Образац 4.

Факултет **Технолошко-металуршки** **УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**

35/219
(Број захтева)
2. 9. 2024.
(Датум)

Веће научних области техничких наука
(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

З А Х Т Е В

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитет", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ **Исаак (Драган) Трајковић**
(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму : **Инжењерство материјала**

пријавио је докторску дисертацију под називом:
Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању

Технолошко инжењерство
из научне области:

Универзитет је дана 10. 4. 2023. својим актом под бр. 61206-1261/2-23 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању

Име и презиме ментора: др Бојан Међо, ванредни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршког факултета.

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 30. 5. 2024. одлуком факултета под бр. 35/110 **,** у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Славиша Путић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Љубица Миловић	редовни професор	Машинство	ТМФ
3.	Др Марина Дојчиновић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
4.	Др Милош Милошевић	научни саветник	Наука о материјалима	ИЦ Машинског факултета
5.	Др Зорана Голубовић	виши научни сарадник	Наука о материјалима	Машински факултет

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности 18. 7. 2024.

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана 28. 8. 2024.

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној **28. 8. 2024.**

одлуком факултета под бр. 35/222 **,** у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Славиша Путић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
2.	Др Љубица Миловић	редовни професор	Машинство	ТМФ
3.	Др Марина Дојчиновић	редовни професор	Инжењерство материјала	ТМФ
4.	Др Милош Милошевић	научни саветник	Наука о материјалима	ИЦ Машинског факултета
5.	Др Зорана Голубовић	виши научни сарадник	Наука о материјалима	Машински факултет

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Студент је уписан на докторске студије школске 2019/2020. године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА
др Петар Ускоковић, редовни професор

Прилози:
1. **Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације**
2. **Извештај Комисије о оцени докторске дисертације**
3. **Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама**

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета

ДIVa

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 52. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 28.8.2024. године, донета је

О Д Л У К А
о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Славиша Путић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Љубица Миловић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Марина Дојчиновић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Милош Милошевић, научни саветник Иновационог центра Машинског факултета у Београду и др Зорана Голубовић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Машински факултет, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: „**Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању**“ коју је поднео **Исаак Трајковић,** мастер инжењер технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Исаака Трајковића, под називом „**Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању**“ Одлуком број: 61206-1261/2-23 од 10. 4. 2023. године.

Верификација научних доприноса:

Категорија М21:

1. Trajković, I., Rakin,M., Milošević, M., Mitrović, N., Travica, M., Sedmak, A., Međo, B.: Selective laser sintered Pipe Ring Notched Tension specimens for examination of fracture properties of pipeline materials, - *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 292, pp. 109573, 2023 (**IF=5.4**) (ISSN 0013-7944) (DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109573).

Категорија М22:

1. Trajković, I., Milošević, M., Travica, M., Rakin, M., Mladenović, G., Kudrjavceca, Lj., Međo, B.: Novel Method for Measurement of Pipeline Materials Fracture Resistance-Examination on Selective Laser Sintered Cylindrical Specimens, - *Science of Sintering*, vol. 54, no. 3, pp. 373 – 386, 2022 (**IF=1.172**) (ISSN 0350-820X) (DOI: 10.2298/SOS2203373T).

.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

ДV

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 52. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 28.8.2024. године, донета је

О Д Л У К А
о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације **Исаака Трајковића**, мастер инжењера технологије, са темом под називом „Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању“, у саставу:

1. Др Славиша Путић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. Др Љубица Миловић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
3. Др Марина Дојчиновић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
4. Др Милош Милошевић, научни саветник Иновационог центра Машинског факултета у Београду,
5. Др Зорана Голубовић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Машински факултет.

Одлуку доставити: Одлуку доставити: члановима Комисије, Универзитету у Београду, Служби за наставно-студентске послове и Архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
Технолошко-металуршки факултет

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технол.**

Одлуком 35/110 бр. од 30.05.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену докторске дисертације кандидата **Исаака (Драган) Трајковића**, маст. инж. технол. под насловом: **Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању.**

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

Р Е Ф Е Р А Т

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- Школске **2019/2020.** године кандидат Исаак (Драган) Трајковић, маст. инж. технологије је уписао докторске студије, на студијском програму Инжењерство материјала, на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду. Испите на докторским студијама положио је са просечном оценом 8,82.
- 02.02.2023. на седници Наставно-научног већа донета је одлука бр. 35/15 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технологије за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под називом: *Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању.*
- 09.03.2023. године на седници Наставно-научног већа донета је одлука бр. 35/61 о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технологије под називом: *Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању,* а за ментора ове докторске дисертације именован је др Бојан Међо, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду.
- 10.04.2023. године на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду донета је одлука бр. 61206-1261/2-23 о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технол. под називом: *Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању.*
- 30.05.2024. године на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука бр. 35/110, о именовању Комисије за оцену докторске дисертације Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технол. под називом *Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању.*

1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошко инжењерство, ужа научна област Инжењерство материјала, за коју је матичан Технолошко-

металуршки факултет Универзитета у Београду. Ментор је др Бојан Међо, ванредни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, чија је компетенција за вођење докторске дисертације потврђена на основу искуства и објављених публикација из области којој дисертација припада.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Исаак (Драган) Трајковић, маст. инж. технол. рођен је 03.01.1996. године у Београду, Република Србија. Након завршене основне школе у Владимировцу и Хемијско-медицинске школе у Вршцу, уписује Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду, школске 2014/2015. године. Основне академске студије, одсек биохемијско инжењерство и биотехнологија, завршава 2018. године са просечном оценом 8,08. Мастер академске студије, смер биохемијско инжењерство, завршава 2019. године са просечном оценом 8,63. Након завршетка мастер академских студија, 2019. године уписује докторске академске студије на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду. Од децембра исте године је запослен у Иновационом центру Машинског факултета у Београду. Током рада у Иновационом центру, кандидат стиче додатна искуства радећи на универзалној машини за испитивање материјала, опреми за оптичка мерења, као и на 3Д штампачима.

Кандидат је укључен у реализацију међународног пројекта под називом „*Structural Integrity and Reliability of Advanced Materials obtained through additive Manufacturing*“, (H2020-WIDESPREAD-2018-03, No. 857124). Од 2022. године кандидат активно учествује у реализацији пројекта Европске мреже предузетништва као саветник за интернационализацију пословања. Кандидат је од 2023. године члан неколико радних група следећих “COST (*European Cooperation in Science and Technology*)” пројеката: CA22143; CA22134; CA22105; CA22110; CA22123; CA20126; CA20124; CA22154.

Кандидат учествује у реализацији „IPA Interreg: CapTTict (*Enhancing capacities for technology transfer, company building and innovations in the field of ICT*)“ међународног пројекта у улози “*Project Manager Assistant*”. Кандидат је члан групе проналазача једног малог националног патента заштићеног под регистрационим бројем 1658 (Помоћни прибор за испитивање алуминијумских и ПВЦ профила). Кандидат такође учествује у реализацији пројекта „Даљи развој иновационог еко система кроз организацију, едукације и повезивања заинтересованих страна“ кроз Програм промоције и популаризације иновационе делатности.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технол. под називом *Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању*, написана је на 164 стране, у оквиру којих се налази 7 поглавља, 166 слика, 42 табеле, 144 литературна навода. Докторска дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Преглед литературе, Методологија и материјали, Експериментални резултати, Нумерички резултати, Закључак и Литература. На почетку дисертације дати су изводи на српском и енглеском језику. На крају дисертације дата је Биографија кандидата, Изјава о ауторству, Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјава о коришћењу и Оцена извештаја о провери оригиналности докторске дисертације. По својој форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У **Уводном делу** докторске дисертације образложен је проблем који се решава овом дисертацијом, односно истакнут је значај развоја нове процедуре за испитивање материјала

танкозидних цевовода под притиском. Наведен је очекивани научни допринос дисертације у решавању овог проблема, заједно са методама које су коришћене. Посебно је истакнут допринос ове дисертације у дефинисању услова испитивања и геометрије испитиваних узорака.

Преглед литературе подељен је на четири потпоглавља. Прво потпоглавље под називом *Линеарно еластична и еласто-пластична механика лома* описује научну област и параметре којима се ова област бави. Први одељак овог потпоглавља *Зона напрезања око врха прслине и типови отварања* даје увид у начине оптерећивања материјала, као и одговор материјала на сваку од врста оптерећења. Нагласак је на фактору интензитета напона (K), као једном од главних параметара механике лома којим је дефинисан облик оптерећења материјала. У одељку *Еласто-пластично понашање материјала* дат је преглед литературе са фокусом на понашање материјала у зонама пластичне деформације и прорачун величине зоне пластичне деформације у случајевима равног стања напона и равног стања деформације. Детаљнији приказ и анализа фактора интензитета напона (K) приказани су у одељку *Фактор интензитета напона K*, у ком је дат осврт на начине прорачунавања овог параметра, као и анализа зависности критичне вредности овог параметра у односу на дебљину узорка, што је кључно за израду ове дисертације имајући у виду да је акценат на танкозидним цевоводима под притиском. Поред фактора интензитета напона, у овом поглављу описан је и теоријски део везан за J-интеграл у одељку *J-интеграл*, у ком је описан сам параметар, као и његова корелација са фактором интензитета напона и густином енергије деформације при лому. У одељку *Отварање врха прслине (CTOD* и *CTOD-δ_5)* описана је историја параметра *CTOD*, као и стандардизоване процедуре за његово одређивање, укључујући и концепт *CTOD-δ_5* коришћен у овој докторској дисертацији. Теоријски део еласто-пластичне механике лома је на крају употпуњен одељком *Корелација J-интеграла и параметра CTOD-δ_5* у коме је приказана веза између ова два параметра за случај сразмерно мале зоне пластичног течења материјала око врха прслине.

Друго потпоглавље под насловом *Преглед претходних радова са стандардним процедурама за одређивање параметара механике лома* у ком је систематично приказан преглед научно-истраживачких радова у којима су аутори приказали резултате одређивања параметара механике лома на основу стандардизованих процедура. Једна од највише примењиваних процедура је ASTM E1820, на основу које су групе истраживача изводиле закључке о понашању различитих материјала и при различитим условима.

У трећем потпоглављу под насловом *Преглед претходних радова са нестандардним облицма епрувета за испитивање материјала цевовода* су приказани предлози и резултати испитивања предложених нових геометрија епрувета за испитивање својстава материјала цевовода. Аутори радова су поред резултата и предности предложених геометрија указивали и на ограничења, која су између осталог служила као основа за развој геометрије узорака у овој докторској дисертацији.

Четврто потпоглавље под насловом *Преглед претходних радова са нестандардним процедурама за одређивање параметара механике лома* даје детаљан увид у до сада предложене процедуре за одређивање интегритета цевовода, као и геометрије испитиваних узорака. Поред експерименталних испитивања епрувета, аутори су се бавили и формирањем нумеричких модела који су служили употпуњавању разумевања понашања материјала и одређивању параметара механике лома. Предложене геометрије су у неким случајевима приближне стандардним геометријама епрувета као што су *CT*, *SENB* і *SENT*, али су такође разматрани и предлози узорака облика прстена са оштрим жлебом и прслином. Резултати, углавном вредности параметара механике лома добијени на основу испитивања епрувета

облика прстена дали су одличан увод у даљи развој процедуре за испитивање оваквих епрувета.

У **трећем поглављу** под насловом ***Методологија и материјали*** дат је увид у испитиване материјале. У првом потпоглављу *Испитани материјали* су детаљније описани коришћени материјали *PLA (polylactide acide) – поли(млечна киселина)* у првом одељку, *PA12 – полиамид* у другом одељку и челици за опрему под притиском P235TR1 и P235GH у трећем одељку. Поред описа материјала, у наведена три одељка дате су и димензије епрувета.

У потпоглављу два под називом *Експерименталне методе* описане су методе коришћене за добијање резултата експерименталним испитивањем епрувета облика прстена са концентратором напона изложених затезању - PRNT (*Pipe Ring Notched Tension*) и епрувета за затезање са ивичним концентратором напона - SENT (*Single Edge Notch Tension*). Епрувете од полимерних материјала израђене су коришћењем адитивне производње, што је детаљно описано у одељку *Адитивна производња и технике адитивне производње.* Одељци *Испитивање затезних особина* и *Испитивање механике лома* дају увид у основне стандарде за одређивање затезних особина и одређивање параметара механике лома, као и преглед геометрија епрувета за испитивање предвиђених тим стандардима.

Као једна од бесконтактних метода за одређивање поља померања и деформација, у одељку 4 под називом *Дигитална корелација слика (DIC – Digital Image Correlation)* описана је истоимена метода кроз кораке за добијање резултата овим мерењем. Одељак пет, под називом *Испитивање преломних површина* даје увид у мерење дужине прслине на попречном пресека епрувете – на преломној површини, коришћењем софтвера „AutoCAD“.

У потпоглављу *Нумеричка анализа* је описан поступак формирања 3Д модела епрувета PRNT. У одељку *Увод у нумеричку анализу* описани су елементи мреже модела, димензије елемената, њихов распоред, дефинисање својстава материјала добијених кроз експериментална испитивања, као и димензије модела коришћених за прорачун МКЕ (методом коначних елемената). Други део потпоглавља *Нумеричка анализа* описан у одељку *Гранични услови и дефинисање излазних параметара* односи се на дефинисање граничних услова на моделима на којима је рађен прорачун МКЕ, као и на дефинисање излазних параметара прорачуна. Поред дефинисања дужине прслине, положаја њеног фронта и броја контура око врха коришћених за израчунавање *J*-интеграла, дефинисани су и услови симетрије, померања, као и тачке и површине на којима су дефинисани излазни параметри.

Поглавље *Експериментални резултати* подељено је на пет потпоглавља у којима су приказани резултати експерименталних испитивања епрувета од PLA, PA12, P235TR1 и P235GH материјала. Потпоглавље *Резултати испитивања епрувета PRNT и SENT од PLA материјала* даје увид у резултате добијене на основу мерења на ове две геометрије епрувета коришћењем универзалне машине за испитивање материјала и камера за DIC методу. Главни резултати овог испитивања су приказани у дијаграмима зависности силе од CMOD и силе од CTOD-δ_5.

Резултати испитивања PRNT и SENT епрувета од PA12 материјала приказани су у потпоглављу *Резултати испитивања епрувета PRNT и SENT од материјала PA12*. Поред зависности силе од параметара CMOD и CTOD-δ_5 приказани су и резултати мерења раста прслине у зависности вредности CTOD-δ_5.

За потребе карактеризације материјала, као и за потребе поређења затезних својстава стандардних епрувета и епрувета облика прстена без оштрог жлеба као концентратора напона, резултати ових мерења приказани су у потпоглављу *Резултати испитивања стандардних, RHTT и RHNT епрувета израђених сечењем из челичних цеви* кроз криве зависности силе од померања и номиналног напона од номиналне деформације. Две наведене

епрувете су облика прстена, од којих *RHTT* нема концентратор напона а *RHNT* има жлеб релативно великог полупречника.

У четвртом потпоглављу *Резултати испитивања епрувета PRNT од P235TR1 и P235GH материјала* приказани су резултати испитивања епрувета са једним и два оштра жлеба кроз дијаграме зависности силе од померања нападне тачке дејства оптерећења. Такође је графички и табеларно дат упоредни приказ за епрувете са приближним вредностима односа почетне дужине оштрог жлеба и ширине епрувете, како би се стекао бољи увид у понашање епрувета. Такође, дат је и графички приказ односа силе и параметара CMOD и CTOD-δ_5.

У последњем потпоглављу четвртог поглавља, под називом *Резултати мерења коначне дужине прслина* приказани су резултати мерења дужине прслине коришћењем „AutoCAD“ софтвера и слике попречног пресека узорака на месту отказа материјала.

У **поглављу** под називом ***Резултати нумеричке анализе*** приказани су резултати добијени методом коначних елемената коришћењем софтвера „Abaqus CAE“ за моделе *PRNT и SENT* при различито дефинисаним својствима материјала. У потпоглављу *Резултати прорачуна на моделима PRNT и SENT епрувета са особинама материјала PA12* приказани су резултати кроз дијаграме зависности силе од CMOD, фактора интензитета напона (K_I) од a_0/W, K_I од B као и однос *фактора интензитета напона* PRNT и SENT модела са варијацијом дужине прслине.

У наредном потпоглављу под називом *Резултати прорачуна на моделима PRNT и SENT са особинама материјала P235TR1* дат је увид у резултате добијене на основу прорачуна модела PRNT и SENT у којима су својства материјала дефинисана као еласто-пластична а димензије одговарају димензијама узорака испитаних у експерименталном раду. У овом поглављу су поред параметара добијених у претходном поглављу приказана и два начина добијања коефициента η_{pl} при различитим димензијама модела и добијање параметра γ.

Обједињени закључци донешени на основу експерименталних и нумеричких испитивања, као и њиховом комбинацијом, описани су детаљно у **поглављу шест** под називом ***Закључци.*** Сва цитирана литература која се налази у другом, трећем, четвртом и петом поглављу наведена је у последњем **поглављу** под називом ***Литература.***

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Савременост и оригиналност ове дисертације огледа се у адресирању једног од кључних проблема у области механике лома материјала цевовода, нарочито танкозидних цеви које су у експлоатацији изложене унутрашњем притиску флуида. Дисертација доприноси актуелним истраживањима која имају за циљ унапређење процедура за процену интегритета цевовода, што је од изузетне важности за индустријске секторе као што су хемијска, нафтна и гасна индустрија. Наведене индустрије имају све веће захтеве у погледу сигурности и ефикасности транспортних система, што чини ово истраживање посебно релевантним и значајним.

Оригиналност дисертације лежи у развоју нове нестандардне епрувете облика прстена са концентратором/концентраторима напона изложене затезању (PRNT) за испитивање материјала цевовода, као и одговарајуће процедуре за испитивање и обраду резултата. Ова процедура укључује употребу специјално пројектованих алата за испитивање, као и комбинацију експерименталних и нумеричких техника, чиме се превазилазе ограничења постојећих стандардних процедура. Употреба адитивних технологија, FDM (*Fused Deposition Modeling*) и SLS (*Selective Laser Sintering*), за израду пластичних епрувета и коришћење CNC и електроерозионе технике за израду епрувета из челичних цевовода додатно доприноси оригиналности истраживања.

Интеграција методе дигиталне корелације слика (DIC) за прецизно мерење померања и деформација представља савремен приступ у анализи параметара механике лома. Захваљујући овој опреми и приступу, дисертација пружа дубље разумевање процеса лома у различитим материјалима, што омогућава примену развијене процедуре на танкозидним цилиндричним геометријама. Такође, развијен је целовит поступак за одређивање вредности фактора интензитета напона, *J*-интеграла (преко фактора η_{pl} и γ), чиме се доприноси даљој примени нестандардних процедура испитивања у индустрији.

Овај рад не само да осветљава савремене изазове у механици лома, већ и нуди савремена решења за лабораторијску примену која могу имати широку примену, чинећи га значајним доприносом у науци о материјалима и инжењерској пракси.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је извршио детаљан преглед стручне и научне литературе из релевантних научних области везаних за проблематику докторске дисертације. Референта литература садржи најновије радове из области механике лома, испитивања цевовода под притиском, као и развоја нових методологија и геометрија узорака за испитивање цевовода. Коришћене су и референце из стандардних књига из области инжењерства материјала, машинског и технолошког инжењерства. Цитирана су 144 литературна навода, што је омогућило да се јасно представи стање у испитиваној научној области и да се сагледа актуелност проблематике. Већину прегледане литературе чине радови објављени у врхунским међународним часописима од стране еминентних стручњака у научној области дисертације. На основу овог пресека стања у литератури изложене су основне смернице за истраживања која су спроведена у оквиру рада на дисертацији. Из образложења предложене теме докторске дисертације и објављених радова у пријави, коју је кандидат поднео, као и из пописа литературе која је коришћена у истраживању, уочава се адекватно познавање предметне области истраживања, као и познавање актуелног стања истраживања у овој области у свету.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру дисертације примењене су различите научне методе како би се осигурала детаљна и свеобухватна анализа.

Адитивна производња, позната као 3Д штампање, била је кључна у изради прототипова епрувета. Примењене су две технике: FDM (*Fused Deposition Modeling*) и SLS (*Selective Laser Sintering*). Ове технике су коришћене за израду прототипова од полимера, PLA и PA12. Прототипови су садржали концентраторе напона у облику оштрих жлебова, што је омогућило испитивање различитих геометрија и анализу њиховог понашања под дејством оптерећења.

Израда челичних епрувета укључивала је коришћење материјала P235TR1 и P235GH. Процес је обухватао сечење прстенова из шавних (P235TR1) и бешавних (P235GH) цеви и површинску обраду како спољашње, тако и унутрашње површине. За добијање оштрих жлебова коришћене су методе ласерског сечења и електроерозије, чиме је омогућено прецизно дефинисање концентратора напона на епруветама.

Експериментална испитивања су извршена на 3Д штампаним полимерним епруветама различитог облика и челичним епруветама облика прстена. Коришћена је универзална машина за испитивање материјала која је омогућила затезна испитивања у контроли деформације и очитавање вредности оптерећења које делује на епрувету. Применом методе корелације дигиталних слика (DIC) омогућено је бесконтактно одређивање померања и

деформација на површини епрувета, што је пружило детаљан увид у механичко понашање материјала под различитим оптерећењима.

Након испитивања, челичне епрувете су загреване у пећи на 400 °C како би се променила боја преломне површине. Ово је омогућило лакше препознавање облика коначне прслине. Потом су епрувете потопљене у течни азот и ломљене применом ударног оптерећења. Овај поступак је омогућио детаљну анализу преломних површина и прецизно одређивање коначне дужине прслине настале механизмом жилавог лома.

Резултати добијени испитивањем епрувета са једним или два жлеба коришћени су за формирање кривих отпорности према расту прслине. Применом методе нормализације омогућено је добијање криве отпорности према расту прслине испитивањем једне епрувете, што је значајно смањило број потребних експеримената.

Нумеричка анализа методом коначних елемената је спроведена коришћењем програмског пакета *Simulia Abaqus*. У овој анализи су коришћена својства материјала добијена затезним испитивањима. Нумерички прорачуни су омогућили одређивање параметара механике лома, као што су фактор интензитета напона K, J-интеграл, CMOD и CTOD. Ови прорачуни су били кључни за квантитативну анализу утицаја геометрије на механичке особине епрувета и отпорност према лому.

Примена методе раздвајања оптерећења омогућила је одређивање корекционог фактора неопходног за израчунавање вредности J-интеграла у експерименталним испитивањима. Ова метода подразумева постпроцесорску анализу кривих сила – померање. Добијени резултати упоређени су са онима добијеним испитивањем серије модела епрувета на којима је J-интеграл одређен применом интеграљења по контурама, а потом одређена зависност корекционог фактора од геометрије епрувете.

Поређена су напонско-деформациона стања око врха концентратора напона и вредности параметара механике лома за епрувете са једним и два жлеба. Ова анализа је омогућила дубље разумевање механичких особина материјала и дала значајан допринос развоју нове методологије у истраживању механике лома.

3.4. Применљивост остварених резултата

Дисертација са једне стране доприноси бољем разумевању развоја лома и отказа цилиндричних структура, а са друге стране има директну применљивост у одређивању отпорности према лому и оштећењу материјала цевовода иситивањем у лабораторијским условима.

Део истраживања је урађен на епруветама израђеним техникама адитивне производње, што је послужило за развој и верификацију методологије испитивања која је после примењена на челичне епрувете. Међутим, треба истаћи да је на овај начин обухваћено и одређивање отпорности према лому адитивно произведених материјала.

На примеру полимера PA12, бесконтактном методом дигиталне анализе слика је праћен раст прслине, при чему је као критеријум раста коришћено достизање критичне вредности деформације испред врха прслине. На овај начин, применом бесконтактног мерења формиране су криве отпорности према расту прслине CTOD-δ_5 – Δa; обе величине су одређене применом DIC. Нажалост, испитивањем адитивно произведених епрувета од PLA су добијени знатно лошији резултати због неправилног раста прслине, тако да се показало да је PA12 знатно погоднији за развој методологије брзом израдом и испитивањем 3Д штампаних полимерних епрувета.

Дефинисан је поступак израде, испитивања и обраде резултата добијених испитивањем. Развијен је поступак за израчунавање параметара механике лома за широк опсег геометрија

цевовода, као и различите особине материјала (од кртих, где је од значаја фактор интензитета напона, до жилавих, код којих долази до стабилног раста прслине и по правилу се користе *J*-интеграл и/или отварање врха прслине).

У поређењу са епруветама облика прстена оптерећеним на савијање, развијеним у претходном периоду, предност геометрије прстена оптерећене на затезање је у могућности примене једног концентратора напона. За испитивање савијањем су потребна два концентратора напона, тако да постоји могућност да до интензивнијег раста прслине и отказа епрувете дође са оне стране епрувете која није снимана системом за стереометријско мерење деформација (DIC).

Развијена геометрија епрувете највећу применљивост има у одређивању својстава материјала танкозидних цевовода и посуда под притиском (релативно) малог пречника, тј. управо код оних геометрија код којих је најизраженији проблем немогућности израде стандардних епрувета механике лома због недовољне дебљине.

У претходним истраживањима је показано да формирање заморне почетне прслине на епруветама облика прстена резултира неправилним обликом фронта. Машинском израдом оштрог жлеба, што је приступ примењен у овој дисертацији, добијен је правилан облик почетног концентратора напона, што имајући у виду поновљивост резултата омогућује примену на новим цевима и цевима из експлоатације (процена интегритета цевовода након одређеног периода експлоатације, избор материјала за нови цевовод и др.).

Карактеризација материјала цевовода је тема којој се тренутно изузетно много пажње придаје и у индустрији и у науци, истраживања спроведена током рада на овој дисертацији дају значајан допринос како у области испитивања материјала цевовода у експлоатацији, тако и пројектовања нових цевовода узимајући у обзир отпорност према лому интегритет структуре.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

У досадашњем истраживачком раду, кандидат Исаак (Драган) Трајковић, маст. инж. технол. показао је самосталност и стручност у претраживању литературе, припреми и реализацији експеримената, коришћењу различитих техника карактеризације материјала, примени методе коначних елемената, као и у обради и анализи резултата. На основу досадашњег залагања и постигнутих резултата, Комисија је мишљења да кандидат поседује све квалитете неопходне за самосталан научно-истраживачки рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру дисертације су остварени следећи научни доприноси:

- Уведена је, испитана и верификована нова епрувета за одређивање отпорности према лому материјала цевовода – епрувета облика прстена са концентратором напона изложена затезању (PRNT).
- Развијене су процедуре за израду, испитивање и обраду резултата добијених испитивањем ове геометрије.
- Развијен је поступак за одређивање вредности параметара механике лома - фактора интензитета напона и *J*-интеграла на геометрији нестандардне епрувете облика прстена изложене затезању, применом комбинованог експериментално-нумеричког приступа.
- Одређен је утицај цилиндричног облика геометрије, упоредном анализом резултата добијених испитивањем епрувета облика прстена и равних епрувета истог попречног

пресека. Такође, одређен је утицај броја концентратора напона, имајући у виду да је при испитивању затезањем могуће користити један или два концентратора, за разлику од испитивања савијањем код кога су обавезна два концентратора напона.
- Поступак испитивања и обраде резултата развијен на полимерним епруветама адитивним методама производње примењен је на епрувете израђене од челичних танкозидних цеви.
- Кроз рад на дисертацији сагледани су различити утицајни фактори и развијена је поуздана методологија за одређивање отпорности према лому материјала цевовода.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа студија објављених у претходном периоду и резултата ове дисертације, може се закључити да постигнути резултати дају значајан допринос постојећим сазнањима. Развој нове епрувете за одређивање отпорности према лому и поступка испитивања и обраде резултата омогућује превазилажење већег броја проблема до којих долази у случају примене стандардних епрувета механике лома или неке од других, раније предложених нестандардних епрувета специјално намењених за испитивање материјала цевовода. Неке од њих, укључујући стандардне, захтевају велику дебљину материјала, неке сложену припрему (нестандардних) епрувета за испитивање, а неке посебан прибор који је потребно израдити и заварити или на други начин довести у контакт са епруветом. У поређењу са епруветом облика прстена оптерећеном на савијање, велика предност је могућност испитивања са једним жлебом, тј. унапред се зна место на коме треба очекивати и пратити раст прслине.

Иако одређивање особина конкретних материјала није спадало у основне циљеве дисертације, истраживањима је показано да се геометрија облика прстена успешно може применити и на адитивно произведене полимерне материјале и на челике који се у највећој мери користе за израду индустријских цевовода. При томе, показано је да за разматрану област један од полимерних материјала (PLA) даје веома лоше резултате и да није пожељно користити га чак ни у поступку развоја методологије.

Кроз ранија истраживања на епруветама облика прстена оптерећеним на савијање, наглашен је проблем формирања почетне заморне прслине на челичним епруветама облика прстена, при чему је закључено да се добија неравномеран облик почетне прслине. У овој дисертацији испитиване су епрувете са машинским жлебом, које имају нижу вредност троосности али дају стабилан раст прслине уз правилан облик почетног концентратора напона. У ранијим истраживањима је показано и да је раст прслине кроз танкозидне структуре (на примеру епрувете облика прстене оптерећене савијањем) знатно већи ако је почетни концентратор израђен машински, као оштар жлеб.

У истраживању је примењен комбиновани експериментално-нумерички поступак, где су нумеричком анализом одређени сви параметри које није могуће или је веома тешко одредити експериментално или аналитички. Овакав приступ даје могућност да се обухвати понашање за шири опсег димензија епрувете и концентратора напона, као и особина материјала.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат је резултате и доприносе ове дисертације потврдио објављивањем радова у врхунском међународном часопису (М21), међународном часопису (М23), међународном часопису који није на СЦИ листи (М51) и зборницима са међународних скупова (М34).

М21 – Рад у врхунском међународном часопису:

(1) **Trajković, I.**, Rakin,M., Milošević, M., Mitrović, N., Travica, M., Sedmak, A., Međo, B.: Selective laser sintered Pipe Ring Notched Tension specimens for examination of fracture properties of pipeline materials, - *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 292, pp. 109573, 2023 (**IF=5.4**) (ISSN 0013-7944) (DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109573).

M22 – Рад у међународном часопису:

(2) **Trajković, I.**, Milošević, M., Travica, M., Rakin, M., Mladenović, G., Kudrjavceca, Lj., Međo, B.: Novel Method for Measurement of Pipeline Materials Fracture Resistance-Examination on Selective Laser Sintered Cylindrical Specimens, - *Science of Sintering*, vol. 54, no. 3, pp. 373 – 386, 2022 (**IF=1.172**) (ISSN 0350-820X) (DOI: 10.2298/SOS2203373T).

M51 – Међународни часопис ван СЦИ листе:

(3) **Trajković, I.**, Milošević, M., Rakin, M., Sedmak, A., Međo, B.: Additively manufactured tensile ring-shaped specimens for pipeline material fracture examination – influence of geometry, - *Procedia Structural Integrity of the 23 European onference on Fracture – ECF23*, vol. 42, pp. 1314 – 1319, 2022 (ISSN 2452-3216) (DOI: 10.1016/j.prostr.2022.12.167).

M34 – Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u izvodu

(4) **Trajković, I.,** Milošević, M., Mitrović, N., Sedmak, A., Rakin, M., Međo, B.: The influence of cyllindrical specimen geometry on the values of fracture mechanics parameters, - *International Conference of Experimental and Numerical Investigations and New Technologies CNNTECH 2023, Zlatibor, Serbia* pp. 26, 2023 (ISBN 978-86-6060-155-3).

(5) **Trajković, I.,** Milošević, M., Sedmak, A., Rakin, M., Radosavljević, Z., Mladenović, G., Međo, B.: Additive manufacturing and characterisation using digital image correlation of tensile pipe ring specimens, - *2nd International Conference on Advanced Production and Processing, The Book of Abstracts, Novi Sad, Serbia* pp. 130, 2022 (ISBN 978-86-6253-160-5).

(6) **Trajković, I.,** Milošević, M., Travica, M., Rakin, M., Jevtic I., Sedmak, A., Međo, B.: Determining fracture mechanics parameters using the digital image correlation method on cylindrical samples produced by different additive manufacturing techniques, - *3rd International Workshop on Reliability and Design of Additively Manufactured Materials – RdAMM2 Belgrade, Serbia, 2022* (ISBN 978-86-6060-140-9).

(7) **Trajković, I.,** Milošević, M., Travica, M., Rakin, M., Jevtic I., Sedmak, A., Međo, B.: Laser sintered polyamide specimens - fabrication and tensile testing conditions on different geometries, - *Serbian Ceramic Society Conference ADVANCED CERAMICS AND APPLICATION X New Frontiers in Multifunctional Material Science and Processing, Belgrade, Serbia,* pp. 80, 2022 (ISBN 978-86-915627-9-3).

5. ПРОВЕРА ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

На основу Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду и налаза у извештају из програма *iThenticate* којим је извршена провера оригиналности докторске дисертације кандидата, утврђено подударање текста износи 7 %. Извештај који садржи резултате провере оригиналности ментор је добио дана 1.6.2024. Доминантан узрок подударања текста са изворима из литературе су називи појмова који се користе у области инжењерства материјала (нарочито механике лома и оштећења материјала), који се по правилу састоје од три или четири речи. У тексту постоје и подударања са општим местима из литературе, као и са радовима у којима су објављени резултати докторандовог истраживања који су проистекли из дисертације. На основу свега изнетог, а у складу са чланом 8. став 2. Правилника о поступку провере оригиналности докторских дисертација које се бране на Универзитету у Београду, изјављујемо да извештај указује на оригиналност докторске дисертације, те се прописани поступак припреме за њену одбрану може наставити.

6. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходно изнетих разматрања резултата докторске дисертације **Исаака (Драган) Трајковића**, маст. инж. технол. под називом **Одређивање отпорности према лому материјала цевовода испитивањем нове епрувете облика прстена изложене затезању**, сматрамо да су испуњени сви циљеви и задаци рада на овој тези и да она својим садржајем и квалитетом значајно доприноси области Инжењерсва материјала, што је потврђено објављивањем радова у међународним часописима, као и публиковањем резултата на конференцијама од међународног значаја. Комисија је мишљења да је кандидат испољио изузетну научно-истраживачку способност у свим фазама израде ове докторске дисертације. Имајући у виду постигнуте резултате и научни допринос, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација кандидата Исаака (Драган) Трајковића, маст. инж. технол. прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану докторске дисертације.

Београд, 9. 7. 2024.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Славиша Путић, Редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Љубица Миловић, Редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Марина Дојчиновић, Редовни професор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
Др Милош Милошевић, Научни саветник
Иновациони центар Машинског факултета у Београду

.....
Др Зорана Голубовић, Виши научни сарадник
Универзитет у Београду, Машински факултет