

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ
ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Милоша Станковића**, студента докторских студија

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду, бр. 896/2 од 23.05.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације докторанда **Милоша Станковића** под насловом

Триболошке карактеристике клизних лежаја од композитних материјала са полимерном основом

После прегледа достављене Дисертације и других пратећих материјала и разговора са Кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

Милош Станковић се уписао на Докторске студије Машинског факултета – Универзитет у Београду, школске 2010/2011 године и по програму ових студија, током прва четири семестра положио је све испите са одличним успехом. Од јануара 2011. запослен је у Иновационом центру Машинског факултета у Београду, на пројектима Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије „Интегритет опреме под притиском при истовременом деловању замарајућег оптерећења и температуре“ – ТР-35011 под руководством проф. др Љубице Миловић и „Развој триболошких микро/нано двокомпонентних и хибридних самоподмазујућих композита“ – ТР-35021 под руководством проф. др Мирослава Бабића. Из обимног развојног и истраживачког рада на оба пројекта, издвојени су резултати који се односе на област Општих машинских конструкција, а који би били база за дефинисање теме и садржине докторске дисертације. На основу ових договора, М. Станковић је урадио и одбранио Пројекат идеје дисертације, из којег је дефинисана сама тема. Израда дисертације под насловом “Триболошке карактеристике клизних лежаја од композитних материјала са полимерном основом” одобрена му је одлуком Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду, број 61206-5258/2-16 од 31.10.2016. године.

1.2. Научна област дисертације

Ужа научна област дисертације припада подручју **Општих машинских конструкција**. Бави се питањима везаним за триболошка својства, првенствено хабање машинских елемената при експлоатационим условима рада. Развијена је методологија за експериментално одређивање улазних величина, потребних за израду нумеричког модела хабања. За ментора је именован др Божидар Росић, редовни професор, чије су компетенције између осталог из области трибологије машинских елемената. Додатне методе и приступи коришћени за израду ове дисертације, покривени су компетенцијама осталих чланова Комисије.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Милош Станковић рођен је 06.02.1984. године у Чачку. Основну школу „Богдан Капелан“ у Гучи завршава 1999. године, са максималном просечном оценом и стиче звање носиоца Вукове дипломе. Потом уписује гимназију у Чачку, коју завршава 2003. године, а након тога отпочиње студије Машинског факултета Универзитета у Београду. На смеру „Машинске конструкције и механизација“ дипломира у септембру 2009. године са оценом 10 и просечном оценом током студија 8,14. Тема дипломског рада је „Конструкција и прорачун машине за савијање сечење и радловање лима“.

Након завршетка редовног војног рока, 2010. године уписује докторске студије на Машинском факултету Универзитета у Београду. Током докторских студија, запослен је у Иновационом центру Машинског факултета на пројектима технолошког развоја ТР 35011 и ТР 35021. Аутор је или коаутор 3 рада на СЦИ листи и неколико десетина радова објављених у зборницима научних скупова. Током докторских студија, академско усавршавање је обављао и у иностранству, при чему је најзначајније истаћи боравак на Универзитету у Болоњи (Италија) и на институту за трибологију у Винернојштату (Wienerneustadt, Аустрија).

Кандидат говори два страна језика: енглески и немачки. Учествоје као сарадник у настави на катедри за Опште машинске конструкције, на предмету „Машински елементи“. У неколико наврата, био је ангажован и од стране других катедара, за помоћ око наставе из области његових компетенција, које се углавном везују за конструисање у САД софтверима и анализе методом коначних елемената.

Ове вештине, квалификовале су га за учешће на великом броју пројеката сарадње са привредом у области конструкција. Југоимпорт СДПР, Институт за испитивања и пројектовања у привреди и компанија ЕдеПро, само су неке од референци у којима је стекао обимно практично искуство.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација „Триболошке карактеристике клизних лежаја од композитних материјала са полимерном основом“ је обима око 100 страница, са 54 слике (скице, дијаграми, фотографије и друге илустрације). У седам поглавља дисертације изложене су следеће целине: методологија за експериментално одређивање величина које дефинишу процес хабања, затим поступак обраде експерименталних резултата и аналитичке прорачуне који представљају предуслов за формирање нумеричког модела и коначно, поступно формирање нумеричког модела са резултатима хабања. С обзиром да се хабање директно везује за радни век машинских елемената и од суштинске је важности за предиктивно одржавање машинских система, то су резултати ове дисертације од изузетног, како научног,

тако и практичног значаја. Мада су предмет овог истраживања клизни лежаји, аналогно се приказана методологија, уз одговарајуће корекције модела може применити и за предвиђање хабања других машинских елемената.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Увод обухвата општи део који се тиче описа клизних лежаја, типова, функције и конструкцијских решења. Истакнут је циљ истраживања у форми одређивања Арчардове константе, као неопходног улазног податка за нумеричку симулацију хабања, која пак представља мотив истраживања. Наведене су хипотезе од којих се кренуло у истраживање. Прва хипотеза се односи на могућност одређивања константе чијим се уврштавањем у нумерички модел може добити процена хабања. Дуга хипотеза се базира на могућности верификације хабања применим два различита приступа – поређењем запреминског хабања са масеним, уз густину као везу између две вредности. У уводу су наведене и научне методе које су се користиле за постизање циљева дисертације и то: експериментална, статистичка, аналитичка и нумеричка метода.

Преглед актуелних истраживања се односи на анализу постојећих истраживања и резултата из области хабања. Тако се анализирана литература дели на четири целине:

- преглед полимерних материјала погодних за израду клизних лежаја
- преглед литературе која обрађује експериментална истраживања хабања, услове и поставке експеримента
- литература која се тиче одређивања Арчардове константе, као улазног параметра за формирање модела хабања
- литература која обрађује симулацију хабања; формирање модела, постављање граничних услова, оптерећења итд.

Посебан акценат је дат на избор параметара експеримента, брзине клизања, оптерећења, конфигурације трибометра на ком је испитивање вршено. На основу ове анализе успостављени су иницијални параметри експеримента ове дисертације. Анализиране су триболошке карактеристике низа материјала сличних материјалу клизног лежаја из овог истраживања, као и њихове промене у зависности од радног режима. Иако је област нумеричке симулације хабања релативно нова, дат је пресек досадашњих истраживања и наведени оквири у којима се нумеричка симулација може/мора спровести. Наведени су различити приступи у изради нумеричког модела и истакнуте њихове предности/мане.

Експериментална испитивања се могу поделити на главна и помоћна експериментална испитивања. Главна испитивања обухватају сам процес хабања узорка уз константно праћење температуре и коефицијента трења, док помоћна испитивања подразумевају мерења величина пре и после главног експеримента. У овом поглављу су наведене опште карактеристике узорка, затим параметри експеримента који су одређени анализом референтне литературе, а потом фино кориговани спровођењем уводних експеримената. Дат је опис опреме за сваки корак експеримента са евентуалним шемама које објашњавају функционисање опреме. Објашњен је след експерименталних истраживања и приказани резултати, уз дискусију добијених вредности.

Аналитички прорачуни обухватају низ прорачуна који за циљ имају или верификацију нумеричких прорачуна, или добијање података неопходних како би се нумерички прорачуни уопште могли извести. Тако се применом Хрцових образаца рачуна контактни притисак између трибо-пара, а има за циљ верификацију контактног притиска добијеног софтверским прорачуном. Прорачун похабане запремине пак, представља математички модел који омогућава да се измерена инклинација вратила у зид клизног лежаја искористи за процену

интензитета запреминског хабања, а на основу геометријских ограничења, тј. облика елемената трибо-пара (вратила и клизног лежаја). Применом поступка израчунавања радног века прописаног од стране произвођача лежаја, извршена је процена радног века. Овај податак је информативног карактера, али се може у даљим истраживањима довести у везу са интензитетом хабања, чије се израчунавање описује у овој дисертацији.

Израда нумеричког модела и симулација хабања је поглавље које описује сам поступак формирања модела, затим даје приказ добијених резултата уз дискусију и евентуално поређење са аналитичким прорачунима из претходног поглавља. Поступак формирања модела обухвата моделирање трибо-пара, дефинисање особина контакта, задавање оптерећења и граничних услова и дискретизацију погодним типом коначних елемената. С обзиром да је симулација хабања транзијентна анализа, тј. зависна од времена, дефинисан је одређен број међукока у којима се могу прочитати вредности контактне притиска. Анализом ових вредности, уочен је пад притиска који је карактеристичан за процес хабања. Добијена је и бројна вредност похабане запремине за три обртаја вратила и израчуната ширина контакта која је у високој корелацији са вредности ширине израчунате Херцовим обрасцима.

Закључак обухвата резиме претходних поглавља уз наглашавање најважнијих научних и стручних доприноса. Дат је осврт на хипотезе постављене на почетку истраживања уз оцену степена потврђености. Главна хипотеза је, тако, у потпуности потврђена, а резултати верификовани референтном литературом, док друга – допунска хипотеза није потврђена, а дата је дискусија која образлаже разлоге за неостваривање ове хипотезе. Таксативно су наведени научни доприноси, изложена ограничења и предложени правци даљих истраживања из ове области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

У дисертацији је обрађена проблематика хабања клизних лежаја од композитних материјала. С обзиром на улазни тренд развоја науке о материјалима и веома честу појаву нових, издржљивијих материјала, могућност брже процене хабања и радног века машинских елемената је од изразите важности. Значајна је и чињеница да дисертација садржи нове методе за одређивање улазних величина, потребних за симулацију хабања.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Иако је практична употреба нумеричких модела и симулације хабања релативно млада, тј. иде у корак са развојем рачунара, постоји низ истраживања спроведених на ову тему, а резултати су објављени у утицајним SCI часописима. Анализирана је литература повезана са сваком целином дисертације понаособ: од прегледа полимерних материјала, преко литературе у вези са условима извођења експеримента, до публикација које описују начине извођења саме симулације. Водило се рачуна о специфичностима анализираних истраживања, те о могућности генерализације одређених поставки и њиховог усвајања при овом истраживању. Ипак, с обзиром на циљ дисертације, тј. експериментално одређивање Арчардове константе – улазног податка неопходног за извођење симулације хабања, кандидат је детаљно анализирао литературу која се бави методологијом ових експеримената, а битну улогу у прегледу литературе, имају и публикације повезане са израдом нумеричког модела за симулацију хабања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Концепт истраживачког приступа овог рада базира се на комбинацији и надовезивању неколико метода у циљу добијања жељеног резултата. Најпре је за добијање иницијалних вредности и потребних улазних параметара коришћен експеримент, који такође има неколико фаза испитивања. Мерене су физичке величине које представљају величине стања (маса, геометријске карактеристике пре и после хабања), као и промена одређених параметара током самог процеса хабања (кофицијент трења и температура у зависности од времена). Коришћењем статистичких метода, подаци добијени експерименталним путем се обрађују, а резултати се затим користе у аналитичким прорачунима. Вредности добијене на овај начин се затим уносе у нумерички модел. Нумеричке методе обухватају примену анализе методом коначних елемената помоћу софтверског пакета Ansys 18.1.

Осим сукцесивног коришћења различитих метода у циљу конвергенције ка жељеном резултату, тј. процени интензитета хабања, набројане методе су коришћене и паралелно, како би се одређене величине верификовале различитим приступима. Као један од примера наводи се контактни притисак израчунат аналитичким путем, који је потом верификован нумеричком методом.

3.4. Применљивост остварених резултата

Како је већ наведено у претходним поглављима, с обзиром на тренд убрзаног развоја нових материјала и потребу за њиховим брзим и ефикасним испитивањем у смислу хабања и радног века компоненти од тог материјала, развој и применљивост резултата ове дисертације од великог је значаја. Примена методологије одређивања улазних података експерименталним путем, као и нумеричка симулација, могу се прилагодити и проширити и на друге компоненте, не само клизне лежаје, што додатно увећава значај ових резултата.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Рад на дисертацији је само једна од активности у научном и стручном раду Милоша Станковића. Његово ангажовање је знатно шире и укључује многе друге експерименталне, нумеричке, теоријске и конструкторске активности. У оквиру академског деловања, као и сарадње са привредом, стекао је веома вредна искуства из области конструисања трансмисионих система (редуктора и мултипликатора), затим прорачуна и избора машинских елемената. Кроз ове активности оспособио се за планирање, припрему и извођење широког спектра експеримената укључујући отклањање бројних проблема који том приликом настају. Изразито је склон тимском раду и вешт у планирању, вођењу и реализацији пројеката. Овладао је применом низа специфичних софтвера, од оних за моделирање конструкцијских решења до софтвера за извођење статичких и динамичких прорачуна применом методе коначних елемената. Учешћем на бројним научним скуповима, оспособио се за представљање резултата научноистраживачког, развојног и стручног рада, како на матерњем, тако и на енглеском језику.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Планирана и изведена истраживања у овој Дисертацији довела су до резултата која представљају допринос развоју научне мисли, а могу се сврстати у следеће ставке:

- Предложена је оригинална методологија за одређивање Арчардове константе, као неопходне величине за симулацију хабања. Методологија се односи на одређивање константе за случај контакта спољне површи цилиндра и унутрашње површи тела прстенастог попречног пресека, што одговара контакту вратила и клизног лежаја. Овај научни допринос је потврђен публикавањем у раду [1], из категорије M23 и [4] и [5], из категорије M33 и [7] из категорије M52.
- Формиран је 3Д нумерички модел за израчунавање похабане запремине, што је верификовано у публикацијама [1] и [6] (одељак 4.3 Верификација научних доприноса).

У стручне доприносе се може се сврстати преглед и класификација полимерних материјала, погодних за израду клизних лежаја, што је објављено у радовима [2], [3].

4.2. Критичка анализа резултата истраживања и доприноса инжењерској пракси

Дисертација представља заокружену целину сачињену од низа корака, чијим се праћењем може брзо и ефикасно извршити процена интензитета хабања. Предлог нове методологије, која омогућава осетну уштеду у времену при процени хабања, свакако је један од највећих доприноса у научном и стручном смислу. Резултати су плод дугог и континуалног мисаоног процеса и комбинације низа вештина и научних метода. Треба истаћи чињеницу да су, где год је то било могуће, резултати проверени и потврђени паралелном применом двају или више независних метода, или консултовањем референтне литературе.

4.3. Верификација научних доприноса

Резултате својих истраживања Милош Станковић је верификовао у радовима који су објављени у часописима и изложени на одговарајућим конференцијама. Најважнији су следећи радови:

Kategorija M23

1. **Stanković M.**, Marinković A., Grbović A., Mišković Ž., Rosić B., Mitrović R., *Determination of Archard's wear coefficient and wear simulation of sliding bearings*, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 71 Issue: 1, pp.119-125, 2019, DOI: 10.1108/ILT-08-2018-0302 (ISSN: 0036-8792), (IF 1,037)

Kategorija M33

2. **Stanković M.**, Vencl A., Marinković A., *A Review of the Tribological Properties of PTFE Composites Filled with Glass, Graphite, Carbon or Bronze Reinforcement*, Proceedings of 13th International Conference on Tribology "SERBIATRIB 13", Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2013, ISBN: 978-86-86663-98-6, pp. 135 – 140

3. Marinković A., **Stanković M.**, *Advantages and Applications of Self-Lubricating Plastic Bearings*, Proceedings of 13th International Conference on Tribology “SERBIATRIB 13”, Kragujevac, Serbia, 15 – 17 May 2013, ISBN: 978-86-86663-98-6, pp. 247 – 250
4. **Stanković M.**, Marinković A., *Tribological Properties of Self-Lubricating Sliding Bearings Made of PTFE and POM-Based Composite Materials*, 14th International Conference on Tribology “SERBIATRIB ‘15”, Belgrade, Serbia, May 13 – 15, 2015, ISBN: 978-86-7083-857-4; pp. 314 – 318
5. **Stanković M.**, Marinković A., Mitrović R., Mišković Ž., *Experimental Determination of the Wear Factor of the Sliding Bearings Made of Polymer Based Composite*; 15th International Conference on Tribology “SERBIATRIB ‘17”, Kragujevac, Serbia, May 17 – 19, 2017, ISBN: 978-86-6335-041-0; pp. 307-310
6. **Stanković M.**, Marinković A., Kolarević N., *Wear Simulation of the Polymer Based Composite Sliding Bearings by Means of Ansys*

Kategorija M52

7. **Miloš Stanković**, Aleksandar Marinković, Nenad Kolarević, *Calculation of the Archard’s Wear Coefficient of the Polymer-Based Composite Sliding Bearings*, Machine Design Volume 10 (2018), Number 3, pp 99 – 102, ISSN: 1821-1259 (DOI: 10.24867/MD.10.2018.3.99-102)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Прегледом и анализом, Комисија је утврдила да Дисертација представља оригинално научно дело са значајним научним и техничким доприносима. Предложена је нова методологија за експериментално одређивање улазних величина неопходних за симулацију хабања машинских елемената, у овом конкретном случају клизних лежаја. То је значајан допринос ужој научној области Општих машинских конструкција. Осим тога формиран је аналитички поступак за израчунавање похабане запремине на основу промене геометрије попречног пресека клизног лежаја и дефинисан је нумерички модел за симулацију хабања. Резултати рада су верификовани у раду који је објављен у SCI часопису као и у другим радовима. На основу тога, Комисија предлаже Наставно-научном већу да се докторска дисертација под називом **„Триболошке карактеристике клизних лежаја од композитних материјала са полимерном основом“** кандидата **Милоша Станковића**, студента Докторских студија, прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Др Божидар Росић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Радивоје Митровић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Александар Маринковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Александар Грбовић, ванредни професор
Универзитет у Београду, Машински факултет

Др Блажа Стојановић, ванредни професор
Факултет инжењерских наука, Универзитет у Крагујевцу