

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

Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu održanoj 17.03.2011. godine određeni smo za članove Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije pod nazivom **MODELOVANJE PROCESA OČVRŠĆAVANJA KLIPNIH LEGURA SA UNAPRED ZADATIM SVOJSTVIMA**, kandidata Mr Srečka R. Manasijevića, dipl. ing. metalurgije. Nakon pregleda doktorske disertacije, Komisija podnosi Nastavno-naučnom veću TMF Beograd sledeći

**IZVEŠTAJ
o urađenoj doktorskoj disertaciji**

1. UVOD

Naslov i obim disertacije

Doktorska disertacija kandidata Mr Srečka R. Manasijevića pod naslovom: **"Modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima"** je napisana na 158 strana formata A4, sadrži 174 slika, 29 tabela i 115 literaturnih navoda. Sadržaj teze je izražen kroz uobičajenu standardnu strukturu: Izvod (na srpskom i engleskom jeziku), Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultati i diskusija, Zaključak, Literatura i Prilog.

Hronologija odobravanja i izrade disertacije

- 06.12.2006. godine, kandidat Mr Srečko R. Manasijević prijavio je doktorsku disertaciju na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu.
- 28.12.2006. godine, odlukom Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu određena je Komisija za ocenu naučne zasnovanosti teme koju je predložio kandidat
- 01.07.2010.godine - sednica Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu na kojoj je doneta Odluka o odobravanju predloga teme doktorske disertacije Mr Srečka R. Manasijevića, dipl.ing. pod nazivom: **"Modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima"**; za mentora ove doktorske disertacije imenovana je dr Zagorka Aćimović-Pavlović, vanr.prof.
- 08.07.2010. godine- sednica Veća naučnih oblasti Tehničkih nauka (Univerzitet u Beogradu), na kojoj je data saglasnost na predlog teme doktorske disertacije Mr Srečka R. Manasijevića, pod nazivom: **"Modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima"**.
- 17.03.2011. -sednica Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu na kojoj je doneta odluka o imenovanju članova Komisije za ocenu i odbranu doktorske disertacije Mr Srečka R. Manasijevića.

Mesto disertacije u odgovarajućoj naučnoj oblasti

Doktorska disertacija pripada naučnoj oblasti metalurgija za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu.

Biografski podaci o kandidatu

Mr Srečko R. Manasijević, dipl.ing. metalurgije je rođen 1974. godine u mestu Dukat-Bosilegrad, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju. Školske 1994/95 upisao je Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, smer metalurško inženjerstvo i diplomirao je 2001. godine. Tokom studija stručnu praksu obavio je u Nemačkoj, Institut für Metallurgie, TU Clausthal u okviru projekta „*Formfüllmechanismen beim Lost-Foam-Gießen*“ (Mehanizam popunjavanja kalupa kod livenja sa isparljivim modelima).

Magistarski rad pod nazivom: *"Razvoj novih klipnih legura primenom savremenih softverskih paketa za simulaciju procesa livenja i očvršćavanja"* odbranio je 2006. godine na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu. Mentor za izradu rada bila je dr Zagorka Aćimović-Pavlović, vanr. prof. TMF Beograd. Naučna oblast magistarskog rada je metalurgija za koju je matičan Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu.

Po diplomiranju zaposlio se u HK "Petar Drapšin" Mladenovac, Tehničkom sektoru Fabrike cilindarskih sklopova. Rad u industriji probudio mu je interesovanja iz oblasti razvoja novih materijala upotrebom softverskih paketa, tako da je ova istraživanja nastavio kroz magistarske studije i svoju magistarsku tezu, a kasnije i doktorsku disertaciju.

Ispred Koncerna PDM, tj. Fabrike cilindarskih sklopova vodio je nekoliko projekata iz oblasti razvoja i osvajanja metoda livenja klipova, bio je u timu za uvođenje standarda ISO 9001:2000 i ISO 14000. U toku 2006/07. godine radio je u firmi Topola LIVAR (deo LIVAR grupacije) kao rukovodilac sektora razvoja.

Od 2007. do 2010. godine bio je stipendista doktorant Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, a sada radi u Institutu LOLA- Beograd i angažovan je na projektima koje finansira isto ministarstvo. Pored navedenog, deo je tima koji je osnovao udruženje Srpsko livačko društvo, tehnički je urednik časopisa LIVARSTVO, član je Saveza inženjera metalurgije Srbije.

2. OPIS DISERTACIJE

Struktura i sadržaj disertacije

Kratak prikaz pojedinačnih poglavlja

Doktorska disertacija Mr Srećka R. Manasijevića sadrži sedam celina: Uvod, Teorijski deo, Eksperimentalni deo, Rezultati i diskusija, Zaključak, Literatura i Prilog. Na početku disertacije dat je kratak izvod (na srpskom i engleskom jeziku), zatim uvod gde je istaknut značaj klipnih legura, problemi koji se javljaju tokom eksploatacije klipnih legura, termo-mehaničke karakteristike koje treba da ispunjavaju, definisanje različitih proizvodnih problema u cilju poznavanja i kontrole svakog segmenta procesa, kao i mogućnost modelovanja procesa očvršćavanja klipnih legura. Navedeni koncept predstavlja predmet istraživanja, a rešenja problema koji proizilaze i kojima se bavio kandidat, kao i rezultate koje je ostvario su osnovni motiv za izradu disertacije.

U *Teorijskom delu* disertacije izvršen je literaturni pregled predmetne oblasti i sistematizovani su podaci koji su objavljeni u stranoj i domaćoj literaturi. U prvom segmentu dat je kratak koncept analize motora SUS i klipova, osnovne karakteristike rada motora sa unutrašnjim sagorevanjem, funkcije klipa, rezultati ispitivanja i analiza uslova rada klipa u motoru, kao i analiza mogućih kvarova i havarija na klipovima.

U drugom segmentu dat je pregled razvoja klipnih legura, legura za izradu klipova i tipova klipova i materijala za *otto* i *diesel* motore, nove tehnologije razvoja klipova, kao i metode za površinsko poboljšanje karakteristika klipova (od konvencionalnih metoda do modifikacije površina mlazom plazme).

U trećem segmentu data je analiza uticaja relevantnih faktora na karakteristike klipnih legura i to: analiza uticaja legirajućih elemenata na osobine klipnih legura, uticaj pripreme tečne legure na osobine klipova, uticaj mikro i makro strukture na osobine klipnih legura, uticaj režima livenja i termičke obrade na osobine klipnih legura i uticaj strukture na termomehničke karakteristike klipnih legura.

U četvrtom segmentu dat je sistematizovan pregled dosadašnjih teorijskih i eksperimentalnih rezultata primene savremenih softverskih paketa za vizualizaciju, simulaciju i optimizaciju tehnoloških parametara livenja klipova. Ovde je prikazan ceo put razvoja klipova počev od izrade 3D modela klipa i alata za livenje klipova, primena softverskih paketa za optimizaciju tehnoloških parametara livenja (Access, MAGMASOFT®). U ovom delu prikazana je savremena metoda uspostavljanja optimalnih tehnoloških parametara livenja, termičke obrade i vizualizacija nastale mikrostrukture (mekanizam očvršćavanja klipne legure kao i simulacija očvršćavanja Access-om). Ovaj način osvajanja nove legure ima velike prednosti u odnosu na do sada korišćene konvencionalne načine.

Na početku u *Eksperimentalnom delu* disertacije iznete su preliminarne teze za istraživanje zasnovane na objavljenim rezultatima predhodnih istraživanja. Detaljno je opisana metodologija rada, definisane polazne hipoteze i naučne metode istraživanja i date su polazne ekperimentalne osnove u okviru ove doktorske disertacije. Za eksperimentalna istraživanja uzeto je više klipnih legura različitog hemijskog sastava kako bi se bolje pratilo i definisao proces očvršćavanja klipnih legura.

U drugom segmentu eksperimentalnog dela opisana je DTA analiza za svaku izabranu leguru. Izvršena je identifikacija faza i temperatura na kojoj se izdvajaju kako bi se definisali uslovi pod kojima se svaka faza izdvaja. Analizirane su klipne legure različitog hemijskog sastava kako bi se obezbedila dominantnost u izdvajanju i identifikaciji svih mogućih faza u navedenim legurama. Rezultati su prezentovani preko dijagrama i tabelarno.

U trećem segmentu opisana je optimizacija svih relevantnih tehnoloških parametara livenja za svaki odabrani hemijski sastav legure na osnovu raspoloživog softverskog paketa MAGMASOFT®, na konkretnom primeru odlivka klipa. Dobijeni rezultati optimizacije implementirani su u industrijskim uslovima na konkretnim primerima.

U četvrtom delu u okviru ekperimentalnih istraživanja prikazan je projektovani sistem za automatsko upravljanje režimima hlađenja u procesa livenja klipova na poluautomatskoj livnoj mašini kako bi se obezbedili kontrolisani uslovi očvršćavanja. Opisana je hardverska i softverska implementacija PLC-a u sistemu

automatskog upravljanja procesom. Rezultati kontinualnog merenja temperature na delovima alata za livenje klipova su sačuvani u bazi podataka i dostupni su za analizu procesa u bilo kom trenutku.

Takođe, u okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena je industrijska proba za svaki ispitivani hemijski sastav klipnih legura na određenom odlivku klipa. Livenje je vršeno na nekoliko različitih tipova klipova (monometalan klip, klip sa nosačem prstena i klip sa nosačem prstena i kanalom za hlađenje). Svi odlici ispitivanih klipova su termički tretirani po različitim režimima kako bi se izvršila analiza uticaja termičke obrade na mikro i makrostrukturu i termo-mehaničke karakteristike odlivka klipa.

U okviru eksperimentalnih ispitivanja vršeno je ispitivanje promene mehaničkih karakteristika na ispitivanim odlivcima klipova na radnim temperaturama (°C): 150, 200, 250, 300, 350 i 360 uz pomoć induktora koji simulira toplotni izvor u motoru. Praćene su temperaturne promene u klipu u svakom ciklusu rada motora. Dobijeni rezultati su detaljno analizirani u poglavlju rezultati i diskusija. Takođe, u okviru eksperimentalnih istraživanja izvršena su metalografska i fizičko-mehanička ispitivanja za svaki odlivak klipa.

U poglavlju *Rezultati i diskusija* izvršena je analiza dobijenih rezultata koja obuhvata analizu faznih dijagrama aluminijumskih klipnih legura, analizu sastava mikrokonstituenata. Za razvoj faznog dijagrama Al-Si-Cu-Ni-Mg neophodna je bila identifikacija svih faza, kao i uslova njihovog nastanka. Identifikacija nastalih faza i temperaturnih promena na kojima se dešavaju fazne transformacije urađena je u okviru eksperimentalnih istraživanja, a na osnovu dobijenih rezultata predložen je algoritam očvršćavanja i izvršena je analiza definisanih faznih dijagrama za četvoro- i petokomponentne sisteme. Analizirani su dobijeni rezultati očvršćavanja klipnih legura koje sadrže različite količine legirajućih elemenata.

U okviru ovog dela prikazana je analiza rezultata ispitivanja uticaja režima livenja i uticaja termičke obrade na mikro i makrostrukturu i termo mehaničke karakteristike ispitivanih odlivaka klipova. Prikazani su rezultati i izvršena je analiza dva različita režima hlađenja, tj. za dva vremena očvršćavanja (110 i 140 sec) na istom odlivku klipa kako bi se uspostavila korelacija između vremena očvršćavanja, nastale mikrostrukture i termo-mehaničkih karakteristika.

Na osnovu dobijenih rezultata sagledana je mogućnost modelovanja procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim karakteristikama. Detaljniji podaci prezentovani su u prilogu. Ovo bi trebalo da obezbedi, da se na osnovu zadatih karakteristika klipnih legura u svakom segmentu dela klipa koju zadaje konstruktor unapred predvidi proces očvršćavanja i definišu uslovi očvršćavanja.

Na osnovu prikazanih rezultata izveden je *Zaključak* u kome su koncizno izneti postignuti rezultati u istraživanju a koji odgovaraju postavljenim ciljevima disertacije.

Na kraju dat je spisak korišćene literature i prilozi.

3. OCENA DISERTACIJE

Savremenost, originalnost i značaj

Rezultati doktorske disertacije Mr Srećka R. Manasijevića predstavljaju značajan doprinos u razvoju i primeni savremenih softverskih paketa, tj. alata kojima se ubrzava osvajanje novih proizvoda, novih klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima. Obradene su faze rada: razvoj ideje, konstrukcije, izbor materijala i postupaka, različiti proračuni, simulacije, izrada prototipa, izrada odlivka, izrada klipne legure zadatih svojstava. Simulacija procesa očvršćavanja klipne legure primenom poznatih softverskih paketa ukazala je na prednosti i nedostatke procesa a cilj je bio da se izvrši optimizacija relevantnih tehnoloških parametara livenja. Ovim kompleksnim simulacionim modelom u jednom iterativnom postupku, projektovana je tehnologija, režimi i alati procesa livenja konkretnog odlivka, sagledane su potencijalne greške mikro i makrostrukture (poroznost, segregacija, zaostali naponi i slično). Tek na kraju, kada je pronađeno optimalno rešenje, izvršana su eksperimentalna istraživanja u industrijskim uslovima.

U industrijskim uslovima livenje klipova se izvodi na polu ili automatskoj mašini za livenje klipova, gde se vrši merenje temperature na odođenim segmentima alata u svakom trenutku u cilju kontrole, ali sistem za hlađenje nije potpuno automatizovan i sam proces hlađenja i očvršćavanja odlivka klipa nije potpuno kontrolisan. Ovim se ne obezbeđuju isti uslovi očvršćavanja za svaki odlivak klipa u kontinuitetu, čime se narušava kvalitet kontinuiteta. U saradnji sa LOLA Institutom Beograd izrađen je sistem automatske regulacije procesa hlađenja i očvršćavanja odlivaka klipova u cilju kontrole i obezbeđenja istih uslova očvršćavanja za svaki odlivak klipa u kontinuitetu. Razrađen je složen automatski sistem sa zadovoljavajućom hardveskom i softverskom podrškom kao neophodan uslov za automatsko upravljanje i kontrolu procesa očvršćavanja. Dobijeni rezultati tokom istraživanja, kao i poređenje sa podacima iz literature, ukazuju na to da su definisani parametri procesa livenja i očvršćavanja klipnih legura sa dobrom kombinacijom livačkih i mehaničkih svojstava, a rezultati se mogu primeniti na slične proizvodne pogone za izradu delova u automobilske industriji.

Osvrt na referentnu i korišćenu literaturu

U literaturnom pregledu doktorske disertacije navedeno je 115 literaturnih navoda u kojima je prikazan sistematizovan pregled dosadašnjih teorijskih, numeričkih i eksperimentalnih rezultata brojnih istraživanja mnogih istraživača, njihove polazne hipoteze, rezultati istraživanja, kao i nedostaci i komentari. Kandidat je koristio literaturu novijeg datuma iz tematike koja je od suštinskog značaja za izradu doktorske disertacije. U okviru ovih literaturnih navoda su i reference kandidata mr Srećka Manasijevića, koje su proistekle iz disertacije i objavljene u vodećim međunarodnim časopisima i saopštene na značajnim međunarodnim konferencijama čime je kandidat proširio do sada poznata saznanja o mogućnostima i primeni modelovanja procesa u proizvodnji novih klipnih legura.

Iz obrazloženja predložene teme doktorske disertacije i objavljenih radova u prijavi koju je kandidat podneo i popisa literature koju je koristio u istraživanju uočava se njegovo poznavanje predmetne oblasti istraživanja, kao i poznavanje aktuelnosti ovih istraživanja u svetu.

Analiza primenjenih naučnih metoda i njihova adekvatnost za sprovedeno istraživanje

Naučne metode korišćene u istraživanju i opisane u ovoj doktorskoj disertaciji primenjene su za karakterizaciju i ispitivanje strukture i svojstava klipnih legura. U istraživanjima odabrano je 9 različitih klipnih legura gde se sadržaj legirajućih elementa kreće u intervalu: 10.51-13.05 %Si, 1.12-7.45%Cu, 1.04-3.90%Ni, 0.50-1.35%Mg i 0.02-1.35%Fe, kako bi se za navedeno istraživanje obezbedilo dominantno izdvajanje svake ispitivane faze u strukturi. U realnom slučaju događa se promena srednjih koncentracija legirajućih elemenata usled redistribucije rastopa bogatog ili osiromašenog legirajućim elementima, što može dovesti do promene srednjih koncentracija znatno više ili manje od nominalne vrednosti i stvaranja uslova za formiranje novih faza. Svaka promena tokom celog procesa očvršćavanja (primarno, sekundarno i tercijalno) klipnih legura ima znatan uticaj na profile koncentracije legirajućih elemenata u čvrstoj fazi.

Da bi se odredile temperature na kojima dolazi do faznih transformacija kod ispitivanih klipnih legura korišćena je diferencijalna termička analiza (DTA). DTA analiza je postupak koji se često koristi pri analizi materijala pri kojoj se temperatura uzorka upoređuje sa temperaturom internog referentnog materijala pri zagrevanju ili hlađenju konstantnom brzinom. Fazne transformacije koje se odvijaju praćene su oslobađanjem ili apsorbovanjem toplote, tj. egzotermnim ili endotermnim efektima koji se uočavaju pri faznoj transformaciji, jer svaki fizičko-hemijski proces koji se odvija u uzorku praćen je dodatnom promenom entalpije. Ove promene se registruju uz pomoć DTA uređaja.

Međutim, za potpunu identifikaciju faza u mikrostrukturi odlivka klipa nije dovoljna samo DTA analiza, već je potrebna paralelna mikroskopska analiza i adekvatan izbor iste. Naprimera, primarni (Si) kristali i eutektikum vidljivi su optičkom mikroskopijom. Međutim identifikacija ostalih faza koje se javljaju u mikrostrukturi odlivaka klipova nije moguća optičkom mikroskopijom, jer je optički mikroskop ograničen talasnom dužinom vidljive svetlosti i povećanjem do maksimalno 1000x. Zato je u ovom slučaju korišćena elektronska mikroskopija, SEM u kombinaciji sa EPMA (electron probe microanalysis), jer se njihov princip rada zasniva pomoću snopa elektrona sa maksimalnim uvećanjem do milion puta.

U cilju optimizacije parametara procesa livenja korišćen je savremeni softverski paket MAGMASOFT®. Ovo je svestrani programski paket nove generacije, namenjen simulaciji livačkih procesa u tehnološko i kvalitetno orijentisanu proizvodnju, gde se diferencijalnim jednačinama opisuju složeni fizičko-hemijski procesi za svaki element diskretne strukture, uzimajući u obzir početne i granične uslove definisane kroz svojstva legure, parametre procesa livenja i 3D model geometrije odlivka. To je omogućilo nalaženje poboljšanja i optimizacije procesa livenja klipova, omogućilo je probu i testiranje različitih tehnoloških rešenja postupka livenja klipnih legura, čime su izbegnuta dugotrajna eksperimentalna istraživanja u praksi. Za potpunu automatizaciju i kontrolu procesa livenja i očvršćavanja klipnih legura primenjen je sofisticirani programibilni logički kontroler (PLC) koji je sa jedne strane direktno povezan sa elektronskim mernim pretvaračima fizičkih veličina karakterističnih za dati proces i izvršnim organima za upravljanje procesom sa druge strane.

Svi odlivci klipova ispitivanih klipnih legura podvrgnuti su termo-mehaničkim ispitivanjima. U cilju ispitivanja otpornosti na nagle temperaturne promene, tj. termošokove gotovi klipovi navedenih legura ispitivani su na naglim temperaturnim promenama. U čelu klipa postavljen je induktor sa vodenim hlađenjem, koji treba da simulira promenu temperature sagorevanja u toku rada. Klip je ubačen do visine ose otvora za osovinicu u vođeno kupatilo sa stalnim protokom. Ovim načinom simulirana je promena strukture i svojstava klipa pod dejstvom promene temperature tokom eksploatacije. Vršena je karakterizacija svih ispitivanih odlivaka klipova od merenja tvrdoće do metalografske analize mikrostrukture. Dobijeni rezultati ovih ispitivanja su detaljno analizirani i prezentovani u disertaciji.

Ocena primenljivosti i verifikacije ostvarenih rezultata

Na osnovu sinteze objavljenih literaturnih podataka iz ove oblasti, eksperimentalnih ispitivanja i dobijenih rezultata iz ovog rada, ostvaren je veliki doprinos u razvoju novog modela simulacije procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim karakteristikama kao i doprinos proširenju fundamentalnih znanja u razvoju modela koji će biti u stanju da na osnovu zahtevanih karakteristika, tj. zahtevane strukture klipnih legura predviđa uslove očvršćavanja u kojima se odvija proces livenja klipova.

Da bi se izvršilo modelovanje procesa očvršćavanja klipova, mora se dobro poznavati ceo proces, neophodno je dobro razumevanje svakog mehanizma kojim se odvija proces, dobro razumevanje i predviđanje mogućih problema i određivanje ciljeva. Svaki proces pa i proces livenja i očvršćavanja se modelira, predstavlja određenim parametrima procesa.

Ocena sposobnosti kandidata za samostalan naučni rad

Kandidat je magistar tehničkih nauka iz oblasti metalurgije, radio je u dve livnice na poslovima inženjera metalurga, a sada radi u Institutu Lola-Beograd na poslovima istraživača saradnika na projektima koje finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije. Dosadašnja istraživačka i stručna delatnost kandidata ogleda se u njegovom relativno bogatom iskustvu u radu u oblasti metalurgije, livarstva i zaštite čovekove sredine. Posebno kandidat je ispoljio iskustvo u oblasti livenja delova za automobilsku industriju, a koje je ostvario baveći se navedenom problematikom tokom rada u proizvodnji, što je uticalo i na njegovu zrelost za realizaciju istraživanja u okviru ove doktorske disertacije. Pored toga, kandidat odlično poznaje funkcionalnost PC-a, kako hardverski deo, tako i softverski. Od CAD paketa dobro poznaje softverski paket CATIA i softverski paket za simulaciju MAGMASOFT®. Koristi nekoliko stranih jezika. To ga sve kvalifikuje za samostalni naučni rad.

4. OSTVARENI NAUČNI DOPRINOS

Prikaz ostvarenih naučnih doprinosa

Određivanje faznih transformacija u ispitivanim klipnim legurama, DTA analiza i indentifikacija nastalih faza u mikrostrukturi odlivka klipa, urađeno je u sprezi sa metalografskim ispitivanjem makro i mikrosutruture odlivaka klipova uz pomoć optičke i elektronske mikroskopije. Na osnovu dobijenih rezultata definisani su uslovi pod kojima se izdvajaju mikrokonstituenti u mikrostrukturi odlivaka klipova.

Dizajn i konstitucija dijagrama petokomponentnog sistema koji sadrži Ni, odnosno Al-Cu-Mg-Ni-Si, Al-Fe-Mg-Ni-Si i Al-Cu-Fe-Ni-Si predložen je praktično kao važan hemijski odnos livenih klipnih legura. Analiza obuhvata raspodelu faznih polja u čvrstom stanju, politermalnu projekciju površine očvršćavanja i reakcije očvršćavanja. Očvršćavanje klipnih legura koje sadrže različite količine Cu i Fe je analizirano pod ravnotežnim i neravnotežnim uslovima očvršćavanja. Analiza izgrađenog faznog dijagrama i njegova eksperimentalna validnost pokazuju da se očvršćavanje klipnih Al-Si legura završava u neravnotežnim uslovima sa invarijantnim eutektičkim reakcijama na $\sim 505^{\circ}\text{C}$ u blizini temperature i sastava invarijantne eutektičke reakcije $L \rightarrow (Al) + (Si) + Al_2Cu + Al_3Cu_2Mg_8Si_6$ u Al-Cu-Mg-Si sistemu. Analiza izgrađenog faznog dijagrama i njegova eksperimentalna validnost pokazuje da se ravnotežni solidus klipnih legura smanjuje sa povećanjem koncentracije Cu sa ~ 540 na $\sim 505^{\circ}\text{C}$. Analiza izgrađenog faznog dijagrama i njegova eksperimentalna validnost pokazuje da nečistoće Fe mogu biti povezane sa fazom $Al_8FeMg_3Si_6$ u legurama sa manjim sadržajem Fe i fazama Al_3FeNi i Al_3FeSi u legurama sa visokim sadržajem Fe.

Karakteristike mogućih mikrokonstituenata koji se mogu naći u mikrostrukturi su ranije poznati, ali u cilju modelovanja procesa očvršćavanja i dobijanja zahtevanih karakteristika potrebno je definisati udeo i raspored istih u određenim delovima klipa. Korišćenjem savremenih metoda vizualizacije i simulacije procesa očvršćavanja može se pratiti tok očvršćavanja u kritičnim delovima klipa (čelo klipa, zona prvog kanala i otvora osovina) u cilju optimiziranja relevantnih tehnoloških parametara i dobijanja zahtevane mikro i makrostrukture i mehaničkih osobina legure.

Dobijeni rezultati optimizacije omogućavaju da se uspostave režimi livenja i kontrola toka usmerenog očvršćavanja odlivaka klipova. Livenje klipova i uspostavljanje režima livenja izvršeno je prema predhodno optimiziranim tehnološkim parametrima. Uz pomoć složenog sistema upravljanja merena je promena temperature odlivka i alata i automatski su kontrolisani uslovi hlađenja i proces očvršćavanja.

U cilju provere postignutih svojstava odlivak klipa i gotov klip podvrgnuti su detaljnim termičkim i mehaničkim ispitivanjima. Vršena je potpuna karakterizacija klipnih legura. Takođe, vršena su mikroskopska i rentgenska ispitivanja u cilju provere kompaktnosti dobijenog odlivaka. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja i dobijenih rezultata, kao i rezultata uz pomoć savremenih metoda vizualizacije može se izvršiti modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim karakteristikama. Pored toga omogućava se brži razvoj novih klipnih legura i mogućnost poboljšanja karakteristika, pre svega poboljšanje funkcionalnih karakteristika klipova. Na osnovu svega izloženog može se zaključiti da doktorska disertacija ima i naučni i praktični značaj.

Kritička analiza rezultata istraživanja

Definisanjem problema i ciljeva istraživanja predodređena je metodologija istraživanja koja je primenjena u doktorskoj disertaciji. S obzirom da se radilo o veoma složenoj problematici opredeljenje za jedan metod ne bi dalo objektivna saznanja zbog čega je bilo neophodno primeniti više metoda istraživanja. Pri izboru modela imalo se u vidu da su modeli uvek uprošćenja realnog sistema i da zbog toga zadržavaju samo one karakteristike originala koje su bitne za svrhu njegovog izučavanja. Jedan od problema koji se ispoljio i bio razlog ograničavanja ili nedovoljno preciznog određivanja fizičkih karakteristika materijala kao funkcija parametara procesa livenja, bila je činjenica da se procesi, koji na to utiču, dešavaju u širokom opsegu skala dužine: od nivoa kristala na kojem se odigrava proces mikro očvršćavanja, do nivoa realnog sistema u kojem se odigrava proces livenja klipova, tj. makrostrukture.

Zato je izvršena integracija i povezivanje fenomena na dva različita nivoa (mikro i makroskopskom), da bi se upoznali fundamentalni mehanizmi na kojima se odigrava složen proces očvršćavanja višekomponentnih legura među kojima su i klipne legure. Fenomeni očvršćavanja na makro i mikro nivou povezani su sa prostiranjem toplote i strujanjem tečne faze na makroskopskom nivou. Pažljiva integracija i povezivanje fenomena na dva različita nivoa (mikroskopskom i makroskopskom) bila je potrebna da bi se upoznali fundamentalni mehanizmi po kojima se odigrava složen proces očvršćavanja višekomponentnih klipnih legura.

Za precizno opisivanje procesa očvršćavanja klipnih legura potrebni su veoma precizni podaci o faznom dijagramu višekomponentnog sistema, što predstavlja jedan od najvećih problema za veliki broj komercijalnih legura danas. Definisanje ravnotežnih dvokomponentnih sistema je jednostavno i već davno su poznati dvo- i trokomponentni fazni sistemi (primer: Al-Si, Al-Cu, Al-Mg, Al-Ni, Si-Mg, ili Al-Si-Mg, Al-Mg-Cu,). Kao jedan od osnovnih problema u poznavanju višekomponentnih sistema predstavlja jednačina površi tečnosti, kao i jednačine površi čvrste faze. Precizne informacije o ovim površima moguće je dobiti samo komplikovanim eksperimentalnim istraživanjima. Ovo je trenutno predmet daljih istraživanja.

Na osnovu svih početnih predznanja iz ove oblasti i odabrane metodologije, nije bilo drastičnih otpunja i neslaganja rezultata od očekivanih, jer tokom rada svi razlozi mogućih neslaganja bili su uzeti u obzir. Takođe, na osnovu izvršene analize mogućnosti primena modelovanja i simulacije procesa, može se zaključiti da postoje na raspolaganju velik broj softverskih paketa i neophodne hardverske podrške, ali da je najveći problem definisanje matematičkog modela.

Očekivana primena rezultata u praksi

Stručni i praktični doprinos rada je rešavanje problema analize strukture i svojstava legura i kontinualnog praćenja procesa njihove izrade kako bi se postigla optimizacija procesa livenja i izrada odlivaka boljih fizičkih i eksploatacionih svojstava. Korišćenjem postignutih rezultata eksperimentalnih ispitivanja i dobijenih rezultata simulacije procesa očvršćavanja klipnih legura, ostvaren je veliki doprinos u proširenju fundamentalnih znanja u razvoju modela koji će biti u stanju da na osnovu zahtevanih karakteristika, tj. zahtevane strukture klipnih legura predviđa uslove očvršćavanja u kojima se odvija proces livenja klipova.

Verifikacija rezultata u časopisima i saopštenjima na konferencijama

Kandidat je svoje rezultate internacionalno verifikovao objavljivanjem radova u vodećim međunarodnim i nacionalnim časopisima i saopšavanjem većeg broja radova na međunarodnim i domaćim skupovima. Iz disertacije su proistekli jedan objavljen rad u vrhunskom međunarodnom časopisu, jedan objavljen rad u međunarodnom časopisu, kao i niz objavljenih radova u domaćim časopisima i saopštenja na međunarodnim i domaćim skupovima. Pored svega treba istaći jedan patent (M92) i monografiju (M42) koji su rezultat naučnog istraživanja iz ove oblasti kandidata Mr Srećka Manasijevića.

Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu (M21)

1. S. Manasijević, R. Radiša, Z. Aćimović-Pavlović, S. Marković i K. Raić; *Thermal Analysis And Microscopic Characterization Of The Piston Alloy AlSi13Cu4Ni2Mg*, DOI: 10.1016/j.intermet.2010.11.011, Intermetallics, ISSN 0966-9795, 19 (2011) 486-492, http://www.elsevier.com/locate/journaldescription.cws_home/423924/description#description, (IF=2.231, 4/70, 2009).

Rad u međunarodnom časopisu (M23)

1. S. Manasijević, R. Radiša, S. Marković, K. Raić, Z. Aćimović-Pavlović, "Implementation of the infrared thermography for thermo-mechanical analysis of the AlSi cast piston", *Practical Metallography* ISSN 0032-678X, Carl Hanser Verlag, München, 46 (2009) 565-579, (http://www.kobson.nb.rs.proxy.kobson.nb.rs:2048/nauka_u_srbiji.132.html?autor=ManasijevicS&samoar), (IF=0.295, 50/70, 2009).

Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini (M33)

1. R. Radiša, S. Marković, J. Pristavec, V. Kvirgić, **S. Manasijević**, "Use of CAE techniques in virtual design of metalcasting technology-saving in Serbian foundries", Conference Proceedings ISSN 1318-9123, pp. 1÷8., 48th International Foundry Conference-Portorož, Slovenija, Septembar 2008, http://www.drustvolivarjev.si/podatki/Program/portoroz_ang_01.pdf
2. R. Radiša, Z. Gulišija, **S. Manasijević**, "Optimization of casting process", MACHINEDESIGN-2009, ISBN 978-86-7892-105-6, pp. 111÷114, printed by: Faculty of technical Sciences, Graphic Center-GRID Novi Sad, publisher: Faculty of Technical Sciences University of Novi Sad, 2009, http://www.ftn.uns.ac.rs/m_design/pdf/2009/111-114_for_web.pdf.
3. R. Radiša, **S. Manasijević**, S. Marković, "Optimizacija tehnologija livenja metala primenom softverskih alata", 9 međunarodna konferencija o dostignućima elektrotehnike, mašinstva i informatike-DEMI 2009, Zbornik radova ISBN 978-9938-39-23-1, str. 175÷180, Mašinski fakultet, Banja Luka, 28-29.05.2009, http://demi.rs.ba/2009/en/doc/eng_spisak_prijavljenih.pdf.

Istaknuta monografija nacionalnog značaja (M42)

1. **S. Manasijević**, "Klipovi za motore SUS", Monografija ISBN 978-86-912177-0-9, izdavač: LOLA Institut Beograd, štampa: Zavod za grafičko inženjerstvo Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, 2009.

Rad u časopisu nacionalnog značaja štampan u celini (M52)

1. **S. Manasijević**, Z. Aćimović-Pavlović, R. Radiša; "Optimizacija parametara livenja klipova korišćenjem softverskog paketa MAGMASOFT®", Metalurgija, ISSN 0354-6306, original naučni rad UDC: 621.746.27-242.2:681.3.06=861., br 3, vol. 13, str. 221÷230, Beograd 2007, <http://metalurgija.org.rs/mjom/vol13.htm>.

Rad u naučnom časopisu štampan u celini (M53)

1. **S. Manasijević**, Z. Aćimović-Pavlović, Karlo Raić, Snežana Tripković; "Termomehanička analiza klipa od Al-legure posle rada u visokopterećenom dizel mototu", Tehnika YU ISSN 0040-2176, Volume 12, broj 6, Volume 16, br. 1, str 1÷6, originalni naučni rad UDC: 621.725.11+861, Beograd, 2006.
2. **S. Manasijević**, R. Radiša, B. Petrović; "Veština i intuicija livaca ili livenje pomoću kompjutera", LIVARSTVO ISSN 0456-293, stručni članak, Volume 47, broj 1, str. 10÷11, Srpsko livačko društvo, Beograd 2008, <http://www.sld-sfs.rs/publikacije.html>.
3. R. Radiša, S. Marković, J. Pristavec, V. Kvirgić i **S. Manasijević**; "Upotreba CAE tehnike za tehnologiju virtuelnog dizajna-ušteda u livnicama Srbije", LIVARSTVO ISSN 0456-293, Volume 47, broj 1, izlaganje sa naučnog skupa, str. 12÷24, Srpsko livačko društvo, Beograd 2008, <http://www.sld-sfs.rs/publikacije.html>.
4. **S. Manasijević**, R. Radiša, Z. Aćimović-Pavlović, K. Raić i S. Marković; "Softverski paketi za simulaciju i vizualizaciju procesa livenja klipova", LIVARSTVO ISSN 0456-293, Volume 48, broj 1, Stručni rad UDC 004.94:621.746, str. 14÷20, Srpsko livačko društvo, Beograd 2009, <http://www.sld-sfs.rs/publikacije.html>.
2. R. Radiša, **S. Manasijević**, S. Marković, "Optimizacija tehnologija livenja metala primenom softverskih alata" LIVARSTVO ISSN 0456-293, Volume 48, broj 3, str. 30÷36, Srpsko livačko društvo, Beograd 2009, <http://www.sld-sfs.rs/publikacije.html>.
5. **S. Manasijević**, S. Dulović, A. Pavlović "Klip K. 23274 za kompresorske motore" LIVARSTVO ISSN 0456-293, Volume 48, broj 4, stručni rad, UD: 669.131.6 621 434-03, COBIS.SR ID 172229900, str. 23÷29, Srpsko livačko društvo, Beograd 2009, <http://www.sld-sfs.rs/publikacije.html>.

Saopštenje na skupu nacionalnog značaja štampan u celini (M63)

1. **Manasijević**, M. Žujević, R. Radiša, P. Dragičević, "Optimizacija postupka livenja klipova u HK "Petar Drapšin" Mladenovac primenom savremenih softverskih paketa", 31st JUPITER Konferencija, 18 Simpozijum CAD/CAM, Zbornik radova ISBN 86-7083- 508-8 str. 2.55÷2.58, Zlatibor, Srbija, April 2005.
2. **S. Manasijević**, J. Brauner, Z. Pavlović-Aćimović, S. Tripković, "Termografsko snimanje uslova rada klipa od aluminijumske klipne legure za visoko opterećene dizel motore", 32st JUPITER Konferencija, 19 Simpozijum CAD/CAM, Zbornik radova ISBN 86-7083-558-4 str. 2.55÷2.58, Zlatibor, Srbija, Maj 2006.

Saopštenje na skupu nacionalnog značaja štampan u izvodu (M64)

1. **S. Manasijević**, R. Radiša, Z. Pavlović-Aćimović, S. Marković "Savremeni softverski paketi za simulaciju i vizualizaciju procesa livenja klipova", VIIst savetovanje metalurga Srbije, Perspektive

razvoja metalurške industrije Srbije Zbornik radova ISBN 86-87183-02-5, str. 13, Beograd, Srbija, 11÷13 Septembar 2008.

Realizovani patent (M92)

1. **S. Manasijević**, *"AlSi13Cu4Ni2Mg, klipna legura za visokopterećene diesel motore"*, broj prijave patenta P-2006/0700, Zavod za intelektualnu svojinu Beograd, 2006, <http://89.216.38.53/rspubserver/document.jsp?PN=RS20060700%20RS%2020060700&iDocId=54077&iPositi on=0&iFormat=0>

Učešće u naučnim projektima:

Kandidat Mr Srećko R. Manasijević, dipl.ing. metalurgije kao stipendista doktorant Ministarstva nauke do sada učestvovao je u dva projekta koja finansira isto ministarstvo. Trenutno je angažovan kao istraživač na trećem projektu koga finansira isto ministarstvo.

1. *"Implementacija automatizovanog projektovanja obradnih sistema i procesa u indistriji prerade metala"*, EB 6319, LOLA Institut Beograd, za 2007.god.
2. *"Virtuelna proizvodnja odlivaka primenom CAE tehnike simulacije livenja metala i legura-uštede u livnicama i alatnicama Srbije"*, EB 19041. Projekat Miinistarstva nauke i tehnološkog razvoja, Republike Srbije, LOLA Institut Beograd, period angažovanja od 2008-2010.god.
3. *"Razvoj uređaja z atrening pilota i dinamičku simulaciju leta modernih borbenih aviona i to 3-osne centrifuge u 4-osnog uređaja za prostornu dezorijentaciju pilota"*, EB 035023, LOLA Institut Beograd, period angažovanja od od 2011-2014.god.

5.ZAKLJUČAK I PREDLOG

Kratak osvrt na disertaciju u celini

Na osnovu analize postavljenog problema, uvida u aktuelne istraživačke zahteve u predmetnoj oblasti, utvrđenog cilja istraživanja, postavljenih hipoteza, usvojene metodologije i predložene strukture istraživanja, dobijenih rezultata i analize mogućnosti njihove primene u praksi, kao i načina prezentovanja rezultata, Komisija smatra da doktorska disertacija Mr Srećka R. Manasijevića pod naslovom: **"Modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima"** predstavlja originalan naučni doprinos proučavanju trijade tehnologija-struktura-svojstva u oblasti razvoja procesa livenja klipnih legura. Ovom doktorskom disertacijom kandidat je dao značajan doprinos u oblasti metalurgije i livarstva što je potvrđeno objavljivanjem radova u časopisima međunarodnog značaja i saopštenjima na međunarodnim i domaćim konferencijama.

Komisija smatra da urađena doktorska disertacija kandidata Mr Srećka R. Manasijevića pod naslovom: **"Modelovanje procesa očvršćavanja klipnih legura sa unapred zadatim svojstvima"** u potpunosti ispunjava sve zahtevane kriterijume i da je kandidat ispoljio izuzetnu naučno-istraživačku sposobnost u svim fazama izrade ove disertacije.

Predlog Komisije Nastavno-naučnom veću

Imajući u vidu kvalitet, obim i originalnost dobijenih rezultata kao i naučni doprinos, Komisija pozitivno ocenjuje doktorsku disertaciju i sa zadovoljstvom predlaže Nastavno-naučnom veću Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu da ovaj izveštaj prihvati i zajedno sa urađenom doktorskom disertacijom učini dostupnim na uvid javnosti u zakonski predviđenom roku, a nakon ove procedure pozove kandidata Mr Srećka R. Manasijevića, na usmenu odbranu disertacije pred Komisijom u istom sastavu.

Beograd, 01.04.2011.

ČLANOVI KOMISIJE:

1. Dr Zagorka Aćimović Pavlović, vanr. prof., TMF Beograd
2. Dr Karlo Raić, red.prof. TMF Beograd
3. Dr Mihailo Lazarević, red.prof. Mašinski fakultet Beograd