

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
Факултет техничких наука у Чачаку

НАСТАВНО НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Извештај Комисије о прегледу и оцени докторске дисертације кандидата мр Ивана Милићевића, дипл. маш. инж.

Одлуком Наставно-научног већа Факултета техничких наука у Чачку, бр. 4-283/7 од 20. II 2013. год. именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата мр Ивана Милићевића, дипл. маш. инж., под насловом „Синтеза мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила“.

На основу прегледа докторске дисертације Наставно-научном већу подносимо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

1. Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у области пројектовања и реализације мехатроничких система

Мехатронички приступ инжењерском пројектовању сложених техничких система базира се на интегрисању различитих научних дисциплина које је потребно применити у свакој фази пројектовања, у циљу постизања оптималног решења. Такво решење не може бити постигнуто класичним приступом, појединачним разматрањем компонената система које припадају различитим научним областима, већ захтева свеобухватну анализу читавог система као целине. У оквиру докторске дисертације извршена су теоријско-експериментална истраживања пројектовања сложених техничких система на практичном примеру реализације и остварења мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила (скраћено линија МСЖ). Сложена концепција изабране линије омогућила је да се укаже на комплексност пројектовања мехатроничких система, изведу потребне анализе, аналитичког и експерименталног карактера, и синтезом релевантних података дефинише најповољнија структура система. С обзиром на то да су у већем делу анализе током процеса пројектовања коришћени CAD/CAE/CAM алати, значајно су смањени трошкови и време потребно за извођење физичког модела – прототипа линије МСЖ. Реализовањем прототипа, развијена је и методологија интегрисаног пројектовања

сложених техничких система, чиме је дат допринос развоју пројектовања мехатроничких система. Основа оваквог приступа је у развоју и примени виртуелних модела, који у овом случају не само да имају задатак да визуелно прикажу конструкцију појединих сегмената система, већ и да опишу и симулирају његово физичко понашање, што је од великог значаја како у циљу исправног димензионисања и дефинисања појединих сегмената система, тако и сагледавања функционисања читавог система као целине. Такође, за разлику од физичких прототипова, виртуелни модели могу искористити све предности савремене рачунарске технике, што омогућава да се тежиште процеса пројектовања премести из физичког у виртуелно окружење. Виртуелни модели се користе за симулацију рада и проверу својстава читавог мехатроничког система пре реализације физичког модела, чиме се остварује знатна уштеда времена и средстава потребних за израду и модификовање физичког прототипа.

2. Оцена оригиналности научног рада кандидата

Комисија констатује да је докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у области пројектовања и реализације мехатроничких система.

3. Преглед остварених резултата рада кандидата у оквиру докторске дисертације

Докторска дисертација кандидата мр Ивана Милићевића, написана је на 193 стране, и обухвата увод, пет поглавља, закључак и литературу. У оквиру литературе, наведено је 110 библиографских јединица укључујући и радове аутора.

У уводу је дефинисан проблем који се разматра у оквиру докторске дисертације, и постављене су основне хипотезе и циљ дисертације, као и примењена методологија решавања проблема. Дат је функционални опис истраживаног мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила. Кроз многобројне практичне примере, дефинисани су производи који се добијају на линији МСЖ и указано је на распрострањеност њихове примене. Дат је и преглед основних литературних података везаних за истраживања у раду.

У оквиру **2. поглавља** извршена је анализа напонских и деформационих стања која настају у технолошком процесу савијања жице при формирању петљи. Дат је преглед основне теорије напона и деформација. Анализирана је веза између њих, која је нелинеарног карактера, (ради се о деформисању материјала изнад границе еластичности). Установљено је да се ради о еласто-пластичном понашању материјала са нелинеарним очвршћавањем. Анализирана је расподела напона при савијању жице од нерђајућег челика као и анализа деформација при савијању жице до захтеваног облика. Коришћењем софтверског пакета *Matlab*, дефинисани су аналитички изрази за везу напон-деформација у нелинеарној области. Одређено је аналитичко решење као и нумеричка решења за поједине пречнике жица. Коришћењем постојећих теоријских модела као основе, и развијеног модела зависности напона од деформације, дефинисан је оригинални аналитички модел за одређивање потребног момента савијања за формирање петљи. Коришћењем софтверског пакета *Mathematica* одређено је аналитичко решење као и нумеричка решења за поједине пречнике жица. Одређена је расподела напона оптерећења, растерећења и заосталих напона по попречном пресеку жице.

У оквиру **3. поглавља** извршено је експериментално одређивање степена деформисаности жице на месту формиране петље коришћењем оригиналне методе засноване на мерењу термоелектромоторне силе термопара конструисаног од бакарног проводника и деформисане жице. Најпре су вршена мерења са узорцима од праве жице

од истог материјала и истих пречника као жице деформисане у технолошком процесу савијања. Ти узорци су претходно оптерећени на истезање и пластично деформисани на хидрауличној кидалици. Сваки узорак је оптерећен различитом силом и пластично деформисан до различитих релативних деформација. Затим су вршена мерења термоелектромоторне силе термопара конструисаног од бакарног проводника и претходно савијене жице у технолошком процесу формирања петљи. Мерења су вршена у потпуно истим условима као и претходно описана мерења са узорцима од праве жице (иста динамика загревања, иста атмосфера, итд.). Добијени резултати приказани су графички. Експериментом је показано да једном одређеном степену деформисаности елемента везаног у термопар са бакарним проводником одговара тачно одређена вредност термоелектромоторне силе, која је за одређену температуру увек иста при истим параметрима процеса мерења. Упоређивањем са теоријски добијеним резултатима у претходном поглављу, установљено је да постоји минимално (занемарљиво) одступање добијених експерименталних вредности.

У оквиру 4. поглавља извршена је анализа напона и деформација у технолошком процесу сабијања жице на хидрауличној преси, са циљем одређивања потребних параметара обраде. Дат је преглед основне теорије обраде метала пластичним деформисањем и дефинисани су основни параметри процеса. Образложена је неопходност примене нумеричких метода за анализу процеса обраде метала пластичним деформисањем. Дефинисана је симулација процеса сабијања жице са подешавањем технолошких параметара. Спроведен је читав низ симулација, у циљу одређивања потребних параметара процеса. Добијени резултати су анализирани и донети су одговарајући закључци. За анализу процеса пластичног деформисања жичаних профила у технолошком процесу сабијања на хидрауличној преси, коришћен је софтверски пакет *Simufact.Forming*.

У оквиру 5. поглавља приказани су детаљи који се односе на пројектовање хидрауличног система, система управљања и симулацију процеса рада мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила. На основу потребних технолошких операција које се морају извршити да би се добио крајњи производ, формиран је алгоритам према коме треба пројектовати управљање мехатроничког система. Извршена је анализа захтева потребних кретања за остварење производног циклуса. Дефинисан је циклограм кретања извршних елемената система. За реализацију потребних кретања по одређеним условима, као погонски систем дефинисан је електро-хидраулички систем са одговарајућим сензорима. Дефинисан је извршни програм PLC контролера реализованог методом *Ladder* дијаграма за управљање мехатроничким системом. Извршено је тестирање система дефинисаним програмом према пројектованим параметрима система (радни притисци, протоци хидрауличних пумпи, димензије хидрауличних цилиндара – пречници клипова, максимални ходови, итд.). За пројектовање детаљне електро-хидрауличне шеме, као и за симулацију рада читавог система коришћен је софтверски пакет *Automation Studio*. Анализом појединих параметара извршен је најповољнији избор електро-хидрауличних компонената, у циљу добијања захтеваних карактеристика система.

У оквиру 6. поглавља дат је приказ реализованог прототипа линије МСЖ са одређеним детаљима и деловима пројектне документације као и резултатима експерименталне провере реализације основних функција линије. Дат је приказ и објашњен је принцип рада појединих подсистема, укључујући и хидраулички систем и систем управљања. Реализовани прототип линије МСЖ проверен је експериментално и извршена су поређења са резултатима прорачуна и симулације циклуса. На основу извршених тестова закључено је да линија МСЖ остварује задате основне параметре и реализује производни циклус уз велику тачност и висок степен производности. На основу анализе рада линије МСЖ предложена су и нека алтернативна решења.

У закључку су сумирани резултати проистекли из извршених истраживања. Указано је на њихов значај, како са научне стране, кроз примену једног новог приступа пројектовању сложених техничких система и развијања оригиналних теоријских и експерименталних модела, тако и са практичне стране, преко освајања читаве једне технологије за производњу пукотинастих сита реализацијом прототипа мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила. Дати су предлози могућности шире примене развијеног система и указано је на могућа техничка унапређења у појединим сегментима реализованог система у циљу побољшања процеса производње. Дате су смернице за будућа истраживања у вези даљег усавршавања мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила.

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

Докторска дисертација, у потпуности испуњава обим и квалитет у односу на пријављену тему, обзиром да су достигнути постављени циљеви и доказане полазне хипотезе истраживања.

5. Научни резултати докторске дисертације

У области пројектовања и реализације мехатроничких система, реализовањем прототипа линије МСЖ, на бази примене савремених рачунарских система развијена је методологија интегрисаног пројектовања која може послужити као пример за даљи развој мехатроничких система.

Анализом напонског и деформационог стања у технолошком процесу савијања жице, коришћењем постојећих теоријских формулација и одговарајућих софтверских алата, дефинисани су нови аналитички изрази за везу напон-деформација у нелинеарној области, развијени специјално за нерђајуће челике. Одређено је аналитичко решење као и нумеричка решења за поједине пречнике жица. Коришћењем познатог теоријског модела за одређивање момента савијања, и развијеног модела зависности напона од деформације, дефинисан је оригинални аналитички модел за одређивање непознатог момента савијања. Дефинисани аналитички модел даје боље резултате од постојећих модела који се могу наћи у литератури јер је развијен специјално за нерђајуће челике (при чему је коришћен модел зависности напона од деформације за који је показано да има изузетно добро поклапање са експерименталним резултатима у целом опсегу σ - ϵ криве за најчешће коришћене нерђајуће челике, међу којима је и X5CrNi1810, од кога је израђена жица коришћена у експериментима). Коришћењем одговарајућих софтверских алата одређено је аналитичко решење као и нумеричка решења за поједине пречнике жица.

Анализирањем физичких појава које прате процес пластичног деформисања метала у хладном стању, као и саме природе пластичне деформације, развијена је и оригинална метода за експериментално одређивање степена деформисаности савијене жице, засноване на мерењу термоелектромоторне силе термопара, конструисаног од бакарног проводника и деформисане жице. Развијена метода може имати доста шири значај од конкретне примене у овом истраживању, јер се може користити као изузетно поуздана за проверу стања конструкција одређивањем степена деформисаности појединих машинских елемената изложених оптерећењу непознатог интензитета, и то не само аксијалном напрезању и савијању, већ и другим типовима напрезања (нпр. сложеним напрезањима), уз услов познавања расподеле деформације по попречном пресеку.

Интеграцијом *CAD/CAM/CAE* софтверских алата у процес пројектовања, извршена је анализа напона и деформација у технолошком процесу сабијања жице на хидрауличној преси, са циљем одређивања оптималних параметара процеса. Овакав приступ омогућава детаљну анализу проблема и синтезу решења са комплексним факторима, када није могуће (или је то веома тешко изводљиво) добити адекватне резултате применом само конвенционалних метода које су засноване на затвореној форми аналитичких решења.

У циљу пројектовања управљачког система, развијен је функционални виртуелни модел управљања читавог мехатроничког система и извршена симулација рада система у реалном времену. Комплетна симулација рада система, како у нормалним условима рада, тако и при настајању нерегуларних услова у радном процесу, омогућила је да се читав процес лакше сагледа и уоче евентуални недостаци пре реализације физичког модела, чиме се може остварити знатна уштеда времена и средстава потребних за израду и модификовање физичког прототипа.

6. Применљивост и корисност резултата у теорији и пракси

Истраживања приказана у овом раду, поред теоријског значаја, имају и значајан практичан допринос који се огледа у освајању читаве једне технологије за производњу пукотинастих сита реализацијом прототипа мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила.

Развијањем прототипа линије МСЖ, реализовано је више оригиналних техничких решења, као на пример:

- решење алата за савијање које омогућава континуално формирање петљи савијањем око трна $\varnothing 8$ и $\varnothing 10$ mm челичне жице пречника 2 - 5 mm која се одмотава са добоша. Одмотани крај жице није слободан, не може се слободно обртати приликом процеса формирања петљи, већ је „заробљен“ у подсистему за пресовање. При томе је избегнуто увијање жице приликом одмотавања са добоша које може довести до прекомерног деформационог ојачања;
- сегментни алат за пресовање деформационом силом до 2000 kN – решење које елиминише појаву концентрације напона на местима где треба остварити оштре ивице деформисаног профила и које омогућава брзу и једноставну демонтажу и монтажу другог алата у случају промене производног програма, односно производње жичаних профила различитих облика и димензија;
- аутоматско управљање процесом рада линије МСЖ применом PLC-а и одговарајућих сензора.

7. Начин презентирања резултата истраживања научној јавности

Резултати докторске дисертације публиковани у последње три године, представљају научне радове на међународним конференцијама и домаћим и страним часописима, од којих се један налази на SCI листи:

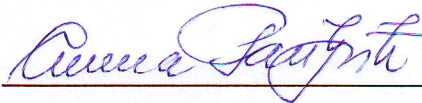
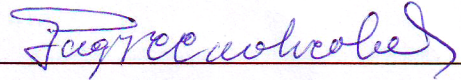
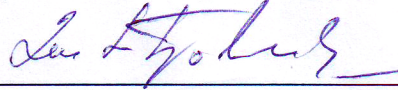
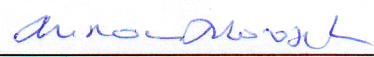
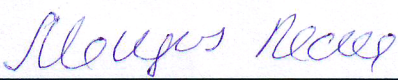
Milicevic, I., Boskovic, N., Slavkovic, R., Golubovic, D., Jugovic, Z., Popovic, M.: *Design and simulation of automation control of mechatronic system for production of stainless steel wired profiles wedge shaped*, Metalurgia international, vol. XVII, No.3, ISSN 1582-2214, pp.25-32, 2012.

Закључак и предлог Комисије

На основу анализе докторске дисертације са аспекта актуелности теме, дефинисаног проблема и циља истраживања, полазних и доказаних хипотеза истраживања, као и научног доприноса и практичне вредности добијених резултата, Комисија позитивно оцењује урађену докторску дисертацију под насловом „**Синтеза мехатроничког система за израду специјално обликованих жичаних профила**“, кандидата мр Ивана Милићевића, дипл.маш.инж. Због тога, Комисија предлаже Научно-наставном већу Факултета техничких наука у Чачку, да прихвати Извештај о прегледу и оцени докторске дисертације.

У Чачку, 12. III 2013.год.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. 
Проф. др Синиша Ранђић, Председник
Факултет техничких наука у Чачку
Научна област: Рачунарска техника
2. 
Проф. др Радомир Славковић, Ментор
Факултет техничких наука у Чачку
Научна област: Производно машинство
3. 
Проф. др Драган Голубовић, Члан
Факултет техничких наука у Чачку
Научна област: Инжењерска механика и роботика
4. 
Проф. др Милош Главоњић, Члан
Машински факултет, Београд
Научна област: Производно машинство
5. 
Проф. др Весна Мандић, Члан
Факултет инжењерских наука, Крагујевац
Научна област: Производно машинство,
Индустријски инжењеринг