj površini ispitivanih legura.

U cilju određivanja uticaja parametara termičke i termomehaničke obrade, kao i HPT prerade, na mikrostrukturna i mehanička svojstva biokompatibilnih legura titana izvršena su brojna ispitivanja koja su bila u potpunoj saglasnosti sa važećim standardima. Tvrdoća je određena primenom metode po Vickers-u (HV). Zatezne karakteristike legura ispitane su jednoosnim zatezanjem na servohidrauličkoj kitalici sa računarskom konzolom za akviziciju podataka i sistemom za numeričku analizu i 3D optičko merenje i

modelovanje deformacionog polja. Metodom digitalne stereometrije je izvršena precizna analiza ponašanja ispitivanih legura na mikro nivou tokom zateznih ispitivanja i ispitivanja žilavosti loma čime je detaljno analizirano naponsko stanje i stanje deformacija i određena raspodela stvarne deformacije tokom svakog trenutka ispitivanja. Ponašanje konvencionalno izrađene legure Ti-6Al-4V ELI pri udarnom dejstvu sile ispitano je određivanjem udarne žilavosti legure na instrumentiranom Šarpi klatnu.

Ispitivanje mehanike loma konvencionalno izrađene legure Ti-6Al-4V ELI je obuhvatalo određivanje brzine rasta zamorne prsline (da/dN) u zavisnosti od opsega faktora intenziteta napona (ΔK) metodom savijanja u tri tačke standardnih Šarpi epruveta sa početnom prslinom na rezonantnom visokofrekventnom pulzatoru, kao i određivanje žilavosti loma merenjem otvaranja prsline (COD) u kontroli pomeranja na servohidrauličkoj kidalici tokom čega je primenjen postupak merenja neposrednog otvaranja vrha prsline (δ_5) i proračuna vrednosti COD na ustima prsline ($CMOD$) dok je merenje vršeno kontaktnom metodom i beskontaktnom stereometrijskom metodom definisanja 3D prostornog polja pomeranja na površinskoj mreži u području vrha prsline. Primenom modifikovane metode normalizacije je, tokom ispitivanja parametara mehanike loma, direktno određena kriva otpornosti prema rastu prsline ($CTOD-R$). Ispitivanje žilavosti loma konvencionalno izrađene legure Ti-13Nb-13Zr je izvedeno na epruvetama za savijanje u tri tačke različitih dimenzija korišćenjem servohidrauličke kidalice. Makroskopska karakterizacija prelomne površine epruveta za ispitivanje žilavosti loma izvršena je primenom stereo svetlosne mikroskopije (SSM).

Nastanak i razvoj duktilnog loma konvencionalno izrađenih legura modelovan je primenom CGM modela, a proračuni MKE su urađeni u programskom paketu ABAQUS. Modelovanje žilavosti loma primenom različitih mikromehaničkih modela je izvedeno kako bi se odredio uticaj mikrostrukturnih promena, nastalih tokom termičke i termomehaničke obrade, na otpornost ispitivanih legura prema rastu prsline.

3.4 Ocena primenljivosti i verifikacije ostvarenih rezultata

Rezultati, koji su ostvareni tokom izrade doktorske disertacije a koji su jednim delom svoju potvrdu već našli objavljivanjem u različitim naučnim časopisima, ukazuju na izuzetan značaj multidisciplinarnog pristupa u izradi biokompatibilnih metalnih medicinskih implanata. Zaključci i rezultati izneti u doktorskoj disertaciji ukazuju na značajan doprinos ove disertacije u razvoju biometalnih materijala za izradu dugotrajnijih ortopedskih zglobnih implanata. Evidentan uticaj hemijskog sastava i načina prerade legure titana na njegove mikrostrukturne karakteristike, a samim tim i na mehanička, koroziona i tribološka svojstva, prikazan je kroz mnogobrojne rezultate disertacije. S druge strane, uspešna numerička analiza nastanka duktilnog loma i modelovanje žilavosti loma ispitivanih legura titana pruža dalju mogućnost poboljšanja otpornosti prema oštećenju i lomu komercijalnih implantnih legura titana i legura nove generacije kroz projekciju njihovih mikrostrukturnih karakteristika.

Verifikacija rezultata je potvrđena objavljivanjem radova u međunarodnim časopisima i na uskostručnim naučnim skupovima i konferencijama međunarodnog značaja.

3.5 Ocena sposobnosti kandidata za samostalan naučni rad

Mr Ivana Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije, je na osnovu dosadašnjih istraživanja u okviru većeg broja domaćih i međunarodnih naučno-istraživačkih projekata, objavila 30 radova u naučnim knjigama, međunarodnim i nacionalnim časopisima različitih kategorija i saopštila veliki broj radova na naučnim skupovima međunarodnog i nacionalnog značaja koji su štampani u celini ili u izvodu. Naučni radovi su do sada

citirani 57 puta, ne računajući autocitate svih autora (izvor Scopus), što govori o kvalitetu objavljenih rezultata i aktuelnosti realizovanih istraživanja.

Imajući u vidu dosadašnji istraživački i stručni rad mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić, dipl. inž. tehnologije, može se zaključiti da je ona samostalan i inventivan istraživač, koji kompetentno i na visokom naučnom nivou rešava probleme kako iz oblasti hemijskog inženjerstva tako i iz oblasti inženjerstva materijala. Tokom izrade doktorske disertacije mr Ivana Lj. Cvijović-Alagić je ispoljila izuzetnu stručnost, samostalnost, sistematičnost i kreativnost, što se oslikava i u izuzetnoj analizi dobijenih rezultata. Na osnovu dosadašnjeg zalaganja i postignutih rezultata Komisija je mišljenja da mr Ivana Lj. Cvijović-Alagić poseduje sve kvalitete neophodne za samostalni naučno-istraživački rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

4.1 Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Ostvareni naučni doprinos doktorske disertacije "Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini" je višestruk:

- osnovni naučni doprinos multidisciplinarnih istraživanja objedinjenih ovom disertacijom jeste sistematski prikaz i potpuno razumevanje ponašanja ispitivanih biokompatibilnih legura titana pod dejstvom spoljnog opterećenja u uslovima koji simuliraju uslove prisutne u ljudskom organizmu;
- poseban naučni doprinos disertacije predstavlja uspešna primena savremene HPT metode prerade metalnih materijala, kojom je po prvi put uspešno izvršeno dobijanje nanočestičnih legura titana poboljšane biokompatibilnosti s obzirom da je HPT preradom komercijalne legure Ti-6Al-4V ELI i legure Ti-13Nb-13Zr nove generacije postignuto poboljšanje njihovih zateznih svojstava;
- primenom termomehaničke obrade postignuta je martenzitna mikrostruktura legure Ti-13Nb-13Zr čime je obezbeđena njena poboljšana biokompatibilnost i znatno niži modul elastičnosti, koji je po svojoj vrednosti najpribližniji modulu elastičnosti ljudske kosti od svih do sada korišćenih metalnih implantnih materijala;
- uspešno je primenjena modifikovana metoda normalizacije za direktno određivanje krive otpornosti prema rastu prsline legura titana, kao i metoda digitalne stereometrije i trodimenzionalne optičke analize i modelovanja deformacionog polja u materijalu tokom ispitivanja mehaničkih svojstava, sa ciljem što jednostavnijeg uočavanja najslabijeg mesta u implantu na kojem bi moglo doći do nastanka oštećenja i loma;
- rezultati ispitivanja triboloških karakteristika legura titana na mikro nivou korišćenjem nanotribometra pri opterećenjima koja odgovaraju opterećenjima prisutnim u veštačkom zglobovima tokom ciklusa hodanja imaju fundamentalan značaj u razumevanju nastanka i razvoja oštećenja i mehanizama habanja koje se javlja na površini kontaktnog para veštačkog zgloba;
- modifikovanje postojećih mikromehaničkih modela za predviđanje vrednosti žilavosti loma biokompatibilnih legura titana, kao i primena CGM modela za numeričku analizu početka i razvoja duktilnog loma, koji do sada nije primenjivan za modelovanje ponašanja legura titana u čijoj su mikrostrukturi prisutne meke faze.

4.2 Kritička analiza rezultata

Na osnovu definisanih ciljeva istraživanja određena je metodologija ispitivanja koja je primenjena u doktorskoj disertaciji. S obzirom na složenost problematike, primenjen je veliki broj metoda istraživanja. Metode korišćene za karakterizaciju mikrostrukturnih, mehaničkih, korozionih i triboloških svojstava ispitivanih legura u skladu su sa postojećim i važećim standardima, a matematički modeli korišćeni za opis razvoja duktilnog loma i žilavosti loma ispitivanih legura su u skladu sa savremenim metodama opisanim u literaturi. Uvidom u dostupnu literaturu iz oblasti biokompatibilnih implantnih metalnih legura i ostvarenih rezultata istraživanja prikazanih u disertaciji može se primetiti da je modifikacijom hemijskog sastava i parametara izrade i prerade legura titana ostvareno značajno poboljšanje u njihovoj biokompatibilnosti i otpornosti prema oštećenju i lomu.

4.3 Očekivana primena rezultata u praksi

Osnovna primena legura titana $\alpha+\beta$ i β tipa, ispitivanih i razvijanih tokom realizacije istraživanja u okviru rada na izradi doktorske disertacije, je izrada ortopedskih zglobnih implanata. Osim izrade veštačkog zgloba kuka, ramena i kolena ispitivane legure titana, pre svega legura Ti-13Nb-13Zr nove generacije i nanočestične legure proizvedene HPT postupkom, svoju primenu mogu naći i u oralnoj hirurgiji za izradu dentalnih implanata.

4.4 Verifikacija rezultata u časopisima i saopštenjima na konferencijama

Iz rada na ovoj disertaciji proisteklo je objavljivanje jednog poglavlja u istaknutoj monografiji međunarodnog značaja (M13), dva rada u vrhunskim međunarodnim časopisima (M21), jednog rada u časopisu međunarodnog značaja (M23), jednog rada na skupu međunarodnog značaja štampanog u celini (M33), jednog rada objavljenog u vodećem časopisu nacionalnog značaja (M51), tri rada u naučnim časopisima (M53), a dato je i tri saopštenja na međunarodnim skupovima koja su publikovana u vidu izvoda (M34).

Monografska studija/poglavlje objavljeni u knjizi M11 (Istaknuta monografija međunarodnog značaja) ili rad objavljen u tematskom zborniku vodećeg međunarodnog značaja (M13)

1. Milan T. Jovanović, Ivana Cvijović-Alagić, „Chapter 11: Microstructure and Mechanical Properties of Investment Cast Ti-6Al-4V and γ -TiAl Alloys”, ***Titanium Alloys: Preparation, Properties and Applications***, Editor: Pedro N. Sanchez, Nova Science Publishers Inc., NY, **ISBN**: 978-1-60876-151-7, 2010.

Radovi objavljeni u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21)

1. I. Cvijović-Alagić, Z. Cvijović, S. Mitrović, M. Rakin, Đ. Veljović, M. Babić, „Tribological Behaviour of Orthopaedic Ti-13Nb-13Zr and Ti-6Al-4V Alloys“, ***Tribology Letters***, 40 (1) (2010) 59-70, **ISSN**: 1023-8883, IF (2010) = 1,574.
2. I. Cvijović-Alagić, Z. Cvijović, S. Mitrović, V. Panić, M. Rakin, „Wear and corrosion behaviour of Ti-13Nb-13Zr and Ti-6Al-4V alloys in simulated physiological solution“, ***Corrosion Science***, 53 (2) (2011) 796-808, **ISSN**: 0010-938X, IF (2011) = 3,734.

Radovi objavljeni u časopisu međunarodnog značaja (M23)

1. F. Živić, M. Babić, I. Cvijović-Alagić, S. Mitrović, A. Vencl, „Wear Behaviour of Ti6Al4V Alloy against Al_2O_3 under Linear Reciprocating Sliding“, ***Journal of the Balkan Tribological Association***, 17 (1) (2011) 27-36, **ISSN**: 1310-4772, IF (2011) = 0,158.

Radovi saopšteni na skupovima međunarodnog značaja štampani u celini (M33)

1. F. Živić, S. Mitrović, M. Babić, I. Cvijović-Alagić, "Application of Tribometry in Investigations of Biomaterials", **11th International Conference on Tribology – SERBIATRIB '09**, Beograd, Srbija, 13.-15. maj 2009, Proceedings, pp. 301-306.

Radovi saopšteni na međunarodnim konferencijama štampani u izvodima (M34)

1. I. Cvijović-Alagić, Z. Cvijović, F. Živić, K. Gerić, M. Rakin, "Nano-Scale Tribological Investigation of Ti-6Al-4V Alloy for Orthopedic Applications", **Euro BioMat 2011 - European Symposium on Biomaterials and Related Areas**, Jena, Germany, 13.-14. April 2011. The Book of Abstracts.
2. I. Cvijović-Alagić, M. Rakin, Z. Cvijović, N. Gubeljak, K. Gerić, Microstructural Effects on the Mechanical Properties and Tribological Damage of Ti-6Al-4V Alloy, **International Conference on Damage Mechanics (ICDM 2012)**, Belgrade, Serbia, 25 – 27 June 2012. The Book of Abstracts.
3. Ivana Cvijović-Alagić, Marko Rakin, Zorica Cvijović, Reinhard Pippan, Characterization of nanostructured Ti-6Al-4V alloy produced by high-pressure torsion, **NanoBelgrade 2012**, Belgrade, Serbia, 26-28 September, 2012. The Book of Abstracts.

Radovi objavljeni u vodećim časopisima nacionalnog značaja (M51)

1. I. Cvijović-Alagić, S. Mitrović, Z. Cvijović, Đ. Veljović, M. Babić, M. Rakin, „Influence of the Heat Treatment on the Tribological Characteristics of the Ti-based Alloy for Biomedical Applications“, **Tribology in Industry**, 30 (3-4) (2009) 16-21, ISSN: 0351-1642.

Radovi objavljeni u naučnim časopisima (M53)

1. M.T. Jovanović, B. Lukić, Z. Mišković, I. Bobić, I. Cvijović, B. Dimčić, „Processing and some applications of nickel, cobalt and titanium-based alloys“, **Metallurgija – Journal of Metallurgy (MJoM)**, 13 (2) (2007) 91-106, ISSN: 0354-6306.
1. I. Cvijović-Alagić, M. Rakin, „Integritet medicinskih implanata od legura titana (prvi deo) / Integrity of Biomedical Implants of Titanium Alloys (First Part)“, **Integritet i vek konstrukcija – Structural Integrity and Life**, 8 (1) (2008) 31-40, ISSN: 1451-3749.
2. I. Cvijović-Alagić, M. Rakin, „Integritet medicinskih implanata od legura titana (drugi deo) / Integrity of Biomedical Implants of Titanium Alloys (Second Part)“, **Integritet i vek konstrukcija – Structural Integrity and Life**, 8 (2) (2008) 121-130, ISSN: 1451-3749.

5. ZAKLJUČAK

5.1 Kratak osvrt na disertaciju u celini

Na osnovu napred izloženog, Komisija smatra da podneta doktorska disertacija mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić pod nazivom **"Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini"** u potpunosti ispunjava sve neophodne uslove za doktorsku disertaciju. U disertaciji su sistematično prikazani rezultati opsežnih multidisciplinarnih istraživanja implantnih materijala na bazi titana, koja su obuhvatila: (a) projektovanje hemijskog sastava materijala i načina njihovog dobijanja, (b) izbor režima termičke i termomehaničke obrade polaznog materijala, (c) definisanje parametara savremenog postupka izrade nanočestičnih materijala, (d) potpunu karakterizaciju mikrostrukture odabranih legura u različitom stanju, (e) utvrđivanje elektrohemijskog i ponašanja pri habanju i trenju u korozionoj sredini, (f) određivanje tvrdoće, zateznih

karakteristika, udarne žilavosti i parametara mehanike loma, (g) fraktografsku analizu nastalih oštećenja i površine preloma, (h) numeričke proračune otpornosti prema oštećenju i lomu primenom MKE i (i) primenu modifikovanih mikromehaničkih modela za predviđanje žilavosti loma. Rezultati ove doktorske disertacije predstavljaju značajan doprinos razvoju novih legura titana i ispitivanjima otpornosti prema oštećenju i lomu implantnih legura titana, što je od primarnog značaja za njihovu buduću primenu u medicini. Originalni naučni doprinos disertacije u oblasti inženjerstva materijala predstavlja i uspešna primena metode jakog plastičnog deformisanja u izradi nanočestičnih legura titana. Osim toga, izuzetan doprinos doktorske disertacije pod nazivom "**Otpornost prema oštećenju i lomu legura titana za primenu u medicini**" budućoj medicinskoj primeni ispitivanih legura titana svakako predstavlja i uspešna numerička analiza nastanka duktilnog loma legure Ti-6Al-4V ELI i elasto-plastični proračun početka rasta prsline legure Ti-13Nb-13Zr primenom CGM modela.

5.2 Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću

Imajući u vidu kvalitet, obim i naučni doprinos ostvarenih rezultata Komisija sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu da prihvati ovaj Izveštaj i da ga, zajedno sa podnetom doktorskom disertacijom mr Ivane Lj. Cvijović-Alagić, da na uvid javnosti, a nakon toga pozove kandidata na usmenu odbranu doktorske disertacije pred Komisijom u istom sastavu.

U Beogradu, 14.12.2012.

ČLANOVI KOMISIJE

1. _____
Dr Marko Rakin, vanredni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u
Beogradu, mentor
2. _____
Dr Radoslav Aleksić, redovni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u
Beogradu
3. _____
Dr Aleksandar Sedmak, redovni profesor
Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
4. _____
Dr Nenad Gubeljak, redovni profesor
Mašinski fakultet, Univerzitet u Mariboru,
Slovenija
5. _____
Dr Nenad Radović, vanredni profesor
Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u
Beogradu