

ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ: Нова метода (M85)

ФРАКТАЛНА ГЕОМЕТРИЈА У КАРАКТЕРИЗАЦИЈИ ТОПОГРАФИЈЕ ОБРАЂЕНИХ ПОВРШИНА

Др Божица Бојовић, Проф. др. Зоран Мильковић, Проф. др. Бојан Бабић,
Најдан Вуковић, дипл.маш.инж.

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Техничко решење припада области микро и нанотехнологија, за које нису стандардом прописани параметри храпавости. Прихваћено је од стране ФМП д.о.о. који је корисник резултата Пројекта технолошког развоја бр. ТР-14031 и то за случај челичног лима који је предмет истраживања. Техничко решење је укључено у лабораторијске вежбе из предмета Интелигентни технолошки системи на модулу за производно машинство, Методе одлучивања на модулу за дизајн у машинству и Нанотехнологије на модулу за Биомедицинско инжењерство.

2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

Стандардни параметри храпавости нису сасвим адекватни, јер ни један од 64 параметара не може описати површину у потпуности. На пример, основни параметар храпавости - средње аритметичко одступање R_a , не прави разлику између „врхова“ и „долина“, нити даје информацију о просторном распореду. Више детаља о површини пружају 3D параметри срачунати на основу измерених топографских података. Скуп стандардних S параметара груписаних у четири категорије (амплитудни, просторни, хибридни и функционални) проширују степен до кога се може описати површина и функција. Ипак се и даље морају користити, нпр. амплитудни и функционални параметри за карактеризацију и предикцију. Значајна пажња је у последње време усмерена на фракталну карактеризацију површинске топографије и њену примену. Корени се налазе у чињеници да фрактални приступ може помоћи да се превазиђу тешкоће са којима се конвенционалне статистичке методе суочавају, а посебно мултискални карактер храпавости и њена нестационарност [1]. Топографија се представља као матрица површине и може се мерити скенирајућим техникама. Од свих постојећих метода, у пракси се као најбоља показала скенирајућа микроскопија базирана на примени атомске силе (*Atomic Force Microscopy-AFM*), јер површине могу бити мерене у присуству влаге, чак и течности, а нема потребе за вакуумом. Може се користити за мерење ломљивих, осетљивих мерних предмета, а у зависности од конкретног уређаја и у нелабораторијским условима.

Очигледан начин да се опише храпавост је испитивање разлике у распореду висина. Одређивање фракталне димензије снимка, омогућава процену фракталне димензије 3-D површине. Предложена нова метода је заснована на развијеној, која је позната под називом „метода небодера“ (енгл. *Skyscrapers*). За разлику од постојеће, код које се одређивање фракталне димензије снимка базира на висини неравнина, представљеном нијансом сиве боје у интервалу [0,255], нова метода користи висине неравнина које су у текстуалној датотеци придруžеној AFM снимку, представљене бројчаним вредностима у интервалу [0,65535]. Самим тим што је висина неравнина у сваком пикселу, код датотеке у текстуалном формату, приказана у далеко већем броју нијанси сиве (до 256 пута више) у поређењу са оном коју даје датотека у графичком формату, нова модификована метода израчунава фракталну димензију која је више тачности у поређењу са оном која је добијена извornом методом.

3. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ У СВЕТУ

Фрактална анализа слике је користан алат за издвајање структурних информација из дигиталних слика. При томе се фрактална димензија слике користи као квантifikатор комплексности. Осамдесетих година је доказано од стране Пентланда (*Pentland*) да разлика у текстури слике зависи од фракталне димензије, а самим тим и храпавост реалног 3-D објекта, као и да је слика фракталне површине такође фрактал, што је дато у [2]. Стога се може извршити процена 3-D површинске храпавости преко података генерисаних из дигиталне слике. Дигитални

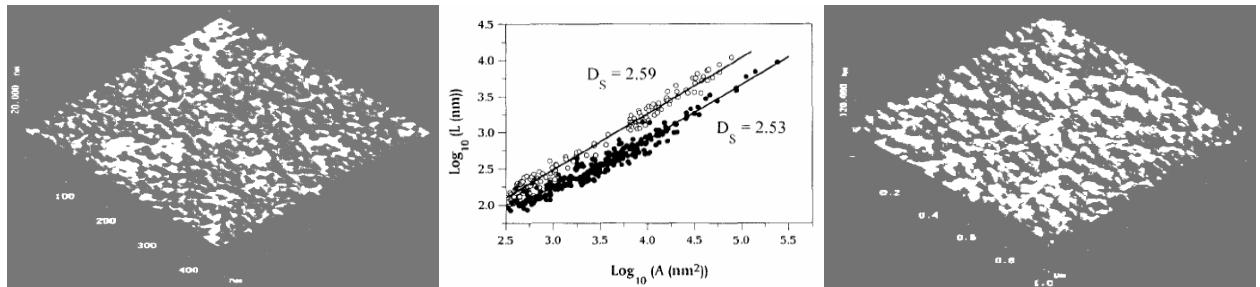
микроскопски снимци се могу третирати као матрица пиксела са познатим координатама x и y , које представљају њихову позицију и са z координатом која представља интензитет сиве боје. Постоје бројни методи за одређивање фракталне димензије на основу добијене слике неке реалне површине.

Метод „острва“ (енгл. *Slit-island method-SIM*) за прорачун фракталне димензије површине је предложен од стране Манделброта [3], који је описујући релацију између површине острва A и периметра L (дужине обода) открио постојање фракталне димензије D у њој, као што је то и приказано у једначини (1). Логаритмовањем ова једначина постаје једначина праве, чији је нагиб у релацији са фракталном димензијом контуре острва, а она сама је за један мања од фракталне димензије површине.

$$L^{1/D_c} \propto A^{1/2} \quad (1)$$

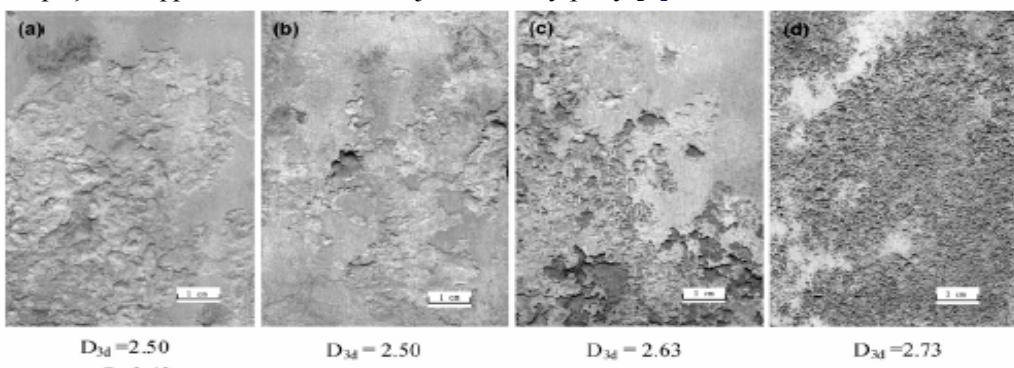
Метод „острва“ примењен у [4], подразумева да је претходно снимљена површина скенирајућом микроскопијом „исечена“ на нивое. Добијени пресеци на одређеним висинама, подсећају на потопљене пределе и издвајају се тзв. острва, што је на слици 1. приказано за две различите површине. За добијене контуре, дијаграмски приказ парова тачака (A , L) у дуплој логаритамској скали, дат на слици 1. у средини, моделиран је правама. Нагиб праве M је у корелацији са фракталном димензијом површине, као што је то и приказано у једначини (2).

$$D_s = 2 \cdot M + 1 \quad (2)$$



Слика 1. AFM снимци узорак од силико/алумина (лево) и PECVD (десно) напуњених водом до одређеног нивоа и дијаграмски приказ (у средини) зависности периметра од површне језера за узорак од силико/алумина (○) и PECVD (●) [4]

Метод „мреже“ је познат под различитим називима, али су два најпознатија енгл. *Box counting method* и *Grid method*. Овај се метод најчешће користи код одређивања фракталне димензије контуре или објекта са снимка неке површине. Првобитни метод предложен од Пентланда се састојао у покривању објекта квадратима, или круговима. Сукцесивно смањивање странице, одн. пречника и преbroјавање прекривајућих елемената, уз одређивање фракталне димензије потиче из релације (3). Она дефинише фракталну димензију D објекта као граничну вредност односа броја прекривајућих елемената N_r (квадрати или кругови) и величине која их одређује r (страница или пречник). Метод „мреже“, прилагођен одређивању фракталне димензије снимка, утврђује фракталну димензију снимка користећи нагиб праве којом се апроксимирају парови ($\log N_r$, $\log(1/r)$). На слици 2. су приказани снимци кородираних површина и методом „мреже“ одређеним фракталним димензијама, дати у раду [5].



Слика 2. Снимци кородираних површина и одговарајуће фракталне димензије [5]

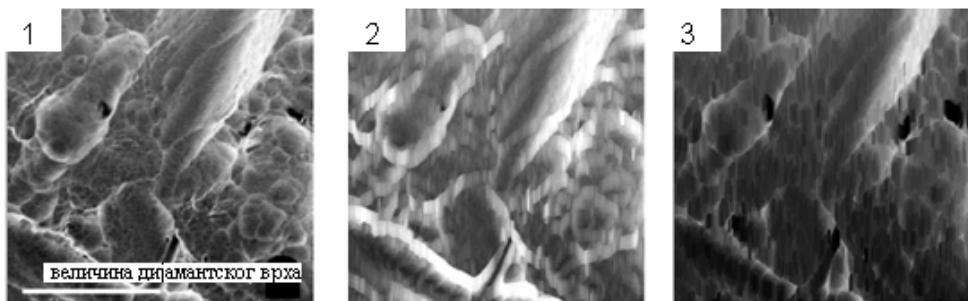
$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N_r}{\log(1/r)} \quad (3)$$

Метод „покривача“ (енгл. *Blanket*) је описан од стране Пелега (*Peleg*) у [6]. Фрактална димензија се одређује преко дилатације и ерозије снимка. Дилатацијом и ерозијом слике добијају се две нове, што је на слици 3. приказано. Запремина покривача, тј. запремина заробљена између горње $u_\varepsilon(x,y)$ и доње $b_\varepsilon(x,y)$ слике је дефинисана релацијом (4). Површина слике $A_{(\varepsilon)}$, измерена структурним елементом величине ε , дата је релацијом (5). Фрактална димензија се одређује на основу дијаграмског приказа површине у зависности од елементарне величине, и то из нагиба праве, дате релацијом (6), којом се апроксимирају парови $(\log A_{(\varepsilon)}, \log \varepsilon)$.

$$V_{(\varepsilon)} = \sum [u_\varepsilon(x, y) - b_\varepsilon(x, y)] \quad (4)$$

$$A_{(\varepsilon)} = \lfloor V_{(\varepsilon)} - V_{(\varepsilon-1)} \rfloor / 2\varepsilon \quad (5)$$

$$\log A_{(\varepsilon)} = c + (2 - D) \log \varepsilon \quad (6)$$

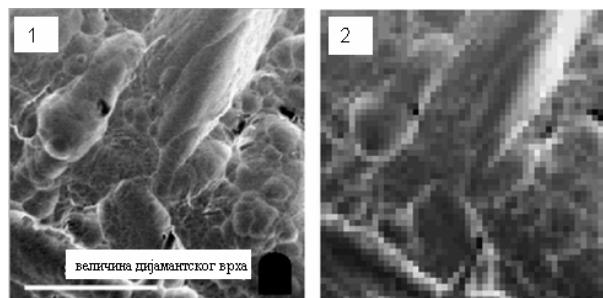


Слика 3. SEM снимак узорка од титанијума са 3000 увећањем (1) и примењен метод покривача за $\varepsilon=10$ за горњу (2) и за доњу површину (3) [7]

Метод „небодера“ (енгл. *Skyscrapers*) је првобитно предложио Колдвел (Caldwell) за прорачун фракталне димензије дигиталне мамографије. Пиксели који чине снимак се могу сматрати небодерима, чија висина $z(x,y)$ представља интензитет сиве боје. Површина слике A се добија одређивањем суме горњих квадрата, који представљају кров небодера и видљивих бочних страна, како је дато једначином (7) у [7]. Кров се увећава постепено, тако да је величина странице горњег квадрата ε једнака 2^n . Увећани кров има интензитет сиве боје, који је усердњена вредност груписаних квадрата, што се види са слике 4. Фрактална димензија D_s површине се одређује на основу дијаграмског приказа зависности површине слике A од величине странице горњег квадрата ε . Нагиб линије *slope*, којом се апроксимирају парови тачака (A, ε) , је у релацији преко израза (8), како је дато у [7]. На слици 4. је приказан метод небодера примењен на снимак узорка од титанијума.

$$A(\varepsilon) = \sum \varepsilon^2 + \sum \varepsilon [z(x, y) - z(x+1, y)] + [z(x, y) - z(x, y+1)] \quad (7)$$

$$D_s = 2 - slope \quad (8)$$



Слика 4. (1) SEM снимак узорка од титанијума и (2) примењен метод небодера са $\varepsilon=10\mu\text{m}$ [7]

Генерални закључак је везан за појаву грешака приликом прорачуна фракталне димензије, које настају као последица аквизиције снимака. При томе се мисли на фокусирање, увећање,

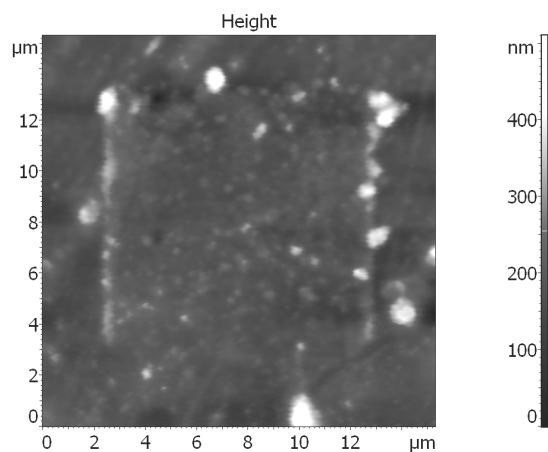
осветљеност, итд. Стога је избор методе скенирајуће микроскопије атомским силама, која није оптички метод, добар избор за аквизицију података. Од метода описаних у овом поглављу, без обзира на то за који су уређај првобитно развијени, свака се може модификовати и применити на AFM снимке, али нису све подједнако погодне за све врсте узорака. Поред врсте микроскопа и резолуције слике и квалитет обрађене површине утиче на избор методе прорачуна фракталне димензије. Развој нове методе је инициран управо потребом да се прилагоди новим улазним подацима који одговарају бројним вредностима висине неравнине придржане сваком пикселу. Код графичких датотека, које користи постојећа метода „небодера“ те су вредности осмобитне, а нова метода користи шеснаестобитне из текстуалних датотека, што омогућава прорачун вишег нивоа тачности фракталне димензије снимка обрађене површине.

4. ДЕТАЉАН ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

Утицај обраде на квалитет обрађене површине и слојева испод ње је суштина инжењерства површина. Зато су истраживања обухватила, сем карактеризације видљивог дела површине (топографије) и анализу магнетних својстава, датих у раду [8]. Мерење површинске топографије служи као витална веза између израде, анализе и предикције функционалних перформанси површина. Микроскопија атомским силама (AFM) нуди разне могућности за истраживање и развој захваљујући анализи својстава обрађене површине недеструктивном методом у нанометарској резолуцији. Карактеризација површине је саставни део истраживања и подразумева прорачун једног или више параметара, а код методе која је овде предложена, и фракталне димензије као мере храпавости.

Принцип рада AFM-а је заснован на скенирању површине помоћу сензора, на растојању довољно малом да мери атомске интеракције и постиже квази тродимензионално мапирање атома на самој површини. Два конвенционална скенирајућа мода AFM су контактни и безконтактни мод. Код контактног мода мерни пипак се једноставно вуче по површини чиме се добија топографска мапа површине узорка. Иако је ова техника успешна код већине узорака, вучење пипка по површини комбиновано са атхезивном силом између њега и површинских молекула, може иззврати озбиљна оштећења и на узорку и на пипку. Ради постизања квалитетног снимка важно је да се не оштети површина током процеса мерења, чиме се обезбеђује адекватна, висока резолуција. Полуконтактни или како се уобичајено назива тапинг мод (од енгл. *tapping*) омогућава да пипак наизменично додирује површину и одиже се од ње. Код тапинг мода AFM побуђује полулу тако да она дође у резонантно осциловање пиезо генератором. Интеракција са површином води ка губитку енергије и смањењу амплитуде, које се користи за одређивање и мерење површинских неправилности (висине неравнине). Када се пипак нађе изнад узвишења, полулу има мање простора за осциловање и тада се амплитуда смањује. Исто тако, када пипак пролази изнад удolini, полулу има више простора за осциловање и тада се амплитуда повећава приближавајући се слободној амплитуди осциловања у ваздуху. Амплитуда осциловања се користи као повратни сигнал за мерење промена у топографији површине узорка.

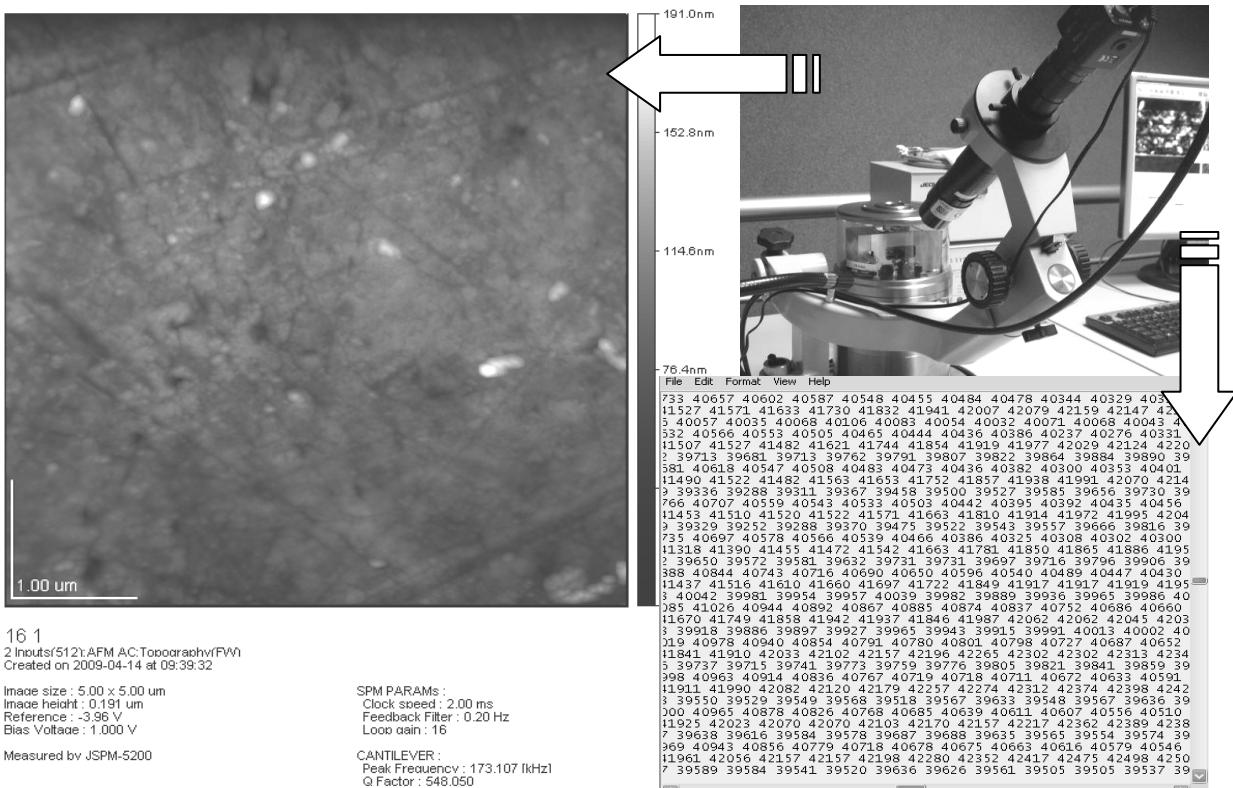
Пошто је било планирање тестирање методе на узорцима од полимера и челичног лима



пресвученог заштитним слојем лака, извршена је провера адекватности избора мода. Као потврда озбиљног недостатка контактног мода, на слици 5. је приказан снимак површине лима величине $15 \times 15 \mu\text{m}$. Након скенирања у контактном моду, остала је приметна промена на површини лима (лако уочљив квадрат величине $10 \times 10 \mu\text{m}$), јер је приликом снимања скинут заштитни слој лака. Челични лим за израду лименки не спада у „осетљиве“ материјале, али се зато заштитни слој лака лако може оштетити. Како полимери припадају „меким“ материјалима, а и пресвучени челични лим је показао „осетљивост“, прихваћен је искључиво тапинг мод за аквизицију података, који се касније обрађују новом методом.

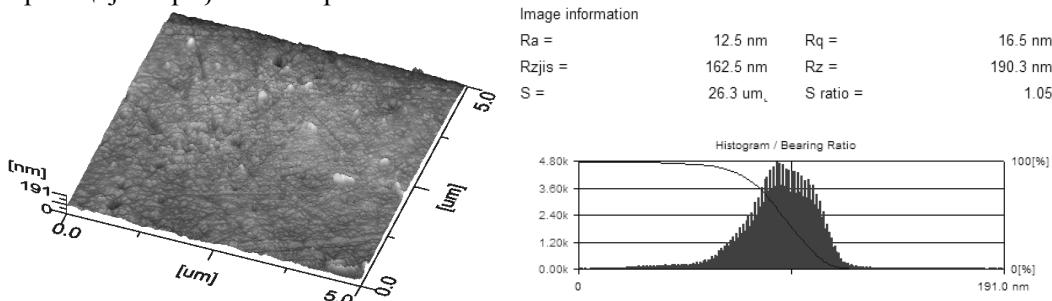
Слика 5. Топографија површине челичног лима снимљена у тапинг моду након претходног снимања у контактном моду

Површина полимера, обрађена конвенционалним методама обраде грубим и финим стругањем ножевима са дијамантским врхом и полирањем као завршном обрадом, коришћена је као реперна, током развоја и тестирања модификованих метода „небодера“. Аквизиција података, тј. скенирање обрађене површине је извршено на Универзитету у Београду, на Машинском факултету, у оквиру *Nanolab* лабораторије у којој се налази инструмент JSPM5200, познате фирме JEOL, који је приказан на слици 6. горе десно. У тапинг моду, силиконским мерним пипком, начињен је топографски снимак који је представљен као слика у 8-битном tiff формату величине 512×512 пиксела, на слици 6. лево. Услови под којима су вршена сва мерења, приказани су на слици 6: величина слике; мод, датум и време снимања; величина снимљене површине и највећа висина неравнина, којој одговара бела боја. Микроскопу придружен софтвер WinSPM, омогућава извоз снимка површине узорка у различитим стандардним форматима за слике, али и у ASCII формату, што је парцијално приказано на слици 6. доле десно. Текстуална датотека се може увести у конвенционални пакет Matlab, ради даљег процесирања, што је и урађено.



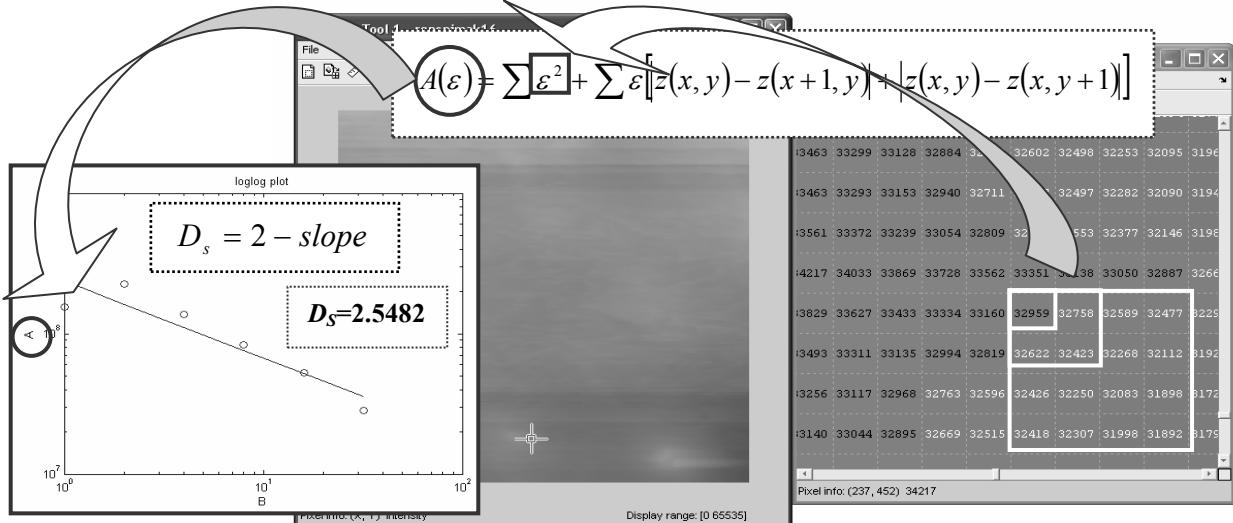
Слика 6. Топографски снимак (лево), скениран на микроскопу JSPM5200 (десно горе) и одговарајући текстуални запис (десно доле)

Програмски пакет WinSPM нуди конвенционалну анализу храпавости преко неколико стандардних параметара храпавости, хистограма и криве ношења, што је на слици 7. приказано. Управо је потреба да се, са више стандардних параметара истовремено, описује обрађена површина, главни недостатак конвенционалне анализе храпавости. Стога се, фрактална анализа храпавости обрађене површине, која следи у наставку, намеће као бољи приступ у карактеризацији обрађених површина.



Слика 7. Тродимензијални приказ снимљене површине и стандардни параметри храпавости

Овде описана методологија је тестирана на шеснаест мерних предмета од полимера и сваки од њих је скениран на четири различита места по ободу. За прикупљене податке увезене у конвенционални пакет Matlab, срачунате су фракталне димензије помоћу сопствено развијених процедура, а детаљно су описаны у оквиру [9]. Методологија подразумева технике скенирајуће микроскопије атомским силама и то „тапинг“ мод, чијом се применом генеришу топографски снимци површине узорка. То је први корак, на основу кога се у софтверу WinSPM, могу генерисати и извести одговарајући формати снимка. Формирање потребног формата записа слике, у другом кораку, подразумева извоз из софтвера WinSPM снимка површине узорка у различитим стандардним форматима за слике, нпр. у 8-битном tiff, али и у ASCII формату са 16-битним бројевима, тј. са петоцифреним бројевима који представљају висину неравнина у сваком пикселу. У трећем кораку се врши конвертовање учитане датотеке у ASCII формату, применом сопствено развијене процедуре у Matlab-у за генерисање матрице слике, која у овом конкретном случају представља матрицу величине 512×512 . Од ње су генерисане остале матрице величине 256×256 , 128×128 , 64×64 , 32×32 . Вредности елемената матрице су добијене усредњавањем вредности суседних елемената, што је четврти корак предложене методологије. На величини 32×32 се зауставило „упрошћавање“ приказа снимка, који се свео на поприлично „сивило“, без јасно уочљивих разлика, што би даље довело до потпуно глатке површине у смислу висине неравнина представљене бојама. Одређивање видљивих страна замишљених небодера и сумирање њихових површина, као и површина кровова, је пети корак. Коришћењем израза (7), одређене су површине свих видљивих страна небодера за одговарајућу величину мерила $\varepsilon=1,2,4,8,16,32$ пиксела, која се сукцесивно увећава и захтева усредњавање нијансе сиве. Добијене вредности за сваку матрицу представљају површине снимка за различите величине мерила ε , које се могу представити као парови тачака на дијаграму са дуплом логаритамском скалом. Провлачење праве кроз парове тачака (A, ε) је извршено у постојећем "Curve fitting toolbox"-у. Нагиб праве је преко израза (8) у релацији са фракталном димензијом D_s , која се у развијеној процедуре одређује у шестом кораку. На слици 8, је приказан метод небодера примењен на снимак узорка од полимера и вредност фракталне димензије срачуната за ту површину.



Слика 8. Одређивање фракталне димензије методом „небодера“ на основу 16-битног записа

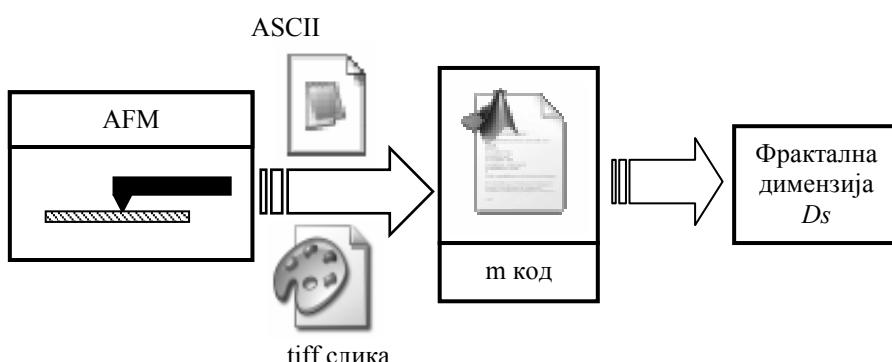
Коначна идентификација, компарација или предикција функционалног понашања обрађене површине, се на основу вредности фракталне димензије може спровести једноставно и недвосмислено. Већа вредност фракталне димензије површине одговара храпавијој површини и обрнуто. Утврђивање утицаја параметара режима обраде на храпавост обрађене површине је, применом овде описане методе, много једноставније, јер се стање обрађене површине описује само једним параметром. Тако се поређењем вредности фракталних димензија површина обрађених истим поступком, али са различитим вредностима режима обраде, може изврши избор параметра режима обраде који доводе до захтеваног квалитета. Површине од полимера, обрађене стругањем и полирањем уз промену само једног параметра обраде, у овом случају времена полирања, се могу поредити на основу вредности фракталне димензије, што је у оквиру [9] и

показано. Додатно се користи вредност фракталне димензије од 2,5 за критеријум на основу ког се сужава интервал у коме се налазе параметри режима обраде, јер се поменута вредност сматра оптималном по питању функционалног понашања.

5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ

У претходном поглављу је описан метод "небодера", који је тестиран на узорцима од полимера датим у радовима [10-12]. Модификовани метод „небодера“, који је схематски приказан

на слици 9, прилагођен је анализи нумеричких вредности које представљају висину неравнина у сваком пикселу, али за разлику од оригиналног, није део анализе слике, већ анализе података.



Слика 9. Схематски приказ методологије одређивања фракталне димензије

На слици 10. је представљена методологија и се састоји од шест корака:

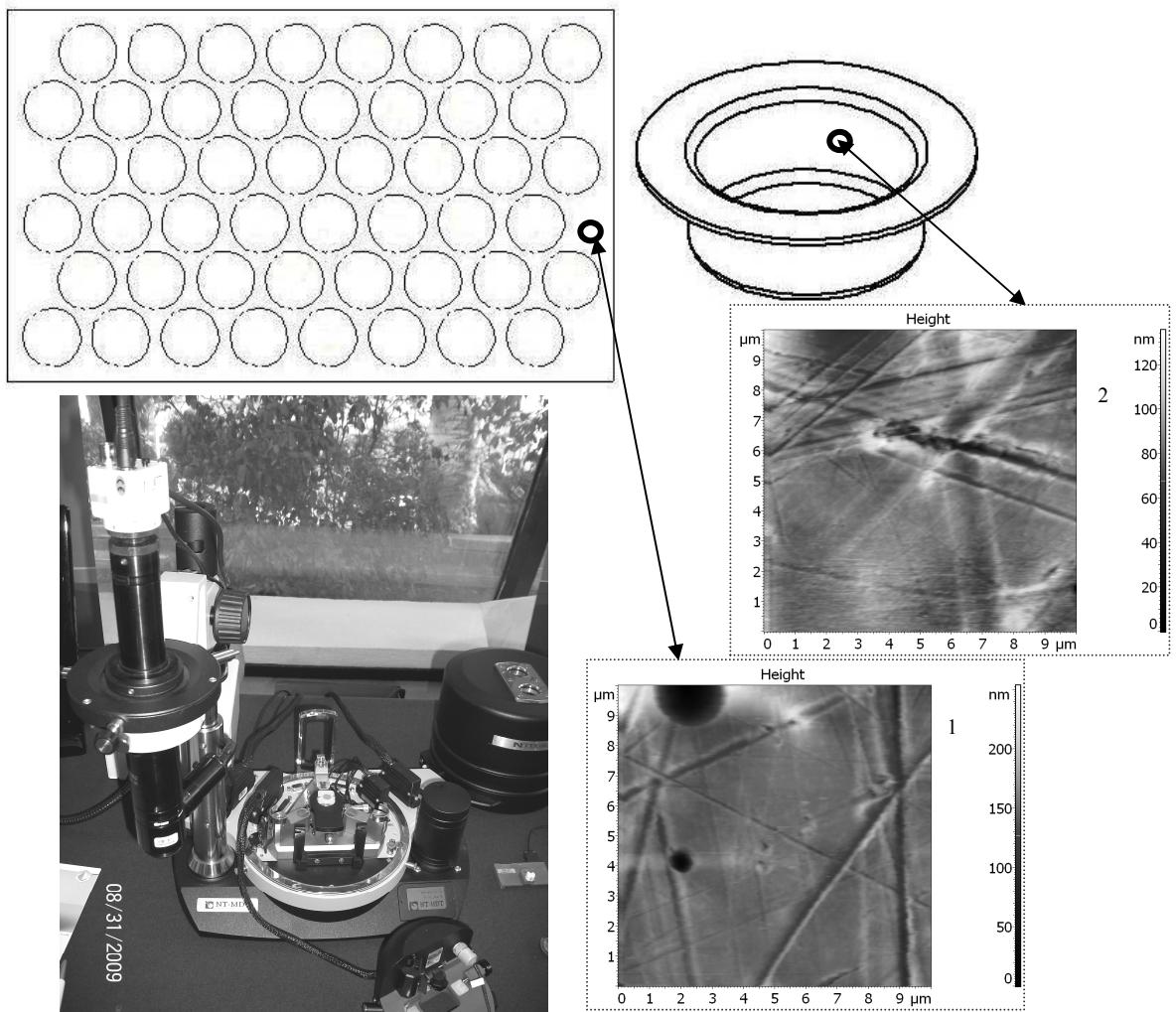
1. техником скенирајуће микроскопије атомским силама и то у тапинг моду се генеришу топографски снимци површине узорка,
2. формирају се потребни формати записа слике,
3. на основу датотеке у ASCII формату у Matlab-у се генерише матрица слике,
4. применом развијене процедуре увећава се величина пиксела и формирају се одговарајуће матрице слика са усредњеним вредностима сиве нијансе, тј. одговарајућим висинама неравнина,
5. применом развијене процедуре се одређују површине слика коришћењем једначине (7),
6. одређивање фракталне димензије преко нагиба праве провучене кроз дате тачке у дуплој логаритамској скали применом развијене процедуре у постојећем „тулбоксу“ Matlab-а.

Након развоја процедуре за утврђивање квалитета инжењерске површине која се може применити на површину дела сачињеног од било ког материјала, укључујући и метале и неметале, било је потребно извршити избор уређаја и метода снимања и мernог сензора за случај челичног лима који је био предмет истраживања дефинисан Пројектом бр. ТР-14031 [13]. Избор тапинг мода за скенирање површине челичног лима је у претходном поглављу разматран и потврђен. Иако ограничења у смислу обрадног процеса којим се генерише инжењерска површина не постоје, усклађивање величине радног простора машине и мernог простора микроскопа, може изазвати потребу за решавањем допунских проблема. Ограничавајући фактор код избора JSPM5200 и за челични лим је тај што величина мernог простора износи 10 mm, што захтева посебну припрему узорака. Такође, овај свремени и софистицирани уређај је „осетљив“ и захтева рад у лабораторијским условима. Припрема узорка од челичног лима, пре и после процеса извлачења није представљала проблем, али је намера да се процес аквизиције приближи производним условима довео до избора другог микроскопа из групе AFM уређаја. Адекватнији уређај, иако по питању перформанси не и бољи, је NTEGRA Prima произвођача NT-MDT, који је приказан на слици 11. Мерни предмети могу бити чак и масивни, јер се мерна глава може раздвојити од остатка микроскопа и поставити на површину коју скенира. Са припремка који се поставља на пресу је издвојен један узорак, на слици 11. означен са 1, а затим након процеса извлачења лименке издвојен други узорак, који је на слици 11. означен са 2. На слици су приказани топографски снимци генерисани у контактном моду који показују распоред висина неравнина површине лима као припремка са јасно уочљивим кружним црним флексама, које указују на неравномерно нанесен слој заштитног лака, као и распоред неравнина након обраде извлачењем, где су ти недостаци „испеглани“ процесом деформисања. Поређењем оба снимка се уочава смањење максималне висине неравнина, али и повећан број трагова. На снимку површине припремка уочљиви су они који остављају вальци током процеса наношења боје и лака, а на

снимку површоне изратка примећује се далеко већи број трагова који настају као последица дејства извлакача.

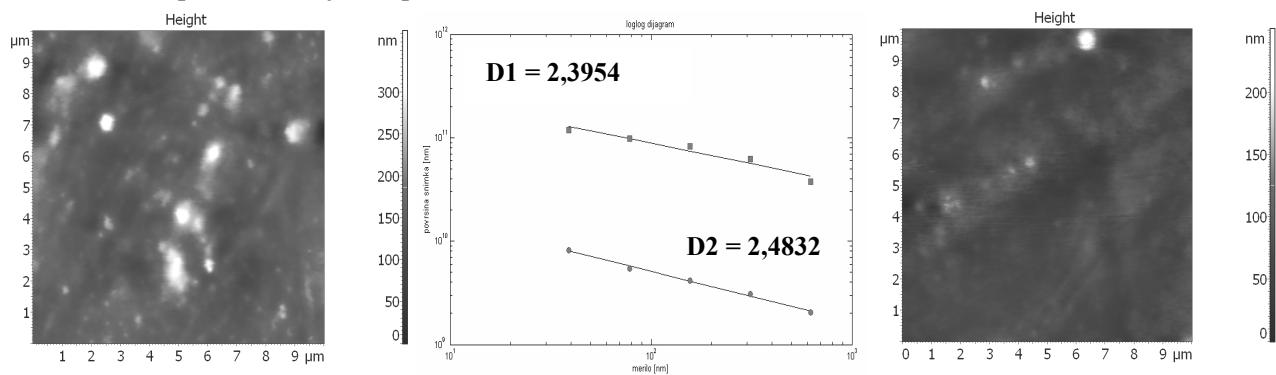


Слика 10. Приказ методологије у шест корака са парцијалним m-кодовима



Слика 11. Издвојени узорци за скенирање са припремка (1) и изратка (2) и одговарајући снимци добијени у контактном моду применом микроскопа NTEGRA Prima произвођача NT-MDT

Мање јасни на први поглед, али за одређивање фракталне димензије неопходни снимци су добијени у тапинг моду и приказани на слици 12. Применом описане методологије су срачунате вредности фракталних димензија припремка $D1=2,395405390716205$ и изратка $D2=2,483212240540936$ и приказане су заједно са дијаграмом у дуплој логаритамској скали на слици 12. У складу са раније изнешеним закључцима, вредности указују да се добија након процеса извлачења неравномернија, тј. храпавија површина, што је последица трагова извлакача. С друге стране, вредност фракталне димензије површине изратка је ближа оптималној, што је са становишта будућег функционалног понашања прихватљивија површина.



Слика 12. Топографски снимци површине лима пре и после процеса извлачења са дијаграмским приказом вредности фракталних димензија

ЗАКЉУЧАК

Фрактална димензија, **омогућава идентификацију и компарацију** обрађене површине једним параметром храпавости, наспрот више-параметарском конвенционалном приступу. Резултати истраживања, **прво** потврђују да је фрактална димензија утврђена, овде представљеном, модификованим методом „небодера“, добар показатељ стања обрађене површине. Развијена процедура за утврђивање квалитета инжењерске површине се може применити на површину дела сачињеног од било ког материјала, укључујући и метале и неметале, без обзира на тип AFM уређаја, методе снимања и мernог сензора, који се користи за акувизицију података.

Друго, на основу вредности, срачунате модификованим методом „небодера“, могуће је успоставити релацију са обрадним процесом. У оквиру истраживања је потврђено да се оптимална бројчана вредност фракталне димензије од 2,5 може **користити за оптимизацију процеса обраде**. Било да је тежња да се обрадом генерише мање храпава површина, или пак она која има жељена својства, нпр. триболовска, фрактална димензија може, као кључни параметар храпавости, послужити у повратној спрези, којом се параметар или параметри обраде доводе до оптималних вредности. На тај начин се омогућава израда делова чије су површине настале неком од метода резања, што је на примеру дела од полимера потврђено или неком од метода пластичног деформисања, на пример извлачење дела од челичног лима, што је започето и у плану је да се заокружи и у оквиру постројења ФМП тестира, до краја трајања Пројекта бр. ТР-14031.

Треће, фрактална димензија добијена на основу дигиталних AFM снимака површине омогућава успостављање везе између структуре и функције. Наведено је, фракталну димензију чини параметром на основу кога се може вршити предикција функционалног понашања. У оквиру истраживања је, модификованим методом „небодера“ одређена вредност фракталне димензије коришћена у обучавању неуронских мрежа, које се касније могу **користити за предикцију функционалног понашања обрађене површине**. Планира се развој нове методе која се базира на примени вештачких неуронских мрежа и фрактала у предикцији квалитета обрађене површине.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] Myskin, N.K., Grigoriev, A.Ya., Chizhik, S.A., Choi, K.Y., Petrokovets, M.I., “Surface roughness and texture analysis in microscale”, *Wear*, 254, pp. 1001-1009, 2003.
- [2] Pentland, A., “On describing complex surface shapes”, *Image and Vision Computing*, Volume 3 Issue 4, pp. 153-162, 1985.
- [3] Mandelbrot, B., *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Co, New York, 1982.
- [4] Yuan, C. Q., Li, J., Yan, X. P., Peng, Z., "The use of the fractal description to characterize engineering surfaces and wear particles", *Wear*, Volume 255, Issues 1-6, pp. 315-326, 2003.
- [5] Xu, S., Weng Y., "A new approach to estimate fractal dimension of corrosion images", *Pattern Recognition Letters*, Vol 27, pp. 1942-1947, 2006.
- [6] Peleg, S., Naor, J., Hartley, R., and Avnir, D., "Multiple resolution texture analysis and classification", *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intel*, Vol, 6, pp.518 –523, 1984.
- [7] Chappard, D., Degasne, I., Hure, G., Legrand, E., Audran, M., Basle, M.F., "Image analysis measurements of roughness by texture and fractal analysis correlate with contact profilometry", *Biomaterials*, Vol.24, pp. 1399-1407, 2003.
- [8] Stamenkovic,D., Kojic, D., Matija, L., Miljkovic, Z., Babic, B., "Physical properties of contact lenses characterized by scanning probe microscopy and optomagnetic fingerprint", *Int. Journal of Modern Physics B*, Vol. 24 Issues: 6-7, pp. 825-834, March 2010.
- [9] Бојовић, Б., „Интеракција стања инжењерских површина и фракталне геометрије“, Докторска дисертација, Машински факултет, Београд, 2009.
- [10] Bojović, B., Kalajdžić, M., Miljković, Z., Babić, B., "Fractal Approach For Substrates Surface Topography Image Evaluation", 3rd IC MEN, Proceedings (ISBN 978-960-243-649-3), pp. 443-452, Kalithea, Greece, 01-03. October 2008.
- [11] Bojović, B., Miljković, Z., Babić, B., "Fractal analysis of AFM images of worn-out contact lens inner surface", *FME Transactions*, 36 /4, pp. 175-180, 2008.
- [12] Bojović, B., Miljković, Z., Babić, B., Koruga, Đ., "Fractal Analysis For Biosurface Comparison and Behaviour Prediction", *Hemisika Industrija*, Vol 63 No 3, 239-245, 2009.
- [13] Бабић, Б., Миљковић, З., Бојовић, Б., Вуковић, Н., „Годишњи извештај за Пројекат 14031“, 2009.