

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ВЕЋЕ ЗА МУЛТИДИСЦИПЛИНАРНЕ СТУДИЈЕ

**Предмет:** Извештај Комисије о оцени завршене докторске дисертације, докторанткиње мр Љубице Лазић Вулићевић, дипл. маш. инж.

Одлуком Већа за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду, број: 06-167/III-1042/4-13, донетој на седници одржаној 3. априла 2014. године, именовани смо у Комисију за преглед и оцену докторске дисертације: **"Отпорност према заморном лому заварених цеви од челика повишене чврстоће"**, кандидаткиње мр Љубице Лазић Вулићевић.

На основу детаљног прегледа, мањих корекција и анализе ове дисертације, подносимо следећи:

## ИЗВЕШТАЈ

Докторска дисертација мр Љубице Лазић Вулићевић, дипл. маш. инж., изложена је на 184 страна текста формата А4, уз 7 уводних страница на којима је дат Предговор и Садржај. Текст дисертације илустрован је са 131 сликом (цртеж, дијаграм, микроструктурни снимак, фотографија, схема и др.) и 13 таблица. Такође је дат списак од 139 библиографских јединица које су директно везане за област истраживања или су њој блиске. Текст тезе састоји се из 8 глава и Литературе.

### 1. Увод

Модерна технологија има јасан циљ – остварити потребни процес са највишом могућом ефикасношћу и минималним утрошком ресурса (материјала, радне снаге и енергије) уз додатно очување окружења. Поред теоријских основа и приказа до сада публикованих резултата из ове области, овај рад ће садржати сопствена теоријско-експериментална истраживања са тежиштем на проблемати отпорности на заморни лом заварених цеви од челика повишене чврстоће које се користе као заштитни елемент у нафтним бушотинама, а у циљу комплетне процене интегритета конструкције.

Од 1950 године цевоводи се користе као најекономичнији и најбезбеднији начин експлоатације и транспорта нафте и гаса. Низ бушотина и цевовода се још увек гради свуда у свету. Садашње загађивање земље и воде услед оштећења цевовода подстакло је важну тему очувања животне средине, те се спроводе интензивна истраживања да би се сачувала целовитост заштитних цеви бушотине и цевовода.

У оквиру раду на овој тези треба да буде истражено понашање у случају оштећења услед замора заштитних заварених цеви израђених од челика J55, јер он има највећу дозвољену толеранцију по питању хемијског састава и могућности термичке обраде, а задовољава све услове прописане стандардом API. Термичком обрадом челика J55 постиже се врло повољна ниска тврдоћа, па може издржати кородивни утицај сумпорводоника ( $H_2S$ ). Код нижих концентрација сумпорводоника ( $H_2S$ ) овај челик се може оптеретити врло близу границе течења, а да не дође до лома. Међутим, угљенични и нисколегирани челици, укључујући J55, подложни су општој и тачкастој корозији, односно напонској корозији, што их чини посебно осетљивим на настанак и раст заморне прслине и сходно томе, захтевају детаљна истраживања њихове отпорности на заморни лом и процену интегритета у наведеним радним условима. Најчешће неисправности заштитних заварених цеви везане су за неадекватан избор основног материјала и технологију израде цеви у односу на карактеристике радне средине и услове експлоатације (напонска корозија, ерозија), руковање цевима и колонама заштитних заварених цеви, за ушће бушотине и за променљива оптерећења у експлоатацији.

Како откази цеви у највећем броју случајева настају иницирањем и растом прслина, повољна конструкцијска решења могу да се постигну само на основу детаљног познавања механизма појаве и раста прслина. При томе постоје два случаја:

Први се односи на стање заштитних заварених цеви код којих нема грешака у почетку експлоатације и код којих кад дође до појаве прслина оне су последица концентрације напона, напонске корозије са унутрашње стране цеви и/или тачкасте (pitting) корозије са спољашње стране цеви. У таквим случајевима меродаван параметар је век до иницијације прслине, односно заморна чврстоћа.

Друго, пракса заваривања показује да и поред најстроже контроле у експлоатацији могу бити пуштене и заштитне заварене цеви са иницијалним грешкама. Њихово порекло може бити вишеструко, почев од избора технологије израде, избора основног и додатног материјала, избора људи и средстава за рад, па до обликовања завареног споја и самих цеви. У таквим случајевима век заштитне заварене цеви при променљивом оптерећењу зависи само од раста прслине из почетне грешке. Да ли ће се та прслина развијати зависи од прага замора, што условљава да се одреди његова величина. Условно праг замора може бити значајан и за прслине које су инициране под дејством напонске корозије и заосталих напона и променљивог оптерећења.

Да би се проценио интегритет заштитних заварених цеви, урађена је 3D симулација и добијени су параметри механике лома коришћењем проширене методе коначних елемената (ПМКЕ), односно софтверског пакета Abaqus и додатка Morfeo/Crack for Abaqus, који је најпогоднији за ту сврху.

## **2. Циљ и задатак рада**

Основни научни циљ у оквиру ове докторске дисертације су да се утврди отпорност заштитних заварених цеви према оштећењу услед замора и према заморном лому, применом комбинованих теоретско-експерименталних и нумеричких истраживања. Примењена је проширена метода коначних елемената (Extended Finite Element Method - XFEM), као једна од нових техника прорачуна у домену моделирања и раста заморних прслина у структури, и показала се као веома ефикасна у симулацији раста заморне прслине на геометрији типа цеви. Експериментална верификација показатеља заморног оштећења и параметара механике лома добијених нумеричким симулацијама помоћу ПМКЕ, представља значајан прилог истраживању интегритета заштитних заварених цеви оптерећених на замор.

Резултати добијени у овом раду могу значајно допринети разумевању проблема одржавања постојеће опреме под притиском и предложене мере за осигурање њеног интегритета у току експлоатације

Очекује се да ће дисертација имати посебан значај пошто ће показати да је могуће користити заварену конструкцију и у присуству прслине која није достигла своју критичну дужину, те се на основу тога могу дати препоруке о праћењу понашања и евентуалног даљег раста те прслине током експлоатације.

## **3. Методологија истраживања**

У овом истраживању коришћене су различите аналитичке методе, као и 3Д нумеричка симулација понашања заварених цеви. Интегритет конструкција је релативно нова научна и инжињерска дисциплина, која у ширем смислу обухвата анализу стања и дијагностику понашања, процену заморног века и ревитализацију конструкција. То значи да, осим уобичајене ситуације у којој треба проценити интегритет конструкције када се испитивањем без разарања открије грешка, ова дисциплина обухвата и анализу напонског стања конструкције без прслине, најчешће методом коначних елемената, а посебно анализу стања конструкције која ради у условима замора. На тај начин се добија прецизна и детаљна расподела померања, деформација и напона, која омогућава да се утврде „слаба” места у конструкцији, чак и пре појаве прслине.

Експериментална истраживања, обухватају испитивања на замор епрувета израђених из основног материјала, заварених спојева заштитних цеви које нису биле у експлоатацији и заштитних цеви које су биле у експлоатацији. Циљ ових испитивања је одређивање параметара механике лома, односно коефицијената Парисовог закона раста прслине. Аналитичким методама је потом утврђен заморни век конструкције са различитим дубинама прслине као могућег оштећења. Поређењем експерименталних

результата и добијених нумеричком симулацијом помоћу проширене методом коначних елемената биће верификована ова нова нумеричка метода.

Нумеричком симулацијом помоћу проширене методом коначних елемената на геометрији типа цеви биће предложена комбинована експериментално-нумеричка метода за оцену отпорности према заморном лому заштитне заварене цеви са прслином.

#### **4. Резултати рада**

Рад на дисертацији ће подразумевати познавање и примену више различитих научних области: машинства, инжењерства материјала, механике лома заварених спојева и конструкција, примену проширене методе коначних елемената на раст прслине. Резултати експерименталних и нумеричких истраживања даће, кроз мултидисциплинарни приступ проблематици осигурања интегритета опреме под притиском у експлоатацији, и предлог мера за успешно коришћење и одржавање постојеће опреме.

У том циљу обрађене су главе по следећем редоследу:

1. Увод.
2. Основне карактеристике заварених цеви у нафтној индустрији.
3. Развој и примена механике лома.
4. Заморни век конструкције
5. Проширена метода коначних елемената
6. Процена преосталог заморног века цеви од челика API J55 експерименталним и нумеричким методама
7. Проширена метода коначних елемената у процени заморног века цеви са аксијалном површинском прслином
8. Закључак
9. Литература

Уводно поглавље указују на значај и комплексност теме, као и на потребу да се применом параметара механике лома анализира и оцењује интегритет и заморни век опреме под притиском.

Друго поглавље се бави материјалом, технологијом производње заварених цеви у нафтној индустрији, типовима могућих грешака и анализом примера отказа ових цеви. Овде је указано на чињеницу да је присуство грешака типа прслина неминовно у завареним спојевима и да је примена одговарајућих параметара механике лома најбољи начин да се обезбеди интегритет опреме под притиском.

У трећем поглављу приказан је развој и примена механике лома, почев од линеарно еластичних параметара, преко еласто-пластичних параметара, све до анализе могућности њихове примене на анализу интегритета опреме под притиском, односно анализе заварених спојева као критичних места такве опреме.

Четврто поглавље говори о конструкцији у условима замора, основним концептима пројектовања у односу на замор материјала, једначинама за одређивање брзине раста заморне прсине, одређивању критичне дужине прсине у реалној конструкцији и израчунавању преосталог заморног века конструкције са грешком типа прсине.

Пето поглавље даје кратак теоретски осврт на проширену методу коначних елемената као релативно нову методу, коју још треба доказивати у пракси, али и са значајним новим могућностима 3Д симулација конструкција у условима замора. Овде је приказано на који је начин побољшана ова метода у односу на класичну МКЕ, као и на који начин с прорачунавају неки од параметара у механици лома.

Шесто поглавље приказује резултате експерименталних истраживања механичких карактеристика челика API J55; одређивање критичних вредности параметара механике лома завареног споја; понашања основног материјала у условима замора; процена интегритета конструкције употребом FAD дијаграма; прорачун преосталог века конструкције са прслином различите дубине и утицај промене опсег анапона на преостали век конструкције.

Седмо поглавље приказује 3Д симулацију употребом ПМКЕ у условима замора на геометрији типа цеви са иницијалном површинском аксијалном прслином. Пре саме симулације, урађена је својеврсна верификација ове релативно нове методе поређењем резултата добијених у експерименту са оним добијеним помоћу ПМКЕ, где је приказано веома добро поклапање.

Осмо поглавље је посвећено закључцима у којима је посебна пажња посвећена мултидисциплинарности рада. Наглашено је да је рад показао предности мултидисциплинарног приступа анализирању стања цевовода као опреме под притиском и успостављању ефикасних мера за обезбеђење њеног интегритета. Употребом проширене методе коначних елемената показано је да постоји реална и погодна могућност да се опсежна, дуготрајна и скупа експериментална испитивања, уколико се прорачуном докаже слагање добијених резултата, скоро у потпуности заменити нумеричким симулацијама.

## 5. Дискусија

Резултати добијени у овом раду указују на велике могућности примене нумеричке симулације потпомогнуте експерименталних истраживањима, у анализи интегритета опреме под притиском. Такође је очигледно да само целовити, мултидисциплинарни приступ може да пружи поуздану процену интегритета конструкција код којих су заварени спојеви, односно хетерогени материјал, критична места. Рад је показао предности мултидисциплинарног приступа анализирању стања опреме под притиском и успостављању ефикасних мера за обезбеђење њеног интегритета. Примењено је више различитих научних дисциплина: механика лома, понашање хетерогених материјала у присуству прлина, прорачун конструкција применом проширене методе коначних елемената. Ове научне дисциплине могу да се сврстају у две научне области: инжењерство материјала и механика лома.

## 6. Закључак

Приказана истраживања у овој дисертацији, указују на то да се применом параметара еласто-пластичне механике лома може проценити интегритет опреме под притиском, имајући у виду заварене спојеве као критична места. Употребом проширене методе коначних елемената показано је да постоји реална и погодна могућност да се опсежна, дуготрајна и скупа експериментална испитивања, уколико се прорачуном докаже слагање добијених резултата, скоро у потпуности заменити нумеричким симулацијама. Коначно, указано је на предности мултидисциплинарног приступа, који је омогућио целовито сагледавање проблема и понудио одговарајуће решење.

## 7. Литература

На последњих седам страна рада даје се списак од 139 библиографских јединица које су директно везане за област истраживања и наведене према интернационалном стандарду за цитирање. Списак објављених радова кандидаткиње мр Љубице Лазић Вулићевић, дипл. маш. инж. који су у вези са проблематиком ове дисертације:

1. **Lj. Lazić Vulićević**, M. Arsić, Ž. Šarkoćević, A. Sedmak, M. Rakin, Structural Life Assessment of Oil Rig Pipes Made of API J55 Steel by High Frequency Welding, Technical Gazette, Vol.20, 6(2013), 1091-1094, [M23](#)
2. Ž. Šarkoćević, M. Arsić, **Lj. Lazić Vulićević**, Z. Savić, Mechanical Properties of Welded Pipes Produced by High Frequency Welding of the Steel API J55, Zavarivanje i zavarene konstrukcije, Vol. 55, br.4, pp. 137-142
3. **Lazić Vulićević, Lj.**, Šarkoćević, Ž., Arsić, M., Sedmak, A., Rakin, M., Burzić, Z., Medjo, B.: Integrity assessment of welded casing pipes in oil well made of api j55 steel by high frequency welding. III International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2013 (IIZS 2013), October 30<sup>st</sup>, 2013, Zrenjanin, Serbia

4. **Lj. Lazić Vulićević**, A. Grbović, A. Sedmak, A. Rajić, The Extended Finite Element Method in Fatigue Life Predictions of Oil Well Welded Pipes Made of API J55 Steel, IV International Conference Industrial Engineering And Environmental Protection 2013 (IIZS 2013), October 30<sup>st</sup>, 2013, Zrenjanin, Serbia

**Напомињемо да је рад под редним бројем 1. са ССП листе.**

## **ЗАКЉУЧАК**

На основу свега изнетог, Комисија за преглед и оцену докторске дисертације, једногласно је закључила да докторска дисертација под насловом: **"Отпорност према заморном лому заварених цеви од челика повишене чврстоће"**, кандидаткиње мр Љубице Лазих Вулићевић испуњава све научне и стручне критеријуме који се односе на докторску дисертацију. Стога Комисија предлаже Већу за мултидисциплинарне студије Универзитета у Београду да овај Извештај у целини прихвати и после спроведених осталих процедура, закаже јавну одбрану ове дисертације.

У Београду, 23.11.2014

## **ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ**

Др Александар Седмак, ред.проф. ментор  
Машински факултет Универзитета у Београду  
Ужа област научноистраживачког рада: механика, интегритет конструкција

2. Др Марко Ракин, в.проф., ментор,  
Технолошко-металуршки факултет, Београд,  
Ужа научна област: инжењерство материјала, рачунска механика

3. Др Зијаж Бурзић, научни саветник.  
Војно-технички Институт, Београд  
Ужа научна област: механика лома и замор материјала

4. Др Мирко Павишић, в.проф.,  
Машински факултет, Београд  
Ужа научна област: механика

5. Др Миодраг Арсић, научни саветник.  
Институт за испитивање материјала ИМС, Београд  
Ужа научна област: Заваривање и заварене конструкција, и замор материјала