

**НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Петра Кнежевића

Одлуком Наставно научног већа од 23.04.2020. године (одлука бр. 22/41-2 од 28.04.2020) именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Петра Кнежевића, маг. инж. грађ., под насловом:

**PREISACH-ОВ МОДЕЛ ХИСТЕРЕЗИСА ЗА АНАЛИЗУ КОНСТРУКЦИЈА  
ИЗРАЂЕНИХ ОД ЧЕЛИКА СА ИЗРАЖЕНИМ ПЛАТООМ ТЕЧЕЊА ПРИ  
ЦИКЛИЧНОМ ОПТЕРЕЋЕЊУ**

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

На седници Већа Катедре за техничку механику и теорију конструкција одржаној 01.11.2018. Петар Кнежевић је јавно излагао предложену тему докторске дисертације под насловом „Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу“. Комисија коју је образовало Веће Катедре прихватила је предложену тему и предложила кандидату да тему, под коригованим насловом „Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција израђених од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу“ пријави Наставно-научном већу Грађевинског факултета.

Одлуком Наставно-научног већа Грађевинског факултета бр. 456/4 од 18.12.2018. године, одређена је Комисија за оцену научне заснованости теме докторске дисертације под насловом „Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција израђених од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу“ у саставу проф. др Драгослав Шумарац дипл.грађ.инж., доц. др Зоран Перовић дипл.грађ.инж. и проф. емеритус др Темал Долићанин дипл.мат. (Државни Универзитет у Новом Пазару). Позитиван извештај Комисије за оцену научне заснованости теме докторске дисертације усвојен је на седници Наставно-научног већа Грађевинског факултета одржаној 21.02.2019. године (одлука бр. 456/6-18 од 07.03.2019.. године). Веће научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду на седници одржаној 02.04.2019. (одлука бр. 61206-1090/2-19 од 02.04.2019. године) усвојило је предлог теме докторске дисертације кандидата Петра Кнежевића.

Кандидат је урађену докторску дисертацију предао Служби за студентска питања Грађевинског факултета 18.03.2020. године.

## 1.2. Научна област дисертације

Тема докторске дисертације припада научној области Грађевинарство и ужој научној области Техничка механика и теорија конструкција, која је дефинисана Статутом Грађевинског факултета Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређен је проф. др Драгослав Шумарац дипл.грађ.инж. редовни професор Грађевинског факултета Универзитета у Београду.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

Петар Кнежевић је рођен 20.07.1988. у Новом Пазару. У Лешку (АП Косово и Метохија) је завршио основну школу „Стана Бачанин“, као ђак генерације и носилац дипломе “Вук Стефановић Караџић” за ученике основних школа. Средњу Архитектонско техничку школу је завршио у Београду са просеком 5.00 уз награду за ђака генерације.

Основне академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2007/08. године, а дипломирао је 2011. године на Модулу Конструкције, са просечном оценом **9.37**. Синтезни пројекат под насловом „**Пројекат стамбено пословне зграде  $P_0+P_p+8$** “ (ментор проф. др Душан Најдановић) одбранио је на Катедри за материјале и конструкције са оценом 10 (десет) и тиме стекао звање дипломираног инжењера грађевинарства. Дипломске академске (мастер) студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2011/2012. године, а дипломирао је 2012. године на Модулу Конструкције, са просечном оценом **9.71**. Мастер рад под насловом „**Идејни пројекат дворане за мале спортове**“ (ментор проф. др Дејан Бајић) одбранио је на Катедри за материјале и конструкције са оценом 10 (десет) и тиме стекао звање мастер инжењера грађевинарства.

Петар је добитник награде из фонда проф. Душана Крајчиновића за изузетне резултате на предметима Катедре за техничку механику и Теорију конструкција у школској 2009/2010.

Докторске академске студије на Грађевинском факултету у Београду уписао је школске 2013/2014. године. Положио је све испите предвиђене наставним планом са просечном оценом **9.75**.

Користи програмске пакете MS Office, AutoCAD, програмске језике MATLAB и C++, као и програме из области грађевинарства (Radimpex Tower, SAP2000).

Учествовао је акредитацији Лабораторије за грађевинске материјале „проф. др Вера Николић-Станојевић“ на Државном универзитету у Новом Пазару, као Лице одговорно за квалитет и одговорни стручњак.

Говори и пише енглески језик и познаје основе руског језика.

## **2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ**

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација Петра Кнежевића под насловом „Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција израђених од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу“ садржи укупно 112 страна, од којих је основни текст на 91 страни. Дисертација је писана на српском језику и подељена је у девет поглавља:

1. Теорија и феномени еластопластичности
2. Хистерезисни оператори
3. Моделирање еластопластичног понашања челика са израженим платоом течења применом Preisach-овог модела хистерезиса

4. Еластопластична анализа аксијално напрегнутих елемената са оштећењем при цикличном напрезању
5. Енергетски губици и феномени заробљене енергије
6. Еластопластична анализа гредних носача од конструктивних меких челика применом Preisach-овог модела хистерезиса
7. Анализа замора материјала и методе одређивања броја циклуса произвољне историје оптерећења
8. Експериментални резултати
9. Закључак

Дисертација садржи 69 слика и 8 табела. Списак цитиране литературе садржи 90 наслова. На почетку дисертације је дат резиме на српском и енглеском језику, са кључним речима. Биографија аутора дата је на крају дисертације.

Дисертација је технички обликована према упутствима Сената Универзитета у Београду и посебним упутствима за обликовање штампане и електронске верзије доктората. Садржи обавезна поглавља и обрасце: изјава о ауторству, изјава о истоветности електронске и штампане верзије и изјава о коришћењу.

## 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Основни текст разматране докторске дисертације има девет поглавља и преглед коришћене литературе. На почетку текста је дат садржај, изјава захвалности, апстракт и списак кључних речи на енглеском и српском језику.

У првом поглављу је дат преглед литературе и представљено је понашање конструктивних меких челика у области еластопластичности. Поред класичне теорије пластичности, посебан осврт је дат и на теорију микропластичности. Помоћу ове теорије је објашњено основно понашање метала на нивоу кристалне решетке, при појави различитих дефеката. Ефекат развоја хоризонталног платоа течења при монотомом напрезању је такође објашњен применом теорије микропластичности. Ефекти цикличне пластичности попут *Bauschinger*-овог и *Massing*-овог ефекта су објашњени. Такође, представљени су и ефекти цикличног ојачања и омекшања, карактеристичних за ову врсту челика.

У поглављу „Хистерезисни модели“ прво је представљен феномен хистерезиса и значај његове примене код описивања различитих физичких феномена. Preisach-ов модел хистерезиса, као један од најзаступљенијих хистерезисних модела, је приказан кроз преглед постојеће литературе. Посебан осврт је дат на особинама меморије и конгруентности, овог модела. Геометријска интерпретација овог хистерезисног модела у виду Preisach-овог троугла је посебно описана. Посебна пажња је посвећена начину дефинисања Preisach-ове функције на основу облика хистерезисне петље, односно на основу транзиционе криве првог реда.

На почетку трећег поглавља су приказани постојећи Preisach-ови модели за дефинисање еластопластичног понашања материјала коришћењем дилатације као улаза. Ови хистерезисни модели су даље искоришћени као основа за развој нових модела типа Preisach. Првенствено је описан Preisach-ов модел за дефинисање еластопластичног понашања конструктивних меких челика при монотомом напрезању на нивоу једног кристала, а затим и на нивоу поликристала. Имплементацијом елемента негативне крутости у механички модел је дефинисан ефекат омекшања, при појави оштећења. Геометријска интерпретација овог модела је приказана кроз новоформирану Preisach-ову троугао. Проширење овог модела на модел за дефинисање еластопластичног понашања меких челика при цикличном једноаксијалном напрезању је спроведено кроз два корака. У првом кораку је дефинисан модел за описивање тренд линије свих хистерезисних петљи, назване *backbone* крива. Модел је дефинисан модификацијом модела за описивање понашања конструктивних меких челика при монотомом напрезању, елиминисањем платоа течења и модификовањем брзине прираста

напона у зони ојачања и оштећења. Други корак представља дефинисање унутрашњих хистерезисних петљи, узимајући у обзир ефекте цикличног ојачања који зависе од остварене максималне дилатације до посматраног временског тренутка. Комбиновањем три Preisach-ова троугла од којих први дефинише *backbone* криву, други троугао „брисања“ који прави простор за трећи троугао који се односи на унутрашње хистерезисне петље, коначни Preisach-ов троугао за описивање понашања меких констриктивних челика при цикличном понашању, је дефинисан. У овом поглављу је приказана примена методе коначних елемената код описивања понашања аксијално циклично напрегнутих носача у домену пластичности, као и начин решавања система једначина МКЕ са критеријумом конвергенције.

У поглављу „Еластопластична анализа аксијално напрегнутих елемената са оштећењем при цикличном оптерећењу“ је искоришћен елемент негативне крутости код моделирања оштећења. Овај елемент је имплементиран у механички модел који описује *backbone* криву уз модификацију домена који дефинише оштећење у односу на монотонно напрезање. Уведена је претпоставка да оштећење настаје само при затезању, па домен интеграције који дефинише оштећење, унутар Preisach-овог троугла постоји само при оптерећењу (затезању). Потпуно циклично понашање је дефинисано са овим моделом уз додатак који дефинише унутрашње хистерезисне петље из претходног поглавља. Други Preisach-ов модел који дефинише оштећење при цикличном напрезању је формиран увођењем елемента предефинисане границе кидања у механички модел без оштећења. Такође се уводи претпоставка о појави оштећења само при затезању.

У петом поглављу примена Preisach-овог хистерезисног модела при прорачуну енергетских губитака је дефинисана. Приказан је поступак дефинисања пластичног рада као површине испод напонско-деформацијског дијаграма у зони пластичности. Коришћењем познатог концепта одређени су изрази за хистерезисне губитке енергије код предметног хистерезисног модела. Феномен заробљене енергије је дефинисан као разлика пластичног рада и остварених хистерезисних губитака, дефинисаних на основу површине хистерезисне петље.

Поглавље „Еластопластична анализа гредних носача од конструктивних меких челика применом Preisach -овог модела хистерезиса“ садржи решење проблема једноаксијалног напрезања код којих расподела дилатација није константна по целом пресеку. Овај проблем представља проблем савијања попречних пресека и у овој дисертацији је ограничен на чисто савијање правоугаоних попречних пресека. Увођењем претпоставке о равним попречним пресецима, изведено је аналитичко решење које врши пресликавање кривине попречног пресека у моменат. Геометријска интерпретација проблема је дата кроз Preisach-ову призму која се састоји од Preisach-ових троуглова дефинисаних за свако влакно попречног пресека. Предности и мане нумеричке интеграције оваквог проблема су наведене.

Могућност евалуације ефекта замора у анализи конструкција, помоћу Preisach-овог модела хистерезиса, је дата кроз ефекте меморије овог модела. Кориштећи основну особину селективне меморије Preisach-овог модела, развијена је потпуно нова метода за екстракцију пуних циклуса из произвољне историје напрезања. Према степенастој меморијској линији, која се формира унутар Preisach-овог троугла, метода је названа *staircase* метода. Поређењем са најпримењиванијим методама за бројање циклуса (метода кишног тока и метода резервоара), приказане су предности ове методе у погледу димензије меморије, тачности и остатка од неупарених циклуса (резидуума). Повећање брзине прорачуна енергетских губитака је такође предвиђено применом ове методе.

У поглављу „Експериментални резултати“ даје се приказ тестова на узорцима цилиндричног облика израђених од конструктивних меких челика. Приказане су две врсте тестова на испитаним узорцима. По два узорка израђених од класа челика S235, S275 и S355 су изложени монотоним напрезањем, са константним брзином напрезања издужења, све до лома. Валидација Preisach-овог модела за дефинисање еластопластичног понашања конструктивних меких челика при монотоним напрезањем је остварена поређењем

нумеричких са експерименталним резултатима за све три класе челика. Резултати у зони оштећења су поређени и са моделом предефинисане границе кидања.

За потребе валидације модела који описује циклично понашање ових челика, цилиндрични узорци класе S275 су изложени различитим историјама напрезања. Укупно 6 узорака је изложено цикличном напрезању, са циљем одређивања основних параметара, који описују циклично понашање ове класе челика. По два узорка за испитивање су изложена истом режиму напрезања. Укупно три различита режима напрезања су спроведена над узорцима при испитивању. Свака историја напрезања се састоји из блокова од по 5 симетричних, пуних циклуса. Брзина наношења оптерећења је константна при свим тестовима.

Општи закључци истраживања, као и препоруке за будућа истраживања су дати у деветом поглављу.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Челичне конструкције израђене од конструктивних меких челика представљају објекте који су значајно заступљени у грађевинској пракси широм света. Поред монотоног оптерећења, код великог броја ових конструкција заступљено је циклично напрезање, које проузрокује хистерезисно понашање.

Анализом приказане докторске дисертације Петра Кнежевића под називом “Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција израђених од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу” може се закључити да предметна дисертација представља резултат озбиљног и самосталног научно-истраживачког рада кандидата. Петар Кнежевић је на основу приказаног резултата показао способност да практично решава сложене проблеме, анализирајући проблеме који су били предмет разматрања. С обзиром да се приказан предмет истраживања односи на различите области примењене механике и анализе конструкција, као и хистерезисне операторе, кандидат је показао да поседује широка знања и способност да успостави и пронађе везу између њих. Што се тиче описивања понашања челика при цикличном напрезању, постоје релативно бројна решења, која чак користе и исти тип хистерезисног модела. Међутим, предложени модел, поседује особине описивања феномена цикличног ојачања и димензију меморије, коју други модели не поседују. Развијени модел својом прецизношћу и једноставношћу, која се огледа у његовој геометријској интерпретацији, представља брже и квалитетније решење у односу на постојеће моделе. Развојем нове методе за одређивање броја циклуса при произвољној историји оптерећења, ефекти замора могу бити узети у обзир. Нарочит допринос дисертације јесу и експериментални резултати испитивања, нарочито успостављање везе између монотоног и цикличног напрезања. У постојећој литератури оваквих истраживања има веома мало. Такође, резултати дисертације имају тренутну практичну вредност и могућност примене у пракси.

#### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У изради ове докторске дисертације је коришћено 90 библиографских јединица. Већину референци чине радови објављени у врхунским међународним часописима, као и радови објављени на значајним међународним конференцијама, извештаји истраживачких пројеката и међународни стандарди у области испитивања материјала и пројектовања челичних конструкција.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Рад у дисертацији је реализован паралелном применом теоријског приступа ослоњеног на податке добијене из литературе и практичног приступа заснованог на сопственом експерименталном и нумеричком истраживању.

Кандидат је рад на докторској дисертацији, полазећи од анализе и синтезе постојећих сазнања и резултата из литературе, засновао на експерименталним и нумеричком анализама. Тежиште овог рада је на експерименталној и нумеричкој анализи и теоријско-аналитичком моделирању. Кандидат се користио основним принципима теорије конструкција и отпорности материјала. Нумеричко моделирање, методом коначних елемената, применио је у параметарској анализи.

Наведене методе истраживања су врло савремене и у потпуности примерене за примену у предметном истраживању.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати добијени у оквиру истраживања указују: (1) на ишчезавања платоа течења у напонско-деформацијском дијаграму код конструктивних меких челика, при цикличном напрезању и (2) на изражени ефекта цикличног ојачања код ове врсте челика.

Добијени резултати су последица истраживања спроведених на резултатима експерименталних и нумеричких анализа. Предложени модел за описивање понашања конструктивних меких челика и прорачунски концепт који су резултат ове дисертације се могу директно применити у пројектовању челичних конструкција.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат се у оквиру своје докторске дисертације бавио изучавањем и критичком анализом доступне литературе, као и планирањем, спровођењем, обрадом и анализом резултата експерименталног и нумеричког истраживања. Кандидат је такође показао способност за критичку анализу научне литературе, развој и предлагање оригиналних решења која доводе до бољих резултата у односу на оне које карактеришу до сада публикована решења. Систематичним приступом постављеном проблему, повезујући различите сегменте научно-истраживачког рада, Петар Кнежевић је успешно решио постављене задатке и доказао да поседује способност за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

У оквиру докторске дисертације Петра Кнежевића остварени су следећи научни доприноси:

1. Експериментално је испитано понашање конструктивних меких челика при монотонном оптерећењу. Показано је да постоји разлика у понашања ових челика при различитим режимима напрезања. Плато течења, карактеристичан при монотонном напрезању, ишчезава при првој промени знака напрезања.
2. Експериментално је испитано понашање конструктивних меких челика при цикличном напрезању. Показано је да ову врсту челика карактерише изражен ефекат цикличног ојачања, који је објашњен дефинисањем тренд линије пикова хистерезисних петљи (*backbone* крива). Такође је успостављена зависност између материјалних параметара који дефинишу монотонно и циклично напрезање.

3. Развијен је хистерезисни модел за прорачун елемената конструкција израђених од конструктивних меких челика. Обухваћени су елементи произвољног попречног пресека изложени цикличном аксијалном напрезању, као и елементи правоугаоног попречног пресека изложени чистом цикличном савијању. Модел обухвата и појаву оштећења код оваквих елемената, уз коришћење два различита приступа код моделирања пада крутости при оштећењу.
4. Развијена је нова метода одређивања броја циклуса при произвољној историји оптерећења, користећи основне меморијске особине Preisach-овог модела. Метода је показала знатну предност у погледу тачности, димензије меморије, као и једноставности примене у односу на постојеће методе.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживачки рад Петра Кнежевића, маг. инж. грађ. на истраживању понашања конструктивних меких челика при цикличном оптерећењу је омогућио формулисање новог модела за описивање понашања ове врсте челика и дефинисање прорачунског концепта за његову примену.

У истраживању је спроведен обиман експериментални програм испитивања конструктивних меких челика монотоним и цикличним оптерећењем, који захтева темељне припремне активности и тачно и прецизно спровођење. Добијени резултати омогућавају извођење закључака као и употребу од стране других истраживача.

Развој новог хистерезисног модела је омогућио описивање цикличног понашања конструктивних меких челика са већом прецизношћу у односу на постојеће моделе. Постигнуто је боље слагање нумеричких и експерименталних резултата. Међутим, модел је нешто сложенији у односу на постојеће моделе. Сложеност модела је последица могућности описивања ефеката цикличности, коју остали модели не поседују.

Анализом експерименталних и нумеричких резултата формулисан је прорачунски модел за практичну примену. У циљу примене предложеног модела за различите случајеве геометрије попречних пресека, као и несиметричних историја оптерећења, неопходно је спровођење додатних испитивања. Примена хистерезисног модела и развијене методе за одређивање броја циклуса, при анализи носивости детаља челичних конструкција, захтева додатна детаљна испитивања која би успоставила везу између опсега дилатација и броја циклуса.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

У току израде дисертације Петар Кнежевић је међународној и домаћој, научној и стручној јавности представио свој рад кроз следеће радове:

##### Категорија M23:

1. **Petar Knežević, Dragoslav Šumarac, Zoran Perović, Ćemal Dolićanin, and Zijah Burzić**, “A Preisach Model for Monotonic Tension Response of Structural Mild Steel with Damage”, *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 64, no. 1, pp. 296–303, 2020, doi: <https://doi.org/10.3311/PPci.14809>.

##### Категорија M33:

1. **Petar Knežević, Dragoslav Šumarac, Milivoje Milanović**, „Primena metode kišnog toka pri određivanju broja ciklusa usled cikličnog opterećenja konstrukcija“. *XII međunarodna naučno-stručna konferencija: Savremena teorija i praksa u graditeljstvu*, Banja Luka 2016, 107-114, UDK COBISS.RS-ID 978-99976-663-3-8 69:71/72(082)(0.034.2) 624(082)(0.034.2) 6240024.

##### Категорија M52:

1. **Petar Knežević, Milivoje Milanović**: „Analiza zamora materijala kod čeličnih drumskih mostova prema Evrokodu“. *Zbornik radova građevinskog fakulteta 27*, Univerzitet u Novom

2. **Petar Knežević, Milivoje Milanović:** „Određivanje broja ciklusa za zadatau istoriju opterećenja pri analizi zamora prema Evrokodu“. *Zbornik radova građevinskog fakulteta 28*, Univerzitet u Novom Sadu - Građevinski fakultet Subotica, Subotica, 23-33, DOI: 10.14415/zbornikGFS28.02, ISSN: 0352-6852, eISSN: 2334-9573.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

У оквиру докторске дисертације под насловом „Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција израђених од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу“ предложен је оригиналан модел за описивање понашања конструктивних меких челика при цикличном напрезању. Резултати експерименталних истраживања која су спроведена од стране кандидата, као и развијени прорачунски модел, представљају оригиналан научни и стручни допринос у области грађевинарства. Резултати истраживања имају практичну примену, а могу да послуже и као основ за даља научна истраживања у овој области.

Комисија сматра да урађена докторска дисертација кандидата Петра Кнежевића, маг. инж. грађ. представља вредан и значајан допринос пројектовању и прорачуну челичних конструкција изложених цикличном напрезању. Комисија сматра да дисертација у потпуности испуњава све захтеване критеријуме који се од докторске дисертације очекују, као и да је кандидат испољио способност за самосталан научно-истраживачки рад у свим фазама израде ове дисертације.

Сходно претходном, Комисија предлаже Наставно-научном већу Грађевинског факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под насловом „Preisach-ов модел хистерезиса за понашање конструкција израђених од челика са израженим платоом течења при цикличном оптерећењу“ кандидата Петра Кнежевића, маг. инж. грађ. изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области грађевинско-урбанистичких наука Универзитета у Београду, као и да се након завршетка ове процедуре кандидат позове на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

Београд, 29.04.2020.

.....  
проф. др Драгослав Шумарац, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)

.....  
проф. др Златко Марковић, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)

.....  
проф. др Растислав Мандић, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)

.....  
доц. др Зоран Перовић, дипл.грађ.инж.  
(Грађевински факултет Универзитета у Београду)

.....  
проф. емеритус др Темал Долићанин, дипл.математичар.  
(Државни Универзитет у Новом Пазару)