

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Иване О. Младеновић**,  
дипл. инж. технологије

Одлуком бр. 35/14 од 04.02.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, под насловом: „**Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима**“.

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

-У октобру, школске 2011/2012. године, кандидат **Ивана О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, је уписала докторске академске студије на Универзитету у Београду, Технолошко-металуршки факултет, студијски програм Инжењерство материјала, под руководством ментора др Весне Радојевић, редовног професора Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду и др Јелене Ламовец, доцента и вишег научног сарадника Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду.

-24.10.2019. Кандидат **Ивана О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, пријавила је тему докторске дисертације под називом „**Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима**“.

-31.10.2019. године на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду донета је Одлука бр.35/34 о именовању чланова Комисије за оцену подобности теме и кандидата, **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, за израду докторске дисертације под називом: „**Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима**“ (Одлука бр. 35/34).

-24.12.2019. године – На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета у Београду донета је Одлука о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата у којој се одобрава израда докторске дисертације, **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, под називом: „**Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима**“. За менторе ове докторске дисертације именоване су: др Весна Радојевић,

редовни професор Технолошко-металуршког факултета и др Јелена Ламовец, доцент и виши научни сарадник Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду.

-23.01.2020. године – На седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност (Одлука 02 број: 61206-172/2-20) на предлог теме докторске дисертације **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, под називом: „**Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима**“ на основу захтева Технолошко-металуршког факултета, број 35/413 од 10.01.2020 године.

-04.02.2021. године на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донета је одлука о именовању Комисије за оцену докторске дисертације, **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, под називом: „**Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима**“ (Одлука бр. 35/14 од 04.02.2021. год.)

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове дисертације припадају научној области Инжењерство материјала, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа. Ментори: др Весна Радојевић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, је до сада публиковала преко 60 радова у међународним часописима, а др Јелена Ламовец, доцент и виши научни сарадник, Криминалистичко-полицијског универзитета у Београду из ове области је публиковала 15 радова у часописима који се налазе на СЦИ листи што говори о компетентности да руководе овом докторском дисертацијом.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

**Ивана (Обрад) Младеновић**, дипл. инж. технологије, рођена је 1. октобра 1985. године у Ужицу, где је завршила гимназију. Дипломирала је на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, одсек Хемијско инжењерство, 2011. године са просечном оценом 8,33. Дипломски рад одбранила је 2011. године на Катедри за инжењерство материјала, под руководством др Весне Радојевић, редовног професора Технолошко-металуршког факултета у Београду. Школске 2011/2012. уписала је докторске студије на матичном факултету, на студијском програму Инжењерство материјала. Положила је све предвиђене испите на докторским студијама, као и завршни испит, са просечном оценом 9,77 након чега пријављује тему докторске дисертације под називом: „Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима“. Говори енглески и руски језик. Од јуна 2011. године запослена је у НУ Институт за хемију, технологију и металургију, Универзитета у Београду, Центар за микроелектронске технологије. Ангажована је на пројекту Министарства за просвету, науку и технолошки развој Републике Србије, на пројекту ТР 32008 под називом: „Микро, нано-системи и сензори за примену у електропривреди, процесној индустрији и заштити животне средине“ у оквиру истраживања у области технолошког развоја, којим руководи др Дана Васиљевић-Радовић. У звању истраживач сарадник је од 24.04.2012. године са реизбором од 24.12.2015. године. Кандидат се бави проучавањем структурно-морфолошких и механичких својстава металних слојевитих композитних структура као и оптимизацијом и моделовањем параметара синтезе електрохемијског таложења металних слојева. Ивана О. Младеновић је аутор и коаутор више

од четрдесет научних радова објављених у часописима међународног значаја и презентованих на скуповима међународног и националног значаја.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата, Иване О. Младеновић, дипл. инж. технологије, написана је на 168 страна, укључује 34 табеле, 104 слике, као и 238 литературних навода. Докторска дисертација садржи шест поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултате и дискусију, Закључак и Литературу.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Докторска дисертација кандидата Иване О. Младеновић се бави анализом структурних, морфолошких и механичких својстава слојевитих композитних структура које су формиране електрохемијским таложењем једнослојних и вишеслојних металних превлака на различитим супстратима. Успостављена је релација између одабраних параметара процеса таложења, микроструктурних својстава превлака и супстрата и одабраних механичких својстава добијених композитних структура као што су микротврдоћа и адхезија. У првом поглављу дисертације (**1. Увод**) истакнут је значај примене електролитичких превлака бакра и никла, као и слојевитих композитних структура и значај за примену у микро електро механичким системаима. Представљена је метода синтезе, опсег одабраних параметара и избор материјала чија својства се посматрају. У другом поглављу дисертације (**2. Теоријски део**) наведене су специфичне технологије и методе које се користе у МЕМС-у, а акценат је стављен на методу електрохемијског таложења метала која је коришћена у овој дисертацији. Дефинисани су параметри електрохемијског таложења, попут режима и густине струје, састава електролита, избора супстрата, температуре и др. Дат је детаљан опис и објашњен утицај сваког параметра појединачно на структурно-морфолошка и механичка својства продукта електрохемијског таложења. Приказани су принципи мерних метода које су коришћене у дисертацији за карактеризацију механичких својстава слојевитих композитних структура, са акцентом на мерне методе тврдоће, а посебно мерне методе микротврдоће по Викерсу која је адекватна за карактеризацију механичких својстава танких металних превлака. Описана су механичка својства композитних структура која су од значаја за дисертацију: адхезија, микротврдоћа и отпорност на пузање. Поред механичких својстава материјала приказане су могућности коришћења слојевитих композитних структура као алтернативног и прилагодљивог плазмонског материјала. У трећем поглављу дисертације (**3. Експериментални део**) дат је преглед експерименталних апаратура коришћених у овом раду, поставка експеримената са објашњењем начина припреме електролита, супстрата и одабира и подешавања параметара електролизе. Наведене су све коришћене мерне методе и параметри мерења који су коришћени. Затим је приказана конструкција машине за тестирање адхезивних својстава танких металних превлака на флексибилним супстратима која је специјално конструисана и израђена за потребе испитивања. Четврто поглавље (**4. Резултати и дискусија**) се састоји од више целина. Прва целина се бави карактеризацијом структурно-морфолошких и механичких својстава одабраних супстрата од силицијума, бакра, месинга и дебелослојних превлака никла на месингу, које се могу сматрати масивним материјалом при карактеризацији. Затим је дефинисано и објашњено постојање два типа композитних система: композитни систем типа „мек филм на тврдом супстрату“ формиран је електрохемијским таложењем бакарних превлака на силицијуму и месингу, применом режима пулсирајућих струја и применом галваностатског режима. Посматран је утицај мешања електролита, утицај присуства адитива у електролиту, као и утицај одабраног

супстрата на структурно-морфолошка и механичка својства бакарних превлака. Окарактерисана је композитна тврдоћа и упоређени резултати за наведене композитне системе бакарних превлака на месингу и бакарних превлака на силицијуму као супстратима. На основу измерене композитне тврдоће по Викерсу, израчунате су апсолутне тврдоће супстрата и исталожених бакарних превлака применом математичких модела композитне тврдоће. Коришћени су следећи математички модели: Шико-Лесаж и Чен-Гао. На основу примене Шико-Лесаж модела утврђена је граница која раздваја област доминантног утицаја превлаке од области одзива читавог композитног система, када је утицај супстрата значајан, нарочито при већим примењеним оптерећењима утискивања. Вредност релативне дубине утискивања (однос дубине утискивања према укупној дебљини превлаке) која се добија применом теоријског критеријума за поузданост модела, износи 0,14. Ова вредност представља критичну вредност којом дефинишемо раздвајање области доминантног утицаја превлаке од области утицаја композита. Применом Чен-Гао модела добијена је апсолутна тврдоћа бакарне превлаке за сваку промену параметара режима таложења на целом опсегу примењених оптерећења, док је за Шико-Лесаж модел вредност апсолутне тврдоће превлака приказан за сваку појединачну тачку примењеног оптерећења. Поред микротврдоће, окарактерисана је и отпорност на пузање наведених слојевитих структура, односно процењена је отпорност на пузање бакарних превлака исталожених у режиму пулсирајућих струја на супстратима од силицијума и месинга. За процену пузања коришћен је Сарцент-Ешбијев модел. Модел се заснива на коришћењу вредности промене композитне тврдоће слојевитих структура са променом времена оптерећења при константној примењеној сили утискивања. На основу добијене вредности параметра пузања дефинисан је механизам пузања бакарних превлака испод утискивача. Пузање ситнозрних бакарних превлака при микроутискивању се одвија по механизму пузања на граници зрна и механизмом дислокацијског пузања или пењања. Показано је да су микроструктурно супериорније превлаке отпорније на пузање приликом утискивања, што представља важан закључак при пројектовању слојевитих структура у МЕМС-у из разлога што су МЕМС уређаји подвргнути температурним и механичким осцилацијама.

Други тип композитног система „тврди филм на меком супстрату“ приказан је на примеру електрохемијски исталожених бакарних превлака на бакарном супстрату применом галваностатског режима таложења. За овај тип слојевитог композитног система посматрани су утицаји две густине струје и варијација састава електролита у односу на садржај адитива. Процењен је утицај адитива на структурно-морфолошке промене добијених бакарних превлака које доводе и до промене механичких својстава превлака. За процену апсолутне тврдоће исталожених бакарних превлака у овом случају коришћен је математички модел композитне тврдоће по Корсунском. Показано је да додаток адитива 3-меркапто-сулфонске киселине, полиетилен-гликола и хлоридних јона доводи до смањења величине зрна, са ефектом поравнања површине, односно до смањења средњег апсолутног параметра храпавости. Са друге стране композитна тврдоћа система, као и апсолутна тврдоћа исталожених бакарних превлака опада са додатком адитива у поређењу са истим бакарним превлакама без адитива. Ефекат омекшавања превлаке у присуству наведених адитива је објашњен и дискутован.

Трећи део овог поглавља приказује резултате тестирања јачине адхезије бакарних превлака исталожених под различитим процесним условима електрохемијског таложења на различитим супстратима. Приказан је начин тестирања адхезије нестандартном методом за процену адхезије на уређају за циклично савијање који је специјално конструисан и израђен за ове намене. Циљ експеримента је приказ и поређење промене адхезивних својстава бакарних превлака на различитим супстратима. Показано је како појединачни параметри електрохемијског таложења утичу на повећање или слабљење пријањања превлаке за подлогу. Са друге стране вредност критичног броја циклуса, који се користио као параметар процене адхезивних својстава слојевитих композитних система има улогу при провери

адхезивних својстава система израчунатих на основу композитног модела Чен-Гао. Вредности параметра адхезије добијене преко Чен-Гао модела и вредности критичног броја циклуса добијеног на машини за циклично савијање су упоређени и дискутовани. Показано је да су мерења поуздана и резултати упоредиви уз ограничење које поставља вредност дебљине исталожене превлаке. Показано је да Чен-Гао модел не даје поуздане резултате када дебљина превлаке прелази критичну дебљину и прелази у масивни материјал.

Симулацијом електромагнетних својстава слојевитог композита који се састоји од наизменичних слојева бакара и никла показано је да се добијена структура може користити за микрооптоелектромеханичке уређаје. Селективним нагризањем бакарног слоја у односу на електрохемијски исталожени слој никла, реализована је плазмонска решетка, задовољавајућих оптичких својстава, без примене сложених фотолитографских поступака. Дат је предлог да се формирана структура може користити као алтернативни плазмонски материјал са прилагодљивим оптичким одзивом захваљујући лаком мењању димензија појединачних слојева, као и њиховом релативном односу дебљина.

У петом поглављу дисертације (**5. Закључак**) дата је анализа резултата и изведен закључак на основу ове анализе. Наведени су оптимални параметри синтезе у циљу добијања слојевитог композита жељених структурних и механичких својстава за потенцијалну примену при реализацији микро електро механичких направа. Приказани су и предлози и правци за будућа истраживања у овој области.

У шестом поглављу (**6. Литература**) дат је преглед коришћене литературе при изради дисертације.

### **3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ**

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Имајући у виду да се електронски уређаји брзо развијају и мењају, да су димензије електронских направа све мање и да последњих десет година наноматеријали имају примат при реализацији ових уређаја, сасвим је оправдано проучавање синтезе слојевитих композитних структура као и проучавање структурних, морфолошких и механичких својстава.

У складу са потенцијалом који имају слојевити композитни материјали, по питању структурних и механичких својстава, модернизација микро електро механичких системских технологија ће бити могућа. Иако се бакар веома дуго изучава и широко је распрострањен материјал у електроници, синтеза и карактеризација танких бакарних превлака и филмова је и даље недовољно истражена област. Детаљна карактеризација структуре, морфологије и механичких својстава са варијацијама параметара електрохемијске синтезе на овај начин се сагледава по први пут. У литератури се могу пронаћи информације о утицају варијације електрохемијских параметара на структурна својства превлака, али не и детаљна карактеризација механичких својстава попут микротврдоће, адхезије и отпорности на пузање при тестовима микроутискивања, са јасним разграничењем типа композитног система и њиховим међусобним поређењем. Утицај тврдоће супстрата при микроутискивању и мерењу композитне тврдоће је уочен раније у односу на опште прихваћену границу, познату као „правило 10%“, које претпоставља почетак утицаја супстрата у измереној тврдоћи на 1/10 укупне дебљине превлаке. Карактеризацијом микротврдоће слојевитих композитних структура бакарна превлака/супстрат утврђена је прецизна граница преко релативне дубине утискивања (индентације) која раздваја област доминантног утицаја тврдоће превлаке и композитне области. Добијена гранична вредност релативне дубине индентације износи 0,14

што представља и границу поузданости примене Шико-Лесажовог модела за исталожене бакарне превлаке на масивним супстратима.

Подаци карактеризације отпорности на пузање преко микроутискивања електролитичких слојева бакара на два различита супстрата нису доступни у литератури, тако да су добијени резултати од интереса и могу се користити при пројектовању мултифункционалних вишеслојних структура при изради микро електро механичких компоненти које се подвргавају сталном напрезању и температурним променама.

Карактеризација адхезивних својстава танких металних превлака на масивним супстратима је од великог интереса за електронику, ако се узме чињеница да је адхезија танких металних превлака на силицијуму слаба и да представља велики проблем при реализацији слојевитих структура из разлога што раслојавање (деламинација) макар једног слоја може довести до проблема реализације компоненте и њеног отказа. Мерење адхезије танких слојева је веома комплексно и често непоуздано. У овој дисертацији су приказане две могућности процене јачине адхезије, преко модела композитне тврдоће и преко теста на циклично савијање. Обе методе су се показале као поуздане за мерење адхезије са могућношћу поређења различитих типова слојевитих композита, са варијацијом материјала супстрата и материјала превлаке.

Реализација вишеслојног композита са наизменичним таложењем два различита материјала (бакар и никл) и применом селективног нагризања једног материјала у односу на други нуди широк спектар примене у микроелектроници. Могућност контролисане дебљине нанетих слојева и релативног односа дебљине појединачних слојева пружа могућност пројектовања различитих мултифункционалних композита са повољним механичким и оптичким својствима. У овој дисертацији је дат предлог потенцијалне примене слојевите структуре за реализацију дифракционе решетке која се може користити у плазмоници уместо племенитих материјала. Приказана је реализација просте ламинатне структуре без коришћења стандардних и сложених фотолитографских процеса.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације Кандидат је извршио преглед научне и стручне литературе из релевантних научних области везаних за проблематику која је приказана и обрађена у дисертацији. Наведену литературу чине углавном релевантни научни радови публиковани у водећим светским часописима у области материјала, превасходно композита, из области хемије, физике и електрохемије, инжењерства материјала, хемијског и електрохемијског инжењерства. Након прегледане литературе утврђено је да нема података о композитној тврдоћи за бакарне превлаке исталожене електрохемијски са варијацијом приказаних параметара, као и да нема података процене отпорности на пузање приказаних бакарних превлака. Процена адхезивних својстава слојевитих структура је опширно приказана у литератури, али су методе мерења и јединице којима се изражава јачина адхезије веома разнолике у зависности од мерне методе. На основу литературног прегледа установљено је да се процена јачине адхезије танких металних превлака спроводи углавном на комерцијалним уређајима, неком од стандардних метода, тако да је развој нове специфичне методе за квантификацију адхезивних својстава танких превлака био од интереса за ову дисертацију. У овој докторској дисертацији укупно је наведено 238 литературних навода из области инжењерства материјала, електрохемијског инжењерства и области електро механичких системских технологија и пројектовања МЕМС уређаја.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Научне методе које су примењене током рада на овој дисертацији су експериментална мерења и карактеризације механичких, структурних и морфолошких својстава слојевитих

композитних структура које чине електрохемијски исталожене металне превлаке на масивним супстратима. Синтеза превлака је обављена методом електрохемијског таложења (електролиза) применом различитих режима таложења са променом параметара таложења и коришћењем различитих електролита. Промена параметара електролизе при таложењу бакарних превлака применом режима пулсирајуће струје: фреквенције (или радног циклуса), амплитудне густине струје (или средње густине струје таложења), времена таложења (или дебљине превлаке) на квалитет исталожених бакарних превлака је посматрана на примеру таложења превлака на два супстрата различита по структурним и механичким својствима: силицијуму и месингу. При таложењу превлака бакра применом галваностатског режима посматрани су утицаји мешања електролита током таложења. Такође су приказани и утицаји параметара попут густине струје, присуства адитива у електролиту, дебљине превлаке и типа супстрата на структурно-морфолошке и механичка својства синтетисаних бакарних превлака.

Структурна својства одабраних супстрата, синтетисаних металних превлака и вишеслојних структура бакра и никла окарактерисана су коришћењем скенирајуће електронске микроскопије. Попречни пресеци и контрола дебљине формираних слојевитих структура као и мерење величине отисака при карактеризацији микротврдоће система обављена је коришћењем оптичких микроскопа. Структурна карактеризација текстуре и кристалографске оријентације исталожених превлака бакра на силицијумском супстрату оријентације (111) спроведена је коришћењем рендгенско-дифракционе анализе.

Морфологија исталожених превлака, визуелизација површине и карактеризација храпавости површине превлака, као и линијски профили добијени су применом микроскопије атомских сила у контактном или бескотактном моду.

Композитна тврдоћа одабраних слојевитих система је окарактерисана применом микроутискивања, методом по Викерсу применом константног времена оптерећења од 25 секунди у опсегу примењених оптерећења од 0,049 N до 2,942 N. На основу мерења композитне тврдоће и применом математичких композитних модела тврдоће, процењена је апсолутна тврдоћа исталожених превлака бакра за сваку варијацију параметара синтезе. Поред микротврдоће превлаке и композита, окарактерисана је и микротврдоћа четири одабрана супстрата (бакар, месинг, силицијум и дебелослојна превлака никла на месингу).

Отпорност на пузање бакарних превлака такође је урађена коришћењем микро-Викерс методе, коришћењем константног оптерећења при промени трајања оптерећења у опсегу од 5 до 65 секунди. Применом Сарцент-Ешбијевог модела за „индентационо пузање“ извршено је поређење синтетисаних превлака и процена отпорности на пузање при микроутискивању.

Адхезивна својства исталожених бакарних превлака са променом режима синтезе, електролита и одабраног супстрата су окарактерисана методом утискивања и методом цикличног савијања. Резултати примене ове две методе су међусобно упоређени и објашњени.

Рачунарском симулацијом, применом методе коначних елемената и коришћењем програмског пакета „Comsol“ приказани су могући оптички одзиви реализоване ламинатне структуре која се састоји од танких слојева бакра и никла исталожених наизменично на бакарном супстрату, применом методе наизменичног таложења из два електролита (бакар-сулфатног и никл-сулфатног) у галваностатском режиму. Симулација је урађена за различите дебљине појединачних металних слојева и за различите релативне односе између њих. Резултати симулације су показали да се слојевита композитна структура може користити као заменски и прилагодљиви плазмонски материјал.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати приказани у овој дисертацији су од великог научног значаја, одабир танких превлака и слојевитих структура при реализацији микро електро механичких компоненти

захтева познавање структурних, морфолошких и механичких својстава како целокупног слојевитог композита, тако и сваког појединачног слоја. Проналажење оптималних услова електрохемијског таложења металних превлака (бабра и никла) има велики комерцијални значај, као и проналазак оптималне рецептуре електролита која се користи при таложењу наведених превлака. Карактеризација храпавости површине исталожених превлака је од великог интереса за микросистемске технологије из разлога што храпавост металних превлака диктира и друга својства попут електричних и оптичких. Карактеризација механичких својстава попут: микротврдоће, отпорности на пузање и адхезије од кључне је важности при пројектовању компоненти и избору материјала за електронику, ако се узме у обзир чињеница да микроелектронски уређаји попут сензора, диода, актуатора, микрокалемова захтевају висок квалитет слојева и супериорна механичка својства, која даље диктирају животни век реализоване компоненте или уређаја.

Приказане методе карактеризације се могу користити за карактеризацију, анализу и тумачење резултата карактеризације механичких својстава многих других варијанти слојевитих композитних структура, било да је реч о варијацији типа супстрата или варијацији типа превлаке или параметара синтезе.

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

Кандидат **Ивана О. Младеновић** је ангажована у научно-истраживачком раду од тренутка запослења у Центру за микроелектронске технологије, Института за хемију, технологију и металургију, Универзитета у Београду, на пројекту технолошког развоја које финансира Министарство просвете, науке и технолошког развоја. У току израде докторске дисертације под називом „Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима“, кандидат је исказао интересовање, стручност и тежњу за самосталним радом у свим фазама израде тезе уз аналитички приступ, систематичност и поузданост у раду. Током експерименталног рада и израде дисертације постигнут је значајан научни допринос у научној области о материјалима, што потврђују објављени радови и саопштења на конференцијама међународног и домаћег значаја. На основу изнетих чињеница, Комисија сматра да је Кандидат квалификован и да поседује све квалитете који су неопходни за самостални научно-истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација кандидата **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије под насловом: „Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима“ пружа значајан научни допринос у оквиру одређивања структурних, морфолошких и механичких својстава бакарних превлака и слојевитих композитних структура, као и у области примене стандардних и специфичних метода синтезе и карактеризације наведених структура, при чему се може издвојити следеће:

- дефинисани су оптимални параметри електрохемијског таложења погодни за израду превлака бабра високог квалитета које се могу користити при изради микро електро механичких слојевитих структура;
- успостављена је корелација између процесних параметара електрохемијског таложења (електролизе) и окарактерисаних структурно-механичких и функционалних својстава добијених превлака бабра;



- одређена је гранична вредност релативне дубине утискивања (индентације), од 0,14 која раздваја област у којој тврдоћа супстрата доминантно утиче на измерену вредност композитне тврдоће од области у којој композитна тврдоћа одговара тврдоћи превлаке при примени теоријског услова композитног модела по Шико-Лесажу за систем бакарна превлака/супстрат;
- извршена је евалуација применљивости, оправданости и поузданости коришћења математичких модела композитне тврдоће (Шико-Лесаж, Корсунски, Чен-Гао) у циљу процене апсолутне тврдоће бакарних превлака независно од утицаја тврдоће супстрата; проширене су базе података које садрже приказе структуре и морфологије композитних система и специфичних величина које их карактеришу (текстурни коефицијенти и средњи апсолутни параметар храпавости површине); дат је допринос проучавању композитних система превлака/подлога и проширене су базе података специфичних механичких својстава (композитна тврдоћа, тврдоћа превлаке, тврдоћа подлоге, параметри адхезије, параметар пузања) за два типа композитних система („тврда превлака на меком супстрату“ и „мека превлака на тврдом супстрату“);
- пројектован је и израђен уређај за испитивање адхезије танких превлака на флексибилним фолијама и параметар методе (критични број циклуса) је верификован и упоређен са параметром адхезије добијен из теоријског композитног модела;
- реализована је тродимензионална структура састављена од наизменичних слојева танких превлака бакра и никла на масивном супстрату и симулирана су електромагнетна својства такве структуре за потенцијалну израду МЕМС-компоненти.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Значајан допринос ове докторске дисертације је у детаљном експерименталном испитивању слојевитих композитних структура које се састоје од превлака бакра исталожених под различитим електрохемијским условима синтезе на различитим масивним материјалима (супстратима) који се као такви користе као градивни елементи микро електро механичких структура. Значајан научни допринос је и у успостављању специфичних метода карактеризације механичких својстава, попут пузања електролитичких превлака током микроутискивања и одређивања адхезивних својстава између електрохемијски исталожене превлаке и изабране масивне подлоге, специфичном методом карактеризације. Разумевање својстава синтетисаних композитних структура је од велике важности при пројектовању и одабиру материјала при изради МЕМС компоненти. Научни доприноси које пружа ова докторска дисертација дају могућност за будућа истраживања у области испитивања сличних композитних система.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат **Ивана О. Младеновић** је аутор шеснаест радова и саопштења и то: 2 рада у врхунском међународном часопису (M21), 3 рада у међународним часописима (M23), 1 рад у часопису водећег националног значаја (M51), 5 саопштења са међународних скупова штампаних у целини (M33), 2 саопштења са међународних скупова штампаних у изводу (M34) и 3 саопштења са скупова националног значаја штампана у целини (M63) и више коауторских радова, чиме је верификовала научни допринос своје докторске дисертације. Након извршене провере оригиналности поднете тезе, извештај указује на оригиналан допринос докторске дисертације.

### Категорија M21:

1. **Mladenović, I.O.**, Nikolić, N.D., Lamovec, J.S., Vasiljević-Radović, D.G., Radojević, V.J.: Application of the Composite Hardness Models in the Analysis of Mechanical Characteristics of Electrolytically Deposited Copper Coatings: The Effect of the Type of Substrate, -*Metals, MDPI*, vol. 11, no. 1, pp. 111, 2021 (**IF(2019)=2.117**) (eISSN: 2075-4701), DOI: 10.3390/met11010111.
2. **Mladenović I.O.**, Lamovec, J.S., Vasiljević-Radović, D.G., Vasilić, R., Radojević, V.J., Nikolić, N.D.: Morphology, Structure and Mechanical Properties of Copper Coatings Electrodeposited by Pulsating Current (PC) Regime on Si(111) - *Metals, MDPI*, vol. 10, no. 4, pp.488, 2020 (**IF(2019)=2.117**) (eISSN: 2075-4701), DOI: 10.3390/met10040488.

### Категорија M23:

1. **Mladenović, I.O.**, Lamovec, J.S., Vasiljević-Radović, D.G., Radojević, V.J., Nikolić, N.D.: Mechanical features of copper coatings electrodeposited by the pulsating current (PC) regime on Si(111) substrate, - *International Journal of Electrochemical Science, ESG*, vol. 15, no. 11, pp. 12173-12191, 2020, (**IF(2019)=1.573**) (ISSN: 1452-3981), DOI: 10.20964/2020.12.01.
2. **Mladenović I.O.**, Lamovec J.S., Jović, V.B., Obradov, M.M., Vasiljević-Radović, D.G., Nikolić, N.D., Radojević, V.J.: Mechanical characterization of copper coatings electrodeposited onto different substrates with and without ultrasound assistance - *Journal of the Serbian Chemical Society*, vol. 84, no. 7, pp.729-741, 2019, (**IF(2019)=1.097**) (ISSN: 0352-5139), DOI: 10.2298/JSC181003023M.
3. **Mladenović, I.O.**, Jakšić, Z.S., Obradov, M.M., Vuković, S.M., Isić, G., Tanasković, D.M., Lamovec, J.S.: Subwavelength nickel-copper multilayers as an alternative plasmonic material - *Optical and Quantum Electronics, Springer*, vol. 50, no. 5, pp.203, 2018, (**IF(2019)=1.842**) (ISSN: 0306-8919), DOI: 10.1007/s11082-018-1467-3.

### Категорија M33:

1. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Nikolić, N.D., Andrić, S., Obradov, M., Radojević, V., Vasiljević-Radović, D.: „Response Surface Methodology and Artificial Neural Network-Based Models for Predicting Roughness of Cu coatings“, -*Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int.Conf. on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcEtran 2020*, Društvo za Etran, Niš, Serbia, 2020., 28.-29. September, pp. 469-472, ISBN: 978-86-7466-852-8.
2. **Mladenović, I.**, Đorović-Amanović, J., Nikolić, N.D., Vasiljević-Radović, D., Radojević, V., Lamovec, J.: „Analysis and interpretation of the micromechanical properties of electrodeposited nickel coatings on different substrates“, -*Proceedings of the 10<sup>th</sup> International scientific conference “Archibald Reiss days” 2020*, University of criminal investigation and police studies, Belgrade, Serbia, 2020., 18.-19. November, vol. 10, no. 1, pp. 655-664, ISBN 978-86-7020-190-3.
3. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Obradov, M., Radulović, K., Vasiljević-Radović, D., Radojević, V.: „Artificial Neural Network for Composite hardness Modeling of Cu/Si Systems Fabricated Using Various Electrodeposition Parameters“, - *Proceedings of the 31<sup>th</sup> International Conference on Microelectronics MIEL 2019*, Niš, Serbia, 2019, 16.-18. September, pp. 133-136, ISBN: 978-1-7281-3418-5.
4. **Mladenović, I.**, Jakšić, Z., Obradov, M., Vuković, S., Isić, G., Lamovec, J.: „Copper-nickel heterometallic multilayer composites for plasmonic applications“, -*Proceedings of 4<sup>th</sup> International Conference on Electrical, Electronics and Computing Engineering, IcEtran 2017*, Kladovo, Serbia, 2017, 5.-8. Jun, pp. MOI3.1.1-MOI3.1.5., ISBN: 978-86-7466-692-0.

5. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Popović, B., Vorkapić, M., Radojević, V.: „Hardness response and adhesion of thin copper films on alloy substrates“, -*Proceedings of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Electrical, Electronics and Computing Engineering, ICEtran 2017*, Kladovo, Serbia, 2017, 5.-8. Jun, pp. MOI1.3.1-MOI1.3.6, ISBN: 978-86-7466-692-0.

#### Категорија M34:

1. **Mladenović, I.**, Jakšić, Z., Obradov, M., Vuković, S., Isić, G., Tanasković, D., Lamovec, J.: „Subwavelength nickel-copper multilayers as an alternative plasmonic material“, - *Proceedings of the Abst. VI International School and Conference on Photonics PHOTONICA'17*, Belgrade, Serbia, 2017, 28. Aug.-1. Sep., pp. 199-199, ISBN:978-86-82441-46-5.
2. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Obradov, M., Popović, B., Vorkapić, M., Radojević, V.: „Preparation and mechanical characterization of copper thin films with additives on alloy substrates“, -*Proceedings of the Abst. Cost MPI402 Workshop, Institute of Chemistry, Technology and Metallurgy*, Belgrade, Serbia, 2017, 29.-30. Aug, pp. 18-19, ISBN: 978-86-81405-22-2.

#### Категорија M51:

1. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Radojević, V.: „Synergetic Effect of Additives on the hardness and adhesion of Thin Electrodeposited Copper Films“, - *Serbian Journal of Electrical Engineering*, Faculty of Technical Sciences Čačak, Serbia, vol. 14, no.1, pp. 1-11, 2017, ISSN: 1451-4869, DOI: 10.2298/SJEE1701001M.

#### Категорија M63:

1. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Radojević, V.: „Sinergetski efekat aditiva u procesu elektodepozicije Cu na različitim supstratima i uticaj na mikromehanička svojstva sistema“, - *Zbornik 60. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2016*, Društvo za Etran, Zlatibor, Srbija, 2016, 13.-16. jun, pp. MO1.1.1-MO1.1.6, ISBN: 978-86-7466-618-0.
2. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Radojević, V.: „Uticaj structure višeslojnih tankih filmova nikla i bakra na njihova mehanička svojstva i primenu u izradi MEMS naprava“, - *Zbornik 59. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2015*, Društvo za Etran, Srebrno jezero, Srbija, 2015, 8.-10. jun, pp. MO2.1.1-4, ISBN: 978-86-80509-71-6.
3. **Mladenović, I.**, Lamovec, J., Jović, V., Radojević, V.: „Uticaj aditiva tiouree na kompozitnu i apsolutnu tvrdoću elektrodeponovanih filmova bakra“, -*Zbornik 57. Konferencije za elektroniku, telekomunikacije, računarstvo, automatiku i nuklearnu tehniku, ETRAN 2013*, Društvo za Etran, Zlatibor, Srbija, 2013, 3.-6. jun, pp. MO3.2, ISBN: 978-86-80509-68-6.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходно наведеног, мишљење Комисије је да докторска дисертација, кандидата **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије, под насловом: „Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима“ представља оригинални научни допринос предметне области истраживања. Оригиналноост докторске дисертације кандидата је потврђена објављивањем више радова у часописима међународног значаја и излагањима на међународним скуповима. Постављени предмет и циљеви докторске дисертације су остварени, на основу чега Комисија износи своје мишљење да

докторска дисертација под називом „Синтеза и карактеризација слојевитих композитних структура за примену у микро електро механичким системима“ у потпуности испуњава све захтеване критеријуме, као и да је кандидат током израде дисертације показао самосталност и оригиналност у научно-истраживачком раду. Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, да прихвати овај Реферат, изложи на увид јавности поднету докторску дисертацију кандидата **Иване О. Младеновић**, дипл. инж. технологије у законом предвиђеном року, као и да Реферат упути Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду и да након завршетка процедуре позове Кандидата на усмену одбрану дисертације пред Комисијом у истом саставу.

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
Др Весна Радојевић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки  
факултет

.....  
Др Јелена Ламовец, доцент  
Криминалистичко-полицијски универзитет, Београд

.....  
Др Петар Ускоковић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки  
факултет

.....  
Др Небојша Николић, научни саветник  
Институт за хемију, технологију и металургију,  
Универзитет у Београду

.....  
Др Радмила Јанчић Heinemann, редовни професор  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки  
факултет