

НАСТАВНО- НАУЧНОМ ВЕЋУ
ТЕХНОЛОШКО- МЕТАЛУРШКОГ ФАКУЛТЕТА
УНИВЕРЗИТЕТА У БЕОГРАДУ

На седници Наставно - научног већа Технолошко - металуршког факултета Универзитета у Београду одржаној 9.04. 2015. године изабрани смо у Комисију за оцену и одбрану докторске дисертације кандидата дипл. инг. Милоша Ненадовића, под називом:

Морфолошка и структурна својства наночестица сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине

Комисија је прегледала докторску дисертацију и Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета подноси следећи

РЕФЕРАТ

о урађеној докторској дисертацији

1. УВОД

1.1 Хронологија одобравања и израде дисертације

-10.07.2012. године кандидат дипл. инг. Милош Ненадовић, пријавио је тему докторске дисертације под називом: „Морфолошка и структурна својства наночестица сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине” а Наставно - научно веће Технолошко - металуршког факултета у Београду усвојило је састав комисије за оцену научне заснованости предложене теме.

-20.09.2012. године на седници Наставно - научног већа Технолошко - металуршког факултета донета је Одлука о одобравању предлога теме докторске дисертације дипл. инг. Милоша Ненадовића, под називом: „Морфолошка и структурна својства наночестица сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине” , а за менторе ове докторске дисертације именовани су др Ђорђе Јанаћковић, редовни професор ТМФ-а и др Златко Ракочевић, научни саветник ИНН Винча.

-22.10.2012. године на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације дипл. инг. Милоша Ненадовића, под називом: „Морфолошка и структурна својства наночестица сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине”.

-09.04.2015. године на седници Наставно - научног већа Технолошко - металуршког факултета донета је Одлука о именовању чланова Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације дипл. инг. Милоша Ненадовића, под називом: „Морфолошка и структурна својства наночестица сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине”.

1.2 Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Хемија и хемијска технологија (ужа област инжењерство материјала), за коју је матичан Технолошко - металуршки факултет Универзитета у Београду.

Ментор др Ђорђе Јанаћковић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, је до сада објавио преко 90 радова у часописима са SCI листе. Руководио је иновационим пројектима и пројектима основних и интегралних интердисциплинарних истраживања. Такође, руководио је и EUREKA и FP7 пројектима. Тренутно руководи пројектом Министарства просвете, науке и технолошког развоја III 45019, под називом: “Синтеза, развој технологија добијања и примена наноструктурних мултифункционалних материјала дефинисаних својстава”. Наведени подаци говоре о компетентности др Ђорђа Јанаћковића да руководи израдом ове докторске дисертације.

Ментор др Златко Ракочевић, научни саветник ИНН Винча, је из ових области публиковао више од 100 научних радова који су на SCI листи и руководио је пројектима основних, интегралних и интердисциплинарних истраживања. Тренутно руководи пројектом Министарства просвете, науке и технолошког развоја III 45005 из области Нових материјала и нано наука, под називом: Функционални, функционализовани и усавршени нано материјали. Све наведено говори о компетентности да руководи израдом ове докторске дисертације.

1.3 Биографски подаци о кандидату

Милош Ненадовић рођен је 22.01.1982. године у Београду. Основну школу и гимназију завршио је у Београду. Дипломирао је 23. 03. 2007. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, са темом: “Синтеза и карактеризација нанопрахова на бази CeO_2 ” под менторством др Ђорђа Јанаковића, ред. проф. на Катедри за Неорганску хемијску технологију.

Докторске студије уписао је 2007. године на студијском програму „Хемија и инжењерство материјала” Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду, под менторством др Ђорђа Јанаковића ред. проф. на Катедри за Неорганску хемијску технологију.

Од јануара 2008. године запослен је у Институту за нуклеарне науке “Винча”, у Лабораторији за атомску физику под непосредним руководством др Златка Ракочевића, научног саветника у Институту за нуклеарне науке “Винча”. Био је ангажован на пројекту Министарства за науку и технолошки развој бр. 141001 под називом „Добијање и карактеризација површина наноструктурних материјала” (2006-2010). Тренутно је ангажован на пројекту интегралних и интердисциплинарних истраживања “Функционални, функционализовани и усавршени наноматеријали” бр. III45005 под руководством др Златка Ракочевића, научног саветника у Институту за нуклеарне науке “Винча”.

Досадашњи истраживачки рад на пројектима Министарства за науку и технолошки развој као резултат су дали велики број публикација у водећим међународним часописима али и у водећим домаћим часописима. У вези са докторском дисертацијом публиковао је четири рада у врхунском међународном часопису (M21), два рада у часопису националног значаја (M52) и једним саопштењем на скупу међународног значаја штампаног у изводу (M34).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1 Садржај дисертације

Докторска дисертација дипл. инг. Милоша Ненадовића написана је на 232 стране, у оквиру којих се налази 18 поглавља, са укупно 122 слике, 8 табела и 127 литературних навода. Докторска дисертација садржи: Увод, Теоријски део (два поглавља), Експериментални део (два поглавља), Резултате и дискусију (седам поглавља), Закључак и Литературу. На почетку дисертације дати су изводи на српском и енглеском језику.

2.2 Кратак приказ појединачних поглавља

У уводу су образложени предмет и циљеви истраживања у оквиру докторске дисертације. Указано је на предности и мане јонске имплантације у полимерне и

друге материјале. Када је започето са применом јонске имплантације у полимерне материјале (пре око 30 година) уочено је да се многа својства полимера могу изменити. Механичка, триболошка, електрична, оптичка, антибактеријска и друга својста се могу прецизно контролисати, добрим дефинисањем параметара имплантације.

Теоријски део је приказан у два поглавља (Полиетилен велике густине (HDPE) и Јонска имплантација) која се даље састоје од 6 потпоглавља. У првом поглављу представљена су основна својства полиетилена као комерцијално најзаступљенијег полимера. Поред тога дат је теоријски приказ физичких и фазних стања полимерних материјала као и преглед деградационих процеса који су веома чести код ове групе материјала. У другом поглављу представљена је јонска имплантација као веома напредна техника за модификацију површине материјала. Са тим у вези су објашњени процеси који се јављају у току јонске имплантације и дефинисани су основни параметри јонске имплантације. У посебном подпоглављу приказан је процес имплантације у полимерне материјале који се одликује извесним особеностима у односу на имплантиране јоне остале класе материјала. Овај сегмент дисертације је веома важан са аспекта разумевања процеса приликом имплантације јона метала у полимерне материјале.

У поглављу Експериментални део представљена је експериментална опрема и технике које су коришћене за извођење овог експеримента. Описана је инсталација 500 keV јонског имплантера и дат је детаљан приказ диспозиције и саставних делова имплантера. Затим је описан AFM микроскоп који је коришћен приликом карактеризације наноструктурних система HDPE/Ag и HDPE/Au, са пратећим техникама: Tapping Mode – Тачкаста метода, Phase mode – Фазни начин снимања и Force-Modulation Microscopy (FMM) – Микроскопија са променљиво - контролисаном силом. Поред најважнијих метода примењених у овој дисертацији представљене су и две веома значајне технике Спектроскопска елипсометрија (SE – Spectroscopic Ellipsometry) и Мерење контактнoг угла (CAM – Contact angle measurement). Ове технике су додатно употпуниле карактеризацију наноструктурних система HDPE/Ag и HDPE/Au и дале су додатну тежину анализираним резултатима.

Друго поглавље Експерименталног дела се односи на Ток експеримента. У овом поглављу приказани су прелиминарни резултати добијени теоријском симулацијом пројектованих домета и имплантационих профила SRIM програмским пакетом. Ови резултати су пружили веома корисне информације значајне за даљи ток експеримента. Након извршених серија експеримената имплантације јона сребра и злата у полиетилен велике густине, извшене су морфолошка и структурна анализа наночестица сребра и злата у HDPE. Методе коришћене за квалитативну и квантитативну потврду јона сребра и злата у HDPE биле су: анализа масеном спектрометријом (ICP – MS), Рендгено – структурна анализа (XRD), Електронска микроскопија (SEM, TEM) и рендгенска фотоелектронска

спектроскопија (XPS - X Ray Photoelectron Spectroscopy). Све четири методе показале су присуство сребра и злата и полиетилену велике густине.

На крају експерименталног дела представљене су и све остале експерименталне технике коришћене у овој докторској дисертацији.

Поглавље Резултати и дискусије представља најкомплекснији део ове дисертације. Подељено је на 7 поглавља. Свако поглавље се састоји од низа подпоглавља и представља целину за себе.

У првом поглављу Резултата и дискусије извршена је Анализа оптичких параметара имплантираног полиетилена велике густине, где су испитана оптичка својства имплантираних система. Елипсометријска карактеризација показала је значајне промене у оптичким спектрима HDPE/Ag и HDPE/Au у односу на HDPE, где је дошло до оптичке активације имплантираног HDPE на тачно одређеним вредностима таласних дужина.

Друго поглавље је посвећено Карактеризацији површинских, структурних и морфолошких промена и анализи попречног пресека помоћу микроскопа атомских сила – AFM. Анализиране су промене настале на површини HDPE услед дејства јона сребра и злата. Те промене су праћене топографском и фазном променом на имплантираној површини. У зависности од дозе, енергије и врсте јона дошло је до великих разлика у структури површине. Упоредо са анализом површине извршена је и карактеризација попречног пресека методом микроскопије са променљиво - контролисаном силом (AFM – FMM). Анализом попречних пресека дошло се до података о ширини зоне радијационог оштећења као и о реалном пројектованом дometу јона у полимерној основи. Јони сребра су показали тенденцију продирања у дубину, док су јони злата показали заустављање на мање пројектованим дometима. Код имплантације две јонске врсте дошло се до закључка да редослед имплантације јонских врста битно утиче на својства имплантираног слоја и на зону радијационог оштећења.

Треће поглавље Резултата и дискусије односи се на анализу површина. У оквиру овог поглавља су три подпоглавља: Анализа површинске хrapавости (RMS), Карактеризација површине имплантираних узорака анализом функције спектра снаге (PSD - Power Spectral Density) и Анализа фазног састава површина. Прво подпоглавље се бави анализом површинске хrapавости као последица различитих реакционих механизма на површини HDPE. Уочено је да јони сребра и злата потпуно другачије хrapаве површину HDPE при истим дозама и енергијама. Из тог разлога уведена је и комплементарна метода за анализу кинетичких параметара модификоване површине – функција спектра снаге (PSD - Power Spectral Density).

Ова техника прецизније говори о промени морфологије током процеса односно величини и дистрибуцији појава на површини насталих услед јонске имплантације. Запажено је да јони злата формирају ситнозрнију структуру на површини HDPE у односу на јоне сребра, што је дефинитивно последица скоро двоструко веће масе. Као још једна комплементарна метода у оквиру анализе површина, је и анализа

фазног састава површина, којом се одређују промене настале на површини услед јонске имплантације изражене преко промене коефицијента вискозности површине. Јонска имплантација је показала да искључиво доводи до повећања површинске вискозности, односно до реакције умрежавања (cross – linking). Скоро исти ефекти умрежавања су постигнути имплантацијом јона сребра и злата, с тим што су јони злата изазвали веће иницијално оштећење површине HDPE.

У наредном поглављу приказани су резултати мерења контактнoг угла и одређене су слободне површинске енергије. Ова техника је показала веома велике разлике у квалитету површине и њеној адхезивности у зависности од услова јонске имплантације. Укупни тренд је показао да јони сребра имплантирани у HDPE доводе до смањења слободне површинске енергије и то узрокује лошија својстава такве површине. Са друге стране, јони злата су побољшали адхезивност имплантиране површине, значајним повећањем слободне површинске енергије. Код имплантације две јонске врсте, очигледан је утицај оба јона, као и редоследа имплантације јонских врста. Доминантнији утицај има друга по реду имплантирана јонска врста.

Након тога су резултати анализе површина инфрацрвеном спектроскопијом (FTIR – ATR), где је показано да приликом имплантације у HDPE долази до промене хемијских веза, како на површини тако у зони радијационог оштећења. Највеће промене хемијских веза изазване су имплантацијом јона злата, док су јони сребра изазвали нешто мање хемијске промене.

Последња два поглавља ове дисертације односе се на конкретне примене добијених наноструктурних система HDPE/Ag и HDPE/Au.

Прво од два поглавља везаних за примене добијених система односи се на испитивање стабилности полиетилена велике густине симулацијом експлоатације у реалним условима озон третманом. Након озон третмана у трајању од 2 сата, ефекти који су се јавили на узорцима имплантираним јонима злата енергија од 50 до 200 keV, извршена је детаљна структурна и морфолошка карактеризација. На површини озонираног HDPE јавиле су се карактеристиче сферне појаве веома малих димензија (реда величине неколико нанометара). Промена површинске храпавости је веома значајна, јер је негде повећана и преко три пута. Анализом функције спектра снаге је потвђено постојање веома ситних појава на површини полиетилена велике густине, што се манифестује интензивношћу спектралне линије у високофреквентном делу PSD спектра. Фазни састав озонираних узорака показао је веома велика одступања у односу на имплантиране. Дошло је до померања фазних пикова ка мањим вредностима вискозности (веће вредности фазних углова). То доводи до несумњивог закључка да озонирање доводи до прекидања полимерних ланаца (scission), што је потпуно супротан процес који се јавља током јонске имплантације (cross – linking). Испитивањем контактних углова и израчунавањем слободне површинске енергије, дошло се до закључка да су озонирани узорци адхезивнији и термодинамички стабилнији од само

имплантираних. То је потврђено смањењем вредности контактних углова, односно повећањем вредности слободне површинске енергије.

Друго поглавље везано за примене испитиваних наноструктурних система HDPE/Ag и HDPE/Au, се бави Испитивањем антибактеријских својстава HDPE имплантираног јонима сребра и јонима злата. Због потенцијалне клиничке примене ових система, јако је важно имати информацију о њиховим инхибиторним својствима. Испитана су инхибиторна својства на два типа најчешћих клиничких микроорганизама *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*, грам – позитивна) и *Escherichia coli* (*E. Coli*, грам – негативна). Показано је да имплантирани јони сребра и злата имају скоро исти ефекат на успоравање раста ових микроорганизама. Имајући то у виду сребро као многоструко јефтинији метал се препоручује за овакве врсте модификације медицинских полимера. Већи степен инхибиције је постигнут у свим случајевима код бактерије *S. aureus*, док је *E. Coli* показала велику резистивност на обе врсте јона. Пресудан фактор код успоравања раста микроорганизама на модификованим површинама полимера представља и концентрација (доза) имплантираних јона. Минимална доза код које уопште долази до инхибиторних ефеката је $1 \cdot 10^{16}$ јона/cm².

У Закључку дисертације сумирани су најзначајнији закључци који су изведени у току ових истраживања.

У делу Литература цитиране су референце коришћене у току израде докторске дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1 Савременост и оригиналност

Убацавање јона племенитих метала у полимерну основу постало је веома актуелно у последњих 20 година. Нарочити значај оваквих система је у постизању оптималних параметара јонске имплантације и што прецизнија контрола услова приликом јонске имплантације у полимер. Деградабилност полимерне основе кроз радиолизу и термолизу у великој мери усложњавају поступак добијања наноструктурних система метал – полимер.

Из тог разлога је у оквиру ове докторске дисертације урађена имплантација јона сребра и злата различитих енергија и доза. Ефекти који су се јавили умногоме се допринели да се овакви системи боље упознају и разумеју. Досада нису вршена испитивања сличних система, јер су постојале објективне потешкоће у добијању снопа јона злата енергије 200 keV. Ова дисертација је укључила испитивање средњих и великих енергија и последице које се јављају након имплантације. Велики степен радијационих оштећења јонима злата и мали степен оштећења јонима сребра, дали су добре основе за даље разумевање процеса на површини HDPE и у областима блиским површини.

Литературни подаци су такође опречни у мишљењима када је реч о наноструктурним системима HDPE/Ag и HDPE/Au. Неки извори наводе да аморфна подручја у полимерним материјалима трпе веће промене од кристалних. Други извори тврде обратно. Ова дисертација је показала да и аморфна и кристална подручја скоро подједнако трпе промене изазване јонском имплантацијом, нарочито јонима злата енергије 200 keV. Велике енергије тешких јона, доводе до великих радијационих оштећења у свим областима полимера. То додатно усложњава процес добијања жељеног материјала, јер помера пројектовани домет на мање дубине. Контрола процеса је у том случају отежана, па се мора имати веома добро предзнање о ефектима модификације полимерних материјала јонима тешких метала.

Наноструктурни системи HDPE/Ag и HDPE/Au показали су различита нова и побољшана својства површина у односу на нетретиран HDPE. Промењена зрновитост, кристаличност и храпавост површине довеле су до значајних промена у квалитету површинске адхезивности, отпорности на спољашње утицаје као и до инхибирајућих својстава на одређене типове микроорганизама. Потенцијалне примене ових система као веома брзи сензори, представљају будући смер истраживања и окосницу даљег дефинисања експеримената.

3.2 Осврт на референтну и коришћену литературу

У току израде докторске дисертације кандидат је детаљно анализирао литературу из предметне области, а у литературном прегледу је наведено 127 референци. Највећи број цитираних референци чине радови из врхунских међународних часописа, са тематиком значајном за израду докторске дисертације. Анализирани су радови који се односе на јонску имплантацију у кристалне и полимерне материјале. Акценат је наравно био на литератури везаној за имплантацију у полимерне материјале, као и на теоријским основама јонске имплантације у полимерне системе. Нарочито важно је да нема пуно литературних података о имплантацији јона злата у полимерну основу, тако да један од битнијих навода и кандидатов научни рад везан за докторску дисертацију. Детаљна анализа литературних података омогућила је дефинисање плана истраживања и објашњење резултата добијених у току израде докторске дисертације. У оквиру литературних навода, налазе се и референце кандидата дипл. инг. Милоша Ненадовића, проистекле из ове дисертације, које су објављене у врхунским међународним часописима и водећем домаћем часопису.

3.3 Опис и адекватност примењених научних метода

У оквиру докторске дисертације наноструктурни системи HDPE/Ag и HDPE/Au добијени су јонском имплантацијом. Они представљају такве системе у којима су јони скоро појединачно инкорпорирани у полимерној основи или формирају наночестице у распону од 5 до 15 nm. Циљ ове дисертације је био да се добију наночестице тих димензија. Сходно томе су примењене дозе имплантације од $1 \cdot 10^{15}$, $5 \cdot 10^{15}$ и $1 \cdot 10^{16}$ јона/cm². Одабир енергија имплантације је такође веома пажљиво извршен са циљем да се испитају различити ефекти радијационих оштећења у полимерној основи и да се добије систем са што оптималнијим својствима. Под оптималним својствима се подразумева да су имплантирани јони смештени што ближе површини и да врше утицај на њу. Са друге стране потребно је да буду и довољно дубоко у материјалу да се не би лако уклонили из њега.

Да би се овако добијени наноструктурни системи HDPE/Ag и HDPE/Au што боље окарактерисали и дефинисали, коришћене су следеће научне методе и технике: у циљу провере и потврде ваљаности изведеног експеримента урађене су прелиминарне методе карактеризације: масена спектрометрија (ICP – MS), рендгено – структурне анализе (XRD) и рендгенске фотоелектронске спектроскопије (XPS). Оптичка карактеризација узорака извршена је морфолошке спектроскопским елипсометром (SE). Површинске и фазне промене површине извршене су у AFM tapping режиму, док су попречни пресеци, пројектовани домети и зоне радијационих оштећења испитане применом микроскопије са променљиво – контролисаном силом (FMM – Force modulation microscopy). Функција спектра снаге (PSD – Power Spectral Density) пружа веома прецизне податке о расподели и величини појава на површини, као и вредности карактеристичних димензија за сваки узорак. Испитивање вредности контактног угла између референтне течности и анализиране површине такође је обезбедило додатне информације о хомогености површине и о њеном афинитету према поларним или неполарним супстанцама.

Све примењене научне методе и експерименталне технике дале су укупан увид у степен промена изазван јонском имплантацијом у полиетилен велике густине. Битна карактеристика примењених научних метода је и њихова комплементарност и репродуктивност. Почевши од потврде ваљаности изведеног експеримента па све до структурних и морфолошких својстава наноструктурних система HDPE/Ag и HDPE/Au, примењене научне методе су дале пун допринос разумевању.

По први пут је коришћена FMM метода за снимање попречних пресека и пројектованих домета јона сребра и злата у HDPE.

3.4 Применљивости остварених резултата

Резултати остварени у овој докторској дисертацији дају значајан допринос повећању нивоа знања у области имплантације јона метала у полимерне материјале. Добијени резултати показују колико параметри имплантације (доза, енергија, врста јона) утичу на својства добијеног наноструктурног система метал – полимер. Површинска карактеризација је показала значајне промене у зрновитости површине и у њеном афинитету према другим супстанцама. Карактеризација попречних пресека је дала увид у померање пројектованих домета јона сребра и злата са различитим дозама и енергијама. Сва структурна и морфолошка својства добијених система су у функцији потенцијалне примене. Две конкретне примене су испитане и у оквиру докторске дисертације а то су: испитивање стабилности полиетилена велике густине симулацијом експлоатације у реалним условима озон третманом и испитивање антибактеријских својстава HDPE имплантираног јонима сребра и јонима злата. Ове анализе су дале веома важне податке о потенцијалној примени модификованих полимера у биомедицини. Реална експлоатација овог материјала испитана је применом озон третмана. Из тог разлога је веома важно знати колика је деградибилност насталих система HDPE/Ag и HDPE/Au и колики је експлоатациони и радни век ових наноструктурних система.

3.5 Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат дипл. инг. Милош Ненадовић је током израде докторске дисертације показао велику стручност у припреми и реализацији експеримента, коришћењу различитих техника карактеризације добијених материјала и анализи резултата. Кандидат поседује све квалитете који су неопходни за самостални научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1 Приказ остварених научних доприноса

У оквиру ове докторске дисертације остварен је значајан допринос разумевању наноструктурних система HDPE/Ag и HDPE/Au, као и процеса јонске имплантације јона тешких метала у полимерну основу. Најзначајнији научни доприноси ове дисертације су:

- Одређивање оптималних енергија и доза имплантације јона сребра и злата у полиетилен велике густине.
- Утврђивање реалних домета јона и корекције теоријских имплантационих профила.
- Одређивање механизма модификације површине полиетилена на основу анализе храпавости површине и функције спектра снаге.

- Одређивање степена уређености површине имплантираног полиетилена велике густине анализом фазног састава површине.
- Утврђивање животног века имплантираног и неимплантираног полиетилена експлоатацијом у реалним условима применом озон генератора.
- Доказивање инхибиторних својстава имплантираних узорака на различите типове микроорганизама.
- Одређивање адхезивних својстава имплантираног полиетилена велике густине на основу одеђивања контактеног угла и површинске енергије помоћу две референтне течности.

4.2 Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у оквиру ове дисертације су конципирана након детаљне анализе литературе из области јонске имплантације у полимерне материјале. Велики број научних публикација се бави сличном проблематиком, међутим мали је број радова који се бави имплантацијом јона злата у полимерни материјал. Објективне потешкоће које се јављају приликом добијања ових снопова јона су и разлог за непостојање већег броја публикација. Што се тиче имплантације јона сребра у полимерне материјале, ту је ситуација потпуно другачија и постоји довољно референтних публикација које су допринеле квалитету ове дисертације. Велики број радова се бави имплантацијом јона метала у полимера али на нижим енергијама. Ова дисертација је узела у обзир и ниже и више енергије јона сребра и злата и дала упоредну анализу система насталих при тим условима. Поред тога урађене су и коимплантације две врсте јона, различитим редоследима. У литератури постоји такође јако мало података о ефектима коимплантације и наноструктурном легирању у полимерној основи. Истраживања у оквиру дисертације су показала ефекте синергетског дејства две врсте јона на својства површине, фазног састава, адхезивности и зоне радијационог оштећења.

Поједини аутори тврде да само аморфна подручја у полимеру трпе радијациона оштећења услед мањег степена уређености. Међутим, показано је у овом раду да и аморфна и кристална подручја полиетилена велике густине трпе подједнаке промене, при довољно великим дозама и енергијама јона. На тај начин је могуће извршити хомогену модификацију површине полимерног материјала. Треба водити рачуна и о параметрима имплантације (доза, енергија) да не би дошло до великог степена радиолизе и термолизе полимера у односу на површинску модификацију. Оптимизација параметара имплантације је извршена врло пажљиво након детаљних теоријских симулација помоћу програмског пакета SRIM 2008 (The Stopping and Range of Ions in Matter). Експериментални резултати су показали (што је и литературно потврђено) да програмски пакет SRIM 2008 има да не може добро да симулира реалних пројектованих домета у полимерним

материјалима. Користећи Monte Carlo нумеричку методу SRIM 2008 не може да предвиди колики је степен радиоллизе и термолизе полимерне основе услед дејства јона. Такође, SRIM 2008 не урачунава јон - јон интеракције у материјалу, већ засебно третира сваки појединачни јон. Из тог разлога се експериментални пројектовани домети јако много разликују од теоријских, нарочито код имплантације јона злата енергије 200 keV.

Резултати истраживања у оквиру ове докторске дисертације су потврдили да се прецизним одабиром параметара имплантације могу добити наноструктурни системи HDPE/Ag и HDPE/Au тачно жељених својстава. Степен површинске модификације, зона радијационог оштећења, расподела нанометарских кластера и остала својства су директна последица услова јонске имплантације. Јони сребра имплантирани у полимер су изазвали мањи степен укупних промена, док су јони злата изазвали веће промене. Специфичност ових наноструктурних система пружа велике могућности за потенцијалне примене. Ова дисертација је показала да је радни век имплантираних полимера продужен у односу на и да постоји велика шанса за клиничком применом. Система HDPE/Ag и HDPE/Au су показала директну везу степена инхибиције микроорганизама са концентрацијом (дозом) имплантираних јона.

4.3 Верификација резултата у часописима и саопштењима на конференцијама

Кандидат дипл. инг. Милош Ненадовић је своје резултате потврдио објављивањем четири рада у врхунском међународном часопису (M21), два рада у часопису од националног значаја (M52) и једним саопштењем на скупу међународног значаја штампаног у изводу (M34).

Научни радови објављен у врхунском часопису међународног значаја (M21)

- 1. M. Nenadović, J. Potočnik, M. Ristić, S. Štrbac, Z. Rakočević, Surface modification of polyethylene by Ag⁺ and Au⁺ ion implantation observed by phase imaging atomic force microscopy, Surface and Coatings Technology, 206 (2012) 4242–4248 (ISSN 0257-8972) (IF (2012)= 1.941).**
- 2. Strbac Svetlana B., Nenadovic M., Rajakovic Ljubinka V., Rakocevic Zlatko Lj., Chemical surface composition of the polyethylene implanted by Ag⁺ ions studied by phase imaging atomic force microscopy Applied Surface Science, 256 (2010) 3895-3899 (ISSN 0169-4332) (IF (2012)= 2.112).**
- 3. M. Nenadović, J. Potočnik, M. Mitrić, S. Štrbac and Z. Rakočević, Modification of high density polyethylene by gold implantation using different ion energies,**

Material Chemistry and Physics, 142 (2013) 633-639. (ISSN 0254-0584) (IF (2012)=2.072).

4. Danilo Kisić, **Miloš Nenadović**, Svetlana Štrbac, Borivoj Adnadjević, Zlatko Rakočević, **Effect of UV/ozone treatment on the nanoscale surface properties of gold implanted polyethylene**, Applied surface science, 307 (2014) 311-318, (ISSN 0169-4332) (IF (2012)= 2.112).

Радови објављени у часопису националног значаја (М 52)

1. **Nenadovic Milos**, Strbac Svetlana, Rakocevic Zlatko, **Effect of silver ion implantation on the surface of polyethylene**, Tehnika, Novi materijali (Belgrade, Serbia) 63(5) (2008) YU ISSN 0040-2176, UDC:62(062.2) (497.1)

2. **M. Nenadovic**, Z. Bogdanov, S. Strbac, Z. Rakocevic, **Force Modulation Microscopy – The Implantation Profile of Ag⁺ Ions in Polyethylene**, Tehnika, Novi materijali (Belgrade, Serbia), 64(3) (2009) YU ISSN 0040-2176, UDC:62(062.2) (497.1)

Рађ саопштен на скупу међународног значаја штампан у изводу (М 34)

1. **M.Nenadović**, J.Potočnik, S.Štrbac, Z.Rakočević, **Surface modification of high density polyethylene by Au⁺ ion implantation observed by phase imaging atomic force microscopy**, The First Serbian Ceramic Society Conference “Advanced Ceramics and Applications”, May 10-11, 2012, Belgrade, Serbia, The Book of Abstracts, pp.20.

5. ЗАКЉУЧАК

Кратак осврт на дисертацију у целини

На основу свега претходно изнетог, Комисија сматра да докторска дисертација дипл. инг. Милоша Ненадовића, под називом: „Морфолошка и структурна својства наночестица сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине”, представља веома значајан и оригинални научни допринос у области Хемија и Хемијска технологија (ужа област Инжењерство материјала), што је потврђено објављивањем радова у врхунским часопису има међународног значаја, у часопису националног значаја и саопштењем на скупу међународног значаја.

Предлог Комисије Наставно – научном већу

Комисија предлаже Наставно – научном већу ТМФ – а да прихвати овај извештај и да га заједно са поднетом дисертацијом дипл. инг. Милоша Ненадовића, под називом: „Морфолошка и структурна својства наночестица

сребра и злата добијених јонском имплантацијом у полиетилен велике густине” изложи на увид јавности у законски предвиђеном року и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, те да након завршетка ове процедуре, позове кандидата на усмену одбрану дисертације, пред Комисијом у саставу:

У Београду, 30.04. 2015.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

1. др Ђорђе Јанаћковић, редовни професор, ментор
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

2. др Златко Ракочевић, научни саветник, ментор
Универзитет у Београду, Институт за нуклеарне науке Винча

3. др Светлана Штрбац, научни саветник, члан комисије
Универзитет у Београду, Институт за хемију, технологију и металургију

4. др Рада Петровић, редовни професор, члан комисије
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет