УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ - МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -БРОЈ: 3202 // ДАТУМ: 22.12.2011.

На основу захтева проф.др Бојана Бабића од 15.12.2011. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 15.12.2011. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Да се за рецензенте Техничког решења рађеног у орквиру пројекта ТР-35004, под насловом: "Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy", чији су аутори: доц.др Божица Бојовић, проф.др Зоран Миљковић, проф.др Бојан Бабић и др Лидија Матија, научни саветник, именују:

- проф.др Ђуро Коруга и

 др Дарко Васиљевић, виши научни сарадник, Институт за физику.

Одлуку доставити: Министарству за науку и технолошки развој РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ПРОДЕКАН А НАУЧНОИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ Троф др Војкан Лучанин

ИСПИТИВАЊЕ ТРЕЊА У МИКРО ПОДРУЧЈУ ПРИМЕНОМ МЕТОДА СКЕНИРАЈУЋЕ МИКРОСКОПИЈЕ (Friction Force Microscopy)

Доц. др Божица Бојовић, Проф. др Зоран Миљковић, Проф. др Бојан Бабић, др Лидија Матија, научни саветник

1. ОБЛАСТ НА КОЈУ СЕ ТЕХНИЧКО РЕШЕЊЕ ОДНОСИ

Техничко решење припада области микротехнологија, које посматрају, с једне стране, као минијатуризацију макроскопских прецизних технологија, а са друге, као примену нанотехнологије на већој скали. Техничко решење се односи на специфичности које се јављају у микротрибологији, односно на понашање силе трења при непромењеној нормалној сили, услед промене топографије површине која се посматра. Прихваћено је од стране ФМП д.о.о који је корисник резултата Пројекта технолошког развоја бр. ТР-35004 и то за случај челичног лима, који је предмет истраживања. Техничко решење је укључено у предавања и лабораторијске вежбе из предмета Микро обрада и карактеризација на модулу за Производно машинство и Основе микро и нано инжењерства на модулу за Биомедицинско инжењерство.

2. ТЕХНИЧКИ ПРОБЛЕМ

За микро обраду се, обично, мисли да је између макро и нанотехнологија израде, те се или занемарује или прескаче као мање атрактивна област за истраживање. Закони који важе у макро области примене не важе у нано области, што је добро позната чињеница, која се и даље потврђује обимним истраживањима у тој области. Било би прикладно да физичке законе у микро области, *а priori* "приволимо једном царству", али то није тако. Истраживања показују [1] да у микро трибологији понекад важе закони из макро, а понекад из наноскопске области. Управо зато је спровођење истраживања у микроскопској области неопходно, чиме се знања о микро обради проширују и продубљују.

Теорија и методе које се тренутно користе у процесу извлачења не могу задовољити, у потпуности, инжењерске захтеве у пракси, за конструисање делова и пројектовање процеса. Најчешће се користе симулациони пакети, који омогућавају проучавање распореда деформација, одређивање оптималне величине припремка и укупне силе извлачења, како је приказано у [2]. Што се тиче фрикционих модела, опште прихваћен Кулонов модел се користи за симулацију при обради лимова пластичним деформисањем [3]. Да би се правилно моделирали услови који владају при процесу извлачења, мора се коефицијент трења између лима и радних органа, правилно изабрати. Најчешће коришћени тестови за одређивање коефицијента трења дају вредност, која не узима у обзир промену у контактним површинама током процеса.

Услед смањења скале на којој се посматра процес извлачења, додатно се јавља одступање коефицијента трења, што су у нанотрибологији већ познат феномен. Како су резултати нумеричких симулација повезани са степеном тачности модела, ограничењима и контактним условима, променљивост коефицијента трења и анизотропност материјала, која се јавља у наноскопском режиму треба узети у обзир. Питање је, да ли такви закони важе и у микроскопској области или се ту могу применити закони из макро света.

3. ПОСТОЈЕЋЕ СТАЊЕ У СВЕТУ

Тежња да се што боље објасне основни принципи који се јављају при клизању две површине, у последњих је двадесетак година, наоружана новим експерименталним техникама које су се развиле као производ минијатуризације механичких и електронских компоненти, као што је нпр. скенирајућа микроскопија попречним, односно фрикционим силама, за област трибологије. За разлику од триболошких експеримената у макроскопској области, у микро и нано трибологији се примењују оптерећења реда величине µN и nN респективно. Уз наведено, нано трибологија подразумева контакт врха пипка са посматраном површином, за разлику од макроскопских контактних површина, које настају као скуп зона у којима врхови храпавих површина остварују контакт. Поређењем резултата који се, за исти материјал, добијају при макро и нано приступу, основна разлика је у томе да је коефицијент трења већи у случају већих контактних површина. Наведено чини избор оптерећења и величине контактне површине јако важним за експерименталне поставке, а самим тим и за тумачење и генерализацију резултата.

Прегледни рад [4], даје корисне смернице у циљу одређивања сличности и разлике између микро и нано трибологије, које су у овом поглављу укратко наведене. Нано трибологија има могућност да испита контактне површине на најмањим скалама, што је неопходно за разумевање основних принципа триболошких појава (трења, хабања и подмазивања). Насупрот њој, микро трибологија подразумева експерименталну поставку, која се налази између класичне (макро) и нано трибологије. Микро триболошка испитивања подразумевају високу осетљивост карактеристичну за нано скале, а велике контактне површине карактеристичне за макро скале.

Механизам запора (*ratchet*) се односи на локалне варијације интензитета силе трења и описује појаву која се јавља при мерењу латералних сила у наноскопском подручју приликом савладавања нагиба неравнине. Уведен је у [5] а приказан на слици 1. У микроскопском подручју је примећен механизам запора под еластичним контактним условима и на већим контактним површинама.



Sample sliding direction

Слика 1. Схематска илустрација механизма запора. Ознаке на слици су: нормална сила W, сила трења F, тангенцијална S и ортогонална N компоента силе и угао нагиба узвишења θ . Преузето из [5]

Промена у топографији која одговара "степенику" величине десетог дела микрометра, приликом клизања трибо тестера изазива деформисање "ивице степеника" и промену у интензитету силе трења и тај се тополошки утицај на силу трења зове "ефекат степеника", што је јасно показано у [6] и приказано на слици 2.

За разлику од нано и микро триболошких испитивања која су се, углавном, спроводила на глатким или структурисаним површинама, испитивања на инжењерској, према [4], указују на већа одступања интензитета силе трења при клизању трибо тестера по храпавој у односу на клизање по мање храпавој површини, што се на слици 3 може и видети.



 $F_{r (Step upward)} > F_{r (flat)} > F_{r (step down)}$ Слика2. Схематска илустрација ефекта степеника. Преузето из [6]



Слика 3. Локалне промене у интензитету силе трења при клизању по храпавој (лево) у односу на мање храпаву површину (десно) Преузето из [4]

Удружени утицаји нехомогености материјала, које и фазни снимци могу детектовати и утицај топографских промена, је приказан на слици 4. Фрикциони сигнал мења вредност у зависности од својства материјала површине по којој клизи мерни пипак, те се може лако уочити као скок који траје док пипак не прође нехомогеност. Топографска промена у виду степеника се уочава као пик на фрикционом сигналу, док се узвишење уочава као нагли скок и пад сигнала.



Слика 4. Схематска илустрација промене силе трења преко фрикционе петље, услед нехомогености материјала и топографских промена (ефекат степеника и запора). Преузето из [6]

4. ДЕТАЉАН ОПИС ТЕХНИЧКОГ РЕШЕЊА

4.1. Припрема узорака и мерење

Узорци су узети са унутрашње површине лименки након процеса извлачења и очишћени. Извлачење је обављено на преси CEPEDA под истим условима за све лименке у погону ФМП-а у Београду. Материјал од кога су направљене све лименке је са комерцијалном ознаком DR550.

Микроскопија атомским силама (Atomic Force Microscopy -AFM) нуди разне могућности за истраживање и развој захваљујући анализи својстава обрађене површине недеструктивном методом у нанометарској резолуцији. Предложена метода подразумева примену фрикционог мода (Friction Force Microscopy). За скенирање су узети узорци са различитих места на лименци, величине прилагођене мерном простору комерцијалног скенирајућег микроскопа JSPM 5200, фирме JEOL из Јапана. Мерни пипак, у ознаци CSC37/AlBS фирме MikroMasch из Естоније, је коришћен за скенирање у контактном моду. Мерни пипак се састоји од три носача са по једним кристалом силицијума конусног облика на крају сваког од њих. Полупречник силицијумског врха је мањи од 10 nm. Висина конусног врха је 15-20 μ m, а угао при самом врху је мањи од 40°. Константа опруге за наведени мерни пипак је 0.3–0.65 N/m. Алуминијумска превлака на задњој страни од 30nm даје резултујући полупречник врха од 40nm. Сви експерименти су спроведени на собној температури.

За генерисање топографских и фрикционих снимака користи се скенирање у моду константне силе, који подразумева да је врх мерног пипка у сталном контакту са површином. У AFM моду се генерише топографски снимак површине, скенирањем у правцу осе носача. У FFM моду се генерише фрикциони снимак површине, скенирањем у правцу попречном на осу носача. AFM и FFM снимци се анализирају применом WinSPM Ver.2.15 софтвера. Програмски пакет WinSPM, између осталог, нуди конвенционалну анализу храпавости преко неколико стандардних параметара храпавости, хистограма и криве ношења, што је у случају фрикционих снимака коришћено, али у другом смислу.

4.2. Методологија

Предложена метода обухвата аквизицију фрикционог сигнала микроскопијом сила трења и утврђивање одступања услед топографије инжењерске површине. Описана је кроз пет корака:

1. Избор величине скениране површине

Зашто

Величина храпаве површине утиче на број и величину појединачних контактних зона, које се јављају око врхова површине и заједно чине стварну контактну површину. Како сила трења зависи од величине стварне контактне површине, а ова опет зависи од величине скениране површине, важно је утврдити при којој се величини скениране површине вредности фрикционог сигнала значајно мењају у односу на следеће мање површине.

Како

На жалост, не постоји други начин да се одреди критична величина скениране површине него добром старом методом покушаја, која подразумева понављање снимања на истој позицији, али све мање и мање површине. Поређењем одступања фрикционог сигнала, уочавају се величине скенираних површина за које су распони приближних вредности, те се од њих највећа површина може сматрати критичном величином скениране површине. Даље, за ту комбинацију материјала, методе обраде и мерног пипка, треба извршити већи број скенирања, али само површина чија величина одговара критичној.

2. Аквизиција топографских и фрикционих сигнала применом AFM и FFM микроскопије на микроскопском нивоу

Зашто

Контакт између две инжењерске површине се мора посматрати као скуп међусобних контакта узвишења обе површине. Управо зато контакти на микроскопском нивоу одређују макроскопско

триболошко понашање инжењерских површина. Конкретно, сила трења, која је од интереса за нову методу, је зависна од топологије површине. Зато се спроводе микро триболошка испитивања, одн. FFM микроскопија, која подразумева, с једне стране, високу осетљивост карактеристичну за нано скале, а с друге стране, велике контактне површине са вишеструким контактним зонама.

Како

Аквизиција се обавља применом два различита мода скенирајуће микроскопије. У AFM моду, савијање носача у Z правцу, услед промене у висини неравнина, се детектује преко фото диоде и претвара у топографски снимак површине. При том је правац скенирања у оси носача. У FFM моду, увијање носача услед сила трења које се јављају при "вучењу" пипка по површини, се детектује преко фото диоде и претвара у фрикциони снимак површине. При том је правац скенирања попречан на осу носача.

3. Одређивање распона фрикционог сигнала

Зашто

Удружени утицаји храпавости површине и нехомогености материјала изазивају промене у фрикционом сигналу. Те се промене могу "видети " на фрикционом снимку, где је сваком пикселу снимка додељена вредност у волтима (V) као показатељ увијања носача мерног пипка услед латералних сила. Фрикциони сигнал је индикатор силе трења и распон њиховог интензитета говори о степену утицаја топографских промена (узвишење, степеник, бразда) на посматраној скали.

Како

Одговарајући фрикциони снимци садрже релативне вредности фрикционог сигнала у сваком пикселу снимка и те се вредности налазе у одређеном распону који се може применом WinSPM софтвера очитати као вредност дата под ознаком Rz. Параметар Rz представља распон сигнала за целу скенирану површину, тј. разлику између максималне и минималне вредности, у овом случају фрикционог сигнала.

4. Детектовање и компензација просторног помераја

Зашто

Из литературе [5] је познат просторни померај између фрикционог и топографског снимка који се може видети на слици 5. Бушан је у [5] показао да је просторни померај последица појаве која се зове прањање-проклизавање (*stick-slip*) па атомском нивоу. На микроскопском нивоу је такође примећен просторни померај који је представљен у [7], где је и показано да вредност помераја на микроскопском нивоу одговара вредности полупречнику врха пипка. На слици 6 су приказани AFM снимак (слика 6-а), графички приказ једне карактеристичне структуре (слика 6-б) и FFM снимак (слика 6-в).

Слика 5. Схематска илустрација просторног помераја фрикционе мапе спрам топографске мапе. Преузето из [5]

Слика 6. (a) AFM снимак, (б) графички приказ карактеристичне структуре, (в) FFM снимак

Како

Просторни померај се применом WinSPM софтвера, односно његовог модула за рад са профилима може одредити на основу координата (пиксела) карактеристичних топографских примитива на AFM снимцима и њима одговарајућих фрикционих примитива на FFM снимцима. Повлачењем линије дуж снимка узорка јасно се издваја померај који се може очитати на апсциси у јединицама за дужину. Величина узорка одговара полупречнику врха пипка, те се на микрометарском нивоу може извршити компензација помераја, познавајући перформансе пипка, препоручене од стране произвођача. Померај прерачунат у број пиксела омогућава брзу и једноставну компензацију приликом рада у WinSPM софтверу.

5. Селектовање региона са сигнификантним променама фрикционог сигнала Зашто

Примећене су и објављене у [7], значајне промене код фрикционог сигнала, које одговарају местима на површини где се мења топографија у смислу бразда и узвишења. Промена фрикционог сигнала зависи од нагиба узвишења или удубљења, одн. од храпавости површине узорка на микроскопском нивоу. Интензитет фрикционог сигнала расте при клизању пипка које фигуративно можемо назвати "пењање узбрдо" односно опада при "силаску низбрдо", према [6,7], где је механизам запора објашњен. Оваква промене фрикционог сигнала је последица тангентне функције у (1), која даје релацију између интензитета силе трења T_n на нагибу дефинисаном угловима θ_n , θ_{n-1} , у односу на ону која одговара равној површини T_0 . У релацији (1) и на слици 7 дате су још и ознаке N_0 и N_n које одговарају нормалним силама које делују на равну и нагнуту површину респективно. Знак плус у релацији (1) одговара позитивном нагибу, а минус негативном. Неочекивано, али доказано је у [6,7], да промена интензитета фрикционог сигнала више зависи од промене угла нагиба него од саме вредности угла нагиба, што се и према релацији (1) може и видети.

Слика 7. Схематска илустрација механизма запора

Како

Истовременим анализирањем топографског и фрикционог снимка могу се издвојити региони са значајним променама фрикционог сигнала. На AFM снимку су нијансама сиве приказане висине неравнина у сваком пикселу. Зато се узвишења лако детектују као региони светлих нијанси (на слици 8 светла широка дијагонална штрафта у доњем десном углу), а удубљења као региони тамних нијанси. Бразде се виде као тамне линије које су окружене светлијим, које опет одговарају наслагама на ивици бразде (на слици 8 линија која иде одозго на доле). На FFM снимку за поменуте регионе можемо уочити промену нијансе сиве, где светлија нијанса значи већи интензитет фрикционог сигнала и обрнуто. Топографска промена која изгледа као бразда се на фрикционом снимку "види" са јасним ивицама, које потичу од пикова на фрикционом сигналу, који настају при силаску и изласку пипка из бразде. Испупчење на топографском снимку се види као пораст и пад фрикционог сигнала, тј. посветљење и потамњење на фрикционом снимку.

Слика 8. AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимак са провученом линијом на истом месту која даје профил (доле десно) и фрикциони сигнал (доле лево)

5. ПРИКАЗ РЕЗУЛТАТА ПРИМЕНЕ

С обзиром да сила трења зависи од контактне геометрије [8,9], утицај топографије површине је много израженији на микро скали у поређењу са макро скалом. Како је трење присутно током процеса извлачења између радних органа алата и лима, спроведено је анализирање ове фрикционе појаве на микро нивоу применом описане методе. Иако је процес извлачења лименки макроскопског карактера, слој којим се превлачи лим, као превлака спада у микро област, и зато, има смисла посматрати триболошко понашање површине челичног лима пресвучено танким заштитним слојем лака.

На узорцима, применом контактног AFM мода у првом и фрикционог FFM мода у другом пролазу, успешно је снимљен 41 пар снимака. Изабрано и приказано у Табели 1, је 12 парова AFM-FFM снимака. Снимци који потичу са истих позиција на узорку имају исту ознаку. Величине скенираних површина су $25 \times 25 \,\mu$ m, $10 \times 10 \,\mu$ m, $5 \times 5 \,\mu$ m, $3 \times 3 \,\mu$ m, $2 \times 2 \,\mu$ m и $1 \times 1 \,\mu$ m. За скенирану површину $25 \times 25 \,\mu$ m FFM снимак у Табели 1, је поприлично једноличан што указује да је то превелика скенирана површина на којој се не могу приметити микроскопске промене силе трења. За исту позицију, али мању површину осетљивост је боља и примећују се бразде као последица

абразивног хабања између радног органа и лима, као и узвишења на другим снимцима величине 10×10 µm из Табеле 1. Снимци скенираних површина од 5×5 µm, 3×3 µm и 2×2 µm имају јасно диференциране регионе на сликама у Табели 1, који одговарају топографским примитивима.

ОЗНАКА УЗОРКА	ВЕЛИЧИНА УЗОРКА	ТОПОГРАФСКИ СНИМАК	ТРОДИМЕНЗИОНАЛНИ ТОПОГРАФСКИ СНИМАК	ФРИКЦИОНИ СНИМАК
13	25X25X186		ran 186	
	10X10X131		right contraction of the second secon	
11	10X10X455		ram 455 Table June	
17	10X10X424		rem Faza	
27	5X5X629		File Job Junit	
	3X3X361		5- 1 1 1 2 2 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	- Free
	2X2X285		5-5 5-5 UNN -5-5	AFR 1

Табела 1. Топографски и фрикциони снимци

На снимку $2 \times 2 \,\mu\text{m}$ се назиру, али се зато на снимку $1 \times 1 \,\mu\text{m}$ јасно примећује мрежаста структура која визуелно подсећа на мрешкање површоне воде, а у овом случају потиче од испаравања лака са површине лима које је оставило такве неправилности видљиве само на површини мањој од $1 \,\mu\text{m}^2$.

Визуелним поређењем FFM снимака за највећу и најмању скенирану површину, они су избачени из даље анализе због неодговарајуће величине скениране површине која не "осећа" микро триболошком нивоу. На основу релативне вредности распона фрикционог сигнала за преостале величине скениране површине, које су дате у Табели 2, може се спровести **први корак** нове методе, који се састоји од избора величине скениране површине. Приказани распони указују да су јако блиске вредности за групу узорака чије су скениране површине 5×5 µm, 3×3 µm и 2×2 µm, на основу чега се те величине узорка могу сматрати релевантним за посматрање фрикционог сигнала на микро скали. Избор критичне величине скениране површине у овом случају је 5×5 µm.

За потребе детаљне анализе триболошког понашања користили би смо аквизицију топографиских и фрикционих сигнала применом AFM и FFM микроскопије на микроскопском нивоу за изабрану критичну скенирану површину површину мерним пипком у ознаци CSC37/AIBS, што је други корак нове методе.

Трећи корак нове методе подразумева одређивање распона фрикционог сигнала, тј. очитавање вредности максималних одступања сигнала за целу скенирану површину у ознаци Rz, који се налази у извештају анализе "храпавости површине", који је дат на слици 9, за два снимка.

Група узорака	Величина скениране површине [µm]	Релативне вредности распона фрикционог сигнала [V]
1.	10×10	$1.2 \div 5.4$
2.	5×5	$0.9 \div 2$
3.	3×3	0.6 ÷ 2
4.	2×2	0.7 ÷ 2

Табела 2. Релативне вредности распона фрикционог сигнала

Слика 9. Промена сигнала фрикционе силе у зависности од топографије

1.8um

2.1um

2.4um

2.7um

3.0um

1.5um

0.3um

0.6um

0.9um

1.2um

Детектовање просторног помераја како је дефинисано у **четвртом кораку** даје вредност блиску полупречнику врха пипка и у овом случају износи око 40nm, што се може на слици 10 и видети. Компензовани померај даје као резултат правовремену реакцију фрикционог сигнала сигнала на топографске промене, што је слици 11 и приказано.

Слика 10. Линија провучена на истом месту AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимка, даје просторни померај уочљив на фрикционом сигналу (доле десно)

Слика 11. Линија провучена на истом месту AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимка, компензованог помераја даје усклађен профил (доле лево) и фрикциони сигнал (доле десно)

Последњи **пети корак** подразумева селектовање региона са сигнификантним променама фрикционог сигнала, као што су бразда и узвишење, који су на слици 12 приказани. Посебно је занимљив последњи пик са највећом променом фрикционог сигнала, који одговара преласку пипка са успона на скоро равну површину. Посматрајући само топографски снимак, тешко да би се могло закључити да је то регион који ће показати највећу силу трења.

Слика 12. Линија провучена на истом месту AFM (горе лево) и FFM (горе десно) снимка, пролази кроз карактеристичне регионе

6. ЗАКЉУЧАК

Овде описана нова метода припада области микро трибологије и пружа, кроз пет корака, поступак за квалитативну и кавантитативну карактеризацију инжењерске површине. Нова метода обухвата:

- 1. Избор величине скениране површине, јер од ње зависи величина стварне контактне површине, односно интензитет силе трења;
- Аквизицију топографских и фрикционих сигнала применом AFM и FFM микроскопије на микроскопском нивоу, која подразумева, с једне стране, високу осетљивост карактеристичну за нано скале, а с друге стране, велике контактне површине са вишеструким контактним зонама;
- 3. Одређивање распона фрикционог сигнала, који указује на степен утицаја топографских промена на посматраној скали;
- 4. Детектовање и компензацију просторног помераја, који на микроскопском нивоу одговара вредности полупречника врха пипка;
- 5. Селектовање региона са сигнификантним променама фрикционог сигнала, које су проузроковане топографским променама површине узорка на микроскопском нивоу.

Новом методом се појашњавају промене фрикционог сигнала узроковане променом нагиба у случају узвишења и бразда и потврђују релацијом (1). Сматрамо да се овде наведеном методологијом продубљује разумевање основних принципа, који важе код микро триболошких појава.

Овде приказана примена нове методе на лименке, представља резултат истраживачких напора у првој истаживачкој години. У наредним годинама се планира примена нове методе на контактна сочива и то мека, јер се код њих јављају смичућих напона током трептања. Скенирање површине меких сочива микроскопијом латералним силама и примена нове методе за анализу снимака, довело би до прикупљања нових података везаних за овај проблем. Други корисник овог пројекта (OPTIX d.o.o) би резултате могао да примени директно у производњи меких сочива.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] Achanta, S., Celis, J.-P., "On the scale dependence of coefficient of friction in unlubricated sliding contacts", *Wear*, Volume 269, pp. 435–442, 2010.
- [2] Xu, Y., "Universal formability technology and applications", Journal of Materials Processing *Technology*, Volume 151, pp. 119–125, 2004.
- [3] Zhang, S., Hodgson, P.D., Cardew-Hall, M.J., Kalyanasundaram, S. "A finite element simulation of micro-mechanical frictional behaviour in metal forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 134, pp 81–91, 2003.
- [4] Achanta, S., Liskiewicz, T., Drees, D., Celis, J.-P., "Friction mechanisms at the micro-scale", *Tribology International*, Volume 42, pp. 1792–1799, 2009.
- [5] Bhushan, B. "Nanotribolgy and nanomechanics", *Wear*, Volume 259, pp. 1507-1531, 2005.
- [6] Santner, E., Klaffke, D., Meine, K., Polaczyk, Ch., Spaltmann, D. "Demonstration of topography modification by friction processes and vice versa", *Tribology International*, Volume 39, pp. 450–455, 2006.
- [7] B.Bojovic, D. Kojic, Z. Miljkovic, B.Babic, M.Petrovic, "Friction force microscopy of deep drawing made surfaces", Proceedings 34th Int. Conf. on Production Engineering, pp. 531-534, Niš, Serbia, 2011.
- [8] Sung, I.H., Lee, H.S., Kim, D.E. "Effect of surface topography on the frictional behavior at the micro/nano-scale", *Wear*, Volume 254, pp. 1019–1031, 2003.
- [9] Lee, B.H., Keum, Y.T., Wagoner, R.H. "Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming", *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 130-131, pp. 60–63, 2002.

Одлуком Истраживачко-стручног већа Машинског факултета у Београду бр. 3202/1 од 2011. године именовани смо за рецензенте нове методе под називом "Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy)" аутора: доц. др Божице Бојовић, проф. др Зорана Миљковића, проф. др Бојана Бабића, др Лидије Матије, научног саветника. На основу предлога и након анализе методе подносимо следећи:

ИЗВЕШТАЈ

Датум:

Нова метода "Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy)" представљена је на тринаест страница А4 формата, коришћењем Times New Roman фонта величине 11 рt, једноструког прореда. Опис методе садржи једну једначину, две табеле и дванаест слика представљених у следећих шест тематских целина уз списак коришћене литературе:

- Област на коју се техничко решење односи
- 2. Технички проблем,
- 3. Постојеће стање у свету,
- 4. Детаљан опис техничког решења,
- 5. Приказ резултата примене,
- 6. Закључак.

Техничко решење припада области микротехнологија и односи се на специфичности које се јављају у микротрибологији, конкретно на одступања силе трења услед промене топографије површине која се посматра. Прихваћено је од стране ФМП д.о.о који је корисник резултата Пројекта технолошког развоја бр. ТР-35004 и то за случај челичног лима, који је предмет истраживања. Техничко решење је укључено у предавања и лабораторијске вежбе из предмета Микро обрада и карактеризација на модулу за Производно машинство и Основе микро и нано инжењерства на модулу за Биомедицинско инжењерство.

У другом поглављу уведен је технички проблем, који се директно решава применом нове методе. Кулонов модел за симулацију у процесу извлачења, који се тренутно користи не може у потпуности задовољити инжењерске захтеве у пракси, за конструисање делова и пројектовање процеса. Резултати симулација су повезани, сем са степеном тачности модела, ограничењима и контактним условима и са променом коефицијента трења и анизотропношћу материјала, који се јављају у наноскопском режиму. Најчешће коришћени тестови за одређивање коефицијента трења између лима и радних органа дају вредност, која не узима у обзир промену у контактним површинама током процеса. Зато је спровођење истраживања у микроскопској области неопходно.

У трећем поглављу су приказани основни принципи, који се јављају у нано и микро трибологији са оптерећењима реда величине nN и µN респективно, при клизању пипка по равним и структуираним површинама. Први је објашњен механизам запора, који се односи на локалне варијације интензитета силе трења и описује појаву која се јавља при мерењу латералних сила FFM микроскопијом у наноскопском подручју приликом савладавања нагиба неравнине. Примећен је и у микроскопском подручју на већим контактним површинама под еластичним контактним условима. Затим је описан тополошки утицај на силу трења, који приликом клизања трибо тестера изазива деформисање "ивице степеника", а зове се "ефекат степеника". Истакнуто је да испитивања на инжењерској површини, указују на већа одступања интензитета силе трења код храпавије површине, као и да удружени утицаји нехомогености материјала и топографских промена, изазивају нагли скок и пад фрикционог сигнала.

Четврто поглавље приказује детаљан опис техничког решења. Представљена методологија се састоји од пет корака: 1. Избор величине скениране површине, јер од ње зависи величина стварне контактне површине, односно интензитет силе трења; 2. Аквизиција топографских и фрикционих сигнала применом AFM и FFM микроскопије на микроскопском нивоу, која подразумева, с једне стране, високу осетљивост карактеристичну за нано скале, а с друге стране, велике контактне површине са вишеструким контактним зонама; 3. Одређивање распона фрикционог сигнала, који указује на степен утицаја топографских промена на посматраној скали; 4. Детектовање и компензацију просторног помераја, који на микроскопском нивоу одговара вредности полупречника врха пипка; 5. Селектовање региона са сигнификантним променама фрикционог сигнала, које су проузроковане топографским променама површине узорка на микроскопском нивоу.

У петом поглављу је приказан резултат примене нове методе на примеру површине челичног лима. Иако је процес извлачења лименки макроскопског карактера, посматра се микроскопско триболошко понашање површине челичног лима пресвучено танким заштитним слојем лака, јер је утицај топографије површине много израженијина на микро него на макро скали. Анализом добијених резултата утврђено је да нова метода обезбеђује пресликавање квалитативних информација које пружа визуелна анализа FFM снимака и квантитативни опис распона фрикционог сигнала, који указује на степен утицаја топографских промена на посматраној скали. Овде је приказана триболошка карактеризација инжењерских површина кроз довољан број примера, са посебним освртом на селектоване регионе и њихов утицај на фрикционо понашање. Посебно се илуструје одступање фрикционе силе, узроковано променом нагиба у случају узвишења и бразда.

У оквиру закључка наглашено је да нова метода омогућава спровођење микро триболошких испитивања коришћењем FFM микроскопије и анализу, како очекиваних, тако и неочекиваних одступања фрикционог сигнала, услед тополошких промена на скенираној површини. Такође, предложена методологија подразумева генерисање нових знања из области микро трибологије. Наглашено је, да се у наредним годинама на пројекту ТР-35004 планира примена нове методе на мека контактна сочива, што би довело до прикупљања нових података, које би други корисник овог пројекта (OPTIX d.o.o) могао да примени директно у производњи.

Наведена нова метода-техничко решење, се може применити у микроскопском домену на инжењерске површине, без обзира на материјал и врсту обраде. Зато она може бити адекватно решење за шири круг корисника. У том смислу, након анализе предлога нове методе и остварених резултата, дајемо следеће

мишљење

Аутори нове методе "Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy)" су на јасан начин описали основне теоријске концепте директно везане за област микротрибологије. Примена нове методе омогућава једноставан и ефикасан начин утврђивања распона фрикционог сигнала снимљеног коришћењем FFM микроскопије, на критичној величини скениране површине, уз анализу узрока одступања вредности силе трења. Резултати остварени применом нове методе указују да постоји јасан допринос постојећем стању, као и продубљивању разумевања основних принципа, који важе код микро триболошких појава. На основу увида у предлог нове методе и остварене резултате предлажемо Истраживачко-стручном већу Машинског факултета у Београду да се нова метода под називом "Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy)" прихвати као ново техничко решење.

Проф. др Ђуро Коруга Универзитет у Београду-Машински факултет

Jarus Vosfgene

др Дарко Васиљевић, виши научни сарадник Институт за физику у Земуну

Београд, 16. 01. 2012. године

Предмет: Мишљење о реализацији пројекта "Иновативни приступ у примени интелигентних технолошких система за производњу делова од лима заснован на еколошким принципима" (ТР-35004)

Пројектом су обухваћена два основна циља истраживања: одређивање параметара производње делова од лима и управљање унутрашњим транспортом материјала са акцентом на примени еколошких принципа који подразумевају уштеду енергије, материјала и средстава за подмазивање.

Као резултат првог циља истраживања настала је нова метода за одређивање запремине лубриканта, базирана на тродимензионалним снимцима лима и обрађене површине лименке, који се анализирају применом концепта лагураности. На основу овог поступка, омогућава се процена потребне запремине лубриканта. Наведено смањује употребу средства за подмазивање у индустрији металних производа, што је конкретна примена еколошких принципа у интелигентним технолошким системима.

Резултати остварени у другом истраживачком правцу, који су од важности за компанију ФМП д.о.о., су две нове методе. У првој методи је приказано решење проблема симултаног управљања мобилног робота путем повратних информација од калибрисане камере и естимације положаја мобилног робота за време извршавања транспортног задатка у оквиру система унутрашњег транспорта сировина, материјала и готових делова. У оквиру друге методе приказано је увођење интелигентне роботизоване манипулације радним предметима (припремак, обрадак, израдак, готов део) у оквиру технолошких система за производњу делова од лима, на бази развијеног хибридног емпиријског управљачког алгоритма.

Након увида у примењивост нових техничких решења, која су проистекла као резултати истраживања у оквиру пројекта, и на основу досадашње сарадње са реализаторима, компанија ФМП д.о.о. изражава задовољство спроведеним истраживањима и оствареним резултатима.

DRUŠTVO SA OGRANIČENOM ODGOVORNOŠĆU Za proizvodnju metalnih proizvoda.	
о тенера Емр	лни директор Фіуії і д.о.о.
MEDICIPAD, Lazerovedid Gran 6, Brillio	myun

Небојша Стојановић, дипл. маш. инж.

11000 Beograd, Jugoslovenska br. 2; Tel: 011 655 75 33, Fax: 011 655 75 73

www.fmp.co.rs office@fmp.co.rs

"OPTIX" Preduzeće za proizvodnju, promet i servisiranje optičkih i optoelektronskih uređaja d.o.o. **"OPTIX"** Enterprise for manufacturing trading and servicing optical and optoelectronical instruments

Београд, 16. 01. 2012. године

OPTIX d.o.o. 3/12 16.01. 20111. nod. BEOGRAD - ZEMUN - ORAČKA 13

Предмет: Мишљење о реализацији пројекта "ИНОВАТИВНИ ПРИСТУП У ПРИМЕНИ ИНТЕЛИГЕНТНИХ ТЕХНОЛОШКИХ СИСТЕМА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ДЕЛОВА ОД ЛИМА ЗАСНОВАН НА ЕКОЛОШКИМ ПРИНЦИПИМА" Евиденциони број ТР-35004

Након увида резултате истраживања који CY објављени V Ν представљени на научним скуповима домаћег и међународног значаја, као и у примењивост новог техничког решења, и на основу досадашње компанија OPTIX Д.О.О. сарадње ca реализаторима, изражава задовољство спроведеним истраживањима и оствареним резултатима.

Генерални директор OPTIX д.о.о

Драгомир Стаменковић, дипл. маш. инж

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ - МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ -БРОЈ: 3202/2 ДАТУМ: 28.12.2011.

На основу захтева проф.др Бојана Бабића од 15.12.2011. године и чл. 12.5 Статута Машинског факултета, Истраживачко стручно веће на седници од 28.12.2011. године, донело је следећу

ОДЛУКУ

Прихвата се Техничко решење рађено у орквиру пројекта ТР-35004, под насловом: *"Испитивање трења у микро подручју применом метода скенирајуће микроскопије (Friction Force Microscopy",* чији су аутори: доц.др Божица Бојовић, проф.др Зоран Миљковић, проф.др Бојан Бабић и др Лидија Матија, научни саветник, а позитивну рецензију поднели: проф.др Ђуро Коруга и др Дарко Васиљевић, виши научни сарадник, Институт за физику.

Одлуку доставити: Министарству за науку и технолошки развој РС, рецензентима и архиви Факултета ради евиденције.

ПРОДЕКАН ЮИСТРАЖИВАЧКУ ДЕЛАТНОСТ ф.др Војкан Лучанин