Факултет за машинство и грађевинарство
у Краљеву
Универзитета у Крагујевцу,
Број: 473
Датум: 12.6. 2025. год.
Краљево, Десанчићева 19.

ОБРАЗАЦ 6

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

ФАКУЛТЕТА ЗА МАШИНСТВО И ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ

и

ВЕЋУ ЗА ТЕХНИЧКО-ТЕХНОЛОШКЕ НАУКЕ

УНИВЕРЗИТЕТА У КРАГУЈЕВЦУ

На седници Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу одржаној 19.5.2025. године (број одлуке: IV-04-292/16) одређени смо за чланове Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом: **„Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту – HP 40 Nb"**, кандидата **Милице Тимотијевић**, студента докторских академских студија Машинско инжењерство, за коју је именован ментор **др Оливера Ерић Цекић, ванредни професор.**

На основу података којима располажемо достављамо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

О ОЦЕНИ УРАЂЕНЕ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

1. Подаци о докторској дисертацији
1.1.Наслов докторске дисертације:
Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту – HP 40 Nb
1.2.Опис докторске дисертације (навести кратак садржај са назнаком броја страница, поглавља, слика, шема, графикона, једначина и референци) (до 500 карактера):
Докторска дисертација „Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту – HP 40 Nb" је написана на 191 страни, садржи 118 слика, 79 табела, 7 једначина и 180 релевантних библиографских јединица. Дисертација садржи следећа поглавља: Увод, Преглед досадашњих истраживања, Експериментална процедура, Методе испитивања, Резултати експерименталних истраживања, Дискусија, Закључци, Литература и Биографија са библиографијом аутора.
1.3.Опис предмета истраживања (до 500 карактера):
Предмет истраживања ове докторске дисертације је центрифугално ливена легура отпорна на топлоту класе HP 40 Nb, која је због веће границе пузања и отпорности на наугљеничење заменила HK 40 легуру у цевима пећи петрохемијске индустрије. Истраживање у овој дисертацији обухвата проучавање утицаја краткотрајног прегревања на промену механичких

особина и микроструктуре, садржаја примарних и секундарних карбида и механизама оштећења цеви у условима експлоатације пећи за пиролизу.

1.4.Анализа испуњености полазних хипотеза:

Истраживање у овој докторској дисертацији заснива се на шест постављених хипотеза:

Хипотеза 1: „Краткотрајно прегревање не утиче негативно на радни век цеви."

Хипотеза је испуњена за опсег температура 950 до 1050°C, односно за краћа времена не делује негативно, док температуре 1150°C, и више, као и времена дужа од 120 мин, делују негативно.

Хипотеза 2: „Улазни параметри процеса краткотрајног прегревања позитивно утичу на структурне и механичке особине испитиваног материјала цеви за реформаторске пећи."

Хипотеза је делимично испуњена, односно поједина прегревања доводе до позитивних промена у микроструктури, док више температуре и дужа времена ове позитивне промене поништавају.

Хипотеза 3: „Успостављањем корелације између улазних параметара процеса прегревања и добијених структурних и механичких карактеристика нове и након 11 година експлоатације цеви од центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту - HP40 Nb могу се дефинисати утицајни улазни параметри процеса прегревања."

Хипотеза је испуњена. На основу резултата ANOVA анализе варијансе и оптимизације резултата механичких особина нове цеви од легуре HP40-0,63%Nb може се закључити да су модели за тврдоћу, затезну чврстоћу и издужење показали да време прегревања представља значајан фактор код све три испитиване механичке особине, док је температура прегревања значајна само код промене затезне чврстоће. Анализа варијансе је спроведена и за напон течења, али добијени модел није био довољно ефикасан у објашњењу промене вредности напона течења услед варијација улазних параметара. Код цеви од легуре HP40 -1,5%Nb која је била у експлоатацији 11 година, применом анализе варијансе на добијене резултате утврђено је да модели за процену тврдоће, затезне чврстоће и издужења веома успешно описују утицај варијације температуре и времена прегревања на поменуте механичке особине. Време прегревања се показало као фактор од значајног утицаја на све три испитиване особине, док је температура прегревања имала битан утицај на затезну чврстоћу и издужење, али не и на тврдоћу. За напон течења је такође урађена анализа варијансе, али модел у овом случају није пружио задовољавајуће објашњење зависности напона течења од улазних параметара.

Хипотеза 4: „ Цеви од центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту HP40 Nb које су биле изложене високим температурама у струји угљоводоника и водене паре при малом притиску више од 100 000 сати након ревитализације тј. краткотрајним прегревањем могу се поново користити."

Хипотеза је тестирана, али није тачна. Иако одређена краткотрајна прегревања неће негативно утицати на микроструктуру и животни век цеви, није могуће извршити значајну ревитализацију цеви краткотрајним прегревањем.

Хипотеза 5: „ Накнадним загревањем цеви од центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту-HP40 Nb која није била у експлоатацији, такође може да се продужи радни век цеви за реформаторске пећи у петрохемијској индустрији."

Хипотеза је делимично тачна, односно пажљиво прегревање може да продужи радни век путем повећања микроструктурне стабилности. Међутим, неповољни услови прегревања могу скратити радни век уместо да га продуже. Стога, иако прегревање може бити корисно у неким случајевима, оно није универзално примењива метода за побољшање радног века цеви.

Хипотеза 6: „Оптимизацијом услова прегревања постиже се побољшање механичких особина и микроструктуре испитиваног материјала, њеног понашања при пузању, а самим тим и доводи до продужења њеног радног века."

Хипотеза је делимично тачна. Оптимизацијом услова прегревања постигнуто је побољшање механичких особина и микроструктуре испитиваног материјала, а самим тим и до продужења њеног радног века. Процес оптимизације услова прегревања доводи до побољшања микроструктуре испитиваног материјала, хомогенизације карбидне фазе и смањења негативних ефеката дуготрајне експлоатације, што утиче на побољшање отпорности на пузање. Ови фактори заједно могу допринети продужењу радног века материјала. Међутим, коначна потврда захтева анализу експерименталних резултата истраживања и праћење дуготрајног понашања материјала у реалним условима.

Полазећи од хипотеза дефинисаних у пријави теме и на основу анализе представљених резултата, Комисија закључује да су хипотезе 1 и 3 у потпуности потврђене, хипотезе 2, 5 и 6 делимично потврђене, док хипотеза 4 није потврђена.

1.5.Анализа примењених метода истраживања:

Кандидаткиња је, на основу свеобухватне и систематичне анализе спроведене у фази планирања докторске дисертације, одабрала адекватне, проверене и поуздане експерименталне и аналитичке методе истраживања за карактеризацију центрифугално ливене легуре класе HP40 Nb, отпорне на топлоту, у условима краткотрајног прегревања. Коришћене су следеће методе:

Испитивање хемијског састава - оптичко емисионом спектроскопијом.

Испитивање микроструктуре материјала, које се састојало из: Металографске припреме узорака; Испитивања светлосним микроскопом; и Анализа слика помоћу програма JMicroVision.

Испитивање микроструктуре и морфологије површине лома - скенирајућа електронска микроскопија.

Метода за електролитичку екстракцију талога: За потребе анализе (хемијског и кристалног састава) фаза методама дифракције рендгенских зрака (XRD) урађена је екстракција фаза из талога електролитичком методом.

Испитивање узорака методом рендгенске дифракције (XRD): Рендгеноструктурна анализа дифракцијом X зрака је коришћена за идентификацију аустенита, примарних и секундарних карбида хрома и карбида ниобијума.

Механичка испитивања: Мерење тврдоће, Викерсова и Бринелова метода (SRPS EN ISO 6507-1:2018 и SRPS EN ISO 6506-1:2011). Испитивање затезањем (SRPS EN ISO 6892-1:2020).

Поред експерименталних испитивања, спроведена је и свеобухватна анализа резултата истраживања применом ANOVA анализе, регресионе анализе и оптимизације режима прегревања два узорка цеви етиленских пећи. Први корак односи се на примену ANOVA анализе са циљем процене релативног значаја температуре и времена прегревања на механичке особине разматраних цеви. Затим, регресионом анализом омогућава се моделирање механичких особина у функцији температуре и времена прегревања цеви. Регресиона анализа се бави постављањем стохастичког модела објекта истраживања којим се на довољно поуздан начин објашњава стање и понашање датог објекта регресије унутар обухваћеног експерименталног простора. Регресионе једначине као излазни резултати регресионе анализе имају улогу функција циља за оптимизацију механичких особина помоћу биолошки-инспирисаног метахеуристичког алгоритма. На овај начин, оптимизацијом се долази до максималних и минималних вредности механичких особина међу којима се издвајају затезна чврстоћа, напон течења, процентуално издужење и тврдоћа по Викерсу. Поред примене за оптимизацију, ANOVA (Analysis of Variance) регресиона анализа добијених резултата механичких карактеристика урађена са циљем утврђивања утицаја фактора температуре и времена прегревања на механичке особине легуре након третмана прегревања. Такође, у циљу детаљније дискусије резултата, спроведена је додатна анализа у којој су упоређене механичке особине легуре у полазном стању (пре прегревања) и након прегревања.

Методе примењене у овом истраживању у складу су са општеприхваћеном научном праксом за проучавање центрифугално ливених топлотно отпорних легура класе HP40 Nb, а њихова валидност потврђена је кроз публикације у реномираним међународним часописима.

Комисија сматра да су примењене методе истраживања, дате кроз поглавља Експериментална процедура и Методе испитивања, адекватне и јасно приказане, и да омогућују поновљивост свих експеримената и успешну реализацију постављених циљева докторске дисертације.

1.6.Анализа испуњености циља истраживања:

Основни циљеви докторске дисертације били су усмерени на испитивање утицаја краткотрајног прегревања на микроструктуру и механичке особине центрифугално ливене топлотно отпорне легуре класе HP40 Nb, уз поређење легура различитог хемијског састава и историјата експлоатације, као и на утврђивање релативног утицаја температуре и трајања прегревања.

Спроведена је детаљна анализа микроструктурних промена и механичких особина (затезна чврстоћа, напон течења, издужење и тврдоћа) на узорцима цеви од HP40–0,63%Nb легуре, која није била у експлоатацији, као и на узорцима цеви од HP40–1,5%Nb легуре, која је била у експлоатацији дуже од 100.000 сати. Резултати указују на значајне разлике у понашању услед различитог стања материјала и садржаја Nb.

Анализа утицаја краткотрајног прегревања на експлоатационе карактеристике материјала цеви указује на следеће: Цеви произведене од новог материјала, односно легуре HP40–0,63%Nb могу се користити након краткотрајног прегревања. Повољни услови прегревања цеви од новог материјала су температура прегревања 950°C и време од 120 минута, а још повољније за материјал је краткотрајно прегревање на 1050°C. Висока температура прегревања 1150°C представља неповољан услов и узрокује знатну деградацију материјала, укључујући потпуно растварање секундарних карбида хрома и уситњавање карбида ниобијума. Испрекидана мрежа примарних карбида је присутна, што доводи до повећане кртости и смањене отпорности на пузање. Цеви из експлоатације од легуре HP40–1,5%Nb, такође могу да поднесу краткотрајна прегревања унутар температурног опсега 950-1050°C. Овај температурни опсег омогућава трансформацију карбида хрома и усмеравање граница зрна, што побољшава отпорност на пузање и механичке особине. У овом опсегу, краткотрајно прегревање од 120 минута је најповољније.

На основу компаративне анализе утицаја различитих температуриних опсега и временских интервала прегревања, утврђено је да температура има доминантнији утицај на деградацију механичких особина у односу на време трајања прегревања. Овај закључак је подржан подацима добијеним кроз систематска испитивања и анализу резултата.

Остварени резултати доприносе бољем разумевању понашања топлотно отпорних легура у условима краткотрајног прегревања и могу послужити као основа за унапређење критеријума за оцену стања и преосталог радног века цеви у реалним условима експлоатације.

Комисија на основу приказаних резултата, дискусије и изведених закључака у овој докторској дисертацији сматра да су сви постављени циљеви су у потпуности остварени.

1.7.Анализа добијених резултата истраживања и списак објављених научних радова кандидата из докторске дисертације (аутори, наслов рада, назив часописа, волумен, година објављивања, странице од-до, DOI број[1], категорија):

Резултати остварени у овој докторској дисертацији представљају савремен и оригиналан допринос у области карактеризације цеви од HP40 Nb легуре, како „нових“, тако и „старих“ (након 11 год. експлоатације), са аспекта процене могућности продужетка њиховог радног века након краткотрајног прегревања. Остварени резултати служе као поуздана основа за одабир адекватног поступка оптимизације услова прегревања, с циљем унапређења механичких својстава и микроструктуре материјала, побољшања отпорности на пузање и, самим тим, продужења радног века испитиваних цеви. Резултати су објављени у осам научних радова: два рада - M23 (међународни часописи), један рад - M24, три рада - M33 (међународне конференције), као и по један рад M53 и M63 (домаћи часописи и конференције).

[1] Уколико публикација нема DOI број уписати ISSN и ISBN

1. **Milica Timotijević**, Olivera Erić Cekić, Petar Janjatović, Marina Dojčinović, Dragan Rajnović: Cavitation Damage Morphology of the Centrifugally Cast Heat-resistant Alloy – HP40 Nb, Materials science (Medžiagotyra) 2024, Volume 30, Issue 4, pp.568-575, doi: 10.5755/j02.ms.37307. (M23)
2. **Milica Timotijević**, Mića Đurđev, Olivera Erić Cekić, Dragan Rajnović, Petar Janjatović: Effect of Overheating Temperature on Microstructure and Hardness of HP40 Nb Alloy: Analysis by ANOVA. Materials Science (Medžiagotyra) 2024, online ISSN: 2029-7289, doi: 10.5755/j02.ms.37697. (M23)
3. **Milica Timotijević**, Olivera Erić Cekić, Dragan Rajnović, Marina Dojčinović, Petar Janjatović: Microstructure evolution and mechanical properties degradation of HPNb alloy after an eleven- year service, Structural integrity and life, Volume 22, No.3, 2022, pp.299–304, ISSN: 1451-3749, doi:http://TechnoRep.tmf.bg.ac.rs./handle/123456789/6320 (M24).
4. **Milica Timotijević**, Olivera Erić Cekić, Dragan Rajnović, Petar Janjatović: The influence of overheating temperature on the microstructure of HP40 alloy. In: 15th International Scientific Conference "MMA Flexible Technologies 2024", Septembar, Novi Sad, Serbia, September 24-26, pp.173-176, MMA 2024 Flexible Technologies, https://doi.org/10.24867/MMA-2024-05-004 (M33).
5. **Milica Timotijević**, Olivera Erić Cekić, Dragan Rajnović, Petar Janjatović: The quantification of carbides in heat-resistant cast steel HP40 Nb alloy 2024, International Multidisciplinary Conference „Challenges of Contemporary Higher Education" - CCHE 2024, Kopaonik January 29th-February 3rd 2024, BOOK of PROCEEDINGS, Volume 3, pp.89-95, ISBN-978-86-8244-04-7 (tom) (M33).
6. **Milica Timotijević**, Mišo Bjelić, Dragan Rajnović, Olivera Erić Cekić: Prediction of the Strain hardening exponent of HP40-Nb alloy. In: 10th International Conference Heavy Machinery-HM 2021, Vrnjačka Banja, 23-25 Jun 2021, pp.9, B45-B50, ISBN 978-86-81412-09-1. (M33)
7. **Milica Timotijević**, Olivera Erić Cekić, Dragan Rajnović, Petar Janatović: Microstructural analysis of a HP 40Nb alloy aged. Engineering Today 2022, Volume 1, Issue3, pp.41-47, doi: 10.5937/engtoday2203041T. (M53).
8. **Milica Timotijević**, Dragan Rajnović, Olivera Erić Cekić: Mikrostruktura i svojstva legure HP40Nb: poređenje materijala u livenom stanju i nakon eksploatacije. Šesti naučno-stručni skup Politehnika 2021, 10. decembar, Beograd, pp.588-593, ISBN 978-86-7498-087-3 (M63)

1.8.Оцена да је урађена докторска дисертација резултат оригиналног научног рада кандидата у одговарајућој научној области и анализа извештаја о провери докторске дисертације на плагијаризам (до 1000 карактера):

Комисија сматра да докторска дисертација „Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту - HP 40 Nb" представља оригиналан резултат научноистраживачког рада докторанда Милице Тимотијевић мастер инжењера машинства. Према предвиђеној процедури Универзитета у Крагујевцу спроведен је поступак детекције плагијаризма ове докторске дисертације помоћу програма „iThenticate". У Извештају о провери оригиналности докторске дисертације бр. IV-04-212/2 од 10.04.2025. год. је детектовано поклапање од 3% са другим изворима. Подударања текста највећим делом представљају елементи текста претходно публикованих резултата докторандових истраживања проистекли током рада на дисертацији, као и текста који представља навођење библиографских података о коришћеној литератури.

Извештај о провери оригиналности докторске дисертације (провера на плагијаризам) и Оцена ментора о извештају о провери оригиналности докторске дисертације „Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту - HP 40 Nb" недвосмислено указује на оригиналност докторске дисертације.

1.9.Значај и допринос докторске дисертације са становишта актуелног стања у одређеној научној области:

У оквиру докторске дисертације је истраживан утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и развој микроструктуре, садржај примарних и секундарних карбида, механизам оштећења цеви са аспекта прегревања цеви за реформере (пећи за пиролизу). Испитивање утицаја краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту – HP40 Nb за пећи за пиролизу значајно је из неколико разлога:

- пећи за пиролизу раде на високим температурама, врло често близу термичких граница материјала. Разумевање реакције новог и старог материјала цеви на краткотрајно прегревање омогућава предвиђање њиховог понашања током температурних скокова који могу настати услед поремећаја у процесу рада пећи.
- истраживање у овој тези омогућује дефинисање температурних опсега при којима материјал цеви може да избегне трајна оштећења, као што су деформација пузањем, термички замор или оксидација.
- испитивање утицаја краткотрајног прегревања новог и старог материјала цеви помаже да се идентификује како да се минимизира штета и продужи век трајања цеви.
- истраживање перформанси материјала цеви током краткотрајног прегревања доприноси пројектовању сигурнијих и поузданијих пећи за пиролизу.
- истраживање утицаја краткотрајног прегревања може открити недостатке материјала цеви, чиме се усмерава развој побољшаних центрифугално ливених легура отпорних на топлоту, попут HP40 Nb, са побољшаном отпорношћу на високе температуре.

Истраживања у оквиру тезе пружила су савремен и оригиналан допринос у области карактеризације цеви „нових“ (цеви израђене од HP40 Nb легуре које нису биле у употреби) и „старих“ (цеви након 11 година експлоатације) са аспекта продужетка радног века, односно могућности њихове употребе након краткотрајног прегревања.

У том контексту, добијени резултати представљају основу за избор одговарајућег поступка оптимизације услова прегревања, са циљем побољшања механичких својстава и микроструктуре испитиваног материјала цеви, његовог понашања при пузању, и тиме продужетка његовог радног века.

На основу свега наведеног, Комисија сматра да докторска дисертација несумњиво представља значајан допринос актуелном стању у датој научној и стручној области.

1.10.Оцена испуњености услова за одбрану докторске дисертације у складу са студијским програмом, општим актом факултета и општим актом Универзитета (до 1000 карактера):

Докторска дисертација кандидата Милице Тимотијевић под насловом **„Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту – HP40 Nb“** израђена је у складу са одредбама Правилника о пријави, изради и одбрани докторске дисертације Универзитета у Крагујевцу. Садржај дисертације у потпуности одговара теми која је одобрена од стране Наставно-научног већа Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву и Већа за техничко-технолошке науке Универзитета у Крагујевцу.

Кандидат је испунио све обавезе и услове прописане студијским програмом докторских академских студија Машинско инжењерство, као и услове дефинисане Правилником о правилима студирања на докторским студијама Факултета.

Имајући у виду све наведено, Комисија констатује да докторска дисертација представља оригиналан научноистраживачки допринос, да су у потпуности остварени постављени истраживачки циљеви, и да су испуњени сви научни, стручни и административни услови за приступање одбрани докторске дисертације.

2. **ЗАКЉУЧАК**
На основу анализе докторске дисертације и приложене документације Комисија за оцену и одбрану докторске дисертације под насловом **„Утицај краткотрајног прегревања на механичке особине и микроструктуру центрифугално ливене легуре отпорне на топлоту – HP 40 Nb”**, кандидата **Милице Тимотијевић**, предлаже надлежним стручним органима да се докторска дисертација прихвати и да се одобри њена одбрана.

Чланови комисије:

Драган Рајновић

Др Драган Рајновић, ванредни професор

Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду

Машинско инжењерство/Материјали и технологије спајања

Председник комисије

Мића Ђурђев

Др Мића Ђурђев, доцент

Технички факултет „Михајло Пупин“ у Зрењанину Универзитета у Новом Саду

Машинско инжењерство/Индустријско инжењерство

Члан комисије

Петар Јањатовић

Др Петар Јањатовић, доцент

Факултет техничких наука Универзитета у Новом Саду

Машинско инжењерство/Материјали и технологије спајања

Члан комисије