

# УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

## Машински факултет

### НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

### ДЕКАНУ МАШИНСКОГ ФАКУЛТЕТА

**Предмет:** Извештај Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње

мр Бранке Гаћеше, дипл. маш. инж.

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду бр. 152/2 са седнице од 03.02.2011. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације кандидаткиње мр Бранке Гаћеше, дипл. маш. инж, под насловом:

### **"НУМЕРИЧКО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА ЧВРСТОЋЕ КОТЛОВСКИХ КОНСТРУКЦИЈА",**

о чему подносимо следећи

## ИЗВЕШТАЈ

### 1. УВОД

#### ***Наслов и обим докторске дисертације***

Докторска дисертација мр Бранке Гаћеше, дипл. маш. инж., под називом ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција*** има 173 стране текста, садржи 103 слике, 36 табела и 80 цитата референтне литературе.

#### ***Хронологија одобравања и израде дисертације***

Мр Бранка Гаћеша је пријавила докторску дисертацију 12.12.2006. године, под редним бројем 1148/1 на Катедри за Отпорност конструкција Машинског факултета у Београду. Кандидаткиња је за ментора предложила в. проф. др Весну Милошевић-Митић. На основу обавештења саопштеног на седници Наставно-научног већа 28.12.2006. године, Катедра за Отпорност конструкција је на седници одржаној 20.04.2007. године формирала Комисију за оцену испуњености услова кандидата и научне заснованости теме докторске дисертације. Комисију су чинили: в. проф. др Весна Милошевић-Митић, проф. др Ташко Манески, проф. др Титослав Живановић, в. проф. др Нина Анђелић и в. проф. др Марко Ракин са Технолошко-металуршког факултета у Београду.

Комисија је поднела позитиван извештај о пријави докторске дисертације кандидаткиње мр Бранке Гаћеше, који је у Архиви Машинског факултета у Београду заведен под бројем 549/2 од 08.05.2007. године. У извештају, Комисија је предложила Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да одобри тему докторске дисертације под називом ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција***, наводећи да је предложена тема адекватна за израду докторске дисертације и да кандидаткиња испуњава све законске и истраживачке квалификације за рад на дисертацији. Наставно-научно веће Машинског факултета усвојило је извештај Комисије на седници одржаној 24.5.2007. године

и донело Одлуку о прихватању предлога о испуњености услова и о научној заснованости теме докторске дисертације кандидаткиње мр Бранке Гаћеше, која је заведена под бројем 549/3. На основу сагласности Стручног већа Универзитета у Београду за машинске, саобраћајне и организационе науке са седнице од 31.05.2007. године, Декан Машинског факултета у Београду донео је коначну одлуку бр. 712/1 од 01.06.2007. (датум завођења 14.06.2007.) којом се одобрава рад на теми докторске дисертације ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција*** кандидаткиње мр Бранке Гаћеше, дипл. маш. инж. под менторством в. проф. др Весне Милошевић-Митић.

На основу обавештења ментора докторске дисертације под насловом ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција***, в. проф. др Весне Милошевић-Митић, да је кандидаткиња мр Бранка Гаћеша завршила израду докторске дисертације, Катедра за Отпорност конструкција предложила је Комисију за оцену и одбрану докторске тезе у саставу: в. проф. др Весна Милошевић-Митић - ментор, проф. др Ташко Манески, проф. др Титослав Живановић, в. проф. др Нина Анђелић и в. проф. др. Марко Ракин, Технолошко-металуршки факултет у Београду (бр.152/1 од 28.01.2011. године).

Одлуком Наставно-научног већа Машинског факултета у Београду, бр. 152/2 од 03.02.2011. године, именовани су предложени чланови Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција*** кандидаткиње мр Бранке Гаћеше, дипл. маш. инж.

### ***Место дисертације у одговарајућој научној области***

Докторска дисертација под називом ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција*** припада области техничких наука, односно области машинства. Како је предмет дисертације одређивање чврстоће наведених конструкција, она припада научној области Отпорност конструкција. Садржина и предмет докторске дисертације односе се на веома актуелну проблематику изучавања статичког и динамичког понашања котловских конструкција. Акценат је стављен на математичко-нумеричко моделирање конструкција, а у циљу верификације добијених модела примењени су експериментално добијени резултати.

### ***Биографски подаци о кандидату***

#### ***Образовање и усавршавање***

Кандидаткиња мр Бранка Гаћеша, дипл. инж. машинства, рођена је 14.02.1968. године у Београду.

Математичку гимназију "Вељко Влаховић" у Београду завршила је 1986. године. Дипломирала је на Машинском факултету у Београду, смер Термотехника, са просечном оценом 8,23/10. Дипломски рад под називом *"Емпиријске једначине конвективног преношења топлоте при принудном спољашњем струјању"*, из предмета Простирање топлоте и масе, одбранила је 1993. године код проф. др Ђорђа Козића са оценом 9/10.

Магистрирала је на истом факултету 2000. године на Катедри за Отпорност конструкција одбранивши магистарски тезу под називом *"Термомеханичка анализа котловске конструкције нумеричким поступком"*. Ментор је био проф. др Растко Чукић.

#### ***Рад и напредовање у струци. Активности у стручним удружењима***

01.04.1993. год. запослила се у предузећу Минел Котлоградња које се бави пројектовањем, производњом, монтажом и продајом термоенергетских и индустријских постројења и опреме.

У периоду од 1993. до 2005. године радила је у Сектору за развој и конструисање. Као водећи инжењер пројектант-конструктор у Одељењу за вансеријске и СЕ котлове била је задужена за израду пројектних подлога, прорачуна везаних за котлове, склопних и радионичких цртежа котлова и пратеће опреме и елабората о стању котлова.

Од 2005. године радила је у Комерцијалном сектору као водећи инжењер продаје у Одељењу за истраживање тржишта, припрему уговора и продају опреме и постројења. Била је задужена за израду

понуда за сложена енергетска и индустријска постројења, разговоре везане за израду и реализацију понуде, израду техничког и комерцијалног прилога уговора и извршење уговора.

Има следеће професионалне лиценце:

- Стручни испит прописан за дипломираног машинског инжењера, група за термотехнику,
- Лиценца одговорног пројектанта и лиценца одговорног извођача радова термотехнике, термоенергетике, процесне и гасне технике, Инжењерска Комора Србије.

### **Научно-стручни радови**

#### **Радови у часописима са SCI листе:**

Одштампани радови:

- [1] V. Milošević-Mitić, D. Kozak, T. Maneski, N. Andelić, **B. Gaćeša**, M. Stojkov, *Dynamic nonlinear temperature field in a ferromagnetic plate induced by high frequency electromagnetic waves*, Strojarstvo Vol. 52, No. 2 (2010) ISSN 0562-1887, str. 115-124, <http://kobson.nb.rs>, IF 0,048

Добијене су позитивне рецензије и радови су у штампи:

- [2] **B. Gaćeša**, V. Milošević-Mitić, T. Maneski, D. Kozak, J. Sertić, *Numerical and Experimental Strength Analysis of Fire-tube Boiler Construction*, Technical Gazette, ISSN 1330-3651, 12.03.20011. добијена је информација од уредника часописа проф. М. Кљајина да су рецензије позитивне и да ће рад бити штампан у Vol. 18, No. 2 (2011), Часопис је на SCI Expanded listi (Thomson Reuters services)
- [3] V. Milošević-Mitić, **B. Gaćeša**, D. Kozak, T. Maneski, J. Sertić, *Modeling of Boiler Membrane Wall Using Finite Element of Reduced Orthotropic Plate*, Strojarstvo ISSN 0562-1887, информација о прихватању рада за штампу добијена је 16.03.2011. године

#### **Радови у националним часописима:**

- [4] **Гаћеша Б.**, Манески Т., Чукић Р., *Термомеханичка анализа понашања парног котла типа МК-1500VP нумеричким поступком*, Процесна техника, Vol.17, бр.1, стр. 128-130.
- [5] **Гаћеша Б.**, *Термомеханичка анализа понашања и побољшања парног блок котла са три промаје мање продукције паре*, Процесна техника, Vol. 18, бр.1, 2002, стр. 111-114.

#### **Радови саопштени на конгресима:**

- [6] **Гаћеша Б.**, *Утицај геометрије парног котла на чврстоћу конструкције*, 32. Конгрес о грејању, хлађењу и климатизацији, Зборник радова, СМЕИТС, Београд, 2001, стр. 128-134.
- [7] Манески Т., Седмак А., Бурзић З., **Гаћеша Б.**, *Интегритет конструкције парних котлова*, 33. Конгрес о грејању, хлађењу и климатизацији, Зборник радова, СМЕИТС, 2002, стр. 327-333.
- [8] **Гаћеша Б.**, *Анализа утицаја геометрије пламене цеви на понашање конструкције вреловодног котла*, 37. Конгрес о грејању, хлађењу и климатизацији, Зборник радова, СМЕИТС, Београд, 2006, стр. 103-108.
- [9] Милошевић-Митић В., Манески Т., **Гаћеша Б.**, *Problems in the Modeling of Steam Boiler*, 1st International Congress of Serbian Society of Mechanics, April 2007, Proceedings, pp. 451-456.
- [10] **Гаћеша Б.**, *Дијагностика попуштања конструкције вреловодног котла снаге 4MW, реконструкција и санација*, 40. Конгрес о грејању, хлађењу и климатизацији, Зборник радова, СМЕИТС, Београд, 2009, стр. 211-219.

### **Пројекти**

У току своје професионалне каријере у Минел Котлоградњи радила је на следећим значајнијим пројектима:

1. “Јасен”-Краљево: Парни котао са косом решетком, 5 t/h, 13 бара, гориво дрвни отпад;
2. НИС Рафинерија Нафте Панчево: Елаборат о процени стања цеви ложишта и ремонт парног котла фаб.бр. 3635 произвођача John Thompson, 70 t/h, 50 бара, гориво мазут и нафта;
3. НИС Рафинерија Нафте Панчево: Парни котао тип VU-60, 110 t/h, 55 bar, мазут и рафинер.гас;

4. “Шик“-Кучево: Реконструкција цеви прегрејача за котло пр. Babcock Wilcox, 4.5 t/h, 10 бара;
5. “Милан Благојевић“-Лучани: Елаборат о испитивању цевног система и бубња парног котла, 32 t/h, 43 бар, котло производ SGP Аустрија из 1955 године;
6. “Вискоза“- Лозница: Санација парног лужног котла, производ Mitsubishi Heavy Industries ltd, 40 t/h, 50 bar, гориво црни луг и мазут;
7. Рудници и Жељезара Скопље: Реконструкција загрејача воде за котло утилизатор ТРК-Загреб, 15t/h, 22 bar;
8. ТЕ-ТО Зрењанин: Израда цеви прегрејача II за котло Минел Котлоградња, 75 t/h, 55 bar;
9. “Митрос“-Сремска Митровица: Реконструкција цеви ложишта парног котла произвођача “Ђуро Ђаковић“, 10 t/h, 20 bar, гориво угаљ;
10. “Дијамант“-Зрењанин: Парни котло са циклонским предложиштем, 25 t/h, 17.6 bar, гориво љуска сунцокрета;
11. НИС Рафинерија Нафте Нови Сад: Санација бубња парног котла произвођача Минел Котлоградња, 64 t/h, 44 бара, гориво мазут и земни гас;
12. ТЕ Никола Тесла Б- Обреновац: Израда делова за санацију парног котла типа 28-А16-48 Минел Котлоградња, 65 t/h, 17.6 бара, гориво мазут;
13. ТЕ Никола Тесла Б- Обреновац: Реконструкција вертикалног прегрејача парног котла типа 28-А16-48 Минел Котлоградња, 65 t/h, 17.6 бара, гориво мазут;
14. Јужне Рафинерије Басра -Ирак: Парни котло, 155 t/h, 33 бара, 410 °С, гориво мазут и земни гас;
15. “Неопланта“- Нови Сад: Реконструкција парног котла типа 18-А10-37, Минел Котлоградња, 20 t/h, редукација притиска са 48 bar на 9 bar, гориво мазут;
16. Mitsui Babcock Energy Limited: Канали рецикулације и канали за упад угља за генерални ремонт и ревитализацију блока А5 у ТЕ Никола Тесла – Обреновац;
17. “Колубара Универзал“ – Велики Црљени: Самоносећи парни котло са превртљивом решетком, 2x2.75 t/h, 13 бара, гориво угаљ;
18. НИС Рафинерија Нафте Нови Сад: Дијагностика стања котла К1, процена поуздности рада за наредних десет година и предлог потребних интервенција на котлу у наведеном периоду.
19. АЕ&Е Inova-Немачка: Израда делова под притиском за котло на смеће.
20. ТЕ Никола Тесла Б- Обреновац: Израда и монтажа жалузина на каналима аеросмеше.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### *Структура и садржај дисертације*

Докторска дисертација је написана на 173 стране. Подељена је у 8 поглавља. То су:

- Садржај
  1. Уводна разматрања
  2. Основи методе коначних елемената
  3. Процедура нумеричко-експерименталне анализе чврстоће котловских конструкција
  4. Анализа чврстоће пламено-димноцевних котлова
  5. Анализа чврстоће водоцевних котлова
  6. Дијагностика понашања и стања котловских конструкција
  7. Поређење резултата нумеричке и експерименталне анализе чврстоће котлова и прорачуна нормама
  8. Завршна разматрања
- Литература

Дисертација садржи 103 слике, 36 табела и 184 формула.

### *Кратак приказ појединачних поглавља*

У поглављу **Уводна разматрања** представљен је предмет рада дисертације који се односи на проблеме чврстоће котловских конструкција. Објашњено је да за димензионисање котловских конструкција постоје два приступа: пројектовање применом “правила“ и пројектовање “анализом”. Ако није другачије одређено, пројектовање применом правила, односно норми за пројектовање и прорачун, се обично

користи од стране произвођача котлова. Норме као што су стандарди групе SRPS M.E2 и европске нормe EN 12952-3 и EN 12953-3 диктирају правила за пројектовање и прорачун делова под притиском водоцевних и пламено-димно цевних котлова. Норме дефинишу дозвољени напон на датој температури и експлицитне формуле за прорачун чврстоће кроз одређивање дебљине елемената под притиском. Недостатак норми је што оне не могу да дефинишу прорачун сваког елемента конструкције. Поред осталог, нормe не разматрају експлицитно утицај термичких напона, локалну концентрацију напона и динамичке промене оптерећења. Могуће је да прорачуном нормама добијемо да усвојене дебљине елемената котла задовољавају у погледу чврстоће, а да ипак дође до трајних деформација и хаварије на конструкцији у току експлоатације, што у котлоградњи и није тако редак случај. Дозвољени напони дати у нормама су засновани на прилично поједностављеним мембранским напонима који потичу од оптерећења од притиска. Утицај термичког оптерећења се узима у обзир само кроз усвајање дозвољеног напона при прорачунској температури.

Егзактна примена теорије еластичности овде није могућа због сложене конфигурације котловске конструкције, али Европске нормe дозвољавају и пројектовање “анализом“, применом методе коначних елемената-МКЕ, за котловске делове под притиском под условом да безбедоносни и функционални захтеви у вези са компонентама нису угрожени. Примена МКЕ-а се предлаже за прорачун компоненти које норма не покрива. На овај начин се прорачун утицаја термичких напрезања оставља на слободну вољу пројектанта и техничког инспектората који надзире и одобрава стављање котла у рад.

Уз детаљан преглед и опис доприноса других аутора по многим питањима од значаја за статичко и динамичко понашање котловских конструкција, кандидаткиња је приказала и разврстала различите прилазе овом проблему кроз запажене критичке осврте. Нагласила је да математичко моделирање ових конструкција и верификација добијених резултата представљају актуелне задатке на којима треба веома озбиљно даље радити.

У **другом поглављу**, после упознавања са процедуром у методи коначних елемената за решавање статичког структуралног проблема, дефинисани су једнодимензиони коначни елементи. Потом су дефинисани дводимензиони коначни елементи кроз анализу мембранског, савојног и укупног напрезања коначног елемента танке плоче. Кандидаткиња је нагласила да је недостатак стандардног прорачуна нормама недовољно разматрање поља температуре у котловским конструкцијама. Пошто је котао конструкција која се моделира великим бројем плоча различите дебљине, на крају овог поглавља, применом аналитичких метода прорачуна, разматран је утицај промене температурског поља по дебљини плоче која се загрева са једне стране. Промена температуре је претпостављена у нелинеарном облику, формиране су и решене у затвореној форми одговарајуће парцијалне диференцијалне једначине. Рад који разматра ову проблематику одштампан је у **часопису Strojарство Vol. 52, No. 2 (2010) [1]**. Код дебелих плоча постоји знатна промена температуре по дебљини плоче, али само у случају када би са једне стране имали загревање, а са друге интензивно хлађење та разлика би била битна за њено механичко понашање. Закључено је да је за прорачун глобалних модела котлова довољно температурско поље плоче апроксимирати температуром у њеној средњој равни, док би за локалне моделе морао да се узме у обзир и одговарајући градијент.

У **трећем поглављу** описана је процедура нумеричко-експерименталне анализе чврстоће котловских конструкција. Нумеричка анализа примењује методу коначних елемената, анализу резултата прорачуна и дефинисање параметара понашања. Објашњене су фазе нумеричке анализе применом МКЕ: моделирање носеће конструкције котла, генерисање рачунског модела, прорачун деформација и напона статичким прорачуном, прорачун сопствених осцилација динамичким прорачуном и примена различитих елемената оптимизације.

Моделирање је објашњено на примеру парног котла са равном пламеном цеви. Подструктуре котла које су оптерећене температурно и површинским притиском (пламена цев и бубањ) моделиране су помоћу елемената танке плоче, док су елементи облика цеви моделирани гредама, чиме се значајно смањује број чворних тачака и скраћује време прорачуна.

Кандидаткиња је детаљно описала кораке експерименталне анализе која обухвата мерење (оптерећења, деформација, напона, вибрација) и дефинисање улазних величина за нумерички прорачун и оцену резултата прорачуна. На крају трећег поглавља представљен је и мерно-аквизициони систем

Лабораторије за анализу напона и деформација на Машинском Факултету у Београду, који је коришћен у оквиру израде ове дисертације.

Експериментална мерења поред тога што се спроводе у циљу верификације рачунског модела, могу да се захтевају и за оцену постојећег стања конструкције. Пошто вибрације могу узроковати проблеме у раду котловског постројења и могу довести до оштећења, кандидаткиња је нагласила да би методу коначних елемената требало користити још у фази пројектовања да би се избегла појава резонанце. МКЕ се такође може користити и као поуздани алат за оцену потенцијалних модификација везаних за проблеме вибрација које су идентификоване мерењем.

Анализа чврстоће пламено-димно цевних котлова приказана је у **четвртном поглављу**. Најпре су представљене основне конструкције ових котлова и дат је критички и детаљан преглед радова из литературе о примени МКЕ за анализу њихове чврстоће. Пошто је кандидаткиња током свог вишегодишњег рада стекла велико искуство, као основни проблем који се јавља код ових котлова навела је избор типа пламене цеви, која може бити таласаста или равна. Зато је анализирала утицај геометрије пламене цеви на понашање конструкције два котла истог типа, али већег и мањег капацитета. Статички прорачуни тропромајних котлова са екранисаном скретном комором продукције паре од 8000 kg/h и 2000 kg/h су најпре урађени за оптерећење од притиска у котлу од 0,13 kN/cm<sup>2</sup> и термичко оптерећење. Показано је да се реални резултати прорачуна добијају апроксимацијом таласа пламене цеви изломљеном линијом од седам тачака. Затим су посебно анализирани утицаји оптерећења од притиска и термичког оптерећења које се у прорачунима нормама не узима експлицитно у обзир.

За котао капацитета 8000 kg/h извршена је термомеханичка анализа са равном и таласастим пламеним цевима извођења Foks, исте дебљине зида али различитих корака и висине таласа. Показано је да би уградња равне пламене цеви довела до појаве високих напона у задњем данцу и изразитих деформација пламене цеви и данаца котла. Анализа конструкције котла са таласастом пламеном цеви корака 150 mm и висине таласа 50 mm, показала је да се за збирно оптерећење добија знатно нижи максимални напон који се јавља у плочама предњег данца. За исти корак али већу висину таласа пламене цеви добијено је даље снижавање максималног напона. Најнижи максимални напон у конструкцији дао је модел котла са таласастом пламеном цеви корака 200 mm и висине таласа 75 mm. Анализа је показала да се уградњом таласасте пламене цеви учешће савојних напона у плочама данаца смањује, а повећава у плочама пламене цеви, али у њима и даље у знатној мери преовлађују мембрански напони. Закључено је да у котао овог типа, капацитета и прорачунског притиска треба да буде уграђена таласаста пламена цев.

За котао продукције паре 2000 kg/h такође су формиране варијанте рачунског модела са таласастом и равном пламеном цеви. На основу термомеханичке анализе конструкције закључено је да у котао овог типа и капацитета може да буде уграђена равна пламена цев. Заменом таласасте пламене цеви равном исте дебљине, максимални напон у конструкцији који се јавља у плочама задњег данца се смањује.

За оптерећење само од притиска напони који се јављају у плочама равне пламене цеви котла већег и мањег капацитета су нижи од напона који се јављају у таласастој пламеној цеви исте дебљине. На основу великог броја изведених прорачуна кандидаткиња је закључила да равна пламена цев има већу крутост на оптерећење од притиска у котлу од таласасте пламене цеви исте дебљине. Анализа напона услед деловања само термичког оптерећења је показала да су термички напони који се јављају у плочама таласасте пламене цеви нижи од напона који се јављају у равној пламеној цеви. Изведен је закључак да таласаста пламена цев има већу флексибилност при деловању термичког оптерећења од равне цеви исте дебљине. Анализа модела котла мањег капацитета је показала да се са повећањем дебљине зида равне пламене цеви напони услед оптерећења од притиска смањују, али се повећавају напони услед термичког оптерећења.

Кандидаткиња је спроведеном анализом показала суштинско познавање конструкције и процеса који се у њој одвијају. Закључила је да термички напони нису напони нижег реда у односу на напоне изазване дејством притиска, па се морају узети у обзир за анализу чврстоће сваке котловске конструкције. Термички напони у плочама равне пламене цеви котла већег капацитета чак имају изразито високу вредност, знатно вишу од напона изазваних дејством радног оптерећења од притиска.

Највећи утицај на понашање конструкције овог типа котла има пламена цев, тако да примена МКЕ омогућава оптимални избор типа пламене цеви и дебљине зида. У раду је препоручено да за мање

капацитете пламено-димно цевних котлова пламена цев треба да буде равна, а за веће капацитете таласаста.

Проблем који се често среће код пламено-димно цевних котлова је и попуштање данаца у експлоатацији. Анализа утицаја геометрије укрућења данаца на понашање конструкције котла и њено побољшање приказани су на примеру оптимизације конструкције котла са равном повратном пламеном цеви. Нумеричком анализом кандидаткиња је закључила да задње данце котла има највећи утицај на понашање ове конструкције јер је то елемент у коме се јављају високи напони и у великој мери преовлађују савојни напони. Због тога су у циљу побољшања конструкције анализирани рачунски модели котла без укрућења задњег данца различитих дебљина, затим модели са радијалним ребрима различите густине и модели са централним цилиндричним укрућењем.

Анализа је показала да се крутост задњег данца у циљу смањења деформације и напона, као и смањења утицаја савијања, може повећати повећањем његове дебљине, оребравањем или укрућењем. На основу изгледа изонапонских линија за моделе без укрућења задњег данца закључено је да она треба да буду постављена радијално и/или кружно. Кандидаткиња је детаљним прорачуном добила да се постављањем радијалних ребара под углом од  $45^\circ$  на кружној плочи задњег данца напон у њему знатно смањује. Модел са кружним укрућењем данца исте дебљине дао је чак мало нижи напон. Даље снижење напона у плочама задњег данца добијено је постављањем и ребара на њему, што је за анализирани котао оптимално решење начина укрућења задњег данца.

У **петом поглављу** кандидаткиња је анализирала чврстоћу водоцевних котлова савремене конструкције са мембранским зидовима - цевним панелима. Прво су представљене основне конструкције водоцевних котлова и дат је веома детаљан преглед радова из литературе о анализи њихове чврстоће применом МКЕ. Сва ова значајна рекапитулација резултата представља веома важну подлогу за боље разумевање проблема.

Применом елемената танке плоче-љуске за моделирање цеви и ребара-трака мембранских зидова добио би се велики број тачака и елемената модела укупне структуре котла, што је на данашњем степену развоја технике скоро неизводљиво. При решавању овог проблема дошло се на оригиналну идеју да се **дефинише нови подтип коначног елемента танке редукване ортотропне плоче** који има две дебљине и две матрице еластичности, за мембранско и савојно оптерећење понаособ. Овај нови коначни елемент испрограмиран је у оквиру програмског пакета КОМИПС.

Применом овог новог елемента моделирани су мембрански зидови самостојећег водоцевног котла продукције паре 110 t/h. Тако је успешно могао да се изведе прорачун глобалног модела основне конструкције овог котла коју чине мембрански зидови, цевни систем са појасевима укрућења, бубњеви и ослонци. Тиме је омогућена анализа утицаја појасева укрућења на чврстоћу конструкције. Прорачуном модела котла без и са појасевима укрућења показано је да се постављањем појасева укрућења драстично смањују деформације и напони у мембранским зидовима који се јављају услед надпритиска у ложишту, као и да се учешће савојних напона који преовлађују у цевним панелима знатно смањује, док се расподела енергије деформације битније не мења. Показано је да велике деформације цевних панела и цеви котла потичу од термичког оптерећења, као и да котао који је самостојећи дилатира навише.

Да би кандидаткиња објаснила порекло високих напона у неким деловима конструкције, извршила је прорачун модела котла и за оптерећење од притиска и за термичко оптерећење. Закључила је да се концентрација високих напона на угловима котла у нивоу појасева укрућења јавља услед термичког оптерећења, док концентрација високих напона у поклопцима данаца бубњева потиче првенствено од притиска у њима. Котлови са мембранским зидовима ложишта изложени су хаваријама цеви у угаоним спојевима панела у нивоу појасева укрућења. Ова оштећења настају током великих температурских промена које се догађају за време стартовања и гашења котла. Анализа је показала да је и код овог котла реално очекивати да дође до појаве пластичних деформација угаоних плоча појасева укрућења и цеви панела у нивоу појасева укрућења.

Поље температуре у панелима ложишта није униформно, услед чега се у цевима и тракама панела индукују термички напони. Кандидаткиња је својом веома прецизном анализом показала да додатни термички напони настају услед релативно крутог система појасева укрућења, чији је иначе основни задатак да спрече велике деформације зидова ложишта услед натпритиска (или потпритиска) у њему.

Концентрација високих напона јавља се у панелима услед спречавања њихових деформација. Ово стање односи се на оба оптерећења, и термичко и услед притиска, и зове се напони дисконтинуитета. МКЕ се може успешно користити за решавање овог проблема.

Треба имати у виду да применом овде развијеног коначног елемента ортотропне плоче не могу да се прикажу места концентрације напона у цевном панелу јер је напонска слика код ортотропне плоче усредњена. Због тога је кандидаткиња формирала и два локална модела мембранских зидова са појасевима укрућења на углу котла: модел чији су цевни панели моделирани ортотропном плочом и други детаљнији чије су цеви и траке моделиране љускама. Код детаљнијег модела поред притиска димних гасова из ложишта узето је у обзир и оптерећење зидова цеви од унутрашњег притиска у њима, као и различите температуре зида цеви и трака. Детаљнији модел је показао да се у угаоној цеви, као и цевима до ње, у нивоу појаса укрућења јавља концентрација напона и то на страни цеви која је у оплати, а која има знатно нижу температуру од оне у ложишту. Оба локална модела за исте граничне услове дала су максималне вредности напона у плочама појасева укрућења на угловима котла које се нису много разликовале, као ни вредности максималних напона у мембранским зидовима. Тиме је потврђена исправност процедуре дефинисања овог новог коначног елемента танке ортотропне плоче и показано је да се његовом применом за моделирање мембранских зидова глобалног модела котла добија поуздана слика деформација и напона у реалним условима рада. Са задовољством морамо да приметимо да је **рад [3]** који се односи на процес дефинисања овог новог подтипа коначног елемента ортотропне плоче прошао рецензије и да је тренутно у припреми за штампу за следећи број часописа *Strojarstvo*.

У **шестом поглављу** дисертације дата је методологија дијагностике понашања и стања котловских конструкција. Имајући у виду да анализа и пројектовање савремених котловских конструкција на данашњем степену развоја науке и технике намеће испуњавање веома строгих захтева, кандидаткиња је приказала алгоритам који илуструје методе које се примењују за дефинисање параметара неопходних за дијагностику понашања и оцену стања конструкција. Објаснила је методе у дефинисаном алгоритму: анализа конструкције, визуелна контрола, испитивање без и са разарањем, аналитичко-нумерички прорачун, експериментална мерења и експертска оцена стања-дијагностика понашања. Основни циљ спровођења изложене методологије је процена поузданости рада у предвиђеном временском периоду и предлог потребних интервенција за продужетак животног века. Дати алгоритам може да се примени код конструкција које су у експлоатацији, а и за дијагностику понашања нових конструкција.

Осим за пројектовање нових котловских конструкција, МКЕ се може користити и за истраживање узрока већ насталих оштећења, симулацијом радних услова у време хаварије и симулацијом механизма оштећења. Резултати МКЕ анализе деформација и напона могу се користити и као улазни подаци за оцену подобности за употребу и за даљу анализу применом механике лома. Као пример примене нумеричке методе за дијагностику понашања конструкције дата је процена поузданости нове конструкције вреловодног котла капацитета 9300 kW, прорачунског притиска 8 bar-a, са предњом пливајућом комором и повратном пламеном цеви. Котао овог типа, који је у експлоатацији, има уграђену таласасту пламену цев. Дијагностика коју је кандидаткиња урадила, извршена је у циљу побољшања понашања те конструкције и смањења трошкова израде. Закључила је да се у котао овог типа (већег капацитета) може уградити равна пламена цев исте дебљине без смањења поузданости конструкције.

Као што је већ наглашено, приликом пројектовања компонената парног котла применом само норми често се не посвећује довољна пажња утицају термичких напрезања. Разлика термичких дилатација спрегнутих компоненти котла може довести до изразитих деформација и хаварије. Кандидаткиња је то приказала на примеру вертикалног двостепеног прегрејача паре који је доживео попуштање цеви између плафона котла и колектора прегрејача после само неколико месеци експлоатације. На основу анализе конструкције прегрејача предложила је ослобађање крајева свих колектора, осим оног најближег бубњу. Напон у цевима између плафона и колектора тиме се смањује чак три пута.

На крају шестог поглавља приказана је и дијагностика чврстоће вреловодног котла са равном повратном пламеном цеви капацитета 4 MW. Приликом испитивања овог котла воденим притиском дошло је до појаве изразитих пластичних деформација задњег данца око крајева ребара-ојачања. Реконструисани котао прорачунског притиска од 7 bara успешно је испитан воденим притиском од 9 bara, али је конструкција попустила у експлоатацији. Кандидаткиња је својом анализом показала да је овакво

понашање конструкције котла у условима хладне пробе и експлоатације било у сагласности са резултатима нумеричких прорачуна, чиме је верификовала своје рачунске моделе.

Поређење резултата нумеричко-експерименталне анализе и резултата на основу прорачуна нормама приказано је у **седмом поглављу**. Приказан је комплетан нумеричко-експериментални поступак дијагностике понашања котловске конструкције топловодног пламено-димно цевног котла са задњом и предњом пливајућом комором. У циљу верификације рачунског модела приказано је поређење резултата прорачуна деформације и напона применом МКЕ и експерименталних мерења извршених током пробе неизолованог котла ложеног балама сламе у фабрици произвођача. У дисертацији је урађен и динамички прорачун сопствених осцилација котла, који је потврдио идентификовано статичко понашање.

У докторској тези је наглашено и доказано да је најбоље за сваку конструкцију пре пуштања у рад урадити нумеричко-експерименталну дијагностику понашања. Експериментом се мора потврдити нумерички модел, а затим се он може користити за даље разматрање различитих параметара дијагностике чврстоће као што су расподела мембранских и савојних напона по подструктурама, расподела енергије деформације, динамички прорачун сопствених осцилација.

У истом поглављу дато је и поређење резултата прорачуна пламене цеви котлова са екранисаном скретном комором применом нумеричке анализе и формула из одговарајуће норме. Поређењем резултата прорачуна котла капацитета 8000 kg/h применом МКЕ и стандарда SRPS M.E2.032 закључено је да обе методе прорачуна захтевају уградњу таласасте пламене цеви у котлове већег капацитета прорачунског притиска од 13 бара. На основу резултата прорачуна котла капацитета 2000 kg/h применом МКЕ у њега би се уместо таласасте могла уградити равна пламена цев исте дебљине и материјала. Таква пламена цев не задовољава стандард SRPS M.E2.032. Према стандарду у овај котао ипак би се могла уградити равна пламена цев али веће дебљине зида и од бољег материјала. Прорачун МКЕ је показао да се повећањем дебљине пламене цеви повећава максимални напон у конструкцији који се у конкретном случају јавља у задњем данцу и близак је граници течења. Наиме, што је зид дебљи, мањи је напон услед притиска, али су виши термички напони. Кандидаткиња је нагласила да конструктор треба да одабере дебљину зида тако да минимизира напон од укупног оптерећења од притиска и термичког оптерећења, за шта можеда се користи МКЕ. Детаљна анализа применом МКЕ може смањити трошкове израде котла избегавањем предимензионисања или преукрућења.

На крају овог поглавља, за конструкцију вреловодног котла са равном повратном пламеном цеви дато је поређење напона израчунатих применом МКЕ са вредностима напона у зиду задњег данца према одговарајућем стандарду за прорачун чврстоће. Осим првобитне конструкције и реконструисаног котла прорачунати су и модели котла са задњим данцем без укрућења, са радијално и кружно постављеним ребрима, као и са централним цилиндричним укрућењем. Да димензионисање само нормама није довољно за сваку конфигурацију показано је на примеру првобитне конструкције котла. Задње данце ојачано ребрима произвођач котла је посматрао као данце са укрућењем и тако га прорачунао стандардом. За првобитну конструкцију дато је и поређење резултата експеримента извршеног током хладне пробе и прорачуна деформације задњег данца применом МКЕ. Измерене и израчунате деформације врло су се мало разликовале. Закључено је да оребравање кружне плоче задњег данца првобитне конструкције није правилно изведено и да је то главни узрок попуштања. Иако је котао успешно испитан воденим притиском дошло је до попуштања на анкер-цевима у експлоатацији. Показано је да је утицај термичког оптерећења велики и да се мора више узети у обзир приликом димензионисања.

Завршно поглавље је посвећено рекапитулацији обрађених тематских целина и постигнутих научних доприноса.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### ***Савременост, оригиналност и значај***

Притисци и повишене температуре којима су изложени поједини елементи котла узрокују у њима деформације и напоне који временом могу довести до попуштања. Због тога су прорачуни чврстоће најодговорнијих елемената котла строго нормирани и подлежу контроли надлежне инспекције. Током експлоатације долази до старења и оштећења компонената котла, па је потребно извршити и накнадну

дијагностику стања и проценити његову поузданост у наредном временском периоду. Зато докторска дисертација ***Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција*** представља савремен, оригиналан и значајан допринос разматраној проблематици.

Аспект поузданости котловских конструкција представља битан чинилац са становишта експлоатације. Сходно чињеници да је интеграција појединих прилаза, који су у овом раду приказани, неопходна, указујемо на висок степен оригиналности који је присутан у овој докторској дисертацији, као и на примену савременог научног приступа приликом решавања овог проблема.

Истраживањем су обухваћени пламено-димно цевни и водоцевни индустријски котлови. Извршена је анализа понашања великог броја конструкција у експлоатацији, развијене су методологије за анализу и прорачун конструкција применом савремених нумеричко-експерименталних метода. Формирани су различити модели прорачуна којима се описују физички проблеми. Показало се да је веома распрострањену методу коначних елемената било неопходно осавременити и допунити новим коначним елементом редукване ортотропне плоче.

### ***Осврт на референтну и коришћену литературу***

У докторској дисертацији је коришћена обимна литература из области прорачуна различитих типова котловских конструкција. Ова литература је пре свега кандидаткињи послужила као полазна основа за приказ постојећег стања у овој области, везано за проблематику која се тиче докторске дисертације. Велики део литературе чине радови еминентних светских стручњака из ове области. Кандидаткиња је у дисертацији навела 80 цитата.

### ***Анализа примењених научних метода и њихова адекватност за спроведено истраживање***

У докторској дисертацији су коришћене експерименталне, аналитичке и нумеричке методе. У циљу добијања резултата који могу послужити као основа за побољшање и повећање поузданости котловских конструкција коришћене су методе обраде и анализе података, као и методе математичко-нумеричког моделирања, пројектовања и развоја посматраних конструкција. Ове методе су потпуно адекватне за проблем који се истражује у оквиру докторске дисертације, јер се применом ових метода могу дефинисати и детаљно испитати сви утицајни чиниоци битни за проблематику чврстоће котловских конструкција, као и поступци потребни за процену преосталог века трајања на основу података из реалних услова експлоатације.

### ***Оцена способности кандидата за самостални научни рад***

Формирање веродостојних и поузданих математичко-нумеричких модела и данас представља значајан допринос области којој припада разматрани објекат. Кандидаткиња је показала велику зрелост и умешност при оригиналном осмишљавању нумеричких модела који до сада скоро и да нису били разматрани у обрађеној литератури. Објективном анализом резултата других аутора, као и критичком анализом сопствених резултата, кандидаткиња је указала на сва она места где су добијени резултати били потпуно оригинални. Сви добијени резултати указују да је кандидаткиња мр Бранка Гаћеша, дипл. маш. инж. овладала материјом која је предмет ове докторске дисертације до те мере да је у потпуности способна да самосталано решава инжењерске и научне проблеме, односно бави се самосталним научно-истраживачким радом.

### ***Оцена верификације остварених резултата***

У циљу приказа сагласности МКЕ са нормама, у тези је за поједине примере дат и прорачун чврстоће котловских компонената применом одговарајућих формула, чиме је доказано да прорачун само нормама није довољно поуздан и да се треба допунити и нумеричким прорачуном. Поузданост МКЕ за прорачун чврстоће котловских конструкција доказана је током верификације рачунских модела котловских конструкција које су већ доживеле хаварију.

У оквиру експерименталног дела рада, а у циљу верификације прорачунских модела, извршено је и мерење температуре, деформација и напона котловских конструкција. У току израде тезе кандидаткиња је добила могућност да мерења изведе и на једној неизолованој конструкцији током топле пробе пламено-димно цевног котла произвођача КИРКА из Београда. Ово је омогућило да се изведе изузетно

валидна нумеричко-експериментална анализа резултата. Резултати су доказали да је развијени приступ прорачуна способан да предвиди понашање котловске конструкције у реалним условима оптерећења.

Обзиром на спроведену анализу која се односи на примену нумеричко-експерименталног прилаза проблему, скоро сви добијени нумерички резултати су и експериментално верификовани.

#### **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

##### ***Приказ остварених научних доприноса***

Приказана докторска дисертација представља нови, и теоријски, и практично применљив рад, у коме је поред оригиналних доприноса нумеричком разматрању проблема приказан и низ спроведених експерименталних мерења. Важно је нагласити да је оригинално решен читав низ постојећих проблема везаних за чврстоћу котловских конструкција.

- Кандидаткиња је дала значајан допринос области којој припада разматрани објекат кроз успешно формирање веродостојних и поузданих математичко-нумеричких модела јер је успела да веома компликоване проблеме (који зато до сада скоро и да нису били разматрани) моделира применом релативно једноставних нумеричких модела.
- У оквиру нумеричке анализе кандидаткиња је уочила велики проблем моделирања зидова водоцевних котлова који су изведени као мембрански зидови. Да би решила овај проблем дошла је до оригиналне идеје да дефинише нов подтип коначног елемента редуковане ортотропне плоче који има две различите дебљине и две одговарајуће матрице еластичности. Тај коначни елемент је испрограмиран и примењен у оквиру програмског пакета КОМИПС.
- Пошто котловске норме за сада не покривају довољно пројектовање појасева укрућења, у тези је доказано да се концентрација високих напона у цевним панелима у нивоу појасева укрућења јавља као последица спречавања термичких дилатација. Због тога су изузетно прецизно и технички зрело дефинисани нумерички модели за анализу напона у мембранским зидовима који се сада могу користити за пројектовање појасева укрућења.
- Кандидаткиња је урадила дијагностику попуштања везних цеви између плафона котла и колектора вертикалног прегрејача паре и осмислила два начина апсорпције термичких дилатација везних цеви.
- Пошто је уочила битне недостатке у методологији прорачуна нормама, као и при дефинисању и праћењу статичко-динамичког понашања конструкција током експлоатације, кроз детаљну нумеричко-експерименталну анализу, дала је научни допринос значајном унапређењу методологије прорачуна котловских конструкција кроз дефинисање нових поузданијих параметара, који треба да обезбеде њихову ефикаснију и сигурнију експлоатацију.
- Кандидаткиња се током рада на докторској тези показала као веома добар познавалац ове класе проблема, предложила је и доказала исправност свог предлога допуне стандардних прописа на којима се данас заснива методологија прорачуна котловских конструкција и њихово праћење током експлоатације.
- Извршила је детаљну анализу утицаја геометрије и оптерећења на понашање различитих котловских конструкција, тако да је дала научно објашњење понашања конструкција у условима експлоатације. Анализом пламено-димноцевних котлова са екранисаном скретном комором и вреловодних котлова са повратном пламеном цеви и предњом пливајућом комором, кандидаткиња је прецизно дефинисала када треба користити равну, а када таласасту пламену цев. Како се томе углавном не посвећује довољна пажња при прорачуну нормама, објаснила је утицај висине таласа и дебљине зида на напоне у конструкцији.
- Извршила је оптимизацију конструкције парног котла са повратном пламеном цеви, стављајући акценат на крутост данца и на избор типа пламене цеви. Дала је и свој предлог развоја фамилија котлова са повратном пламеном цеви, као и предлог развоја нове генерације различитих типова котлова са централно постављеном пламеном цеви, чиме се постиже равномернија расподела напона и доприноси продужетку животног века котла.

У оквиру докторског рада прецизно је дефинисан алгоритам који илуструје методе које се примењују за прикупљање података неопходних за дијагностику понашања и оцену стања котловских конструкција. Дат је предлог за побољшање методологије дијагностике применом нумеричких метода. Предности нумеричких метода у односу на прорачун само нормама огледају се у могућности одређивања приближно реалне слике деформација и напона и давања поуздане прогнозе и процене реаговања конструкције у условима експлоатације.

Кроз резултате нумеричко-експерименталне анализе котловских конструкција, прорачунатих само према нормама, кандидаткиња је показала да је утицај термичког оптерећења велики и да се мора више узети у обзир при пројектовању и процени века трајања котловских конструкција. Зато су резултати добијени у овом докторском раду веома индикативни за даља истраживања у овој области и могу бити и практично примењени за побољшање и развој котловских конструкција.

Сматрамо да ће научни резултати ове докторске тезе инжењерима омогућити знатно поузданију процену реаговања конструкције током експлоатације, боље дефинисање узрока лошег понашања или попуштања конструкције, и дати јасне и прецизне препоруке за реконструкцију постојећих конструкција у циљу отклањања проблема.

### ***Очекивана примена резултата у пракси***

Резултати до којих је кандидаткиња дошла током рада на овој докторској дисертацији поред научне, поседују и високу употребну вредност. Прорачун основних делова котловског постојења под притиском врши се у складу са важећим техничким прописима, стандардима и нормама. Котловска конструкција се углавном не анализира као целина већ се сваки њен део прорачунава посебно. Овакав прилаз проблему није довољно поуздан и углавном се заснива на искуствима стеченим на претходно изведеним сличним конструкцијама. Зато је било научно оправдано да се за овако значајне и одговорне конструкције изврши детаљан прорачун применом савремених нумеричко-експерименталних метода.

Сматрамо да добијени резултати имају значајну примену при пројектовању, а посебно при експлоатацији и одржавању котловских постројења од којих се захтева изузетно велика поузданост у раду. Значајан допринос ове докторске дисертације је и могућност примене резултата истраживања на постојеће сличне конструкције котлова у циљу смањења трошкова израде, повећања поузданости и продужења њиховог експлоатационог века.

Примена резултата који су добијени у овој докторској дисертацији отвара нове перспективе у пројектовању и експлоатацији котловских конструкција. Надградњом постојећих прилаза, остварене су претпоставке за квалитетну оцену понашања конструкција у различитим условима експлоатације за познате (измерене) вредности меродавних параметара. Имајући у виду да су овом докторском дисертацијом обухваћени релевантни чиниоци неопходни при конструисању и праћењу рада котловских конструкција, може се очекивати примена предложене методологије у пракси.

Сматрамо и да ће део резултата из овог истраживања наћи примену и кроз даљу разраду предметне проблематике у другим научно-истраживачким пројектима.

### ***Верификовани научни доприноси***

Са задовољством морамо да констатујемо да је кандидаткиња радећи на овом проблему прошле године као коаутор објавила **један рад** [1], а средином марта ове године добијене су потврде да су **још два рада** [2, 3] успешно прошла рецензије и да су тренутно у штампи. Сви радови су наведени на страни 3 овог извештаја.

Посебно морамо да нагласимо да ће рад под бројем [3] много помоћи инжењерима који се баве пројектовањем и одржавањем котловских конструкција да сагледају целокупност проблема применом **новог оригиналног коначног елемента** који је представљен у раду, а који је резултат истраживања ове докторске дисертације.

На основу приказане анализе урађене докторске тезе

Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да усвоји следећи

## ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација под називом **Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција** кандидаткиње мр Бранке Гаћеше, дипл. инж. маш, представља самосталан, савремен и оригиналан научни рад који даје значајан допринос свеобухватном сагледавању процеса математичко-нумеричког моделирања и поступка адекватне анализе експерименталних резултата разматране класе проблема везане за чврстоћу котловских конструкција. Ценећи кандидаткињин иновациони приступ проблему, чињеницу да је анализирана проблематика веома актуелна са аспекта савремене техничке мисли, и оно што је приказано у докторској дисертацији, са задовољством констатујемо да је кандидаткиња мр Бранка Гаћеша, дипл. инж. маш, успешно завршила докторску дисертацију у складу са предвиђеним предметом и постављеним циљевима. Треба истаћи да је кандидаткиња дошла до оригиналних и проверљивих резултата у атрактивној области, који су делимично публиковани у меродавним часописима. Такође је показала и висок ниво способности и самосталности у доношењу и спровођењу одлука у току израде докторске дисертације.

На основу прегледа докторске дисертације под називом **Нумеричко-експериментална анализа чврстоће котловских конструкција**, кандидаткиње **мр Бранке Гаћеше**, дипл. инж. маш, Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације са задовољством констатује да је урађена докторска дисертација написана према свим стандардима у научно-истраживачком раду и да испуњава све услове предвиђене Законом о високом образовању Републике Србије и Статутом Машинског факултета у Београду. Комисија предлаже Наставно-научном већу Машинског факултета у Београду да овај Извештај прихвати, дисертацију стави на увид јавности и упуту Извештај на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Унивезитета у Београду.

- у Београду, 07.04.2011. године

### ПОТПИСНИЦИ ИЗВЕШТАЈА:

---

др Весна Милошевић-Митић  
в. проф. Машинског факултета у Београду, ментор

---

др Ташко Манески  
проф. Машинског факултета у Београду

---

др Титослав Живановић  
проф. Машинског факултета у Београду

---

др Нина Анђелић  
в. проф. Машинског факултета у Београду

---

др Марко Ракин  
в. проф. Технолошко-металуршког факултета у Београду