

ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА У НОВОМ САДУ

ИЗВЕШТАЈ О ОЦЕНИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

-обавезна садржина- свака рубрика мора бити попуњена

(сви подаци уписују се у одговарајућу рубрику, а назив и место рубрике не могу се мењати или изоставити)

I ПОДАЦИ О КОМИСИЈИ:
<p>1. Датум и орган који је именовео комисију</p> <p>На основу предлога Катедре за технологије обликовања и инжењерство површина, Одлуке Наставно-научног већа Департмана за производно машинство и Одлуке Наставно-научног већа Факултета техничких наука, а у складу са чланом 77, став 1, Статута Факултета техничких наука, Декан Факултета техничких наука, решењем 012-72/63-2013 од 16.07.2015, именовео је Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације.</p>
<p>2. Састав комисије са знаком имена и презимена сваког члана, звања, назива уже научне области за коју је изабран у звање, датума избора у звање и назив факултета, установе у којој је члан комисије запослен:</p> <p>1. Др Милентије Стефановић, редовни професор, ужа научна област: Производно машинство и индустријски инжењеринг, изабран у звање редовног професора 25.01.1995, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, председник</p> <p>2. Др Србислав Александровић, редовни професор, ужа научна област: Производно машинство и индустријски инжењеринг, изабран у звање редовног професора 27.01.2011, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, члан</p> <p>3. Др Лепосава Шиђанин, професор емеритус, ужа научна област: Наука о материјалима, инжењерски материјали и микроскопија, изабрана у звање професора емеритуса 24.01.2008, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, члан</p> <p>4. Др Мирослав Планчак, редовни професор у пензији, ужа научна област: Технологије пластичног деформисања, брза израда прототипова и модела и виртуална производња, изабран у звање редовног професора 28.03.1995, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, члан</p> <p>5. Др Бранко Шкорић, редовни професор, ужа научна област: Технологија ливења и термичке обраде, инжењерство површина и нанотехнологије, изабран у звање редовног професора 13.06.2011, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, члан</p> <p>6. Др Дамир Какаш, редовни професор, ужа научна област: Технологија ливења и термичке обраде, инжењерство површина и нанотехнологије, изабран у звање редовног професора 14.03.1994, Универзитет у Новом Саду, Факултет техничких наука, ментор</p>
II ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ
<p>1. Име, име једног родитеља, презиме: МАРКО (ДРАГИША) ВИЛОТИЋ</p>
<p>2. Датум рођења, општина, држава: 13. априла 1979, Нови Сад, Република Србија</p>

3. Назив факултета, назив студијског програма дипломских академских студија – мастер и стечени стручни назив:

**Факултет техничких наука, Нови Сад,
Одсек: Машински; смер: Производно машинство 2
Стечени стручни назив: Дипломирани машински инжењер**

4. Година уписа на докторске студије и назив студијског програма докторских студија:

/

5. Назив факултета, назив магистарске тезе, научна област и датум одбране:

**Факултет техничких наука, Нови Сад,
Јонска имплантација површине алата за хладно запреминско деформисање,
Техничко-технолошке науке; област: Машинство
Датум одбране: 06.05.2011.**

6. Научна област из које је стечено академско звање магистра наука:

Техничко-технолошке науке; област: Машинство

III НАСЛОВ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

**ИНТЕНЗИВНА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦИЈА У ПРОЦЕСИМА ВИШЕФАЗНОГ
САБИЈАЊА МАТЕРИЈАЛА**

IV ПРЕГЛЕД ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Навести кратак садржај са назнаком броја страна, поглавља, слика, шема, графикона и сл.

Савремене методе обраде деформисањем изазивају одређене промене у структури материјала, што се манифестује ојачавањем материјала и побољшањем њихових механичких особина, уз губитак пластичности. За значајније повећање механичких особина метала неопходно је значајније уситњавање зрна микроструктуре материјала.

Интензивна пластична деформација је поступак који омогућује стварање ултрафине (субмикронске) структуре материјала по запремини радног комада, без дефеката у материјалу и уз задржавање високе пластичности материјала.

Циљ истраживања ове докторске дисертације били су развој новог поступка интензивне пластичне деформације у области хладног запреминског деформисања и провера утицаја тог поступка на својства материјала након ове обраде.

Основна претпоставка истраживања била је да се екстремна пластична деформација може остварити поступком вишефазног хладног сабијања призматичног припремка помоћу алата одређене геометрије, то јест алатима одговарајућег профила.

За реализацију постављеног циља, у складу с уведеном хипотезом сачињен је адекватан план теоријско-експерименталних истраживања, који обухвата следеће: теоријску анализу процеса вишефазног сабијања помоћу V-алата, нумеричку симулацију сабијања V-алатом, експериментална испитивања процеса сабијања V-алатом, испитивање особина материјала након процеса вишефазног сабијања.

На основу детаљних теоријско-експерименталних истраживања, резултата нумеричке симулације, анализе микроструктуре материјала помоћу скенинг и трансмисионог електронског микроскопа и након механичких испитивања материјала, установљено је да поступак вишефазног сабијања призматичног обратка помоћу V-алата, представља методу интензивне пластичне деформације.

Докторска дисертација кандидата мр Марка Вилотића под насловом – **Интензивна пластична деформација у процесима вишефазног сабијања материјала** написана је на 198 страна.

Дисертација садржи: 29 табела, 155 слика/графикона/шема/дијаграма и 209 литературних референци.

Основном тексту претходе: наслов рада, Резиме, Summary, Захвалност, Acknowledgement, Кључна документацијска информација и садржај.

Дисертација је презентована у десет поглавља:

1. Увод
2. Приказ стања у области интензивне пластичне деформације
3. Предмет, циљ истраживања, хипотезе

4. Методе истраживања, материјал и опрема
5. Резултати истраживања
6. Коментар резултата
7. Закључак
8. Научни допринос истраживања и могућност примене резултата истраживања у пракси
9. Предлог будућих истраживања
10. Литература

V ВРЕДНОВАЊЕ ПОЈЕДИНИХ ДЕЛОВА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

1. Увод

У овом поглављу кандидат је указао да конвенционалне методе обраде деформисањем изазивају одређене промене у структури материјала, што се манифестује ојачавањем и побољшањем њихових механичких особина, уз губитак пластичности. Релација Hall-Pech показује да је за постизање већих ефеката у погледу побољшања особина материјала потребно значајније уситњавање структуре материјала. Повећање чврстоће материјала омогућује смањење тежине елемената конструкције, што може имати посебан значај у одређеним областима технике.

У поступке којима се добијају ситнозрна структура и наноструктурни материјали с ултрафином структуром спадају: методе депозиције, високоенергетско млевење материјала, брзо очвршћивање растопљеног метала и метода интензивне пластичне деформације.

Интензивна пластична деформација је поступак који омогућује стварање ултрафине и наноструктуре материјала по запремини обратка. Током поступка интензивне пластичне деформације, у материјалу се морају остварити екстремне вредности смичуће деформације у условима високог хидростатичког притиска, а границе зрна новонастале структуре морају бити високоугаоне.

Методе интензивне пластичне деформације развијају се у области запреминског деформисања и подручју обликовања лима. Међутим, већина метода није достигла индустријску примену, и углавном су на нивоу лабораторијских истраживања феномена и својстава интензивне пластичне деформације.

Циљ истраживања докторске дисертације кандидата мр Марка Вилотића били су развој новог поступка интензивне пластичне деформације у области хладног запреминског деформисања и провера утицаја интензивне пластичне деформације на микроструктуру и механичка својства материјала након ове обраде.

Комисија сматра да је кандидат мр Марко Вилотић у Уводу јасно дефинисао предмет и циљ истраживања који се односе на развој нове технологије у области пластичног деформисања.

2. Приказ стања у области интензивне пластичне деформације

Све снажнија конкуренција у свету и прописи из области заштите животне средине, захтевају да се делови машина, уређаја и система производе од материјала који треба да задовоље захтеве у погледу функционалности производа, цене и, посебно, захтеве у погледу утицаја на животну средину. Нови поступци обраде материјала стварају услове за развој нових производа с унапређеним функционалним особинама, прихватљивом ценом и минималним утицајем на животну средину. Материјали с ултрафином величином зрна привлаче значајну пажњу као потенцијал у изради делова који треба да задовоље или чак превазиђу тренутне захтеве тржишта. Стварање материјала с ултрафином структуром могуће је применом технологије интензивне пластичне деформације. Кандидат посебно указује да актуелност теме интензивне пластичне деформације потврђује узлазни тренд публикованих радова по годинама истраживања, као и укупни број до сада објављених радова.

Интензивна пластична деформација омогућује стварање ултрафине структуре материјала чија је величина зрна субмикронска, мада има и случајева стварања наноструктуре величине зрна испод 30 nm.

У овом поглављу су презентоване основне методе интензивне пластичне деформације, с критичким освртом на њихове карактеристике, од којих су најзначајније: торзија под високим притиском, истискивање кроз угаони канал, калибрационо ваљање, вишеосно сабијање, наизменично истискивање и сабијање, наизменично савијање и исправљање и др.

Анализом литературе кандидат мр Марко Вилотић потврдио је да се експерименти интензивне пластичне деформације најчешће изводе на алуминијуму, челику, бакру, титанијуму, никлу итд.

За потребе карактеризације структуре материјала након интензивне пластичне деформације највише се користе електронски микроскопи – скенинг и трансмисиони. Провера механичких својстава материјала најчешће се изводи стандардним механичким испитивањима на затезање и мерењем тврдоће. Постоје и подаци о анализи деформабилности материјала.

Што се тиче индустријске примене метода интензивне пластичне деформације, кандидат је констатовао да је имплементација ове технологије релативно слаба а користи се у производњи специјалних делова машина и уређаја те у области медицине за израду импланата. Материјали добијени интензивном пластичном деформацијом се примењују за даљу прераду методама суперпластичног деформисања, што је посебно важно за израду делова од титанијумских легура, попут турбинских лопатица. Како су технолошке иновације повезане с порастом механичких својстава материјала, ускоро се очекује се значајнија индустријска примена ове технологије.

На основу увида у досадашња истраживања у области интензивне пластичне деформације Комисија сматра да је преглед конципиран јасно и да су обухваћени сви неопходни аспекти за истраживања изведена у овој дисертацији. Посебно се истиче квалитетан критички приступ литературним подацима.

3. Предмет, циљ истраживања, хипотезе

У овом поглављу кандидат мр Марко Вилотић на јасан начин дефинише технологију производње материјала с ултрафином структуром методом интензивне пластичне деформације у хладном стању, као предмет истраживања.

Циљ истраживања било је креирање једноставног поступка деформисања у хладном стању који ће омогућити постизање високих вредности степена деформације у обратку, без појаве оштећења структуре материјала, и стварање материјала с ултрафином структуром од јефтиног комерцијалног нискоугљеничног челика.

Истраживања су темељена на хипотези да се поступак интензивне пластичне деформације може реализовати методом вишефазног сабијања призматичног обратка помоћу пара идентичних алата V-профила.

Комисија сматра да су предмет, циљ истраживања и наведене хипотезе у овој докторској дисертацији јасно дефинисане.

4. Методе истраживања, материјал и опрема

За реализацију постављених циљева кандидат мр Марко Вилотић најпре је успоставио концепцију истраживања која предвиђа експериментално обликовање узорака поступком вишефазног сабијања призматичног припремка V-алатом и потом детаљна испитивања насталих структурних промена и механичких особина материјала, уз претходну теоријску анализу и нумеричку симулацију поступка сабијања.

У складу с постављеним циљем и концепцијом истраживања, сачињен је и адекватан план истраживања који обухвата: Теоријску анализу процеса сабијања V-алатом са аспекта интензивне пластичне деформације; Дефинисање геометрије V-алата и геометрије узорка; Избор материјала за узорке и дефинисање претходне термичке обраде; Симулацију процеса сабијања V-алатом; Експериментална истраживања процеса вишефазног сабијања V-алатом; Испитивање карактеристика материјала након вишефазног сабијања.

С обзиром на значај ефективне деформације у процесу интензивне пластичне деформације, проблему одређивања деформације при сабијању V-алатом посвећена је дужна пажња. Кандидат је у ту сврху поставио теоријско-експериментални модел одређивања компоненти инкременталне и укупне деформације у главним правцима по фазама сабијања.

Метода нумеричке симулације коришћена је као начин прелиминарних испитивања процеса вишефазног сабијања V-алатом која је имала за циљ предвиђање ефеката овог процеса.

За експериментална истраживања израђен је алат V-профила са централним углом од 120 степени. Припремци за експерименте имали су димензије 14 x 14 x 70 mm и израђени су од Č.1221. Термичка обрада узорака (нормализација) извршена је у заштитној атмосфери након њихове израде.

Сабијање узорака изведено је на хидрауличној преси у Лабораторији за технологије пластичног деформисања на Факултету техничких наука – Департман за производно машинство.

За карактеризацију микроструктуре предвиђене су скенинг и трансмисиона електронска микроскопија. Скенинг електронска микроскопија урађена је у Универзитетском центру за електронску микроскопију у Новом Саду а трансмисиона електронска микроскопија на Националном Чунг Ченг универзитету на Тајвану. Узорци за трансмисиону микроскопију су израђивани поступком јонског глодања (FIB поступак).

Механичке особине проверене су испитивањем тврдоће и испитивањем на затезање узорака који су израђивани и претходно деформисаног материјала помоћу V-алата. Пластична својства вишефазно сабијаног материјала оцењена су анализом површине прелома и анализом деформабилности материјала.

На основу приказа 4. поглавља Комисија сматра да је кандидат мр Марко Вилотић правилно поставио концепцију и план теоријско-експерименталних и нумеричких истраживања у својој

докторској тези, те да је примењивао савремене и врло софистициране методе истраживања у циљу доказивања ефеката вишефазног сабијања V-алатом с аспекта интензивне пластичне деформације.

5. Резултати истраживања

Резултати истраживања у дисертацији кандидата мр Марка Вилотића презентовани су у шест потпоглавља, у складу са планом истраживања и у наставку су укратко приказани.

У поглављу 5.1 приказано је теоријско решење одређивања компоненти деформације на осам узорка при сабијању V-алатом. Такође, развијен је и модел за теоријско-експериментално одређивање деформација на чеоној површини узорка помоћу мерне мреже.

Резултати нумеричке симулације процеса вишефазног сабијања призматичног узорка V-алатом приказани су у поглављу 5.2 а обухватају следеће параметре: ефективна деформација, ефективни напон, контактни напони, хидростатички напон и деформациона сила.

Нумеричка симулација је показала да ефективна деформација има највише вредности у центру средишњег пресека узорка ($\phi_e = 11,44$), а на чеоној површини, такође у средишту, има вредност $\phi_e = 3,9$. Симулацијом је такође утврђена неравномерност деформације како у попречном тако и уздужном пресеку узорка.

Сходно дистрибуцији ефективне деформације мења се и ефективни напон. Највише вредности ефективног напона обухватају централну уздужну зону узорка, а порастом броја фаза сабијања та зона се шири ка периферији.

Хидростатички напон је важан параметар интензивне пластичне деформације. Утиче на услове деформисања са становишта појаве лома у материјалу. Критична зона при сабијању V-алатом је средиште чеоне површине. Међутим како симулација показује, у тој области током свих фаза деформисања хидростатички напон има притисни карактер, што спречава појаву разарања материјала.

Нормалне контактне напоне добијене симулацијом карактерише релативна равномерност по површини узорка, посматрано из правца чела узорка.

Ток дијаграма деформационе силе у зависности од хода алата добијен нумеричком симулацијом очекивано је сличан другим процесима сабијања. Максималне вредности силе бележе се на крају процеса сабијања одређене фазе. Ови подаци експериментално су потврђени.

Резултати експерименталних истраживања вишефазног сабијања призматичног узорка помоћу V-алата приказани су у поглављима 5.3 – 5.5. Експериментом су добијени: узорци обликовани V-алатом с различитим бројем фаза; дијаграми деформационе силе по фазама сабијања; димензије мерне мреже на чеоној површини призматичног узорка по фазама сабијања; просечне деформације узорка након одређене фазе сабијања; инкременталне компоненте деформације елемената ограничених мерном мрежом и укупне деформације након одређеног броја фаза сабијања.

Вишефазно сабијање успешно је извршено на осамнаест узорка уз одговарајући број фаза. У експерименту није било појаве разарања материјала. Узорци су задржали призматичан облик, али постоји благо иобличене полазног облика (набуричење).

Експериментално одређени дијаграм силе по свом облику подсећа на дијаграм одређен нумеричком симулацијом.

Теоријско-експерименталним поступком одређене су компоненте инкременталне и укупне деформације на чеоној површини узорка по фазама сабијања. Ове вредности су сматране референтним за даља истраживања. Укупна вредност ефективне деформације у средишту чела узорка након осамнаест фаза сабијања износи $\phi_e = 3,38$.

Комисија сматра да су резултати експеримента сабијања помоћу V-алата од великог значаја јер показују да овај поступак обезбеђује високе вредности ефективне деформације без појаве разарања материјала.

У поглављу 5.6 приказани су резултати микроструктурне анализе скенинг електронским микроскопом (СЕМ, поглавље 5.6.1) и трансмисионим електронским микроскопом (ТЕМ, поглавље 5.6.2).

Скенинг микроскопија је показала да су након осам фаза сабијања ($\phi_e = 2,74$) границе у средишту узорка практично потпуно невидљиве, што указује на екстремно високо смицање у процесу деформисања. После дванаесте фазе сабијања у средишту узорка уочено је вртложно течење материјала које има додатни ефекат смицања и уситњавања структуре материјала.

На основу микроструктурних испитивања материјала трансмисионим електронским микроскопом након вишефазног сабијања закључено је следеће:

Стварање великоугаоних граница на мањем броју зрна и формирање прстенова око трансмисионог снопа указују на почетак процеса уситњавања зрна у узорку сабијеном у четири фазе при вредности ефективне деформације $\phi_e = 2,00$.

Већи број кристалних зрна с великоугаоним границама и мање издужена зрна упућују на значајнији

процес уситњавања зрна на узорку сабијеном у шест фаза.

Просечна величина феритних зрна у дванаестој фази од око 250 nm, велики број прстенова на дифракционој слици и велики број зрна с великоугаоним границама потврдили су да се сабијање алатом V-облика може користити као метода за стварање УФЗ структуре у нискоугљеничном челику.

Резултате испитивања механичких својстава материјала након вишефазног сабијања презентује поглавље 5.7.

На основу испитивања тврдоће материјала (макро, микро и нанотврдоће) након вишефазног сабијања V-алатом (поглавље 5.7.1) утврђено је следеће: порастом броја фаза сабијања, то јест повећањем ефективне деформације повећава се тврдоћа материјала; најпрецизнији подаци о тврдоћи добијени су испитивањем микротврдоће. У средишњој области узорка, микротврдоћа је повећана скоро два пута у односу на почетно стање већ након друге фазе сабијања; резултати мерења нанотврдоће нису поуздан показатељ насталих промена након вишефазног сабијања V-алатом.

На основу резултата испитивања на затезање у зависности од броја фаза сабијања V-алатом (поглавље 5.7.2) установљено је следеће:

Порастом броја фаза сабијања повећавају се граница течења и чврстоћа материјала. Већ након четврте фазе сабијања чврстоћа материјала је увећана скоро двоструко у односу на чврстоћу полазног материјала, док је истовремено граница течења повећана 2,8 пута.

Максимално и равномерно издужење као и равномерна ефективна деформација нагло опадају с порастом броја фаза сабијања, односно порастом ефективне деформације остварене сабијањем V-алатом.

Дуктилност материјала након вишефазног сабијања V-алатом, која је проверена прегледом површине прелома (макро и микро), показује да је након вишефазног сабијања материјал задржао дуктилна својства.

Детаљну проверу пластичних својстава материјала кандидат мр Марко Вилотић је извео испитивањем деформабилности материјала, односно конструкцијом дијаграма граничне деформабилности у зависности од броја фаза сабијања V-алатом (поглавље 5.7.4). На основу ових испитивања закључено је да материјал С.1221, који је третиран вишефазним сабијањем помоћу V-алатом и након високе претходне деформације има висока пластична својства при испитивању сабијањем ваљка равним плочама.

Комисија сматра да су резултати теоријских, нумеричких и експерименталних истраживања приказани у докторској дисертацији кандидата мр Марка Вилотића од изузетног значаја, јер су потврдили да процес вишефазног сабијања V-алатом припада категорији технологија интензивне пластичне деформације.

6. Коментари резултата

У поглављу 6. кандидат је извео детаљну и квалитетну критичку анализу резултата остварених сопственим истраживањима, уз поређење с адекватним резултатима других аутора у области технологије интензивне пластичне деформације. Резултати су анализирани према редоследу који прати план истраживања.

На основу експерименталног сабијања V-алатима потврђено је да овај поступак обезбеђује високе вредности укупне ефективне деформације без појаве разарања, што је основни захтев који испуњавају поступци интензивне пластичне деформације. Кандидат правилно закључује да је то могуће стога што V-алат својим четвоространим дејством ствара претежно притисно напонско стање по запремини обратка.

На основу резултата нумеричке симулације кандидат даје препоруку да се ова метода може користити само за прелиминарна истраживања вишефазних процеса сабијања и да се резултати експеримента (деформациона сила и дистрибуција деформације по појединим зонама) значајно разликују. Добро слагање вредности ефективне деформације добијене симулацијом и експериментом постоји само на чеоној површини узорка током свих фаза сабијања.

Микроструктурна испитивања материјала скенинг и трансмисионом електронском микроскопијом показала су еволуцију развоја ултрафине структуре. Кандидат изводи закључак да је значајнија промена микроструктуре наступила већ након четврте, односно шесте фазе сабијања, а дефинитивно профињавање микроструктуре постигнуто је већ након дванаесте фазе.

На основу резултата испитивања тврдоће кандидат је установио да у процесу вишефазног сабијања V-алатима, повећање броја фаза условљава повећање тврдоће како макро тако и микро и нанотврдоће. У одређеним фазама сабијања уочена је сатурација тврдоће, што је феномен који бележе и други поступци интензивне пластичне деформације који су приказани у бројним референцама.

Испитивањем на затезање основних механичких карактеристика материјала након вишефазног сабијања кандидат је потврдио, слично подацима из литературе, да интензивна пластична деформација у

значајној мери побољшава чврстоћу и границу течења због ефекта уситњавања материјала. При томе је установљен значајан пад укупне и равномерне деформације с повећањем броја фаза сабијања. Овај ефекат такође је познат истраживачима из области интензивне пластичне деформације.

На основу анализе површине прелома помоћу скенинг микроскопа закључено је да је лом дуктилан, што је у сагласју с резултатима других аутора.

На основу испитивања деформабилности материјала после вишефазног сабијања V-алатом, кандидат је утврдио да материјал и даље има високу деформабилност, што је у сагласности с резултатима других аутора (Bridgman, Valiev и др.).

Комисија констатује да је кандидат спровео изузетно квалитетну анализу резултата остварених у својој докторској дисертацији, те да их је непрекидно потврђивао поређењем с резултатима светски реномираних аутора из области интензивне пластичне деформације.

7. Закључак

У овом поглављу приказани су сумарни резултати истраживања са закључцима по појединим сегментима истраживања на предметној докторској дисертацији. На основу укупних резултата истраживања у оквиру ове дисертације, кандидат закључује да процес вишефазног сабијања призматичног обратка помоћу V-алата спада у категорију технологија интензивне пластичне деформације из следећих разлога:

- Обезбеђује високе вредности деформација у условима доминантног притисног напонског стања;
- Омогућује уситњавање и стварање високоугаоне микроструктуре материјала до вредности које одговарају величини ултрафине структуре (просечна величина зрна је 250 nm);
- Обезбеђује значајно повећање механичких својстава материјала (тврдоће и чврстоће), уз задржавање високе дуктилности материјала;
- Омогућује обликовање предмета различитих димензија;
- Има реалну могућност практичне примене за израду квалитетних производа у различитим областима машинске технике, медицине, електротехнике, прецизном инжењерству и др.
- Пружа велике могућности за стварање нових метода ИПД на сличном начелу;
- Има посебан значај јер омогућује трансформацију комерцијалних металних материјала у високо материјале нових, значајно побољшаних својстава.
- Отвара широко подручје за даља истраживања у овој области.

На основу изложеног Комисија у потпуности подржава изведене закључке аутора и сматра их веома значајним јер целовито одражавају суштину истраживања и потврђују уводну хипотезу о оправданости декларисања радног процеса вишефазног сабијања V-алатом као поступка интензивне пластичне деформације.

8. Научни допринос истраживања и могућност примене резултата истраживања у пракси

Основни научни допринос ове тезе јесте развој нове технологије интензивне пластичне деформације, засноване на вишефазном сабијању призматичног припремка помоћу V-алата. Нова технологија интензивне пластичне деформације омогућује стварање ултрафине микроструктуре материјала, што позитивно делује на побољшање механичких својстава.

Развијена технологија интензивне пластичне деформације (вишефазно сабијање V-алатом) има реалну могућност практичне примене у производњи различитих машинских елемената повишених механичких особина и у производњи медицинских импланта и надоградњи.

9. Предлог будућих истраживања

Током истраживања вишефазног сабијања V-алатом кандидат је уочио одређене недостатке овог поступка од којих су посебно значајни издуживање обратка при сабијању и, с тим у вези, проблем смањења површине попречног пресека обратка, затим смањење хода алата и опадање вредности инкременталне деформације. Осим тога испољена је и неравномерност деформација у попречном и уздужном пресеку обратка.

За решавање уочених проблема кандидат предлаже увођење ограничења дужине при сабијању, то јест увођење поступка вишефазног сабијања у затвореном V-алату.

Такође кандидат предлаже да се за значајније повећање степена деформације при сабијању V-алатом без ограничења аксијалног течења материјала примени поступак вишефазног сабијања уз постепено смањење површине калибра алата.

10. Литература

Преглед коришћене литературе садржи 209 литературних навода. Од тога, 29 референци из периода 2011–2015. и 70 из периода 2006–2010, што заједно представља 47% референци из последње деценије. Висок проценат приказаних и коришћених најновијих литературних навода додатно потврђује да је тема дисертације веома актуелна и атрактивна.

VI СПИСАК НАУЧНИХ И СТРУЧНИХ РАДОВА КОЈИ СУ ОБЈАВЉЕНИ ИЛИ ПРИХВАЋЕНИ ЗА ОБЈАВЉИВАЊЕ НА ОСНОВУ РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА У ОКВИРУ РАДА НА ДОКТОРСКОЈ ДИСЕРТАЦИЈИ:

Таксативно навести називе радова, где и када су објављени. Прво навести најмање један рад објављен или прихваћен за објављивање у часопису са ИСИ листе односно са листе министарства надлежног за науку када су у питању друштвено-хуманистичке науке или радове који могу заменити овај услов до 01. јануара 2012. године. У случају радова прихваћених за објављивање, таксативно навести називе радова, где и када ће бити објављени и приложити потврду о томе.

M21 Рад у врхунском међународном часопису

1. Vilotić Dragiša, Alexandrov Sergei, Šidanin Laposava, **Vilotić Marko**: The influence of torsional and tensile pre-straining on the validity of ductile fracture criteria, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 23, No. 1, str. 63–82, 2014, ISBN 1056-7895, Izdavač: SAGE.

2. Alexandrov Sergei, Vilotić Dragiša, Konjović Zoran, **Vilotić Marko**: An Improved Experimental Method for Determining the Workability Diagram, *Experimental Mechanics*, Vol. 53, No. 4, str. 699–711, 2013, ISBN 0014-4851, Izdavač: Springer.

M22 Рад у истакнутом међународном часопису

1. Vilotić Dragiša, Alexandrov Sergei, Plančak Miroslav, **Vilotić Marko**, Ivanišević Aljoša, Kačmarčik Igor: Material Formability at Upsetting by Cylindrical and Flat Dies, *Steel Research International*, str. 1175–1178, 2012, ISBN 1611–3683, Izdavač: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

2. Vilotić Dragiša, Alexandrov Sergei, Plančak Miroslav, Movrin Dejan, Ivanišević Aljoša, **Vilotić Marko**: Material Formability of Upsetting by V-Shape Dies, *Steel Research International*, str. 923–928, 2011, ISBN 1611-3683, Izdavač: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.

3. Alexandrov Sergei, **Vilotić Marko**, Jeng Yeau-Ren, Plančak Miroslav: A study on material workability by upsetting of non-axisymmetric specimens by flat dies, *Journal of Mechanics*, Vol. 30, No. 6, str. 585–592, 2014, ISBN 1727-7191, Izdavač: Society of Theoretical and Applied Mechanics.

M33 Саопштење са међународног скупа штампано у целини

1. Alexandrov Sergei, **Vilotić Marko**, Jeng Yeau-Ren, Plančak Miroslav: A Study on Material Workability by Upsetting of Non-Axisymmetric Specimens by Flat Dies, str. 35–40, *International Conference: Advances in Materials and Processing Technologies - AMPT (16, Taipei, 2013)*.

2. **Vilotić Marko**, Kakaš Damir, Terek Pal, Kovačević Lazar, Kukuruzović Dragan, Miletić Aleksandar: Severe Plastic Deformation by Compression, str. 497–500, ISBN 978-86-7892-429-3, Izdavač: Faculty of technical sciences, *International Scientific Conference "Advanced Production Technologies" - MMA "Advanced Production Technologies" (11, Novi Sad, 2012)*.

M34-Саопштење са међународног скупа штампано у изводу

1. **Vilotić Marko**, Kakaš Damir, Alexandrov Sergei, Šidanin Laposava, Jeng Yeau-Ren: Grain Size Refinement of Carbon Steel by V-Shape Dies Compression, *International Conference on Nanostructured Materials - NANO (12, Moskva, 2014)*.

M51 Рад у водећем часопису националног значаја

1. **Vilotić Marko**, Kakaš Damir, Šidanin Laposava, Alexandrov Sergei, Jeng Yeau Ren, Terek Pal: Severe

VII ЗАКЉУЧЦИ ОДНОСНО РЕЗУЛТАТИ ИСТРАЖИВАЊА:

На основу изведених истраживања и добијених резултата у овој докторској дисертацији изведени су закључци у складу с појединим сегментима истраживања. Циљ истраживања био је да се докаже како поступак вишефазног сабијања V-алатом спада у категорију процеса интензивне пластичне деформације.

1. Теоријском анализом установљено је да процес вишефазног сабијања V-алатом има могућност остваривања високих вредности ефективне деформације, што је основни услов интензивне пластичне деформације.
2. На основу резултата симулације сабијања призматичног узорка V-алатом закључено је следеће:
 - Деформационо стање је нехомогено у попречном и уздужном правцу узорка с максимумом ефективне деформације у средишту. Повећање броја фаза проширује област високих деформација у попречном пресеку узорка. Укупна ефективна деформација на чеоној површини узорка након осамнаест фаза сабијања износи $\varphi_e = 3,9$.
 - Ефективни напон добијен симулацијом има дистрибуцију сличну ефективној деформацији. Дистрибуција ефективног напона утврђена симулацијом показује њену неравномерност по попречном пресеку узорка. Зона високог ојачавања након осамнаест фаза сабијања обухвата око 75% пресека узорка.
 - Хидростатички напон има претежно негативне вредности (притисно стање) у обратку, што онемогућује појаву лома.
 - Дијаграм деформационе силе добијен симулацијом има очекивани ток у процесу сабијања V-алатом. Ове вредности су проверене експериментално.
3. Најзначајнији резултати истраживања процеса вишефазног сабијања V-алатом добијени су експериментално, према утврђеном плану истраживања, на основу којих је закључено:
 - 3.1. При вишефазном сабијању призматичног припремка V-алатом величина попречног пресека обратка смањује се порастом броја фаза сабијања, а дужина узорка повећава, што утиче на неједнакост деформација уздуж аксијалне осе обратка.
 - 3.2. Дијаграм деформационе силе у зависности од хода алата при сабијању V-алатом (слика 6.1) показује да су резултати нумеричке симулације слични подацима добијеним експериментом, уз чињеницу да постоје сигнификантне разлике у погледу апсолутних вредности, које се крећу и до 60%. И овај резултат показује несавршеност нумеричке симулације када су у питању вишефазни процеси обликовања, попут сабијања V-алатима, који је изразито немонотон.
 - 3.3. Деформационо стање у процесима ИПД кључни је параметар који дефинише могућност трансформације микроструктуре и одређује коначну величину зрна. Због тога је овом проблему била посвећена адекватна пажња. На основу експерименталних података о ефективној деформацији на чеоној површини узорка закључено је следеће:
 - Деформационо стање је нехомогено, максимум је у средишту узорка, с тим што се зона високих вредности ефективне деформације постепено проширује с порастом броја фаза сабијања.
 - Максимална ефективна деформација у средишту слободне површине износи 3,38, а према симулацији 3,46.
 - Вредности ефективне деформације на слободној површини узорка по фазама сабијања, добијене нумеричком симулацијом и експериментално, скоро су подударне. На основу добијених података закључује се да појас високих вредности ефективне деформације ($\varphi_e > 1,5$) обухвата зону узорка пречника око 10 mm.
4. Неравномерност ефективне деформације постоји и у другим поступцима интензивне пластичне деформације, на шта је указано и у дисертацији.
5. На основу микроструктурних испитивања материјала скенинг електронским микроскопом по фазама сабијања закључено је следеће:
 - Након прве фазе сабијања ($\varphi_e = 2,74$) није било значајнијих промена микроструктуре.
 - Након двофазног сабијања ($\varphi_e = 1,05$) у средишту узорка примећена је слаба видљивост

- граница зрна.
- Након осам фаза сабијања ($\varphi_e = 2,74$) границе у средишту узорка су практично потпуно невидљиве, што указује на екстремно високо смицање у процесу деформисања.
 - Након дванаесте фазе сабијања у средишту узорка је уочено вртложно течење материјала, које има додатни ефекат смицања и уситњавања структуре материјала.
 - Микроструктура у центру узорка после осамнаест фаза сабијања при укупној ефективној деформацији $\varphi_e = 3,38$, не разликује се значајније од микроструктуре узорка сабијеног у дванаест фаза због незнатног одступања у оствареној ефективној деформацији – $\varphi_{e12} = 3,05$, док је $\varphi_{e18} = 3,38$.
 - Према томе, ефекат ИПД у процесу сабијања V-алатом остварен је већ након дванаест фаза сабијања.
6. На основу микроструктурних испитивања материјала трансмисионим електронским микроскопом, након вишефазног сабијања закључено је следеће:
- Стварање великоугаоних граница на мањем броју зрна и формирање прстенова око трансмисионог снопа указују на почетак процеса уситњавања зрна у узорку након четири фазе сабијања, при вредности ефективне деформације $\varphi_e = 2,00$. Међутим, велики број издужених зрна говори да четири фазе сабијања нису довољне да створе микроструктуру с претежно великоугаоним границама зрна.
 - Већи број кристалних зрна великоуганих граница и мање издужена зрна указују на интензивнији процес уситњавања зрна на узорцима сабијаним у шест фаза.
 - Након осам фаза сабијања, број зрна с великоугаоним границама повећан је у односу на шесту фазу, а број и целовитост прстенова на дифракционој слици су увећани и потпунији.
 - Просечна величина феритних зрна у дванаестој фази (око 250 nm), велики број прстенова на дифракционој слици и велики број зрна с великоугаоним границама потврђују да се сабијање V-алатом може користити као метода за стварање УФЗ структуре у нискоугљеничном челику.
 - Сабијање узорка у осамнаест фаза нема битни утицај на микроструктуру у односу на дванаесту фазу.
 - На основу укупних испитивања микроструктуре трансмисионим електронским микроскопом закључује се да повећање броја фаза сабијања V-алатом доприноси уситњавању структуре материјала и проширује поље са ултрафином структуром. Први видљиви знаци уситњавања јављају се већ при деформацији $\varphi_e = 2,00$ (након четврте фазе сабијања).
7. На основу испитивања тврдоће материјала (макро, микро и нанотврдоће), након вишефазног сабијања V-алатом закључено је следеће:
- Порастом броја фаза сабијања, односно повећањем ефективне деформације повећава се тврдоћа материјала.
 - Најпрецизнији подаци о тврдоћи добијени су испитивањем микротврдоће. У средишњој области узорка, микротврдоћа је повећана скоро два пута у односу на почетно стање већ након друге фазе сабијања.
 - Благо повећање тврдоће постоји све до шесте фазе сабијања, након које следи благи пад и поред пораста ефективне деформације, што се може објаснити ефектом сатурације тврдоће који бележе и други поступци интензивне пластичне деформације, што је показано и у раду.
 - На основу укупних резултата испитивања микротврдоће закључује се да важи генерално правило по којем повећање ефективне деформације у оквиру одређене фазе сабијања значајно утиче на ојачавање материјала и стварање ултрафине структуре, што се огледа и у порасту тврдоће с растом степена деформације.
 - На основу поједностављене презентације нанотврдоће у зависности од броја фаза сабијања, уздуж осе попречног пресека узорка, закључено је да су ефекти стварања ултрафине структуре најинтензивнији у средишњем делу узорка. Укупни резултати нанотврдоће остварени у овој дисертацији показују да овај параметар није поуздан индикатор механичких особина при интензивној пластичној деформацији.
8. На основу резултата испитивања на затезање у зависности од броја фаза сабијања V-алатом закључено је следеће:
- Порастом броја фаза сабијања повећавају се граница течења и чврстоћа материјала. Већ након четврте фазе сабијања чврстоћа материјала је увећана скоро двоструко у односу на полазни материјал, док је истовремено граница течења повећана 2,8 пута.

- Максимално и равномерно издужење као и равномерна ефективна деформација нагло опадају с порастом броја фаза сабијања, односно порастом ефективне деформације остварене сабијањем V-алатом.
 - Дуктилност материјала након вишефазног сабијања V-алатом проверена је прегледом површине прелома (макро и микро). Начелно посматрано, може се закључити да је након вишефазног сабијања материјал задржао дуктилна својства те да је испитивањем на затезање утврђено како све фазе региструју дуктилни лом, уз одређене промене морфологије преломљене површине, зависно од броја фаза сабијања.
9. Детаљна испитивања пластичних својстава материјала спроведена су провером деформабилности материјала, односно конструкцијом дијаграма граничне деформабилности у зависности од броја фаза сабијања V-алатом. На основу ових испитивања закључено је следеће:
- Материјал Š.1221, који је третиран вишефазним сабијањем V-алатом и након високе претходне деформације има изванредна пластична својства при испитивању сабијањем ваљка равним плочама. Гранична деформација при сабијању ваљка равним плочама мења се у распону од 0,98 (за полазни материјал без претходне деформације) па до 0,70 за материјал након четрнаест фаза сабијања у V-алату и претходном деформацијом $\varphi_e = 3,24$.
 - Гранична деформација при једноосном затезању је веома ниска (равномерна деформација) и драстично опада порастом броја фаза сабијања V-алатом.
 - Висока деформабилност материјала у условима притисног напонског стања уочена је у код другим поступцима интензивне пластичне деформације.
10. На основу укупних резултата истраживања у оквиру ове дисертације резимира се да процес вишефазног сабијања призматичног обратка помоћу V-алата спада у категорију технологија интензивне пластичне деформације из следећих разлога:
- Обезбеђује високе вредности деформација у условима доминантног притисног напонског стања.
 - Омогућује уситњавање микроструктуре материјала до субмикронске вредности и омогућује стварање високоугаоних граница зрна.
 - Обезбеђује значајно повећање механичких својстава материјала (тврдоће, чврстоће и границе течења), уз задржавање високе дуктилности материјала.
 - Има реалну могућност практичне примене за израду квалитетних производа у различитим областима машинске технике, медицине, електротехнике, прецизног инжењерству и др.
 - Пружа широке могућности за креирање нових метода на сличном начелу.
11. Вишефазно сабијање V-алатом има посебан значај јер омогућује трансформацију комерцијалних металних материјала у висококвалитетне материјале нових, значајно побољшаних својстава. Процес је технолошки једноставан за примену у индустријској пракси а може се реализовати на хидрауличним и механичким пресама и чекићима.

VIII ОЦЕНА НАЧИНА ПРИКАЗА И ТУМАЧЕЊА РЕЗУЛТАТА ИСТРАЖИВАЊА:

Експлицитно навести позитивну или негативну оцену начина приказа и тумачења резултата истраживања.

На основу прегледа и анализе докторске дисертације Комисија сматра да је целокупна презентација дисертације (Увод; Приказ стања у области интензивне пластичне деформације; Предмет, циљ истраживања и хипотезе; Методе истраживања, материјал и опрема; Резултати истраживања; Коментар резултата; Закључак; Научни допринос истраживања и могућност примене у пракси; Предлог будућих истраживања; Литература) добро и јасно структурирана, прегледана, систематичана и у складу с пријављеном темом дисертације. Тумачење резултата је на високом научном нивоу, аргументовано и свеобухватно, а изведени закључци произлазе из остварених резултата.

Комисија ПОЗИТИВНО оцењује начин приказа и тумачења резултата истраживања.

IX КОНАЧНА ОЦЕНА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ:

Експлицитно навести да ли дисертација јесте или није написана у складу са наведеним образложењем, као и да ли она садржи или не садржи све битне елементе. Дати јасне, прецизне и концизне одговоре на 3. и 4. питање:

1. Да ли је дисертација написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме?

ДА – Дисертација је у потпуности уобличена у складу с образложењем наведеним у пријави теме.

2. Да ли дисертација садржи све битне елементе?

ДА – Дисертација садржи све битне елементе: предмет и опис проблема, полазну хипотезу и циљеве истраживања, преглед досадашњих истраживања и актуелно стање у области интензивне пластичне деформације материјала, савремене методе истраживања (теоријске, методе нумеричке симулације, експерименталне методе, савремене методе карактеризације микроструктуре материјала СЕМ-ом и ТЕМ-ом, методе испитивања механичких својстава и деформабилности материјала), затим прегледан приказ и исцрпну анализу резултата, јасне закључке и предлог будућих истраживања. Полазне претпоставке и циљеви истраживања у потпуности су остварени. Истраживање је оригинално, тумачења резултата на високом научном нивоу, а закључци истраживања јасно презентовани.

3. По чему је дисертација оригиналан допринос науци?

Нов поступак интензивне пластичне деформације заснован на вишефазном сабијању призматичног припремка V-алатом представља оригиналан допринос науци. Поступак је технолошки јединствен и има велике могућности примене у индустријским условима, омогућује трансформацију полазне структуре комерцијалних металних материјала у материјале с ултрафином структуром, који имају значајно виша механичка својства, уз задржавање солидне дуктилности, што омогућује њихову даљу прераду поступцима пластичног деформисања.

4. Недостаци дисертације и њихов утицај на резултат истраживања

Дисертација НЕМА недостатака који утичу на резултат истраживања.

X ПРЕДЛОГ:

На основу укупне оцене дисертације, Комисија предлаже:

– да се докторска дисертација прихвати, а кандидату одобри одбрана

ПОТПИСИ ЧЛАНОВА КОМИСИЈЕ

Др Милентије Стефановић, редовни професор,
Факултет инжењерских наука, Крагујевац, председник

Др Србислав Александровић, редовни професор,
Факултет инжењерских наука, Крагујевац, члан

Др Лепосава Шиђанин, професор емеритус,
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

Др Мирослав Планчак, редовни професор у пензији,
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

Др Бранко Шкорић, редовни професор,
Факултет техничких наука, Нови Сад, члан

Др Дамир Какаш, редовни професор,
Факултет техничких наука – Нови Сад, ментор

НАПОМЕНА: Члан комисије који не жели да потпише извештај јер се не слаже са мишљењем већине чланова комисије, дужан је да унесе у извештај образложење односно разлоге због којих не жели да потпише извештај.