

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ
Број 144/2
24. 01. 2013. год.
Ч А Ч А К

На основу члана 48. ст. 5. Статута Универзитета у Крагујевцу и члана 67. Статута Факултета техничких наука, доносим следећу

О Д Л У К У

1. Извештај Комисије за оцену докторске дисертације кандидата **мр Љубице Радовић, дипл. инж. метал.**, под називом "**Деформационо понашање и карактеристике лома Al-Mg легура у светлу међузависности састав-технологаја-структура**", ставља се на увид јавности 30 дана, објављивањем на сајту Универзитета у Крагујевцу.

Образложење

Одлуком Наставно-научног већа број 1984/11 од 12. децембра 2012. год. именована је Комисија за оцену докторске дисертације кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. метал., у саставу:

1. **Др Венцеслав Грабулов, научни саветник**, Институт за испитивање материјала, Београд, научна област: Материјали, председник,
2. **Др Бранка Јордовић, ред. проф.**, Универзитет у Крагујевцу, Факултет техничких наука, Чачак, научна област: Материјали, ментор,
3. **Др Снежана Радовић, ред. проф.**, Универзитет у Крагујевцу, Факултет техничких наука, Чачак, научна област: Производно машинство, члан,
4. **Др Миљентије Стефановић, ред. проф.**, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац, научна област: Производно машинство, члан,
5. **Др Миљана Поповић, доцент**, Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет, Београд, научна област: Материјали, члан.

Комисија је поднела извештај Декану и Наставно-научном већу 24. јануара 2013. год.

Сагласно одредби чл. 48. ст. 5. Статута Универзитета у Крагујевцу доносим одлуку као у диспозитиву.

Доставити:

- Универзитету у Крагујевцу и
- општој служби.



ДЕКАН
ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Проф. др Јерослав М. Живанић, дипл. инж. ел.

А.Т.

З А Х Т Е В
ЗА ДАВАЊЕ САГЛАСНОСТИ НА ИЗВЕШТАЈ О УРАЂЕНОЈ
ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ

Шифра за идентификацију дисертације _____

Шифра УДК (бројчано) _____

Веб адреса на којој се налази извештај Комисије о урађеној докторској дисертацији:

СТРУЧНОМ ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ
УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

Молим да у складу са чл. 128. Закона о високом образовању и чл. 48. Статута Универзитета дате сагласност на извештај комисије о урађеној докторској дисертацији:

Назив дисертације: Деформационо понашање и карактеристике лома Al-Mg легура у светлу међузависности састав – технологија – структура

Научна област УДК(текст): _____

Ментор и састав комисије за оцену дисертације:

др Бранка Јордовић, ред. проф., Факултет техничких наука Чачак, - ментор,
др Венцислав Грабулов, научни саветник, Институт за испитивање материјала, Београд,
др Снежана Радоњић, ред. проф., Факултет техничких наука Чачак,
др Милентије Стефановић, ред. проф., Факултет инжењерских наука Крагујевац,
др Миљана Поповић, ван. проф., Технолошко-металуршки факултет Београд.

Добијени резултати како са фундаменталног тако и са практичног становишта представљају значајан допринос разумевању односа састав–технологија–микроструктура-својства у растворно ојачаним Al легурама, што је кључни услов за оптималан избор легура за одговарајућу намену. То ће омогућити контролу и превенцију појаве лома у Al-Mg легурама избором одговарајуће термомеханичке прераде.

Посебан допринос, представља објашњење односа механичких својстава Al-Mg легура након ротационог ваљања конуса и конвенционалног ваљања које су деформисане истим степеном деформације, тј. појаве динамичког опорављања при ротационом ваљању, која до сада није публикована у литератури. Анализом субструктуре AlMg₃ легуре на трансмисионом електронском микроскопу потврђена је претпоставка да су нижа механичка својства ротационо ваљаних елемената који су деформисани истим степеном деформације као и хладно ваљани лимови, последица динамичког опорављања. Показано је да је појава динамичког опорављања при ротационом ваљању, која је иначе отежана у Al-Mg легурама, последица велике брзине деформације и велике количине топлоте концентрисане у уској зони деформације.

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Презиме и име кандидата: Радовић Љубица

Назив завршеног факултета: Технолошко-металуршки факултет у Београду

Одсек, група, смер: Металуршки, Обојена металургија

Година дипломирања: 1989.

Назив магистарског рада, односно докторског студијског програма: „Утицај термомеханичке прераде и садржаја легирајућих елемената на деформабилност Al-Mg легура“

Научно подручје: Материјали

Година одбране: 2008.

Факултет и место: Технолошко-металуршки факултет у Београду

Број публикованих радова: 15

1. Lj. Radović, M. Nikačević, B. Jordović, Deformation behaviour and microstructure evolution of AlMg6Mn alloy during shear spinning, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22(2012) 991–1000. (M22)
2. Lj. Radović, M. Nikačević, B. Jordović, Some aspects of microstructure and properties of Al-Mg alloys after shear spinning and cold rolling, Hemijska industrija, DOI: 10.2298/hemind121023116R. (M23)

Назив и седиште организације у којој је кандидат запослен: Војнотехнички институт

Радно место: Београд

**ПОТВРЂУЈЕМО ДА КАНДИДАТ ИСПУЊАВА УСЛОВЕ УТВРЂЕНЕ ЧЛ. 128.
ЗАКОНА О ВИСОКОМ ОБРАЗОВАЊУ И ЧЛ. 48. СТАТУТА УНИВЕРЗИТЕТА
У КРАГУЈЕВЦУ**

У прилогу вам достављамо: - Извештај комисије о оцени урађене докторске дисертације;
- Одлуку научно-наставног већа факултета о прихватању
извештаја комисије о урађеној докторској дисертацији

(место и датум)



³²
ДЕКАН ФАКУЛТЕТА ТЕХНИЧКИХ
НАУКА

J. M. J. J.

A.7.

ПРИМЉЕНО 24.1.2013.			
Сред.	Број	Примок	Вредност
	144		

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У ЧАЧКУ

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

ПРЕДМЕТ: *Извештај Комисије за оцену писаног дела и усмену одбрану докторске дисертације кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије.*

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, бр. 111-1984/11 од 12.12.2012. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије, под насловом:

**„ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА
Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЋУЗАВИСНОСТИ САСТАВ –
ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“**

На основу увида у приложену докторску дисертацију и извештај о подобности кандидата и теме за докторску дисертацију која је одобрена за израду Одлуком Факултета техничких наука у Чачку бр. LXII/1152-6 од 02. 06. 2010. године а на основу правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу, Комисија подноси Наставно-научном већу следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области

Докторска дисертација кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије, под насловом „ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЋУЗАВИСНОСТИ САСТАВ – ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“, представља резултат научно-истраживачког рада у тематској области инжењерства материјала, која се односи на познавање понашања Al-Mg легура при деформацији у циљу добијања захтеваних својстава које се постављају пред комерцијалне производе наоружања и војне опреме.

Кандидат је извршио критичку анализу и систематизацију постојећих знања и научних резултата водећих светских истраживача који се односе на област истраживања ове докторске дисертације.

Савременост дисертације се огледа у чињеници да у задњој деценији истраживања у области технологије ротационог ваљања, како конусних, тако и цилиндричних и комплексних елемената, постају веома актуелна, са циљем да се конвенционални поступци обликовања металних материјала, који све теже задовољавају захтеве авио, космичке и војне технике, замене овом технологијом.

Ротационим ваљањем се израђују осносиметрични конусни или цилиндрични елементи са праволинијском или криволинијском изводницом, са константном или променљивом дебљином зида, уз мањи утрошак енергије, нижу цену израде, велику димензиону тачност и стабилност, висок квалитет унутрашње и спољне површине. Ова технологија је супериорна када је у питању израда конусних и цилиндричних елемената у ракетној техници (оплате глава, контактне и балистичке капе, млазнице, кошуљице бојевих глава, кумулативни левци и коморе мотора) и авиоиндустрији (носне капе, делови мотора, хидраулични и пнеуматски цилиндри) и многи други елементи.

Интерес за израдом делова од алуминијумских легура технологијом ротационог ваљања посебно је изражен када се захтева смањење масе компонената ради повећања енергетске ефикасности. У циљу што адекватнијег избора материјала, који ће датим процесом обезбедити најбољу комбинацију употребних својстава и трошкова производње, врши се оптимизација како, хемијског састава, тако и процесних параметара прераде. Примена танкозидних конусних елемената од алуминијумских легура повећава са све убрзанијим развојем ракетне, авио и војне индустрије. Због тога се и повећава интерес за истраживања у овој области.

Савремена истраживања у овој области у усмерена су ка анализи отпора деформацији и процени дејствујућих сила, док се мали број радова бави испитивањем структурних промена у току хладног ротационог ваљања (густина дислокација, облик и величина зрна и расподела честица секундарних фаза) и утицајем полазне структуре на способност обликовања. Нарочито недостају радови који се баве понашањем при лому ротационо ваљаних делова. Познавање механизма настанка и раста прслине су кључни код избора легуре за одговарајућу намену, односно употребних својстава и сигурности конструкција.

Проучавања у оквиру ове дисертације била су усмерена на праћење промена у структури, физичким и механичком својствима у току деформације Al-Mg легура применом две различите технологије прераде. Примењене су технологије ротационог ваљања конусних елемената (РВ) и конвенционалног ваљања (ваљање глатким ваљцима - ГВ). Реализовано је експериментално испитивање три комерцијалне Al-Mg легуре са садржајем Mg од 3 %, 4,5 % и 6 % и додатком Mn, у два структурна стања у погледу величине зрна. Испитано је жарено стање легура, као и деформисана стања након различитих степени деформације (30-85 %).

Оригиналност овог рада се огледа у чињеници да је први који се бави обликовањем растварајуће ојачаних Al-Mg легура са високим садржајем Mg и додатком Mn, специфичном технологијом ротационог ваљања, да су праћене микроструктурне промене при деформацији, као и да су упоређене са микроструктурним променама при конвенционалном процесу прераде.

Квантификација понашања у току пластичне прераде двома технологијама обухватила је карактеризацију микроструктуре, испитивање механичких својстава одређивањем карактеристика отпорности и деформације материјала и карактерисање површине прелома добијене испитивањем једноосним затезањем.

При карактеризацији микроструктуре су примењене савремене методе скенирајуће електронске микроскопије (SEM) са енергодисперзионом анализом x-зрака (EDS), трансмисионе електронске микроскопије (TEM), као и квантитативне микроструктурне анализе коришћењем софтвера за обраду слике (OM и SEM).

Такође, на основу претходних истраживања кандидата и саопштених резултата других аутора, испитан је утицај садржаја легирајућих елемената, садржаја Mg и додатка Mn, и утицај параметара термомеханичке прераде на контролу микроструктуре у комерцијалним легурама серије 5xxx.

Добијени резултати како са фундаменталног тако и са практичног становишта представљају значајан допринос разумевању односа састав-технологија-микроструктура-својства у растворно ојачаним Al легурама, што је кључни услов за оптималан избор легура за одговарајућу намену. То ће омогућити контролу и превенцију појаве лома у Al-Mg легурама избором одговарајуће термомеханичке прераде. Осим тога, испитане су три различите легуре у по два структурна стања у погледу величине зрна, што представља квалитативни искорак у односу на уобичајене публиковане резултате.

Посебан допринос, представља објашњење односа механичких својстава Al-Mg легура након ротационог ваљања конуса и конвенционалног ваљања које су деформисане истим степеном деформације, тј. појаве динамичког опорављања при ротационом ваљању, која до сада није публикована у литератури. Анализом субструктуре AlMg₃ легуре на трансмисионом електронском микроскопу потврђена је претпоставка да су нижа механичка својства ротационо ваљаних елемената који су деформисани истим степеном деформације као и хладно ваљани лимови, што је примећено у ранијим истраживањима у Војнотехничком институту, како на челицима, тако и Al легурама, последица динамичког опорављања. Појава динамичког опорављања при ротационом ваљању, која је иначе отежана у Al-Mg легурама, је последица велике брзине деформације и велике количине топлоте концентрисане у уској зони деформације.

2. Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области

Комисија сматра да је докторска дисертација кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије под насловом „ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЋУЗАВИСНОСТИ САСТАВ – ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“ представља резултат оригиналног научног рада. Обрађена тема је актуелна и значајна за развој науке у области понашања материјала у току деформације, односно утицаја структурног стања и својстава полазног материјала, обликованих елемената и понашања у експлоатацији.

- Кандидат је детаљно, према научним принципима, реализовао веома обимна експериментална испитивања.

Оригиналност научног рада, истраживања и резултата остварених у оквиру ове дисертације огледа се, између осталог, у следећим елементима:

- Утврђене су и објашњене разлике у деформационом понашању при једноосном затезању и механичким својствима Al-Mg легура након ротационог и конвенционалног ваљања. Утврђено је да су разлике последица појаве динамичког опорављања, до кога долази приликом ротационог ваљања, а које се не јавља при конвенционалном ваљању. Овај феномен је први пут саопштен.
- Утврђен је механизам лома ротационо ваљаних Al-Mg легура при једноосном затезању и микроструктурне карактеристике које имају одлучујућу улогу у одређивању микромеханизма лома.

3. Преглед остварених резултата рада кандидата у одређеној научној области

Љубица Радовић је дипломирала 17. 10. 1989. године на Технолошко-металуршком факултету у Београду, на смеру Обојена металургија, са средњом оценом у току студија 9,11. Магистарску тезу са темом „Утицај термомеханичке прераде и садржаја легирајућих елемената на деформабилност Al-Mg легура“ одбранила је на Технолошко-металуршком факултету у Београду 11. 06. 2008. године.

Од 16. 04. 1990. године мр Љубица Радовић, дипл. инж. металургије ради у Ваздухопловнотехничком институту, а од 01. 10. 1992. године у Војнотехничком институту у Београду у Сектору за материјале и заштиту. У току свог рада на радним местима истраживач сарадник, самостални истраживач, виши истраживач и руководилац пројекта бави се истраживањима у области металургије и инжењерства металних материјала, технологијама обликовања и методама за испитивање металних компоненти при развоју и у експлоатацији средстава наоружања и војне опреме, као и испитивањима по захтеву цивилног сектора.

Као члан радног тима, активно је учествовала у реализацији више истраживачко-развојних и функционалних задатака у области наоружања и војне опреме.

Руководилац је истраживачког задатка „Истраживање у области металургије и инжењерства металних материјала“ у Војнотехничком институту. Као аутор или коаутор објавила је 8 научних и стручних радова у часописима, 16 на домаћим и међународним конференцијама, 1 монографску библиографску студију, 2 техничка решења од којих су за овај извештај релевантни:

1. **LJ Radović**, Nikačević M., Jordović B., Deformation behaviour and microstructure evolution of AlMg6Mn alloy during shear spinning, Trans. Nonferrous Met. Soc. China 22 (2012) 991–1000. (M22)
2. **LJ Radović**, Nikačević M., Jordović B., Some aspects of microstructure and properties of Al-Mg alloys after shear spinning and cold rolling, Hemjska industrija, DOI: 10.2298/HEMIND121023116R. (M23)
3. **Radović LJ.**, Nikačević M., Evaluation of low spinnability of AlMg5 alloy during flow forming, 5th International Scientific Conference on Defensive Technologies, OTEH 2012, Serbia, Belgrade, 2012, 551-556. (M33)
4. **Radović LJ.**, Nikačević M., Effect of forming technology on microstructure and properties of Al-Mg alloys, 4th International Scientific Conference On Defensive Technologies, OTEH 2011, Serbia, Belgrade, 2011, 644-647. (M33)
5. **Radović Lj.**, Nikačević M., Popović M., Romhanji E., Jordović B., Inhomogenities of plastic deformation – serrations in comercial Al-Mg alloys, 12th International Conference on Tribology, SERBIATRIB 11, Serbia, Kragujevac, 2011, 152-155. (M33)
6. **Radović LJ.**, Nikačević M., Popović M., Romhanji E., Effect of colled rolling reduction on critical strains and final grain size of Al-Mg alloys containing Mn, 2nd Int. Conf. on Deformation and Microstructure, Ed. by E.Romhanji et al., SIMJ, Belgrade, 2005. 231-236. (M33)
7. **Никачевић М., Радовић Љ.**, Ротационо ваљање: специфична технологија за израду делова ракета, Кумулативна научно техничка информација, Војнотехнички институт Београд, Vol. XLIII, Бр. 2, 2010. ISBN 978-86-81123-35-5. (M43)
8. **Radović Lj.**, Nikačević M. Popović M., Romhanji E., The influence of thermomechanical treatment on recrystallization of AlMg4.5Cu0.5 alloy", Metalurgija-Journal of Metallurgy, No. 1, Vol. 13, Beograd 2007, 83-88. (M51)
9. **Radović Lj.**, Nikačević M. Popović M., Romhanji E., The influence of thermomechanical treatment and chemical composition on recrystallization of Al-Mg alloy", Metalurgija-Journal of Metallurgy, No. 4, Vol. 13, Beograd 2007, 259-267. (M51)
10. **Radović Lj.**, Nikačević M., Microstructure and properties of cold rolled and annealed Al-Mg alloys, Scientific Technical Review, 2, Military Technical Institute, Beograd, (2008) 14-20. (M52)
11. **Радовић Љ.**, Никачевић М., Особине ротационо ваљаних конусних делова од Al легура у функцији садржаја Mg и степена деформације, III Научно стручни скуп

- из одбрамбених технологија, ОТЕХ 2009, Војнотехнички институт Београд, Зборник радова (на CD-у), Београд, 2009. ISBN 978-86-81123-40-9. (M63)
12. Никачевић М., Радовић Љ., Истраживање у подручју ротационог ваљања танкозидних конусних и цилиндричних делова ракета од Al легура, II Научно стручни скуп из области одбрамбених технологија, ОТЕХ 2007, Војнотехнички институт Београд, Зборник радова, свеска II, Београд, 2007, IX-88 - IX-92. ISBN 978-86-81123-49-2. (M63)
13. Никачевић М., Радовић Љ., М. Хршум, Утицај микроструктуре припремка на механичке особине ротационо ваљане бешавне челичне цеви високе чврстоће, VII Саветовање металурга Србије, Београд, 2008, 39. ISBN 868718303-х. (M64)
14. Радовић Љ., Никачевић М., Хршум М., Могућност израде конусних танкозидних великогабаритних елемената технологијом ротационог ваљања, VI Саветовање металурга Југославије са међународним учешћем, Зборник синопсиса, Аранђеловац, 2003, 99. ISBN 86-904393-0-7 (M64)
15. Никачевић М., Радовић Љ., Технологија израде танкозидних конусних и цилиндричних делова ракета од високочврстих легура алуминијума, Војнотехнички институт Београд, 2010. (M83)

4. Оцена о испуњености обима и квалитета у односу на пријављену тему

Докторска дисертација кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије под насловом „ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЋУЗАВИСНОСТИ САСТАВ – ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“ одговара по обиму и садржају прихваћеној теми од стране Факултета техничких наука у Чачку и Стручног већа Универзитета у Крагујевцу. По квалитету, обиму и резултатима истраживања приложена дисертација у потпуности задовољава све научне, стручне и законске услове за израду докторских дисертација. Дисертација је написана на 154 стране у 7 поглавља, а садржи 143 слике и 11 табела. Цитиран је 191 библиографски наслов. Резултати истраживања изнети су у седам поглавља:

1. Увод
2. Литературни преглед
3. Експериментални рад
4. Резултати
5. Дискусија
6. Закључак
7. Литература

У уводном делу рада истакнут је значај и потреба истраживања у области алуминијумских легура, посебно када је изражен захтев за смањењем масе компонената ради повећања енергетске ефикасности, као у ракетној, авио и космичкој техници, аутомобилској индустрији и др. Објашњене су предности примене Al-Mg легура које ојачавају растварајућим ојачавањем и њихове главне карактеристике (механизми

ојачавања, утицај легирајућих елемената, величине зрна, промене при деформацији и при загревању). Дат је осврт на тренутно стање у овој области у литератури. Истакнуто је да је утицај микроструктуре на деформационо понашање и лом Al-Mg легура након хладног ваљања био предмет многих истраживања. Са друге стране, у случају ротационог ваљања, било конусних или цилиндричних елемената, утицају наведених фактора на својства обликованих елемената, деформационо понашање и лом, нарочито растварајуће ојачаних Al легура, које су погодније за ротационо ваљање у односу на таложно ојачане Al легуре, није у литератури посвећена довољна пажња. Објашњени су и разлози за истраживање у области специфичне технологије ротационог ваљања конуса од алуминијумских легура.

У поглављу литературни преглед изложена су постојећа знања и теоријске основе процеса термомеханичке прераде, пластичне деформације и лома у алуминијумским легурама. Објашњени су процеси деформације метала конвенционалном технологијом ваљања (глатким ваљцима) и технологијом ротационог ваљања конусних елемената (шема главних напона и деформација, опрема, процесни фактори који утичу на деформацију). Такође је приказано понашање метала у току деформације и у току накнадног загревања: феномени ојачавања који зависе од материјала (врста решетке, енергија грешке у редоследу, систем легирања, величина зрна и величина и расподела секундарних фаза) и утицај процесних параметара (брзина и степен деформације, температура итд.).

Понашање деформисаних метала при загревању је посебно обрађено са аспекта утицаја процесних параметара (претходни степен деформације, температура и време загревања и полазна величина зрна) на однос брзине настанка клица нових зрна и брзине раста рекристалисаних зрна, пошто се на тај начин може контролисати финална величина зрна. У случају степена претходне деформације која је мања од критичне вредности рекристализација може изостати, па је једини механизам обнављања структуре опорављање, до кога може доћи и у току саме деформације (динамичко опорављање или у паузи након деформације–статичко опорављање).

У овом делу су приказане и теоријске основе појаве лома у металним материјалима. Како се сваки лом састоји из две фазе, фазе настанка и фаза раста прслине, описан је утицај секундарних фаза (врста, облик, величина честица), на фазу настанка, односно утицај садржаја легирајућих елемената и величине зрна на фазу раста прслине.

У поглављу експериментални рад дати су подаци о алуминијумским легурама које су коришћене у раду (AlMg3, AlMg4,5Mn и AlMg6Mn), процесним параметрима примењених технологија пластичне деформације (ротационо ваљање конусних елемената и ваљање глатким ваљцима), као и примењеним методама испитивања.

Осим хемијског састава легура, шематски су приказани у примењени термомеханички режими прераде који су обезбедили добијање структурних стања са две величине зрна: ситнозрно (10-15 μm) и крупнозрно (40-50 μm), која су била полазна

стања за даљу деформацију ротационим ваљањем и и конвенционалним ваљањем. Ова стања су уобичајена код испитивања утицаја величине зрна на способност обликовања лимова конвенционалним поступцима прераде.

Ово поглавље садржи и процесне параметре који су примењени при обликовању лимова Al-Mg легура технологијом ротационог ваљања. Мењана је геометрија алата (угао трна), тако да су остварени степени деформације од 30 % до 85 %, при чему су мењани и остали процесни параметри (брзина ротације трна, корак-помак по аксијалној оси, зазори између алата итд.). Конвенционално ваљање је извршено у лабораторијским условима деформацијом лимова глатким ваљцима, при чему је остварен опсег деформација као и код ротационог ваљања.

Дат је приказ поступака припреме при карактеризацији микроструктуре (одређивање величине зрна, величине и типа секундарних фаза, мерење тврдоће фаза и анализа субструктуре жарених и деформисаних узорака), као и примењених метода: оптичке микроскопије (ОМ), скенирајуће (SEM) и трансмисионе електронске микроскопије (ТЕМ), енергодисперзионе анализе X-зрака (EDS), мерење микротврдоће (Micro Vickers test), као и квантитативна металографска анализа. У овом делу су дати и сви параметри који су примењени код појединих метода, начини припреме и нагризања металографских узорака за микроскопска испитивања (ОМ, SEM и ТЕМ), као и идентификацију честица секундарних фаза. Такође је описана и метода која је примењена за квантитативну анализу величине зрна и честица секундарних фаза.

Одређивање механичких својстава је реализовано мерењем тврдоће по Vickers-у и тестом једноосног затезања, а одређивање физичких својстава мерењем електричне проводљивости применом методе вртложних струја (Sigmatest). Карактеризација површине прелома (тип лома, карактеристичне појаве на површини прелома) је извршена на SEM-у, а услови испитивања су такође дати у овом поглављу.

У поглављу резултати приказани су резултати који су искључиво добијени у оквиру истраживања ове дисертације. Испитане су три Al-Mg легуре у полазном жареном стању са две величине зрна, и након деформације РВ и ГВ са 4 степена деформације. Резултати су систематизовани према испитаним параметрима: структурни параметри, механичка својства, физичка својства и карактер прелома. Ради праћења утицаја садржаја главних легирајућих елемената, Mg и Mn, на својства Al-Mg легура пре и након деформације, најпре су приказани резултати микроструктурне карактеризације Al-Mg легура у полазним стањима (жарено ситнозрно и крупнозрно стање). Изглед карактеристичних микроструктура и фаза добијених на ОМ, SEM-у и ТЕМ-у су приказане микрофотографијама. Графички и табеларни прикази статистички обрађених мерења величине честица секундарних фаза и величине зрна, су приказани на најпогоднији начин, као и поређење за све три легуре.

Извршена су и микроструктурна испитивања узорака Al-Mg легура након деформације ротационим ваљањем и глатким ваљцима (ОМ, SEM, ТЕМ) и резултати упоређени са полазним стањем легура.

Реализована су и испитивања механичких својстава легура у полазном стању и након деформације (РВ и ГВ), и то мерењем тврдоће и тестом једноосног затезања. Резултати су приказани упоредо за све три легуре, као и две примењене технологије деформације, што је олакшало анализу утицаја садржаја Mg у легури, величине зрна и примењене технологије на деформационо понашање и механичка својстава Al-Mg легура.

Добијени резултати су детаљно анализирани у поглављу дискусије. Анализа прати след приказаних резултата. На основу анализе резултата испитивања микроструктуре (ТЕМ) показано је да се при ротационом ваљању у Al-Mg легурама јавља феномен динамичког опорављања. Тиме су објашњене ниже вредности границе попуштања и затезне чврстоће испитаних Al-Mg легура у оба структурна стања ротационо ваљаних конуса у односу на ваљање глатким ваљцима, у целом опсегу деформације. Са научног аспекта ово има велики значај, јер објашњава промену структуре у току деформације и објашњава разлику у понашању према конвенционалном ваљању, што до сада није објављено у литератури. Са аспекта практичне примене, ова анализа, такође има велики значај, јер је показано да се могу проценити својства ротационо ваљаних елемената од Al-Mg легура и оценити деформационо понашање и понашање при лому на основу резултата добијених испитивањем лимова деформисаних једноставнијим поступком – конвенционалним ваљањем. На овај начин индустрија добија практичну процедуру којом може предвидети понашање материјала.

У шестом поглављу рада изнети су врло конкретни закључци који одговарају постигнутим циљевима дисертације.

У седмом поглављу рада цитиран је 191 литературни навод, укључујући и радове аутора, који су омогућили да се прикаже стање у области истраживања ове тезе, као и актуелност проблематике. Наведени научни радови су са тематског и суштинског значаја за израду докторске дисертације и послужили су као добра теоријска основа да се сагледа стање у испитиваним областима и формулишу циљеви ове дисертације. Из наведене литературе се уочава адекватно познавање предметне области истраживања и актуелног стања у овој области у свету.

5. Научни резултати докторске дисертације

Кандидат је кроз ову докторску дисертацију извршила систематизацију постојећих теоријских и експерименталних знања и искуства у области пластичне прераде Al-Mg легура узимајући у обзир различите утицаје (садржај легирајућих елемената, величину зрна, технологију прераде) и утврдила зависност између састава, технологије прераде и резултујуће микроструктуре.

Реализацијом истраживачког рада у овој дисертацији кандидат долази до одређених резултата и закључака који имају своје место како у научном, тако и у практичном смислу:

- Утврђене су и објашњене резлике у деформационом понашању при једноосном затезању и механичким својствима Al-Mg легура након ротационог ваљања и конвенционалног ваљања. Утврђено је да је она последица појаве динамичког опорављања, до кога долази приликом ротационог ваљања, а које се не јавља при ваљању глатким ваљцима. Овај феномен је први пут саопштен.
- Утврђен је механизам лома ротационо ваљаних Al-Mg легура при једноосном затезању и микроструктурне карактеристике које имају одлучујућу улогу у одређивању микромеханизма лома;
- Дефинисан је поступак контроле микроструктуре Al-Mg легура при термомеханичкој преради. Одређен је режим термомеханичке прераде све три Al-Mg легуре који обезбеђује добијање структуре са задатом величином зрна;
- Анализом расподеле честица секундарних фаза пре и након хомогнизације, установљено је да је примењени режим довео до огрубљавања честица секундарних фаза, првенствено честица $(\text{FeMn})\text{Al}_6$ фазе, на рачун растварања ситних дисперзоида. Ефекат је израженији у легурама са Mn ($\text{AlMg}_4,5\text{Mn}$ и AlMg_6Mn);
- Утврђен је утицај напонског стања и степена деформације при хладном ротационом ваљању конусних елемената од Al-Mg легура на промене у структури; Показано је да са повећањем степена деформације долази до значајне промене облика, величине и усмерености зрна, али да се разлике између примењених технологија не могу уочити оптичком микроскопијом, већ само ТЕМ-ом;
- Утврђен је утицај полазне величине зрна, садржаја легирајућих елемената и степена деформације при хладном ротационом ваљању на механичка својства ротационо ваљаних елемената; Показано је да се повећањем садржаја Mg у легури, повећањем степена деформације и смањењем величине зрна, граница течења и затезна чврстоће повећавају. Садржај Mg није показао једнозначан утицај на вредности издужења Al-Mg легура након ротационог ваљања. Такође је показано да се динамичко опорављање јавља при ротационом ваљању при већим степенима деформације, што доводи до повећања пластичности Al-Mg легура;
- Одређене су деформационе карактеристике при једноосном затезању Al-Mg легура деформисаних ротационом ваљањем, у области дисконтинуираног попуштања;
- Дефинисане су макроскопске и микроскопске карактеристике лома при једноосном затезању ротационо ваљаних елемената; Лом ротационо ваљаних Al-Mg легура при једноосном затезању се одвија дуктилним механизмом. Доминантан утицај на карактеристике лома Al-Mg легура су показали величина и расподела честица секундарних фаза. Показано је да крупне

честице секундарних фаза представљају места за нуклеацију микрошупљина за време деформације и ограничавају дуктилност и способност обликовања;

- Успостављена је веза између полазне микроструктуре и деформационог понашања при једноосном затезању: облика и карактеристика кривих деформације; Показано је да је деформација при једноосном затезању на собној температури и брзини деформације $\dot{\epsilon} = 6.7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ нехомогена, што се огледа у појави дисконтинуираног попуштања (ДП) на кривима деформације, без појаве изражене границе попуштања. Интензитет ДП се повећава са повећањем садржаја Mg у легури. Примењена технологија је такође показала утицај на тип и учесталост типова дисконтинуитета А и В;
- Објашњење су разлике у механичким својствима и деформационом понашању при једноосном затезању елемената хладно деформисаних двома технологијама. Ниже вредности границе течења и затезне чврстоће Al-Mg легура након РВ у односу на конвенционално ваљање су последица појаве динамичког опорављања;
- Претпостављено је да је појава динамичког опорављања при ротационом ваљању последица велике брзине деформације и велике количине топлоте концентрисане у уској зони деформације;

6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

У научно-теоријском смислу докторска дисертација кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије, под насловом „ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЋУЗАВИСНОСТИ САСТАВ – ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“ даје низ значајних резултата која представљају нова знања у вези са својствима и понашањем Al-Mg легура при ротационом ваљању конусних елемената и анализира уочене феномене који до сада нису били јасно објашњени у литератури.

Обзиром да се примена танкозидних конусних елемента од алуминијумских легура повећава са све убрзанијим развојем авио и војне индустрије, повећава се и интерес за истраживања у овој области. Овај рад илуструје истраживања у циљу добијања структуре материјала са побољшаним својствима која захтевају савремена средства наоружања и војне опреме. Резултати ове дисертације јасно указују на механизме лома као ограничавајућим фактором пластичне деформације легура са високим садржајем Mg.

Кроз научно-истраживачки рад приказан у овој дисертацији дефинисан је поступак контроле микроструктуре Al-Mg легура, што је веома значајно са аспекта практичне примене ових легура намењених пластичној деформацији.

Установљени су поступци контроле величине зрна и честица секундарних фаза чиме ће се директно утицати на експлоатациона својства. Такође, сазнање да процес обликовања прати динамичко опорављање, омогућиће примену већих степена

деформације и производњу делова сложенијих облика. Ова сазнања су такође битна и за дефинисање почетних и граничних вредности неопходних за моделирање процеса деформације.

Утицај микроструктуре на деформационо понашање и лом Al-Mg легура након хладног ваљања је предмет многих истраживања. Међутим, у случају ротационог ваљања, било конусних или цилиндричних елемената, утицају наведених фактора на својства обликованих елемената, деформационо понашање и лом, растворно ојачаних Al легура, које су погодније за ротационо ваљање од таложно ојачаних Al легура, није у литератури посвећена довољна пажња. Због тога овај рад има значајан допринос.

Нарочити велики интерес за истраживање има легура са 6% Mg и додатком Mn, о којој је у литератури постоји мало података, а код које се деформацијом може постићи чврстоћа и преко 500 MPa, па зависно од захтева, може заменити таложно ојачане легуре алуминијума серије 2xxx (Al-Cu), 6xxx (Al-Si-Mg) и 7xxx (Al-Zn-Mg/Cu) и смањити цену производње обликованих делова. Показано је да се AlMg6Mn легура може успешно обликовати ротационим ваљањем и постићи чврстоћа од око 450 MPa ($r=50\%$) уз задржавање дуктилности ($A_5=12\%$).

Посебан допринос, представља успостављање корелација између механичких својстава Al-Mg легура које су ротационо ваљане. Потврђено је да се стандардни тест једноосног затезања узорака Al-Mg легура ваљаних глатким ваљцима може користити за оцену способности обликовања ротационим ваљањем.

Осим тога, познавање карактера лома је важно како са аспекта пластичне прераде, тако и са аспекта експлоатације, те је веома битно успоставити везу између механизма лома и микроструктуре ради оптималног избора технологије обликовања и структуре легуре за конкретну намену, што је у овој тези и урађено.

Све коришћене методе су описане довољно детаљно да се истраживачки резултати могу репродуковати, односно верификовати.

Добијени резултати имају и велику практичну примену и при избору Al легура и технологије израде танкозидних делова ракета (балистичке и контактне капе, оплате бојевих глава, кумулативни левци, коморе ракетних мотора, млазнице и др.).

7. Начин презентирања резултата научној јавности

Део резултата из ове дисертације је већ публикован и верификован објављивањем резултата у међународним научним часописима и међународним конференцијама.

Комисија сматра да истраживања и резултати докторске дисертације пружају обиман и користан материјал за даљу презентацију на научним скуповима и објављивање радова у научним часописима који се баве развојем материјала и технологија.

На основу увида у резултате истраживања презентирани у докторској дисертацији, Комисија доноси следећи

ЗАКЉУЧАК

1. Докторска дисертација кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије, под насловом: „ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЃУЗАВИСНОСТИ САСТАВ – ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“ одговара теми прихваћеној од стране Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку.
2. Докторска дисертација представља значајан и оригиналан научни допринос у области инжењерства материјала, што је потврђено објављивањем радова у часописима од међународног значаја.
3. Теоријско-експерименталним радом на испитивању Al-Mg легура кандидат је показао системски приступ у планирању, организовању и реализацији истраживања.
4. У овој дисертацији кандидат је кроз обимна истраживања дошао до оригиналних научних резултата потребних за дефинисање природе понашања Al-Mg легура при деформацији у зависности од полазног састава и микроструктуре.
5. Докторска дисертација је оригинални научни и самостални рад кандидата који је резултат вишегодишњег истраживања, коришћења савремених метода и поступака, као и коришћења савремене теоријске стручне литературе. Добијени резултати представљају веома значајан допринос знањима везаним за термомеханичку прераду Al-Mg легура и технологију ротационог ваљања конусних елемената.
6. Презентирани рад кандидата по квалитету, обиму и резултатима истраживања у потпуности задовољава законске услове и универзитетске норме прописане за израду докторске дисертације.

На основу претходно изнетог предлажемо Наставно-научном већу Факултета техничких наука у Чачку да прихвати докторску дисертацију кандидата мр Љубице Радовић, дипл. инж. металургије, под насловом

„ДЕФОРМАЦИОНО ПОНАШАЊЕ И КАРАКТЕРИСТИКЕ ЛОМА Al-Mg ЛЕГУРА У СВЕТЛУ МЕЋУЗАВИСНОСТИ САСТАВ – ТЕХНОЛОГИЈА – СТРУКТУРА“

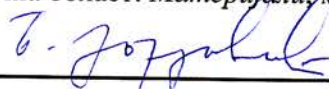
као успешно урађену и да кандидата позове на усмену јавну одбрану дисертације.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ:

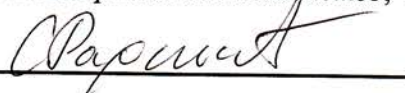
1. **Др Венцислав Грабулов, научни саветник**
Институт за испитивање материјала Србије, Београд
Научна област: *Материјали*, председник



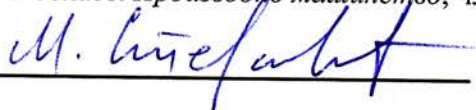
2. **Др Бранка Јордовић, ред. проф.**
Факултет техничких наука у Чачку
Научна област: *Материјали*, ментор



3. **Др Снежана Радовић, ред. проф.**
Факултет техничких наука у Чачку
Научна област: *Производно машинство*, члан



4. **Др Милентије Стефановић, ред. проф.**
Факултет инжењерских наука у Крагујевцу
Научна област: *Производно машинство*, члан



5. **Др Миљана Поповић, ванр. проф.**
Технолошко-металуршки факултет Београд
Научна област: *Материјали*, члан

