

37. JUPITER KONFERENCIJA

sa međunarodnim učešćem

37th JUPITER CONFERENCE

with foreign participants

**ZBORNİK RADOVA
PROCEEDINGS**



UNIVERZITET U BEOGRADU - MAŠINSKI FAKULTET

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

Beograd, maj 2011.

Marković, D. PRIMENA INFORMACIONO KOMUNIKACIONIH TEHNOLOGIJA U REALIZACIJI VIRTUELNOG PROJEKTA	1.33
Marković, B. VAZDUHOPLOVSTVO I ODBRAMBENA INDUSTRIJA KREĆU KA IZMENJENIM MEĐUNARODNIM STANDARDIMA	5.6
Mikalački, Ž., Tabaković, S., Zeljković, M., Živković, A. PROJEKTOVANJE ZGLOBNIH PRENOSNIKA PRIMENOM SAVREMENIH PROGRAMSKIH SISTEMA	3.36
Milačić, V. GLOBALNI UNIVERZITET I VELIKA TRKA ZA LJUDSKIM KAPITALOM	UR.37
Milčić, D., Mijajlović, M., Anđelković, B., Đurić, S. RAZVOJ MODULA ZA PRORAČUN ZAVARENIH SPOJEVA	3.53
Milosavljević, A., Polić Radovanović, S., Petronić, S. CAD/CAM TEHNOLOGIJE I PRIMENA SUPERLEGURA U SAVREMENOM DIZAJNU	2.80
Milutinović, D., Glavonjić, M., Tanović, L., Bojanić, P., Puzović, R., Živanović S., Kokotović B., Popović M., Slavković N., Mladenović G. REZULTATI ISTRAŽIVANJA I RAZVOJA NOVE GENERACIJE OBRADNIH SISTEMA	UR.51
Mitić, M., Miljković, Z., Vuković, N., Lazarević, I. KONCEPCIJSKO REŠENJE UPRAVLJANJA MOBILNOG ROBOTA U DOMENU UNUTRAŠNJEG TRANSPORTA MATERIJALA INTELIGENTNOG TEHNOLOŠKOG SISTEMA	4.23
Mladenović, G. ANALIZA STRATEGIJA OBRADNE KORIŠĆENJEM KOMERCIJALNIH CAD/CAM SOFTVERA	2.63
Mladenović, C., Tabaković, S., Zeljković, M., Gatalo, R. VIRTUELNI MODEL KAO OSNOVA ZA KINEMATSKU ANALIZU MAŠINE ALATKE	3.1
Pejić, V., Petković, Z., Mišić, B. KONCEPT SISTEMA ZA ODREĐIVANJE PARAMETARA REŽIMA REZANJA ZASNOVANOG NA WEB - TEHNOLOGIJAMA.....	3.115
Peković, O., Simonović, A., Stupar, S., Komarov, D. KONSTRUKTIVNO REŠENJE VRHA DIMNJAKA SA KOMPENZACIJOM TERMIČKIH DILATACIJA.....	2.46
Perović, M., Veljić, D. KARAKTERIZACIJA ZAVARENOG SPOJA RAZLIČITIH LEGURA ALUMINIJUMA FORMIRANOG POSTUPCIMA TOPLJENJEM I PLASTIČNOM DEFORMACIJOM.....	3.47
Petrakov, Y. NEW METHOD OF 3-D SIMULATION FOR CAD/CAM SYSTEMS.....	2.1
Petrašinović, N., Petrašinović, D., Posteljnik, Z., Svorcan, J. PRIMENA NAPREDNIH SOFTVERSKIH ALATA ZA RAZVOJ MLINSKOG KOLA OD KONCEPTA DO GOTOVOG PROIZVODA	3.42
Petrović, P., Milanov, M., Vićentić, A., Stojović, M., Spasić, Ž. PRIMENA INELIGENTNIH SENZORSKIH SISTEMA U RAZVOJU INTEGRISANE AUTOMATIZACIJE REALNIH I VIRTUELNIH PROCESA PROIZVODNOG PREDUZEĆA – REKAPITULACIJA REZULTATA NA PROJEKTU MA14035.....	1.17
Petrović, P., Danilov, I., Lukić, N. NOVI PRISTUPI U PROJEKTOVANJU EKSTREMNO VARIJANTNIH PROIZVODA	3.26
Petrović, M., Miljković, Z., Babić, B., Čović, N. VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE I AKSIOMATSKA TEORIJA PROJEKTOVANJA U KONCEPCIJSKOM PROJEKTOVANJU ROBOTIZOVANOG UNUTRAŠNJEG TRANSPORTA MATERIJALA	3.72
Petrović, M., Danilov, I., Lukić, N., Glavonjić, M., Kokotović, B. MEHANISTIČKA IDENTIFIKACIJA MODELA SILE PRI ORTOGONALNOM REZANJU	3.93



МЕХАНИСТИЧКА ИДЕНТИФИКАЦИЈА МОДЕЛА СИЛЕ ПРИ ОРТОГОНАЛНОМ РЕЗАЊУ⁶

Резиме

У раду је описана идентификација параметара модела сила при ортогоналном резању рендисањем, уз примену двокомпонентног динамометра са мерним тракама за мерење сила. За мерење попречне и уздужне компоненте силе резања, мерне траке су постављене на осам места на полупрстену тела сензора. Сигнали силе резања су снимљени коришћењем модула за аквизицију и обрађивани помоћу MATLAB софтверског пакета. Резултати добијени при различитим параметрима резања (променљива дубина резања и променљива ширина резања) показују да се динамометар може користити за поуздано мерење сила при обради резањем, док експериментална верификација показује да се идентификовани модел може користити за предикцију сила при различитим обрадама резањем, уз задржавање исте геометрије алата и истог материјала обрада.

Кључне речи: модел сила резања, динамометар, мерне траке, аквизиција експерименталних података, Витстонов мост, баждарење

1. УВОД

Обрада резањем је један од најважнијих производних процеса који се широко користи у различитим индустријама па је из тог разлога познавање сила резања од значаја за прорачун крутости структуре и снаге машине алатке [3]. Носећа структура машина алатки би требало да обезбеди да силе резања не остварују деформације које би имале негативан утицај на процес обраде. Да би се спречиле деформације или могућа оштећења машина алатки изазвана већим силама резања, користе се сензори за мерење сила резања, као и сензорске информације за предикцију сила резања. Предикција силе на основу експериментално успостављеног модела може се користити и при пројектовању обрадних система за познате услове процеса резања.

У ову сврху су пројектовани и развијени различити типови динамометара: механички, хидраулички, пнеуматски [3] и др. За овај рад посебно су интересантни механички динамометари, код којих се измерена сила резања углавном добија на основу еластичних деформација материјала. Једначине за израчунавање напона и деформација различитих конструкција (двокомпонентних) динамометара на основу максималне претпостављене силе приказане су у [1,2,3]. Поред конвенционалног приступа базираног на једначинама теорије отпорности материјала, верификација понашања конструкције динамометра, под утицајем спољашњег оптерећења, може се извршити и помоћу методе коначних елемената [4]. Мерење деформација на основу којих се израчунава промена силе, у реалним условима, извршава се помоћу мерних трака на основу промене њихове отпорности.

¹ **Милица Петровић**, студенткиња докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-414, e-mail: mmpetrovic@mas.bg.ac.rs

² **Иван Данилов**, студент докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-414, e-mail: idanilov@mas.bg.ac.rs

³ **Никола Лукић**, студент докторских студија, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-414, e-mail: nlukic@mas.bg.ac.rs

⁴ **Др Милош Главоњић**, редовни професор, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-413, e-mail: mglavonjic@mas.bg.ac.rs

⁵ **Мр Бранко Кокотовић**, асистент, Катедра за производно машинство, Универзитет у Београду - Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, 011/3302-413, e-mail: bkokotovic@mas.bg.ac.rs

⁶ Рађено у оквиру предмета Аквизиција и обрада експерименталних података на докторским студијама.

Положај и начин постављања мерних трака код ових динамометара обухваћени су у [1,2]. За снимање сигнала са мерних трака, тј. за запис силе у току експеримента користе се аквизициони системи. Конфигурисање и баждарење аквизиционог система може се спровести као што је приказано у радовима [1,2,5]. Овако припремљен сензорско-аквизициони систем се може користити за мерење и снимање сила при различитим процесима обраде, како за стругање и глодање [1,2,3], тако и за рендисање [5]. Експериментални подаци добијени аквизицијом могу се користити за израчунавање коефицијената у моделу силе, као и за верификацију модела силе претходно успостављеног неком од познатих математичких метода. У раду [6] приказан је пример нумеричке методе за апроксимацију завојних сечива глодала правим сегментима, како би се случај резања свео на ортогонално резање. У [7] је приказана анализа различитих модела силе резања при глодању и успостављање, у општем случају, степеног модела, којим се у зависности од експонента дебљине струготине може представити линеарна или нелинеарна промена карактера интензитета силе. Поред класичног начина израчунавања и предикције вредности силе на основу успостављених модела, у [8] је приказана могућност примене вештачких неуронских мрежа за ове потребе.

Садржај овог рада је организован у шест поглавља. Након уводног, у оквиру другог поглавља рада је усвојен модел силе резања, затим су представљени конструкциони критеријуми динамометра, уз верификацију димензија полупрстена. У наставку овог поглавља приказан је поступак повезивања мерних трака у пун Витстонов мост. У трећем поглављу представљене су активности пре, у току и после мерења. Ове активности обухватају баждарење сензорског и аквизиционог система пре и после мерења, као и активности у току мерења, које се односе на обраду експерименталних делова. Четврто поглавље обухвата приказ експерименталних резултата и њихову обраду, уз примену софтверског пакета MATLAB. Закључак рада дат је у петом, док је преглед коришћене литературе приказан у шестом поглављу.

2. МАТЕРИЈАЛИ И МЕТОДЕ

Сходно критеријумима који су дати у [9], може се дефинисати неколико модела обрадног система: (1) геометријски и кинематички модел структуре машине; (2) механистички модел процеса обраде; (3) модел спрезања положаја; (4) модел регенеративног ефекта и (5) карта стабилности обрадног система са динамичко-енергетским билансом.

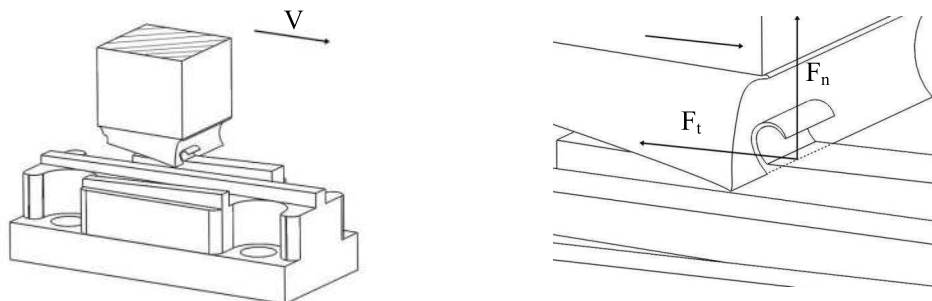
2.1 Модел силе

Механистички модел се користи за израчунавање тренутних вредности сила по класичним емпиријским линеарним, евентуално степеним изразима [7]. Тренутне вредности уздужне и попречне силе при обради рендисањем рачунају се на основу израза датих једначинама 2.1 и 2.2:

$$F_t = a_p \cdot (K_{tc} \cdot h(t)^{x_{Ft}} + K_{te}); \quad (2.1)$$

$$F_n = a_p \cdot (K_{nc} \cdot h(t)^{x_{Fn}} + K_{ne}); \quad (2.2)$$

где су: $F_t [N]$ тренутна вредност уздужне силе; $F_n [N]$ тренутна вредност попречне силе; $K_{tc} [N/mm]$ коефицијент резања за уздужну силу; $K_{nc} [N/mm]$ коефицијент резања за попречну силу; $a_p [mm]$ тренутна дебљина струготине; x_F експонент за дебљину струготине; $K_{te} [N/mm]$ коефицијент губитака за тренутну уздужну силу; $K_{ne} [N/mm]$ коефицијент губитака за тренутну попречну силу. На слици 2.1 приказани су правац и смер попречне и уздужне компоненте силе резања при обради рендисањем, и то на самом почетку захвата.



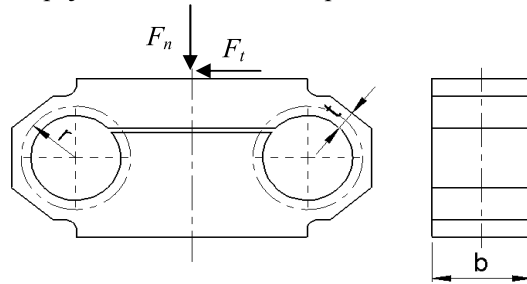
Слика 2.1: Смер кретања алата и правац и смер попречне и уздужне компоненте силе на почетку захвата

2.2 Конструкциони критеријуми и карактеристичне димензије динамометра

Двокомпонентни динамометар има два еластична осмоугаона полупрстена на којима се постављају мерне траке. Кључни критеријуми који се намећу и узимају у обзир при пројектовању и конструисању динамометра су: осетљивост и крутост. Пројектовање динамометра и димензионисање полупрстена није била тема овог рада, тако да су за постојећи динамометар проверене следеће карактеристичне димензије, које утичу на крутост и осетљивост полупрстена:

- ширина $b=34$ mm;
- полупречник $r=15,55$ mm;
- дељина $t=7$ mm;

Шема сила резања при обради рендисањем са карактеристичним димензијама полупрстена дата је на слици 2.2.



Слика 2.2: Шема сила резања и карактеристичне димензије полупрстена динамометра

2.3 Верификација димензија прстена

Према раду [3], за $b=34$ mm, $r=15,55$ mm и $t=7$ mm, извршена је верификација димензија октагоналног полупрстена. Еластичне деформације од сила F_n и F_t приказане су једначинама (2.3) и (2.4), респективно:

$$e_n = \pm \frac{1,09F_n r}{Ebt^2} = \frac{1,09 \times 4500 \times 15,55}{210000 \times 34 \times 7^2} = \frac{7,6273 \times 10^4}{349860000} = 2,1801 \times 10^{-4}; \quad (2.3)$$

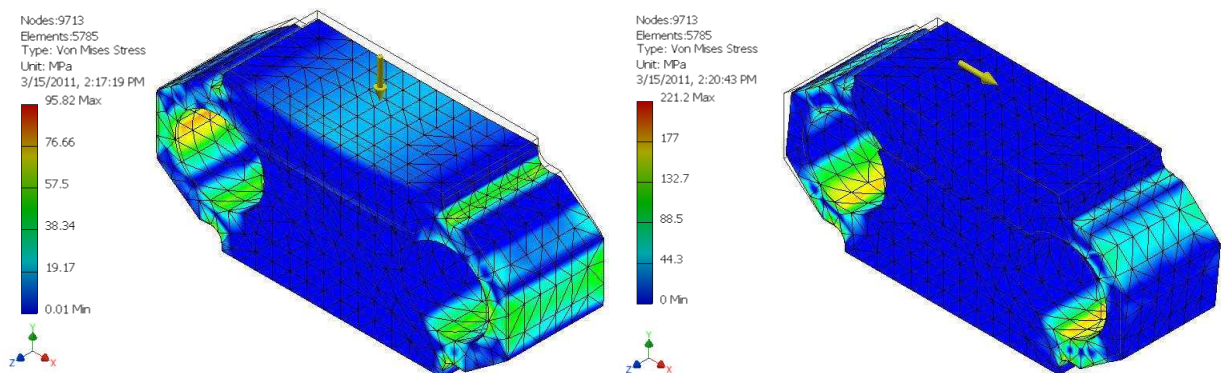
$$e_t = \pm \frac{2,18F_t r}{Ebt^2} = \frac{2,18 \times 4500 \times 15,55}{210000 \times 34 \times 7^2} = \frac{1,5255 \times 10^5}{349860000} = 4,3602 \times 10^{-4}; \quad (2.4)$$

док је напон који се добија израчунат на основу следећих једначина:

$$\sigma_n = Ee_n = 210000 \times 2,1801 \times 10^{-4} = 45,7820 N / mm^2; \quad (2.5)$$

$$\sigma_t = Ee_t = 210000 \times 4,3602 \times 10^{-4} = 91,5639 N / mm^2. \quad (2.6)$$

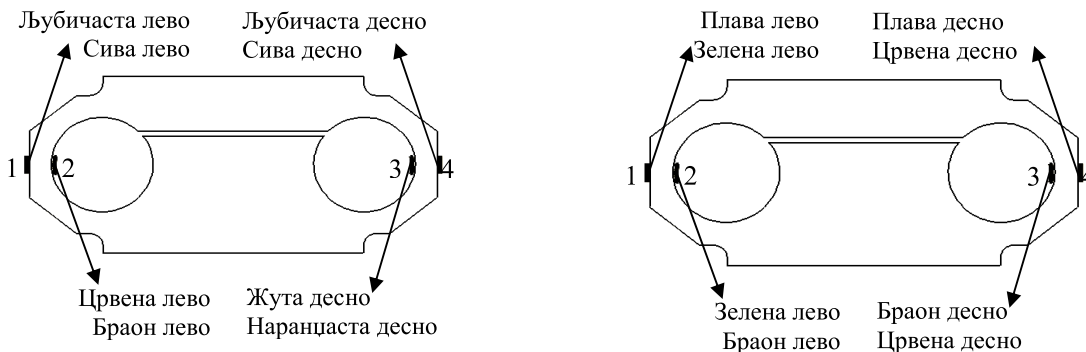
Верификација добијених резултата за напоне и деформације извршена је и у софтверу Autodesk Inventor, у модулу за анализу методом коначних елемената. Након генерисања 3D модела сензора, извршено је оптерећивање сензора познатим вредностима попречне, слика 2.3 лево, и уздужне силе, слика 2.3 десно. На сликама је приказана и легенда са бројем чворова и бројем коначних елемената коришћених за анализу, као и геометрија сензора током дејства обе силе. Овај динамометар је употребљив за мерење очекиваних сила $F_n = 4500 N$ и $F_t = 4500 N$.



Слика 2.3: Деформација сензора током дејства попречне и уздужне силе са приказом мреже коначних елемената

2.3 Шема за повезивање пуног Витстоновог моста

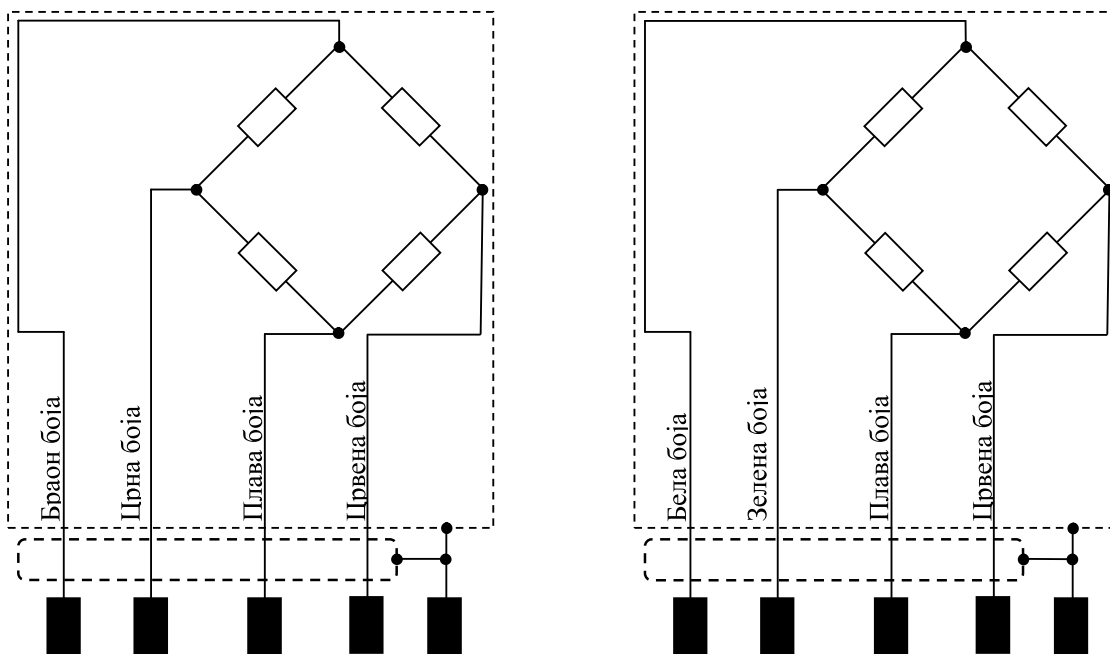
Након постављања и лепљења мерних трака на сензор, следи процес лемљења излазних проводника мерних трака и проводника за везу са конекторима. Због једноставности при повезивању моста, одабрани су проводници различитих боја и то за прву мерну траку љубичасти и сиви, за другу црвени и браон, за трећу наранџасти и жути и за четврту љубичасти и сиви. На сликама 2.4 и 2.5 приказани су положаји мерних трака са назначеним бојама проводника, док је шема за повезивање пуног Витстоновог моста за мерење попречне компоненте силе приказана на слици 2.6. Аналогна процедура је примењена и за лемљење мерних трака за мерење уздужне компоненте силе резања.



Слика 2.4: Положај мерних трака на површинама сензора са бојама проводника



Слика 2.5: Положај мерних трака на површинама сензора, боје проводника и фотографије реализованог ожичења

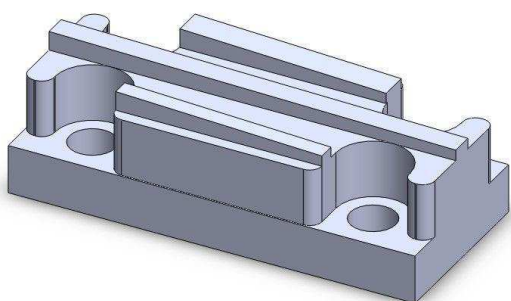


Слика 2.6: Шема за повезивање Витстоновог моста за мерење попречне и уздужне компоненте силе

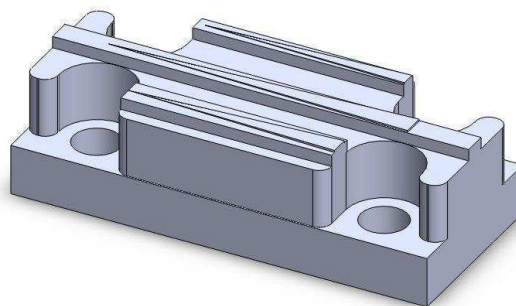
3. ПРИМПРЕМА И ТОК ЕКСПЕРИМЕНАТА

3.1 Експериментални делови

Део 1 и део 2 су идентични и њихов 3D модел приказан је на слици 3.1. Направљени су од комада алуминијума на вертикалној глодалици са ручним управљањем. Имају четири рупе преко којих се помоћу вијака везују за тело сензора. На њима се налазе три брега ширине 3, 4 и 5 mm са променљивом висином. 3D модел дела 3 приказан је на слици 3.2, направљен је дорадом дела 1, на вертикалној глодалици са ручним управљањем, након првог експерименталног мерења. На њему се налазе три брега променљиве ширине и променљиве висине.



Слика 3.1: 3D модел дела 1 и дела 2



Слика 3.2: 3D модел дела 3

3.2 Машине и алат

Прво мерење урађено је на деловима 1 и 2 на хоризонталној рендисалци која је приказана на слици 3.3. Главно кретање, које врши алат, остварено је ручним померањем хоризонталног клизача машине. Позиционо кретање помоћу којег се задаје дубина резања остварује се ручним подизањем радног стола машине. Алат је причвршћен у носач алата вијком за стезање. Обрадак је заједно са сензором причвршћен у глодачкој стези која је постављена на радни сто машине.

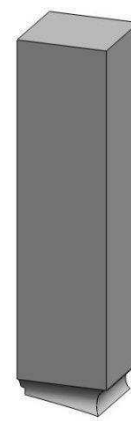
Друго мерење урађено је на делу 3. За мерење је искоришћен универзални струг приказан на слици 3.4 заједно са модулом за аквизицију. Главно кретање врши обрадак, који је заједно са сензором силе стегнут у носач алата и постављен на попречни клизач струга. Главно кретање се остварује ручним обртањем навојног вретена помоћу којег се покреће попречни клизач. Позиционо кретање помоћу којег се задаје дубина резања остварује се ручним померањем уздужног клизача. Алат је постављен у стезну главу главног вретена струга, која је закочена како се алат не би померао у току обраде.



Слика 3.3: Хоризонтална рендисалка



Слика 3.4: Универзални струг са уређајима за аквизицију

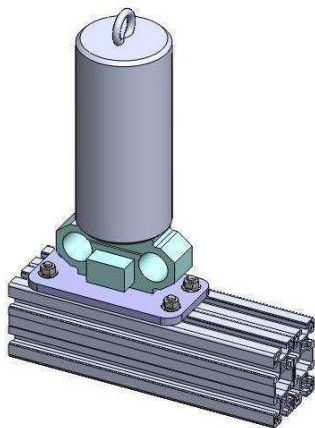


Слика 3.5: 3D модел ножа

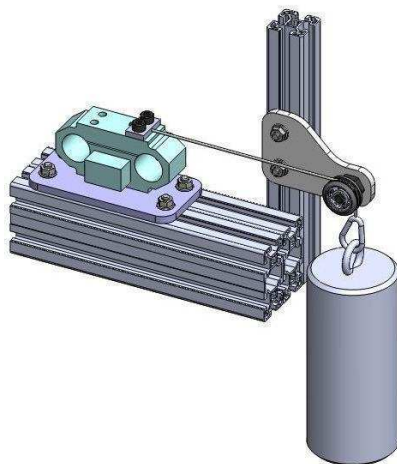
3D модел стругарског ножа од брзорезног челика приказан је на слици 3.5. Нож је адекватно обрушен, са грудним углом $45,22^\circ$, леђним углом $7,13^\circ$, док је капа угао једнак нули због ортогоналности резања, а све у циљу добијања квалитетних података при обради.

3.3 Баждарење динамометра и припрема за експерименте

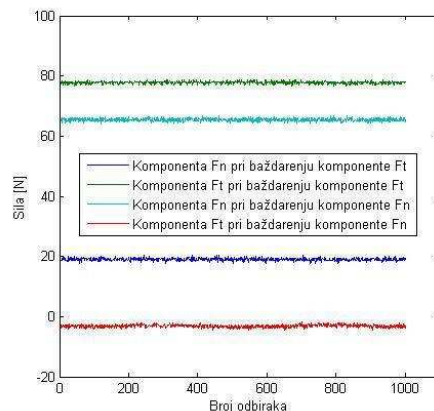
Баждарење сензора урађено је пре мерења на систему за аквизицију помоћу система тега са сајлом и точкићима. Попречна компонента је баждарена постављањем тега познате масе директно на сензор силе, као што се може видети на слици 3.6. Уздужну компоненту је теже баждарити, па је поставка, која је приказана на слици 3.7, нешто сложенија. На тело сензора причвршћена је сајла, која је пребачена преко котура. На другом крају сајла је преко карабињера причвршћена за тег познате масе. Запис који је добијен након баждарења попречне и уздужне силе приказан је на слици 3.8. Баждарење сензора важно је урадити и после мерења како би се проверило да није дошло до неких поремећаја у систему сензора и аквизиције у току мерења.



Слика 3.6: Баждарење попречне компоненте



Слика 3.7: Баждарење уздужне компоненте



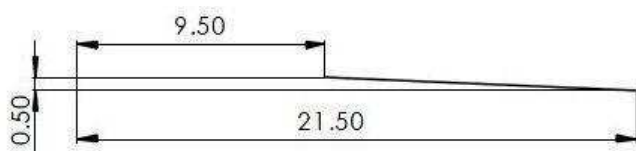
Слика 3.8: Запис баждарења попречне и уздужне компоненте пре мерења

Компаратером је проверена паралелност основне површине сва три дела са алатом како се не би добио додатни нагиб брегова при резању. Усвојено је да је варијација паралелности у границама 0,1 mm задовољавајућа. Помоћу компаратера су измерене промене висине сваког брега, а помоћу помичног кљунастог мерила са нонијусом су измерене дужине и ширине брегова. Тиме је утврђена тачна геометрија сва три дела.

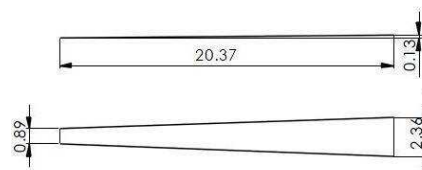
3.4 Експерименти

Сваки брег дела 1 и 2 обрађиван је из више пролаза, док су сва три брега дела 3 обрађена из једног пролаза. Поступак мерења се састоји у томе да се брег на ком се врши мерење обележи маркером, затим се полако нож постави на нулу у односу на врх брега, након чега следи заузимање жељене дубине позиционим кретањем и провером оставреног кретања компаратором. Након тога се фино приближава нож обратку и када благо зареже површину брега проверава се да ли је дужина од зарезаног места до краја брега задовољавајућа. Уколико је потребно, повећава се дубина, док се у супротном скицира се геометрија дела брега и затим врши резање уз снимање података. Након резања врши се мерење геометрије дела брега помичним кљунастим мерилом, а димензије се уписују на скицу геометрије дела брега, које су приказане за део 1 на слици 3.9, а за део 3 на слици 3.10.

За силу F_t постављен је опсег 0,2 и фактор скалирања 200, а за F_n опсег 0,1 и фактор скалирања 100, тако да F_t може да се мери до 2000N и F_n до 1000N. Приликом мерења дела 1 фреквенција узорковања је 600Hz, а време трајања записа 2s па постоји 1200 одбирака по запису. Код дела 2 фреквенција узорковања је подешена на 1000Hz, а време мерења смањено на 1,5s, а код дела 3 на 500Hz и 4s, зато што је обрада спорја.



Слика 3.9: Скинути део брега 1 други пролаз

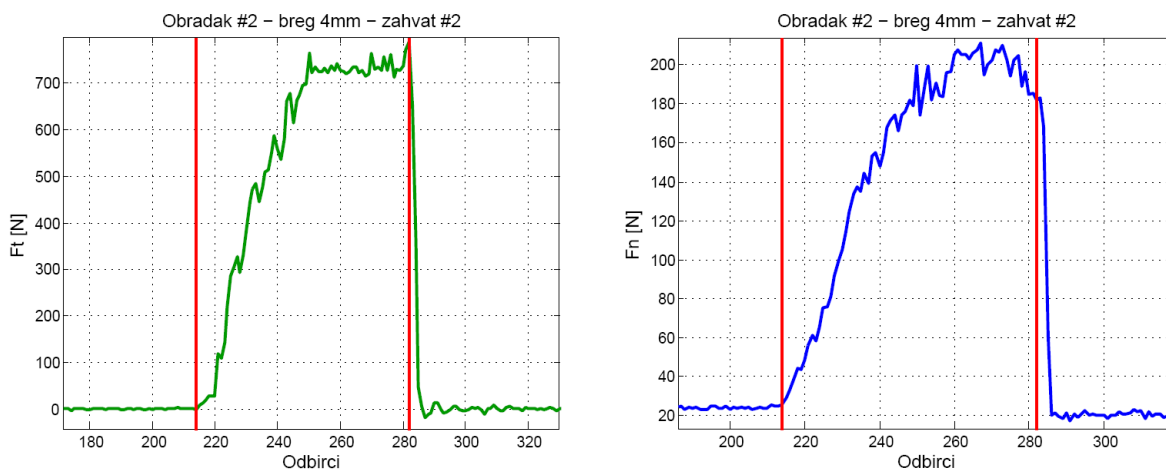


Слика 3.10: Скинути део средњег брега

4. ОБРАДА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ ПОДАТАКА

4.1 Примарна обрада записа силе

У току мерења, која су обављена под познатим условима аквизицијом се добијају „сирови“ подаци записани у дигиталном облику, у одговарајућим датотекама. Као што је познато, обрадом експерименталних података потребно је одредити параметре за усвојени модел силе резања. Параметре представљају коефицијенти резања и губитка за уздужну и попречну компоненту силе (K_{tc} , K_{te} , K_{nc} , K_{ne}), и експонент дубине резања (x_F). У циљу израчунавања коефицијената и експонената садржаних у одабраном моделу силе, првобитно је потребно извршити примарну обраду података, што у овом случају подразумева одбацавање непотребног дела записа из сваке од датотека. Као релевантан, узима се део записа од почетка пораста силе, што се усваја за почетак резања, до тренутка за који се сматра да означава завршетак резања, а то је одбирак након кога вредност силе нагло опада. Пример издвајања валидног сегмента записа силе дат је на слици 4.1.



Слика 4.1: Уздужна и попречна компонента силе при другом пролазу резања брега ширине 4 mm, на обратку #2 – увеличан приказ

Како би израчунавања параметара модела била могућа, за сваки издвојен запис силе неопходно је одредити коресподентну промену дубине резања. Дакле, на основу познате дужине и дубине резања из скице пролаза, као и броја изабраних одбирака силе формира се низ (вектор-колона) H , који садржи дубине резања коресподентне сваком одбирку из изабраног сегмента записа силе. Дефинисани низ H израчунава се на следећи начин:

$$H = \left(\frac{h_{\max}}{l_{\max}} \right) \cdot [0 \ \Delta l \ 2\Delta l \ n\Delta l]^T ; \quad (4.1)$$

где су: h_{\max} максимална дубина резања, l_{\max} максимална дужина резања, n број изабраних одбирака из записа силе, док је Δl инкремент дужине пролаза који се израчунава као:

$$\Delta l = \frac{l_{\max}}{n} . \quad (4.2)$$

Представљени параметри за израчунавање дубине резања су дати у општем облику. Приликом израчунавања, параметри су различити за сваки пролаз и усвајају се према скици формираној у току експеримента. У случају да пролаз садржи сегмент константне дубине резања, тада се на претходно формирану низ са нагибом придружује низ са одговарајућим бројем чланова вредности максималне дубине (h_{\max}), у складу са укупним бројем валидних одбирака.

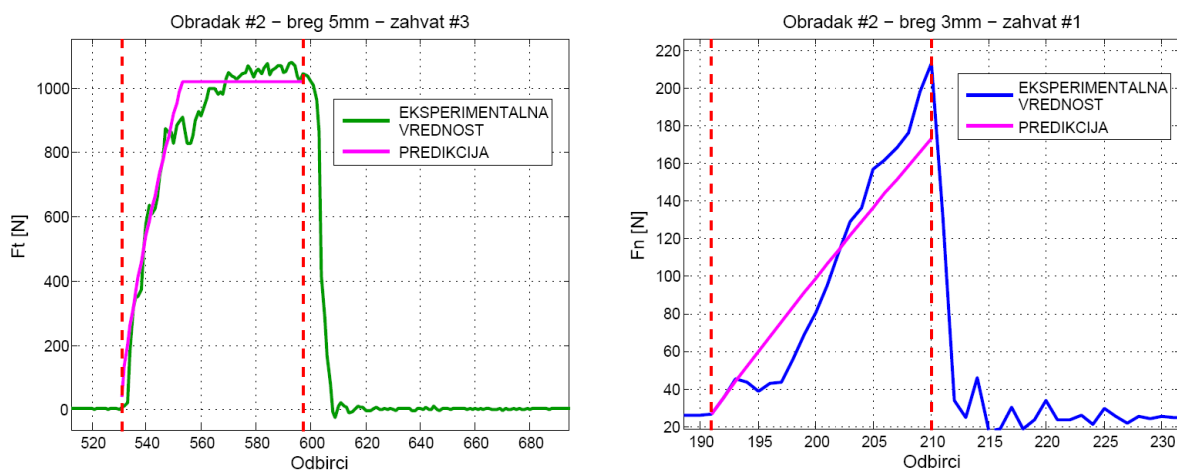
4.2 Израчунавање параметара модела силе на основу података из првог експеримента

Након издвајања релевантних сегмената записа и формирања низова који одговарају промени дубине резања за сваки од издвојених одбирака силе, следи рачунска обрада података. За потребе рачунске обраде претходно припремљених података коришћен је MATLAB софтверски пакет, односно интегрисана функција *nlinfit* у оквиру овог софтвера. Функција *nlinfit* користи се за естимацију коефицијената нелинеарне регресионе функције дефинисане од стране корисника, користећи методу најмањих квадрата. У наставку, применом функције *nlinfit*, на основу претходно издвојених података из записа сила и одређених коресподентних промена дубина резања према скицама из експеримента, одређени су коефицијенти и експоненти садржани у усвојеном моделу силе. Као што је из експеримента познато поред вредности силе и дубине резања за израчунавања се као познат параметар уводи и ширина брега константна у току резања једног пролаза, односно брега. Израчунате вредности коефицијената и експонента у усвојеном моделу, за уздужну и попречну компоненту силе дати су у табели 4.1.

Табела 4.1: Израчунати параметри модела силе		
Параметри модела силе	Попречна компонента	Уздужна компонента
Коефицијент резања [N/mm]	$K_{tc} = 482,61$	$K_{nc} = 153,22$
Коефицијент губитка [N/mm]	$K_{te} = 6,89$	$K_{ne} = 8,84$
Експонент дубине резања	$x_{Ft} = 0,74$	$x_{Fn} = 0,95$

Међусобни однос вредности K_{tc} , K_{te} и K_{nc} , K_{ne} указује да је коефицијент губитка за тренутну силу занемарљив у односу на коефицијент резања за исту, што одговара претпоставкама према [7], где је наглашено да $K_{te} \rightarrow 0$. Вредност експонента дубине резања x_{Ft} указује да се ради о нелинеарној промени уздужне силе, док је промена вредности попречне компоненте приближно линеарна.

Заменом израчунатих вредности коефицијената и експонента у усвојен модел силе, уз промену дубине резања која је позната из експеримента, као и за познату ширину резања, добија се апроксимирана вредност силе, односно предикција за дате услове. Упоредни приказ експерименталних резултата и предикције, за одабране записа уздужне и попречне силе, дат је на слици 4.2.



Слика 4.2: Упоредни приказ експерименталних вредности и предикције уздужне и попречне компоненте силе за израчунате коефицијенте и експонент, у оквиру одабраних интервала записа

4.3 Верификација израчунatih параметара модела силе на основу података из другог експеримента

Средства и услови под којима је извршен други експеримент описани су у трећем поглављу. Такви услови за резултат су имали релативно равномерно резање, уз дужи временски интервал, за разлику од првог експеримента где је појава силе била приближно импулсна.

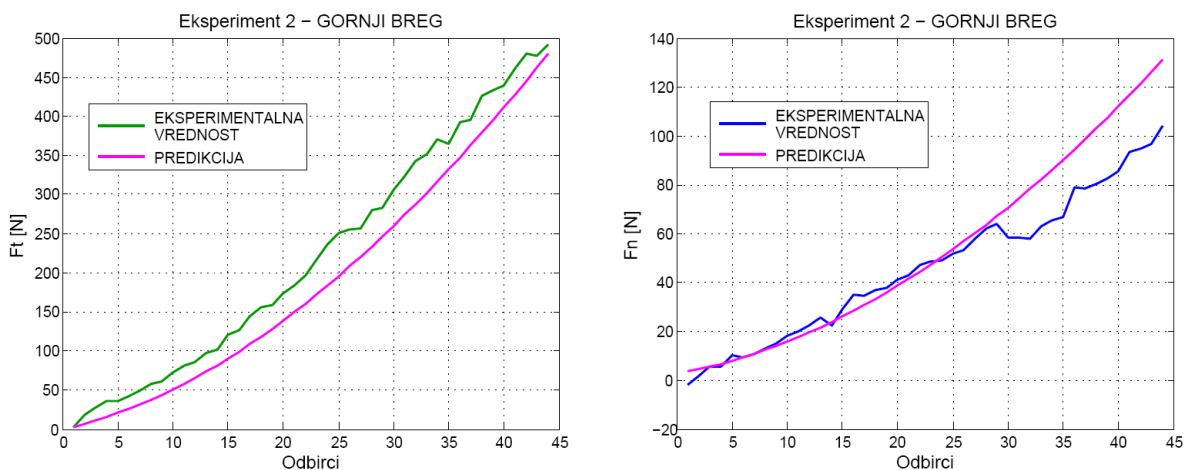
Примарном обрадом података из другог експеримента поново је било обухваћено издвајање релевантних сегмената записа силе, уз аналоган поступак одређивања коресподентне промене дубине, а у овом случају и ширине резања.

Усвојен модел силе, комплетиран израчунавањима на основу података из првог експеримента, што је приказано коефицијентима и експонентима датим у табели 4.1, овде се још једном представља у потпуном облику:

$$F_t = a_p \cdot (482,61 \cdot h(t)^{0,74} + 6,89); \quad (4.3)$$

$$F_n = a_p \cdot (153,22 \cdot h(t)^{0,95} + 8,84). \quad (4.4)$$

На месту дубине (h) и ширине (a_p) брегова, приликом верификационих израчунавања, уводе се промене тих вредности према скици геометрије обратка за други експеримент. Низови ових вредности формиран су приликом примарне обраде података. Овде се верификацијом практично извршава предикција вредности силе за познате услове из другог експеримента. Поред тога предикцију је оправдано извршити само уколико су материјал и геометрија алата, као и материјал обратка идентични у поступку одређивања параметара модела силе и у процесу резања за који је потребно извршити предвиђање. У овом случају тај услов је испуњен. У наставку је на слици 4.3 дат упоредни приказ предикције вредности компонената силе за други експеримент и записа силе у току другог експеримента, под већ дефинисаним условима, при резању једног од три брега – горњег брега.



Слика 4.3: Упоредни приказ експерименталних вредности и предикције попречне и уздужне компоненте силе за пролаз резања горњег брега

На слици 4.3 се уочава да је на основу модела формираног обрадом података из првог експеримента могуће извршити предикцију силе уз дефинисане услове, јер степен поклапања предвиђених са измереним вредностима из другог експеримента веома висок и јасно указује на то.

5. ЗАКЉУЧАК

За мерење уздужне и попречне компоненте силе при обради рендисањем коришћен је двокомпонентни динамометар базиран на мерним тракама. За потребе верификације карактеристичних димензија полупрстена динамометра, поред теоријског приступа базираног на теорији отпорности материјала, коришћен је и софтверски приступ, применом методе коначних

елемената. У делу рада који се односи на мерења, након процедуре баждарења попречне и уздужне компоненте силе пре мерења, приказан је један пролаз при обради резањем брегова експерименталних делова. Поред 3D модела, приказана је и скица геометрије скинутог дела брега са дефинисаним карактеристичним димензијама. Након фазе мерења, у фази обраде експерименталних података паралелно су приказани резултати и њихова примарна обрада, која се односи на издвајање релевантних интервала записа силе за даља израчунавања. Затим је у фокус стављен опис интегрисане функције MATLAB-а, као технике за нелинеарну апроксимацију експерименталних података, уз осврт на примену у конкретном случају (израчунавање коефицијената модела силе). У наставку су извршена ова израчунавања за сваку од компоненти сила засебно и дат је упоредни приказ експерименталних вредности и предикције силе на основу израчунатих коефицијената. На основу успешне верификације модела силе, може се закључити да је добијене податке могуће применити за потребе предикције вредности компоненте силе, при различитим врстама обраде, али за идентичне услове као у извршеном експерименту (иста геометрија и материјал алата и исти материјал обратка).

6. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Yaldiz S., Unsacar F., **Design, development and testing of a turning dynamometer for cutting force measurement**, Materials and Design 27, pp. 839–846, 2006.
- [2] Korkut I., **A dynamometer design and its construction for milling operation**, Materials and Design 24, pp. 631–637, 2003.
- [3] Karabay S., **Design criteria for electro-mechanical transducers and arrangement for measurement of strains due to metal cutting forces acting on dynamometers**, Materials and Design, Vol. 28, pp. 496–506, 2007.
- [4] Totis G., Sortino M., **Development of a modular dynamometer for triaxial cutting force measurement in turning**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 51, pp. 34–42, 2011.
- [5] Seker U., Kurt A., Ciftci I., **Design and construction of a dynamometer for measurement of cutting forces during machining with linear motion**, Materials and Design, Vol. 23, pp. 355–360, 2002.
- [6] Gonzalo O., Beristain J., Jauregi H., Sanz C., **A method for the identification of the specific force coefficients for mechanistic milling simulation**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 50, pp. 765–774, 2010.
- [7] Milfelner M., Cus F., Balic J., **An overview of data acquisition system for cutting force measuring and optimization in milling**, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164–165, pp. 1281–1288, 2005.
- [8] Faassen, R.P.H., **Chatter Prediction and Control for High-Speed Milling: Modelling and Experiments**, Ph.D. work, Technische Universiteit, Eindhoven, 2007.
- [9] Главоњић М., **Предавања на предмету Машине алатке М**, Универзитет у Београду - Машински факултет, Београд, 2010.

MECHANISTIC APPROACH TO IDENTIFICATION OF THE SPECIFIC FORCE COEFFICIENTS

Abstract

The paper describes the identification of model parameters of cutting forces during orthogonal cutting, using two-component dynamometer with strain gauges to measure force. For measuring radial and extensive components of cutting force, strain gauges were installed at eight positions on the body of the ring sensor. Cutting force signals are recorded using a data acquisition module and processed by MATLAB software package. The results obtained under different cutting parameters (variable cutting depth and variable cutting width) shows that the dynamometer can be used for reliable measurements of the cutting forces, and experimental verification shows that the identified model can be used to predict the forces under different types of machining, maintaining the same tool geometry and the same workpiece material.

Keywords: cutting forces model, dynamometer, strain gauges, acquisition of experimental data, Wheatstone bridge, calibration