

ВЕЋУ ДОКТОРСКИХ СТУДИЈА

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Лазар Д. Јеремић, дипл. инж.маш. – мастер инжењер машинства.**

Одлуком 710/2 од 04.06.2020.године именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата кандидата **Лазар Д. Јеремић, дипл. инж.маш. – мастер инжењер машинства** под насловом

”ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРОЈЕКТОВАНИХ СА СМАЊЕНИМ СТЕПЕНОМ СИГУРНОСТИ”

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

Кандидат Лазар Д. Јеремић, дипл. инж. маш.– мастер инжењер машинства, уписао је прву годину докторских студија на Машинском факултету Универзитета у Београду школске 2015/2016. године. На основу захтева студента Лазара Јеремића, маст. инж. маш., бр. 1081/1 од 11.06.2019. године да му се одобри израда докторске дисертације, реферата Комисије у саставу: др Александар Седмак, ред. проф., др Зоран Радаковић, ред. проф., др Оливера Поповић, ред. проф., др Ташко Манески, ред. проф. МФ. у пензији и др Марко Јарић, научни сарадник, ИЦ. МФ. Београд број 1081/5 од 09.07.2019. године, а на основу члана 30. Закона о високом образовању („Службени гласник РС“, број 76/2005, 100/2007 – аутентично тумачење, 97/2008, 93/2012 и 89/2013), члана 64. Статута Машинског факултетета (број 1450/4 од 14.06.2018. године) и члана 30. Правилника о докторским студијама Машинског факултета, Наставно-научно веће Машинског факултета на седници од 11.07.2019. године, донело је следећу одлука да се прихвата научна заснованост теме докторске дисертације и констатује да студент ЛАЗАР ЈЕРЕМИЋ, маст. инж. маш. испуњава услове за израду докторске дисертације ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРОЈЕКТОВАНИХ СА СМАЊЕНИМ СТЕПЕНОМ СИГУРНОСТИ. За ментора студенту Лазару Јеремићу, именује се др Александар Седмак, ред. проф.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду донело је Одлуку број 61206-2272/2-17 од 11.7.2017. године којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Лазара Јеремића, под насловом: „ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРОЈЕКТОВАНИХ СА СМАЊЕНИМ СТЕПЕНОМ СИГУРНОСТИ“.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета Београду број 1081/4 од 4.7.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Лазар Д. Јеремић, студента Докторских студија на Машинском факултету у Београду, за израду докторске дисертације и научне заснованости теме: ”Процена интегритета заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности” у саставу:

- др Александар Седмак, редовни професор (ментор), Машински факултет у Београду
- др Зоран Радаковић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Оливера Поповић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Ташко Манески, професор у пензији, Машински факултет у Београду
- др Марко Јарић, научни сарадник, Иновациони центар, Машински факултет у Београду.

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду донело је Одлуку број 61206-3170/2-19 од 26.8.2019. године којом се даје сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Лазара Јеремића, под насловом: „ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРОЈЕКТОВАНИХ СА СМАЊЕНИМ СТЕПЕНОМ СИГУРНОСТИ“.

На основу обавештења проф. др Александра Седмака да је кандидат Лазар Јеремић, завршио докторску дисертацију под насловом: ПРОЦЕНА ИНТЕГРИТЕТА ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПРОЈЕКТОВАНИХ СА СМАЊЕНИМ СТЕПЕНОМ СИГУРНОСТИ”, и предлога Катедре за Технологију материјала, Наставно-научно веће Машинског факултета у Београду је на седници одржаној 04.06.2020. године донело Одлуку број 710/2 којом се именују чланови Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације у саставу:

- др Александар Седмак, редовни професор (ментор), Машински факултет у Београду
- др Зоран Радаковић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Оливера Поповић, редовни професор, Машински факултет у Београду
- др Небојша Гњатовић, доцент, Машински факултет у Београду
- др Симон Седмак, Научни сарадник, Иновациони центар, Машински факултет у Београду.

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација под насловом **”Процена интегритета заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности”**, припада области техничких наука - машинству, ужој научној области **Технологија материјала-Машински материјали**, за коју је Машински факултет Универзитета у Београду матичан.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Лазар Јеремић је рођен 13.03.1991. у Горњем Милановцу. Завршио је основну школу „Момчило Настасијевић“ у Горњем Милановцу, средњу техничку школу „Јован Жујовић“ у Горњем Милановцу. Машински факултет у Београду је уписао 2010. Основне дипломске студије је завршио 2013. са просеком 9.44, док је мастер академске студије завршио 2015. на катедри за Технологија материјала - Машински материјали и заваривање са просеком 9.65. Докторске студије је уписао новембра 2015. До сада је положио све предмете на докторским студијама.

Радно искуство

2014 -2015- Messer Castoin Београд, Инжењер заваривања,

2015 – 2016- Машински факултет, Стипендиста Министарства науке на докторским студијама,

2016 – 2017- Конструктор Метал, Београд, Шеф производње,

2017 – 2018 -ТанкМонт Београд, Инжењер заваривања,

2018 – 2019 - Saipem Italy, Инжењер заваривања,

2019 – Инстраживач сарадник, Иновациони центар, Машински факултет Београд.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата кандидата Лазара Јеремића под **”Процена интегритета заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности”** садржи: 109 страна формата А4, 57 слике, 30 табела, 51 једначина и списак коришћене литературе који садржи 74 референце.

Докторска дисертација садржи следећа поглавља:

1. Увод
2. Преглед литературе у области тезе
3. Особине и понашање челика повишене чврстоће и њихових заварених спојева
4. Механике лома и интегритет заварених спојева
5. Напојни цевовода ХЕ „Бајина Башта“
6. Екпериментални део
7. Нумеричка симулација прототипа цевовода ХЕ „Бајина Башта“
8. Оцена ризика на основу интегритета напојног цевовода
9. Анализа и дискусија резултата
10. Закључак
11. Литература

Осим наведеног, докторска дисертација садржи резиме на српском и енглеском језику, садржај, биографију аутора, Изјаву о ауторству, Изјаву о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада и Изјаву о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Поглавље 1 и 2: Увод и преглед литературе у области тезе

У првом и другом поглављу кандидат Лазар Јеремић је дао детаљан преглед релевантне научне литературе који је од суштинског значаја у циљу утврђивања досадашњих научних резултата и достигнућа у оквиру разматране области. Утврђује се предмет истраживања и дефинише циљ истраживања. Биће приказана подела и примена посуда под притиском, катактеристике материјала које се користе за опрему под притиском. Приказаће кратак опис плана целе дисертације и на крају ће бити направљен преглед литературе из области ове тезе. Биће приказани резултати одређених радова који су се бавили овом тематиком, пре свега екперименталног испитивања напојног цевовода ХЕ „Бајина Башта“, као и самог основног материјала SUMITEM SM80P, у комбинацији са методом коначних елемената, укључујући радове са међународних конференција, из часописа, као и докторске дисертације. Кроз ове радове ће бити објашњено како је дошло до идеје за избор теме, и како

је све изгледало од самог почетка. Прецизније, радови представљени у овом поглављу ће бити фокусирани на следеће: Експериментално испитивање и нумеричку анализу напојног цевовода ХЕ „Бајина Башта“ од челика повишене чврстоће, са посебним пажњом на заварене спојеве и места концентрације напона.

Поглавље 3: Особине и понашање челика повишене чврстоће и њихових заварених спојева

У трећем поглављу је размотрен основни материјал, који спада у челике повишене чврстоће, имајући првенствено у виду склоност ове групе материјала и њихових заварених спојева ка настанку и расту прслина.

Из ове групе челика највише се користе нисколегирани челици кањени и опуштени. Ови челици се, условно, могу сматрати добро заварљивим материјалима. Непожељне појаве које се уочавају при њиховом заваривању су повећање тврдоће, смањење жилавости, повећање прелазне температуре кртости и појава прслина у ЗУТ. Наведене појаве повећавају склоност заварених спојева ка кртом лому, због чега је основни проблем у обезбеђењу сигурног рада њихових заварених конструкција обезбеђење од појаве кртог лома.

За заваривање ове групе челика користе класичне врсте заваривања у првом реду Е, ТИГ и ЕПП. Постоји ризик од појаве прслина на хладно код челика повишене и високе чврстоце, уколико се примењују релативно мале количине унете топлоте и дозволи висок садржај водоника. С друге стране применом поступка заваривања са великом количином унете топлоте смањују се жилавост и чврстоца ЗУТ.

Поглавље 4: Механике лома и интегритет заварених спојева

У четвртом поглављу кандидат се бавио механиком лома са посебним нагласком на механици лома и параметрима механике лома у циљу процене интегритета заварене опреме под притиском.

Поглавље 5: Напојни цевовода ХЕ „Бајина Башта“

У петом поглављу кандидат је анализирао карактеристике напојног цевовода хидроелектране Бајина Башта који је пројектован од нисколегираног челика повишене чврстоће. Такође је описана технологија заваривања цевовода, опис самог постројења и порачун дебљине зида цевовода на дејство статичког притиска

Поглавље 6 и 7: Екперимент и нумеричка симулација прототипа цевовода ХЕ „Бајина Башта“

У шестом и седмом поглављу кандидат се бавио екперименталним испитивањем и нумеричком симулацијом прототипа цевовода ХЕ „Бајина Башта“. Разматрани проблема, тј. применом МКЕ коришћењем софтверских пакета АВАQUS. Метода коначних елемената има велику примену у пракси за процену интегритета заварених конструкција. Поред класичних екперимената, као још један алат који се користи код релних конструкције јесте и нумеричка симулација. У пракси се увек нумеричке анализе пореде са експерименталним резултатима. Али често није могуће одрадити екперименте до краја, па се као замена користе нумеричке симулације, имајући у виду предност нумеричке симулације да је увек могућа поновљивост анализе, уз услов да су постављени добри гранични услови и мрежа коначних елемената.

У том циљу направљен је тродимезиони модел цевовода у делу највеће концентрације напона, да би се добила прецизна расподела деформација и напона, односно верификовао нумерички модел, као и експериментално мерење деформација мерним тракама. Осим тога, овим моделом је симулиран циклус оптерећење-растерећење који је довео до пластичне деформација на мерног траци у близини завареног споја, односно на месту симултаног

дејства хетерогеног материјала (локално различита крутост и пластичност) и концентрације напона. Нумеричка симулација је показало добро слагање са експериментом у смислу одређивања пластичне деформације .

Поглавље 8:

У осмом поглављу кандидат се бавио оценом ризика на основу интегритета напојног цевовода ХЕ „ Бајина Башта“ је преко Дијаграма Анализе Лома (FAD) и матрице ризика.

Поглавље 9: Анализа и дискусија резултата

У поглављу девет кандидат је дао дискусију резултата добијених експерименталном анализом, различитим нумеричким симулацијама и њиховим међусобним утицајем на интегритет и радни век напојног цевовода. Обухвата анализу и дискусију резултата, где су сви приказани резултати систематизовани, анализирани и продискутовани.

Поглавље 10: Закључак

У поглављу десет детаљно су систематизовани остварени научни резултати и дати правци могућих, односно, будућих истраживања заснованих на резултата постигнутих у овој докторској дисертацији.

Поглавље 11: Литература

У поглављу једанаест приказана је и нумерисана литература коришћена за израду докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Истраживања у области понашања посуда под притиском и цевовода веома значајна и актуелна. Кандидат је дао јасну идентификацију и анализу основних проблема који доводе до хаварије цевовода са несагледивим последицама. Докторска дисертација представља савремен и оригиналан допринос разматраној проблематици лома услед постојања грешака типа прслина у материјалу, посебно завареном споју. У оквиру докторске дисертације примењени су савремени истраживачки поступци и лабораторијска мерења уз коришћење најновијих софтверских решења за нумеричке симулације.

Оригиналност добијених резултата у оквиру дисертације потврђују радови који су публиковани и саопштени на научним скуповима или објављени у часописима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији коришћена је обимна литература из различитих области, па су због изразито комплексног карактера теме докторске дисертације референтне области обухватале механику лома и понашања металних материјала, нумеричке метода и симулације, али и експерименталне методе испитивања. Ова литература је кандидату послужила као полазна основа за формирање прегледа постојећих истраживања везаних за област отказа услед лома заварених конструкција, као и за припрему експеримената и нумеричких модела. У уводном делу докторске дисертације кандидат приказује хронолошки преглед релевантне научне литературе, чиме је дао критички осврт на најважније резултате релевантних аутора. Све референце коришћене у раду приказане су на крају рада, а кандидат

се позива на анализе, резултате и закључке објављене у научним часописима високог ранга и конференцијама међународног значаја. Од наведених наслова коришћене литературе, доминирају оне млађе од десет година, као и оне из водећих међународних часописа.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У изради докторске дисертације примењене су и експерименталне и нумеричке методе. Метода коначних елемената у савременој науци има све већу примену и користи се за испитивања и прорачуне различитих машинских конструкција. У склопу нумеричких анализа формиран су веродостојни и поуздани нумерички прорачунски модели. Примењене су методе верификације, засноване на поређењу добијених нумеричких и експерименталних резултата, као и метода експертског мишљења током анализе и тумачења добијених резултата.

3.4. Применљивост остварених резултата

Добијени резултати у оквиру докторске дисертације поред научне вредности имају и значајну практичну примену, пре свега у прорачунима интегритета заварених конструкција као што су посуде под притиском и цевоводи. Остварени експериментални резултати омогућавају одређивање утицаја замора и различитих геометрија које се могу наћи у клиничкој пракси на напонско стање, интегритет и радни век заварених конструкција. Дијагностичке методе имају велику примену у откривању грешака у дизајну, односно геометрији конструкције или дела конструкције, посебно у случајевима отказа, а досадашња искуства из праксе показала су да најчешћи узрок отказа представљају појаве прслина на местима највећих концентрација напона, које је могуће добијених нумеричким прорачуном.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Током израде докторске дисертације кандидат је показао способност за самостални научни рад, као и да решава научне проблеме, односно да има изузетено знање у оквиру области науке о материјалима, затим теоријске механике лома, као и савремене нумеричке анализе, потребно за даљи научно-истраживачки рад. То је потврђено како бројним испитима које је кандидат положио на докторским студијама, тако и бројним коауторским радовима.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Оригинални научни допринос кандидата Лазара Јеремића и његовог доктората под називом **”Процена интегритета заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности** је верификован нови поступак процене интегритета и ризика заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности, на основу класичног концепта механике лома, примењен на конкретном завареном цевоводу кроз примену основних параметара у оквиру Дијаграма Анализе Лома и нумеричке симулације протипа цеввода, што је приказано у поглављу 8.1 дисертације на странама од 77-78 и објављено у раду 2, категорије M23 у часопису Technical Gazette, доступан на линку <https://doi.org/10.17559/TV-20200413142538>, где се у поглављу 5 рада на странама 1146-1147 дати закључци интегритета цеввода на основу нумеричке симулације.

Остали битни доприноси дотората су:

· Приказан је поступак процене интегритета заварених конструкција на основу оцене ризика, приказан у поглављу 8 дисертације на странама од 79-80, који је такође примењен на конкретном завареном цевоводу, и који је показан у у раду 1, категорије M14, Lecture Notes, Springer, доступан на линку https://doi.org/10.1007/978-3-030-58362-0_16.

· Приказана је процедура верификације нумеричких и експерименталних резултата испитивања посуда под притиском, приказан у поглављима 6 и 7 дисертације на странама од 36-75, чиме је омогућена примена комплексних симулација реалних заварених конструкција и што је показано кроз радове 2, 3 и 4.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

На основу прегледа релевантне научне литературе и постојећих решења из области докторске дисертације, комисија констатује да су приказани резултати истраживања изузетно значајни и научно утемељени. Истовремено, на основу увида у задате циљеве истраживања и резултате представљене у докторској дисертацији, констатујемо да су пружени одговори на сва релевантна питања и да су решени проблеми са којима се кандидат сусрео у току истраживања. Развијени нумерички модели и експерименталне процедуре имају велику примењивост у области процене интегритета заварених конструкција.

4.3. Верификација научних доприноса

Научни допринос кандидата Лазара Јеремића, верификовани су следећим радовима:

Категорија M10

1. Aleksandar Sedmak, Snezana Kirin, Igor Martic, Lazar Jeremic, Ivana Vucetic, Tamara Golubovic, Simon A. Sedmak - Structural integrity and life assessment of pressure vessels - risk based approach, CNNTech 2020: Experimental and Computational Investigations in Engineering pp 274-293, DOI Number: [10.1007/978-3-030-58362-0_16](https://doi.org/10.1007/978-3-030-58362-0_16), M14

Категорија M20

2. Lazar Jeremić, Aleksandar Sedmak, Blagoj Petrovski, Branislav Đorđević, Simon Sedmak Structural integrity assessment of welded pipeline designed with reduced safety, **Technical Gazette**, доступан на линку <https://doi.org/10.17559/TV-20200413142538>, Vol. 27/No. 5, стр. 1461-1466, **M23**.
3. L. Jeremić, B. Đorđević, I. Šapić, S. Sedmak, N. Milovanović: Manufacturing and integrity of ammonia storage tanks, STRUCTURAL INTEGRITY AND LIFE Vol. 20, No 2 (2020), pp. 123–129, M24

Категорија M30

4. Gordana Bakić, Branislav Đorđević, **Lazar Jeremić**, Miloš Đukić, Bratislav Rajičić, Simon Sedmak, Aleksandar Sedmak: Influence of exploitation conditions and welding on crack initiation and propagation in pressure vessels, The Third International Conference on FRACTURE MECHANICS "Engineering Applied Fracture Mechanics and Environment", Chlef 27-30 November 2016., Algeria, M33

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу детаљног прегледа докторске дисертације, Комисија за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације констатује да је докторска дисертација под **”Процена интегритета заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности”** кандидата Лазара Јеремића, маг. инж. маш., прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. На основу резултата и закључака приказаних у докторској дисертацији, Комисија констатује да је кандидат Лазар Јеремић, маг. инж. маш., успешно завршио докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима истраживања, а да је докторска дисертација под називом **”Процена интегритета заварених конструкција пројектованих са смањеним степеном сигурности”** представља оригиналан научни рад са научним доприносима у области машинства, ужа научна област **Технологија материјала-Машински материјали**.

У Београду, 30.9.2020. год

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
Др Александар Седмак, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Зоран Радаковић, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Оливера Поповић, ред. проф.
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Небојша Гњатовић, доцент,
Машински факултет Универзитета у Београду

.....
Др Симон Седмак, научни сарадник,
Иновациони центар Машински факултет у Београду

Structural Integrity Assessment of Welded Pipeline Designed with Reduced Safety

Lazar JEREMIĆ, Aleksandar SEDMAK*, Blagoj PETROVSKI, Branislav ĐORĐEVIĆ, Simon SEDMAK

Abstract: The main goal of this paper was to assess the integrity of welded joints in the main pipeline of the reversible hydropower plant "Bajina Bašta". Japanese steel Sumiten 80P (SM 80P) was used as the parent material. European recommendation for pipeline safety factor is equal to 1.7 and this value was used for calculations of the RHPP "Bajina Bašta", whereas the value recommended by Japanese standards is 2.1. A relatively small safety factor, which is different from the Japanese recommendation (since the material itself is Japanese), represented one of the main reasons for a detailed investigation of the pipeline structural integrity and safety, using the prototype. In the case of pressure vessels, the welded joint is a location of stress concentration, which can act in the same way as residual stresses. Assessment of prototype test results is possible to perform based on stress and strain calculations of vessels with ideal geometry. For this reason, the solution for thin-walled vessels is given, both in elastic and elastic-plastic areas. Numerous tests were performed in order to obtain a reliability assessment necessary for the construction of the pipeline, since the consequences of potential failure would be disastrous in this case. A numerical simulation, based on the experimentally determined mechanical properties of the material used, was also performed in order to obtain the stress/strain distribution. These results were then compared to the experimentally obtained ones, and it was concluded that there is a good level of compliance between numerical and experimental results.

Keywords: finite element method; structural integrity; Sumiten 80P; undermatched welded joint

1 INTRODUCTION

Penstocks in hydro-electrical power plants are generally exposed to high stresses. In the case of the hydro-electrical power plant "Bajina Bašta", two different designs and steels were considered:

1. The selection of common mild steel of yield strength 350 MPa required expensive design with 2 penstocks and 2 tunnels.

2. For only one penstock the application of high strength low alloyed (HLSA) steel of yield strength level 700 MPa was inevitable, bringing about additional problems due to cracking sensitivity in respect to welding of such a steel.

Since the latter solution was adopted, additional "fitness for purpose" was required, in order to understand better crack significance. The following fact additionally contributed to make a decision to produce two full scale prototypes of this penstock in order to gather the data about its integrity:

1. The plate thickness of the selected steel (Sumiten 80P, made by "Sumitomo", Japan) was maximum 47 mm, leading to safety margin of only 1.7, significantly lower than the recommended value 2.07, [1].

Two identical full-scale pressure vessels, modelled as prototype of the penstock most stressed part (Fig. 1), were produced by welding of SUMITEN 80P, 47 mm thick plates. The burst test was performed on pre-cracked model for testing resistance to fast fracture and crack arrest properties, whereas the hydro-pressure test on a model with no crack enabled the post-yield experimental analysis of weldments, being the focus of this paper.

Most pressure vessels are welded using the automatic submerged arc welding (SAW), due to its high productivity. Anyhow, manual arc welding (MAW) is still important and often used, at least for repair, so it will be considered here as well. In any case, due to HSLA steel sensitivity to cracking, so-called undermatching effect is a preferable option for welded joints since the overmatching would cause additional welding problems. The undermatching effect, as well as all

other constraint effects, requires essentially different approach to welded structure analysis, [1-11], since plastic strain in such weld metal is inevitable, [12, 13].

In this paper, the experimental data obtained on the prototype was used for detailed analysis of welded joints, as well as to verify numerical simulation of prototype behaviour.

2 PROTOTYPE CONSTRUCTION

The prototype was constructed by taking into account the geometry, measures and wall thickness at the most critically loaded part of the pipeline (diameter of 4.2 m, with a 5° bend, wall thickness of 47 mm). In order to reduce the effect of lids, reinforcement ribs were placed at both ends of the mantle. The plates were cold bent, and the edges were prepared using gas cutting and grinding. Manufacturing of the prototype involved all combinations of welded joint positions and welding procedures used for the pipeline.

The geometry of the prototype which simulates the most critically loaded part of the pipeline consists of a cylindrical mantle with a diameter of 4200 mm and a 5° bend in the pipeline transition area, was closed off using two lids, and is shown in Fig. 1. Welding processes included manual arc (MAW) and submerged arc welding (SAW).

The prototype was made of six sheets, with a thickness of 47 mm, Sumiten 80P steel, joined by SAW and MAW. The prototype consisted of three rings, made from four longitudinal SAW joints (LS1, LS2, LS3, LS4) and two longitudinal MAW joints (LM1, LM2), joined by circumferential manually welded joints (CM), and automatically welded joint (CS). Tests were performed on LS2, LM2, CM and CS joints. Chemical composition and mechanical properties of sheets and filler materials used for both automatic and manual welding procedures are given elsewhere, [1].

Fig. 2 shows strain gauge distribution on prototype mantle, used to monitor welded joints during pressurizing.

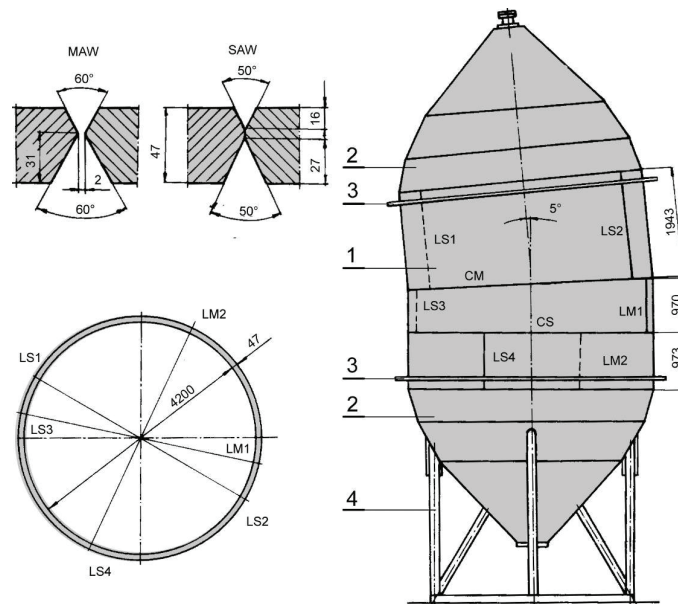


Figure 1 The design and dimensions of the pipeline prototype used in the stress-strain state analysis

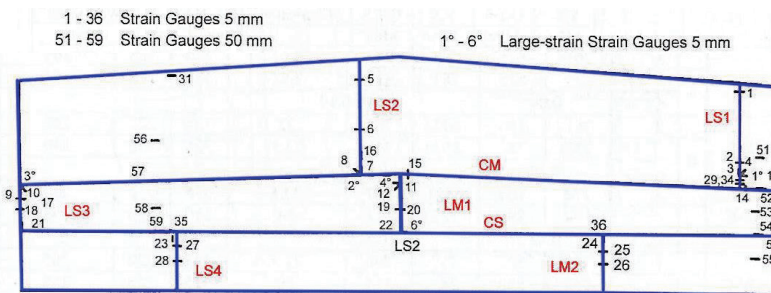


Figure 2 Strain gauge distribution on the prototype

3 PROTOTYPE TESTING

Hydrostatic tests of prototypes, by adding adequate water pressure was performed under maximum working stress conditions, as well as under conditions where these stresses were exceeded by 30%. After the hydrostatic test, corresponding specimens were cut out of the prototype and various tests were performed in order to compare these results to the unloaded specimens, thus assessing the effects of overload and initial plastic strain. This involved static tests and quick fracture tests.

Prototype strains were measured by 51 strain gauges and 10 Moire grids. Hydrostatic testing was performed in three stages, always followed by unloading:

- 1) Checking of the measuring system by increased internal pressure in the prototype from 0 to 2.95 MPa.
- 2) Loading the prototype up to work stress level, by increasing the internal pressure from 0 to 9 MPa, with hold on under pressure 73.5 bar for two hours.
- 3) Overloading the prototype by 33.3%, by increasing the pressure from 0 to 12.05 MPa, corresponding to 77.5% of SAW joint yield stress (687 MPa). Since the acoustic emission indicated noticeable activity, loading was stopped.

Strain gauges had nominal lengths of 5 mm, denoted by 1-36, and 50 mm, denoted by 51-59, Fig. 2, [1]. Strain gauge 3 was connected to a pressure sensor, for the purpose of monitoring the continuous change of strain with pressure. Strain gauges 30-33 were connected to the measuring system only during the third test stage (internal

pressure increase from 0 to 12.05 MPa), thus the results obtained from them are incomplete.

Focus will be here on the vertical weld LS4, Fig. 1. Welded joint LS4 represents one of the most critical locations in the prototype, due to its vicinity to the 5° bend.

Fig. 3 shows the comparison of tangential strain from strain gauges 23 and 27 with the equivalent strain. Analytical expressions relating to strains and stresses in elasticity are as follows:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E}(\sigma_t - \nu\sigma_z); \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu\sigma_t); \varepsilon_r = -\frac{1}{E}(\sigma_t + \sigma_z)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\varepsilon_t - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_t)^2}$$

$$\varepsilon_i = 18.44 \times 10^{-5} p$$

where ε_t is tangential, ε_z axial and ε_i equivalent strain.

Fig. 4 shows change of strains ε_t and ε_z with pressure, loaded up to 9 MPa and 12.05 MPa. Circumferential strain was measured by strain gauge 27, whereas axial strain was measured using strain gauge 23.

Residual stresses that have occurred after the second test stage affected the way in which stress changed with strain in the third stage, in the sense of causing it to deviate from the previous proportionality, for pressures below 9 MPa. Further increase in pressure lead to increased strain rate, whereas the stress changed in non-

linear manner. For the maximum pressure in the third stage, equivalent stress σ_i was calculated, by using von Mises relation:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}$$

$$\sigma_i = 38.71 \cdot p$$

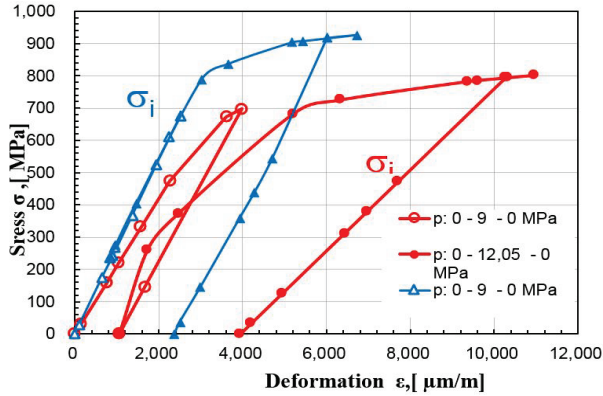


Figure 3 Stress strain diagram for the parent material

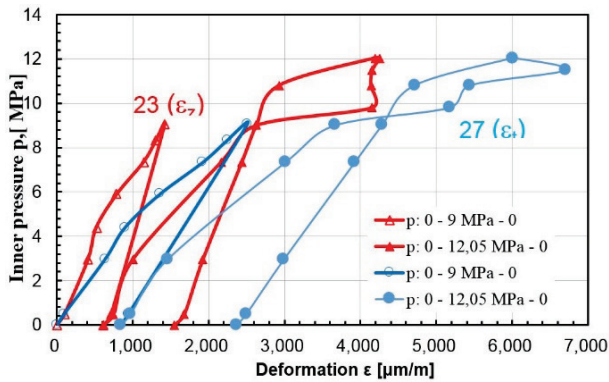


Figure 4 Strain change with pressure in welded joint LS4, for strain gauges 27 (ϵ_x) and 23 (ϵ_z)

As one can see, Figs. 3 and 4, maximal residual (plastic) strain is 0.24% (strain gauges 27) in welded joint

LS4. Proportional behaviour during the second stage of testing can be observed, whereas unusual "loop" behaviour has been recorded in the third stage, as explained in [14].

4 NUMERICAL SIMULATION OF LS4 WELDED JOINT BEHAVIOUR

As already mentioned, numerical simulation based on the experimentally obtained results was also performed in order to obtain the stress/strain distribution. Aim was to compare numerical and experimental results and their verification [15-17]. This section of the paper includes the numerical analysis of welded joint LS4, subjected to a pressure of 12.05 MPa. The simulation is very similar to the previous work involving the plastic deformation of welded joint LS1, [18], and once again involves an undermatched weld, due to the use of submerged arc welding procedure. The goal here was to obtain equivalent strain which would be similar to the experimental values [1, 12].

In this case, mechanical properties were defined for the parent material (Yield Strength 760 MPa) and two weld metals, which had somewhat different Yield Strengths, 687 MPa for SAW and 725 MPa for MAW. Other properties were defined as for the true stress - true strain curves, in a way explained in more details in [19].

Boundary conditions and the mesh are shown in Fig. 5a. The bottom ring surface was fixed, whereas the top ring was constrained in all directions except along the y axis. This was due to the fact that the lower ring was reinforced along its circumference on the prototype, whereas the upper one was not, and in the experiment, it was able to expand in the radial direction.

The mesh was defined with finer elements in the regions of interest, being the circumferential weld CS, since the strain gauges that were used as a reference were located near it, Fig. 5b. The total number of elements was 147400, whereas the total number of nodes was 223110. Standard linear hex elements (C3D8R) were used for this simulation.

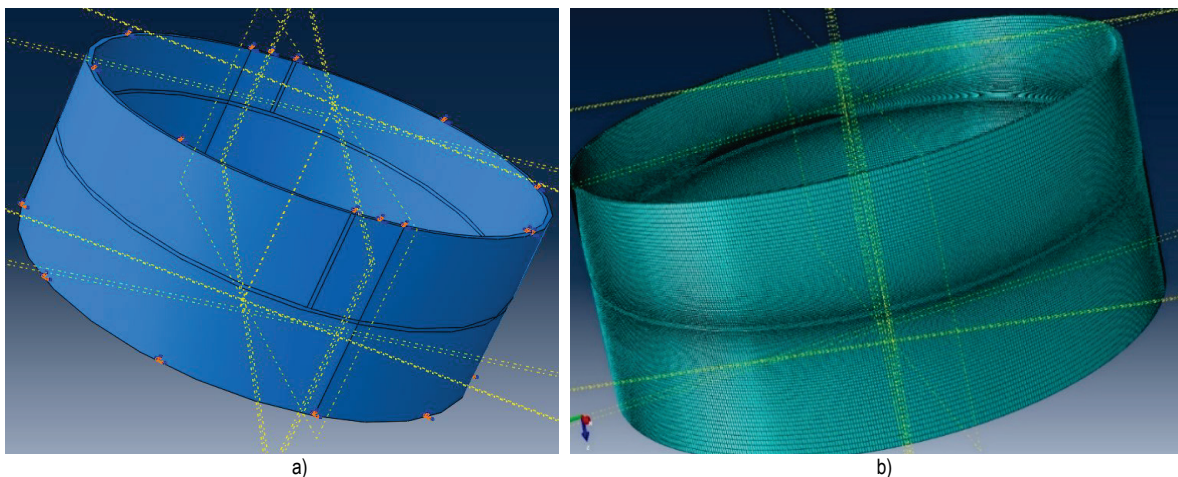


Figure 5 Boundary conditions and the mesh of finite elements

Obtained results for equivalent strain distribution was compared with the experimental results for the same load, at the same locations (strain gauges 23 and 27 in the prototype).

Results of the numerical simulation are shown in Figs. 6a (stresses) and 6b (strain). It can be seen that the stresses

in the relevant location were around 763 MPa (near the connection between the two welded joints), and were slightly above the Yield Strength for the weld metal (SAW), resulting in plastic strain, 0.25%, which can be seen in Fig. 6b as the total strain (0.55%, including cca 0.3% of elastic

strain) and in Fig. 7. These values are in excellent agreement with experimental one, being 0.24% for the plastic strain, and 0.66% for the total value, Figs. 3 and 4. Plastic strain concentration in the upper right corner can be disregarded since it was in the area where boundary conditions were defined.

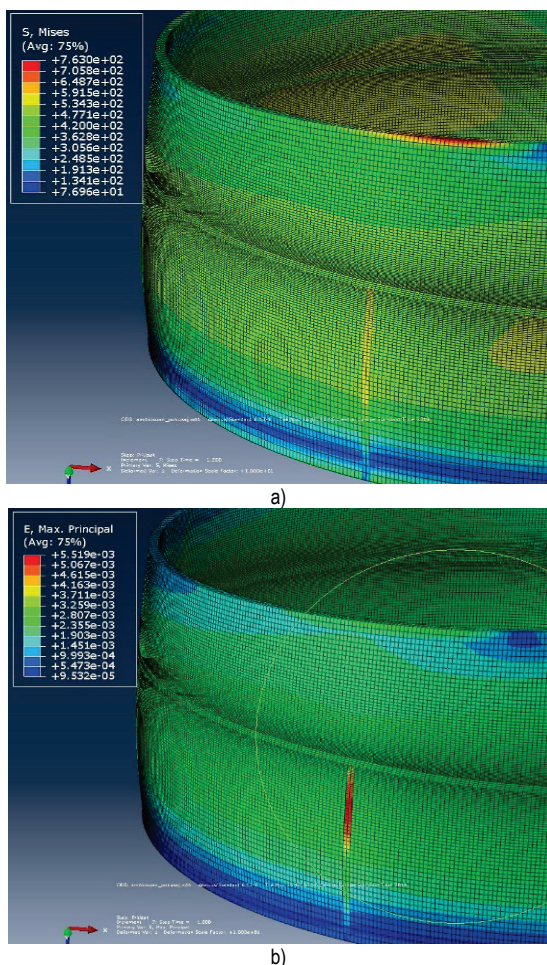


Figure 6 Results of the numerical simulation: a) stresses; b) strains

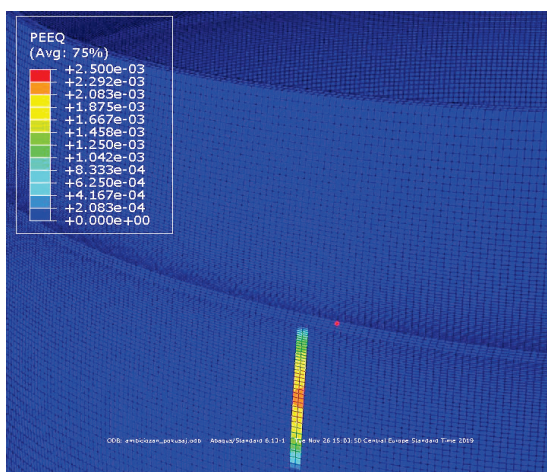


Figure 7 Equivalent plastic strain distribution

Following the simulations shown above, an additional case was also considered. In this case, it was assumed that the penstock was made of steel SM60 instead of the original parent material. It should be noted that this material was actually used as the parent material for the remaining parts of the HEPP "Bajina Bašta" pipeline.

Fig. 8 shows the equivalent plastic strain magnitudes and distribution, with the same test load of 12.05 MPa. As expected, there was an increase in maximum values, of around 10% compared to the results from Fig. 7. In this case, however, plastic strain was present in a significantly larger number of places, and "covered" a much larger area. Since its maximum and other relevant values were distributed in a similar way to the SM80P case, it was decided to focus on the circumferential weld this time, since that one was not previously considered.

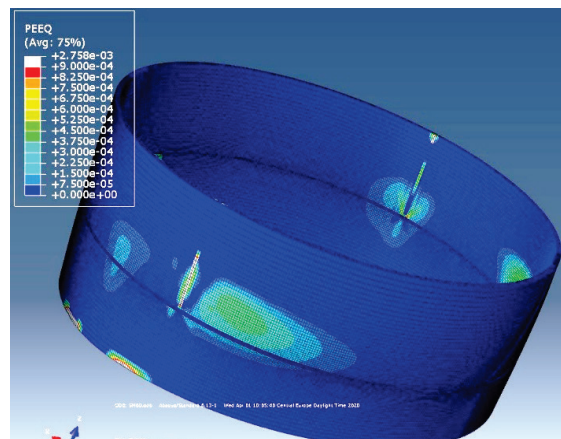


Figure 8 Equivalent plastic strain distribution with parent metal SM60

Fig. 9 shows the most critical region in the vicinity of the circumferential weld (CS), at its connection to the LS3 weld. Here the plastic strain was around 0.09%, similar to the values obtained in the area where welded joints LS4 and CS meet, in the case of the previous model, with a stronger PM. The fact that this value was lower despite that suggests that the circumferential welded joint was not a critical location in neither of the cases, whereas the overall distribution of PEEQ in the second model numerically confirmed what was already known from experience - that a higher strength steel was necessary for this particular penstock.

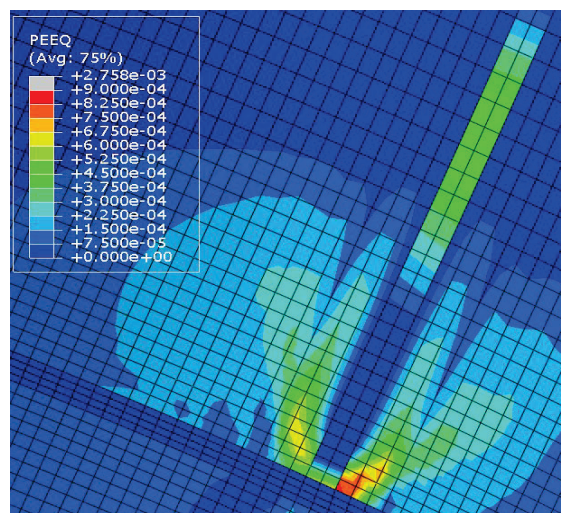


Figure 9 Equivalent plastic strain distribution with SM60 in the circumferential weld

5 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

Experimental tests of the prototype and its welded joints have shown that there are significant differences in terms of behaviour and properties of the parent material and the filler

metals. The behaviour of a pressure vessel in exploitation is dictated by the welded joint.

Having in mind the fact that this experimental investigation confirmed that the unloaded vessel had shown completely elastic behaviour, it can be concluded that further increase in load will lead to plastic strain developing in regions where deformation was highest.

Numerical simulation of the prototype also showed similar behaviour as in the experimental conditions. This numerical model shows that the welded joints and base material have good performance at inner pressure of 12.05MPa, which proves that the integrity of the penstock is not compromised. Additional models with the other material used in this pipeline had shown that the choice of SM80P was correct, as in this case there was noticeably more plastic strain involved.

Testing of weld metal and welded joint specimens supported the viewpoint that the weaker weld metal can be viewed as a "softer layer", providing additional plasticity to the penstock as a whole, and crucially contributing to its structural integrity. Anyhow, having in mind nowadays capabilities to manufacture overmatching welded joints which are not too sensitive to cracking, one should also consider this option when designing such a construction.

Based on presented results and their discussion, one can conclude that the integrity of the pipeline of HPP "Bajina Bašta" is not compromised, even when designed with a reduced degree of safety.

Acknowledgments

The authors of this paper would like to thank the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia for their support, subproject 34050.

The authors wish to dedicate this paper to the memory of two great men and friends, Prof. Stojan Sedmak, Belgrade, and Prof. Zvonimir Lukačević, Slavonski Brod, who paved the way in this region of fracture mechanics and structural integrity of welded joints.

7 REFERENCES

- [1] Sedmak, S. & Sedmak, A. (1995). Experimental investigation into the operational safety of a welded penstock by a fracture mechanics approach. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 18, 527-538. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1995.tb01415.x>
- [2] Gubelj, N., Predan, J., Rak, I., & Kozak, D. (2009). Integrity Assessment of HSLA Steel Welded Joint with Mis-Matched Strength. *Structural Integrity and Life*, 9, 157-164.
- [3] Konjatić, P., Kozak, D., & Gubelj, N. (2012). The Influence of the Weld Width on Fracture Behaviour of the Heterogeneous Welded Joint. *Key Engineering Materials*, 488-489, 367-370. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.488-489.367>
- [4] Kozak, D., Konjatić, P., Matejiček, F., & Damjanović, D. (2010). Weld Misalignment Influence on the Structural Integrity of Cylindrical Pressure Vessel. *Structural Integrity and Life*, 10(2), 153-159.
- [5] Kozak, D., Gubelj, N., Konjatić, P., & Sertić, J. (2009). Yield load solutions of heterogeneous welded joints. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 86, 807-812. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2009.11.012>
- [6] Kozak, D., Gubelj, N., & Vojvodić Tuma, J. (2007). The effect of a material's heterogeneity on the stress and strain distribution in the vicinity of a crack front. *Materials and technology*, 41(1), 41-46.
- [7] Gubelj, N. (1999). Fracture behaviour of specimens with surface notch tip in the heat affected zone (HAZ) of strength mis-matched welded joints. *International Journal of Fracture*, 100(2), 155-167. <https://doi.org/10.1023/A:1018794316336>
- [8] Bajić, D., Momčilović, N., Maneski, T., Balać, M., Kozak, D., & Culafić, S. (2017). Numerical and experimental determination of stress concentration factor for a pipe branch model. *Technical gazette*, 24(3), 687-692. <https://doi.org/10.17559/TV-20151126222916>
- [9] Younise, B. S. & Sedmak, A. (2014). Micromechanical study of ductile fracture initiation and propagation on welded tensile specimen with a surface pre-crack in weld metal. *Structural Integrity and Life*, 14(3), 185-191.
- [10] Bakić, G., Šijački-Žeravčić, V., Djukić, M., Rajičić, B., Radović, M., Gajić, I., Maslarević, A., & Jakovljević, A. (2014). Characterisation of Undermatch Welded Joint of X20CrMoV121 Steel after Prolonged Service. *Structural Integrity and Life*, 14(2) (2014), 133-140.
- [11] Schneider, C., Ernst, W., Schnitzer, R., Staufer, H., Vallant, R., & Enzinger, N. (2018). Welding of S960MC with undermatching filler material. *Welding in the World, March* 62, 801-809. <https://doi.org/10.1007/s40194-018-0570-1>
- [12] Sedmak, S. & Sedmak, A. (2005). Integrity of Penstock of hydroelectric powerplant. *Structural Integrity and Life*, 5(2), 59-70.
- [13] Čamagić, I., Burzić, Z., Sedmak, A., Vasić, N., Čirković, B., & Algoal, M. (2014). Influence of mechanical properties and microstructural heterogeneity of welded joint constituents on tensile properties and fracture toughness at plane strain, K_{Ic} . *Structural Integrity and Life*, 14(1), 45-49.
- [14] Sedmak, S., Algoal, M., Sedmak A., Tatic, U., & Dzindo, E. (2016). Elastic-plastic behaviour of welded joints during loading and unloading of pressure vessels. *21st European Conference on Fracture, Procedia Structural Integrity*, 2, 3546-3553. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.442>
- [15] Sedmak, S., Jovičić, R., Sedmak, A., Đorđević, B., & Čamagić, I. (2017). Numerical analysis of different weld geometries of lap welded joint in ammonia transport tanks. *Structural Integrity and Life*, 17(3), 217-220.
- [16] Martić, I., Sedmak, A., Mitrović, N., Sedmak, S., & Vučetić, I. (2019). Effect of Over-Pressure on Pipeline Structural Integrity. *Technical Gazette*, 26(3), 852-855.
- [17] Jovičić, R., Sedmak, S., Tatić, U., Lukić, U. & Walid, M. (2015). Stress state around imperfections in welded joints. *Structural Integrity and Life*, 15(1), 27-29.
- [18] Tatic, U., Sedmak, S., Djurdjevic, A., Sedmak, A., & Bakić, R. (2013). Numerical modeling of full-scale penstock model testing. *Proc. of the 3rd Int. Conf. Numerical Modeling of Full-Scale Penstock Model Testing*, September 2013, Graz University of Technology - Austria. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.06.183>
- [19] Sedmak, A. (2018). Computational fracture mechanics: An overview from early efforts to recent achievements. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 41(12), 2438-2474. <https://doi.org/10.1111/ffe.12912>

Contact information:

Lazar JEREMIĆ, PhD student
Innovation Centre of Faculty of Mechanical Engineering,
Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia
E-mail: laki991@hotmail.com

Aleksandar SEDMAK, Prof. PhD
(Corresponding author)
Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade,
Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia
E-mail: asedmak@mas.bg.ac.rs

Blagoj PETROVSKI, Prof. PhD

Innovation Centre of Faculty of Mechanical Engineering,
Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia
E-mail: bpetrovski@mas.bg.ac.rs

Branislav ĐORĐEVIĆ, PhD student

Innovation Centre of Faculty of Mechanical Engineering,
Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia
E-mail: brdjordjevic@mas.bg.ac.rs

Simon SEDMAK, PhD

Innovation Center of Faculty of Mechanical Engineering,
Kraljice Marije 16, 11120 Belgrade, Serbia
E-mail: simon.sedmak@yahoo.com