



Tabaković, S¹., Knežev, M¹., Zeljković, M¹., Živanović, S²., Štrbac, B¹.

ANALIZA I VERIFIKACIJA OBRADNE SLOŽENIH GEOMETRIJSKIH POVRŠINA OPERACIJOM TROOSNOG GLODANJA NA NU MAŠINAMA ALATKAMA^{3) 4)}

Rezime

Operacija obrade glodanjem sa tri numerički upravljane ose često u savremenim uslovima obuhvata izradu površina čija topologija utiče na pojavu različitih opterećenja u sistemu pomoćnog kretanja mašine alatke. Kao rezultat toga, dobijaju se obrađene površine sa netačnostima uzrokovanim između ostalog geometrijom oblika koji se izrađuje i uticajem veličine pomeranja u pojedinim osama u svim segmentima putanje alata. Cilj rada je ispitivanje grešaka koje nastaju pri obradi pojedinih složenih oblika. Analiza oblika je realizovana u dve faze: softverski poređenjem geometrije obradka sa oblicima koji se dobijaju putanjom alata, kao i fizički skeniranjem obrađenih površina kontaktnom metodom i poređenjem dobijenog oblaka tačaka sa modelom izradka.

Ključne reči: složeni oblici, greške obrade, verifikacija putanje alata, skeniranje kontaktnom metodom

1. UVOD

Tačnost procesa obrade na numerički upravljanim mašinama alatkama predstavlja kompleksnu problematiku koja obuhvata karakteristike svih činilaca u procesu obrade. Tu spadaju karakteristike mašina alatki (krutost, tačnost pod sistema pomoćnog kretanja, karakteristike mernog sistema), alata i držača alata, krutost i podešavanja steznog pribora, netačnosti putanje alata koji nastaju pri aproksimaciji geometrije i sl. U cilju brže i efikasnije pripreme proizvodnje poslednjih godina se uvode virtualni obradni sistemi koji primenom različitih tipova programskih sistema omogućavaju značajno efikasnije definisanje tehnoloških procesa obrade i programiranje numerički upravljanih mašina alatki primenom simulacije obrade čime se efikasno pronalaze potencijalni nedostaci [1]. Primenom ovakvih tehnologija se omogućava određivanje uticaja tačnost mašine alatke, tehnološkog procesa i drugih činilaca kao i njihovim upravljanjem definisanjem optimalnog procesa obrade [2].

Efikasna eksploatacija savremenih obradnih sistema se na današnjem nivou automatizacije ne može zamisliti bez primene računara i CAD/CAE/CAM programskih sistema. To je naročito izraženo kod obrade radnih predmeta složenije konfiguracije. Primenom ovakvih sistema moguća je integracija inženjerskih aktivnosti u okviru projektovanja proizvoda i pripreme proizvodnje korišćenjem tehnologija virtuelnog prototipa, metoda simulacije ponašanja proizvoda, različitih računarskih analiza, itd. Time se direktno utiče na smanjenje vremena razvoja proizvoda budući da se provere pojedinih varijantinih rešenja realizuje računarski uz manje troškove u odnosu na primenu fizičkih prototipova.

Jedan od važnih segmenata razvoja proizvoda primenom računara obuhvata pripremu proizvodnje u cilju definisanja tehnologije izrade proizvoda i automatizovanog programiranja numerički upravljanih mašina alatki primenom CAM programskih sistema.

Primena računarske simulacije i analize dobijenog rešenja u ovoj oblasti obuhvata više faktora značajnih za proizvodnju kao što su: proizvodnost, predikcija kolizije, opterećenje alata i mašine alatke, itd. To omogućava analizu više potencijalnih rešenja kao i generisanje optimalnog rešenja upravljačkog programa.

¹⁾ Dr Slobodan Tabaković, vanr. prof., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2315, e-mail: (tabak@uns.ac.rs), msr Miloš Knežev, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2345, e-mail: (knezev@uns.ac.rs), dr Milan Zeljković, red. prof., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2351, e-mail: (milanz@uns.ac.rs), dr Branko Štrbac, docent., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, tel: +381 21 485 2316, e-mail: (strbacb@uns.ac.rs)

²⁾ Dr Saša Živanović, vanr. prof., Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, e-mail: (szivanovic@mas.bg.ac.rs)

³⁾ U okviru rada se prezentuje deo rezultata istraživanja u okviru projektu TR 35025: Savremeni prilazi u razvoju specijalnih uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

⁴⁾ Rad obuhvata i rezultate istraživanja u okviru projekta TR 35022: Razvoj nove generacije domaćih obradnih sistema, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

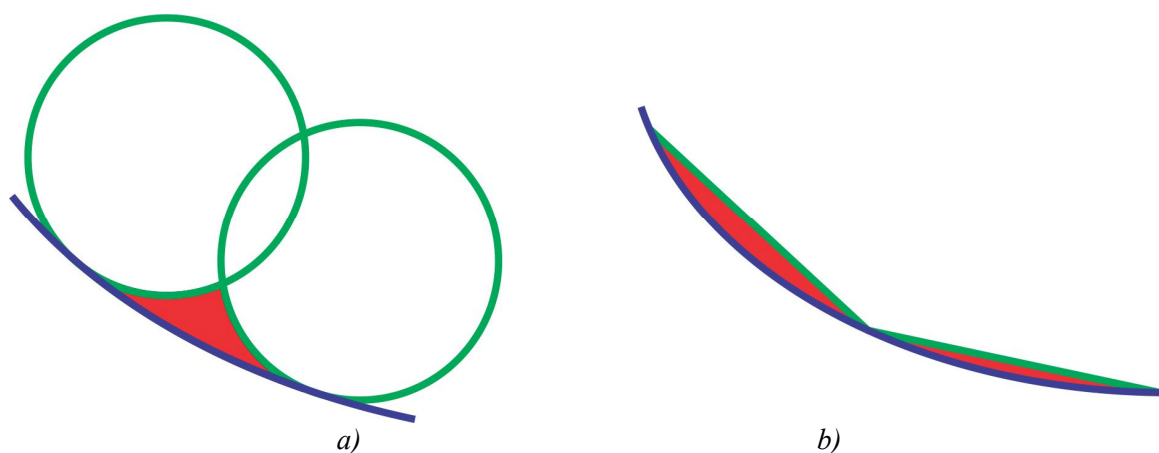
Prethodno se postiže variranjem strategija obrade, tehnoloških parametara, izbora alata i pribora kao i metoda definisanja putanje alata dok se ne dobije optimalno rešenje. Sve pomenute aktivnosti se, u savremenim uslovima, realizuju na računaru, bez utroška vremena mašine i drugih fizičkih resursa [3].

Jedan od najizraženijih uticajnih faktora na ukupnu grešku koja nastaje u procesu izrade proizvoda složene geometrije na numerički upravljanim mašinama alatkama predstavlja aproksimacija geometrijskih oblika koja se sprovodi pri definisanju putanje alata konverzijom složenih geometrijskih formi na linearne, kružne ili polinomne segmente. U prvom delu istraživanja, prikazanog u radu, je opisan postupak analize grešaka nastale ovim procesom. Druga faza istraživanja obuhvata analizu ukupne tačnosti obrade sa stanovišta karakterističnih geometrijskih oblika koji se nalaze na test radnom predmetu. Ova faza je realizovana fizički, skeniranjem obrađenih površina kontaktnom metodom na koordinatnoj mernoj mašini. Poređenjem računarskog modela radnog predmeta na osnovu kog je i definisana tehnologija obrade i oblaka tačaka dobijenih skeniranjem su dobijena ostvarena ukupna odstupanja od željenih dimenzija [7].

2. PROBLEMATIKA APROKSIMACIJE KRIVOLINIJSKIH PUTANJA

Pored činjenice, da već duži niz godina postoje programski sistemi za automatizovano programiranje numerički upravljanih mašina alatki, analiza grešaka koje nastaju pri generisanju putanje alata predstavlja relativno zapostavljenu oblast analize grešaka obrade [5]. Ove greške su rezultat metode definisanja geometrijskih elemenata putnje alata (procesiranje) kao i procesa njenog prilagođavanja konkretnoj mašini alatki (postprocesiranje).

Osnovni razlog za zapostavljanje ovih netačnosti je što se u proizvodnji u većini slučajeva obrađuju delovi čija se konfiguracija sastoji od pravolinijskih i kružnih oblika koje spadaju u osnovne geometrijske oblike koje upravljačke jedinice numerički upravljanih mašina alatki sa vrlo velikom tačnošću ostvaruju na osnovu ugrađenih interpolacionih funkcija, pa do pojave grešaka aproksimacije praktično i ne dolazi. To se može zaključiti i na osnovu činjenice da geometriju test radnih predmeta za ispitivanje radne tačnosti mašina alatki (NCG preporuke, preporuke proizvođača) čine isključivo oblici koji pripadaju osnovnim geometrijskim oblicima. Razvoj proizvoda složene geometrije koja se sastoji od površina koje ne spadaju u osnovne geometrijske oblike, kao novi tehnološki izazov proistekao pretežno iz automobilske, avio industrije, industrije prerade plastike, itd. drastično je ubrzao usavršavanje programskih sistema za automatizovano definisanje upravljačkih programa. U tim slučajevima se krivolinijske putanje najčešće aproksimiraju: linijama, kružnicama ili u najnovijim upravljačkim sistemima spline segmentima (što je još uvek retko u industriji). Na slici 1 je dat primer aproksimacije segmenta eliptične putanje a) kružnicama b) linijama, što neizbežno dovodi do pojave grešaka koje su prikazane crvenom bojom.



Slika 1. Aproksimacija segmenta eliptične putanje a) kružnicama b) linijama

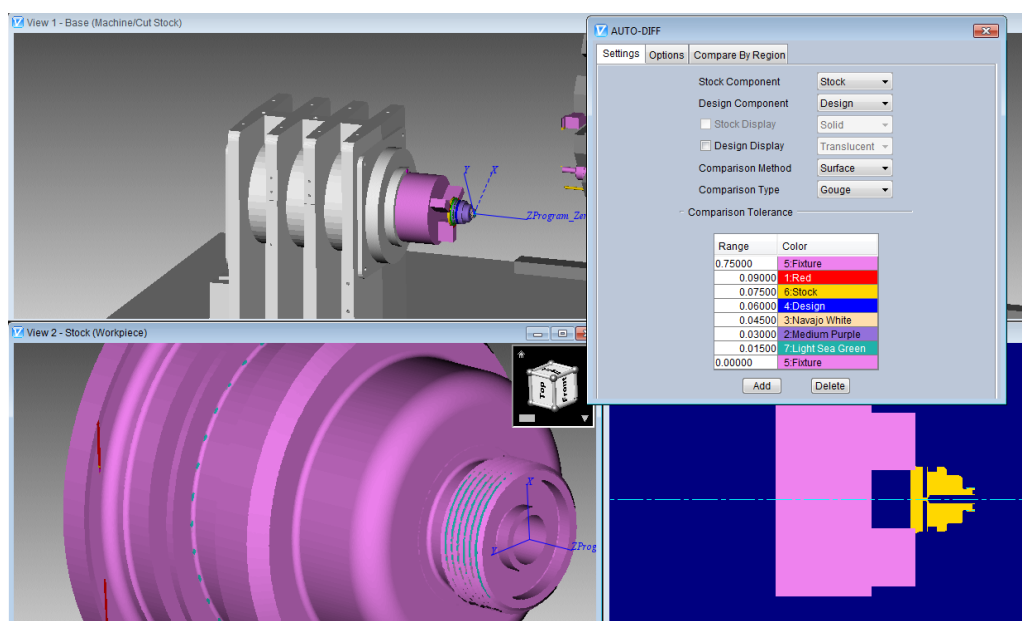
Analize matematičkih algoritama ugrađenih u programske sisteme za automatizovano programiranje numerički upravljanih mašina alatki s ciljem aproksimacije krivolinijskih putanja omogućuju korisnicima da steknu uvid u tačnost i mogućnosti CAM programskog sistema i da korekcijom pojedinih parametara dobiju putanju alata "optimalne tačnosti", pri čemu je funkcija cilja optimizacije dozvoljeno odstupanje od oblika obrađene površine. Primena CAD/CAM programskih sistema se smatra najefektivnijim rešenjem za implementaciju u tehnološku pripremu proizvodnje proizvoda složene geometrije [6].

2.1 Analiza grešaka aproksimacije

Proces definisanja upravljačkog programa za numerički upravljane mašine alatke može biti realizovan na više načina ručno ili primenom različitih programskih sistema. Iz tog razloga nije jednostavno odrediti da li projektovana putanja alata dovoljno tačno opisuje zadatu geometriju. Jedan od načina da se izvrši provera tačnosti jeste primena programskih sistema za verifikaciju upravljačkog programa.

Greške aproksimacije nastaju pri formiranju putanje alata kao i pri njenom prevođenja u upravljački program za konkretnu NUMA. One su naročito izražene kada se putanja alata izražava isključivo linearnim interpolacionim segmentima.

Verifikacija putanje alata i analiza grešaka aproksimacije podrazumeva da se dobijena putanja alata tj. upravljački program učita u specijalizovani programski sistem za analizu grešaka simulacije skidanja materijala sa priprema i poređenje dobijenih oblika sa izvornim modelom radnog predmeta. Za ovakve analize se koristi više programskih sistema u koje spadaju Vericut, NCSimul, NCBrain i sl. U okviru istraživanja je za analizu putanje alata korišćen programski sistem CGTech Vericut i verifikaciona funkcija AutoDiff koja se koristi za diskretne analize grešaka putanje alata (Slika 2).



Slika 2. AutoDiff u okviru Vericut

Korišćeni programski sistem kao i slični poseduje mogućnost direkne komunikacije sa većim brojem CAD/CAM sistema u cilju distribucije modela kao i primene neutralnih formata u slučajevima kada nije moguća direktna distribucija modela. Analizom je omogućeno poređenje topologije aproksimativno opisanog modela radnog predmeta sa modelom koji se dobija simulacijom skidanja materijala sa geometrije priprema. Rezultat analize je izveštaj koji obuhvata prirodu nastalih grešaka, vrednost tolerancije, pozicije gde putanja alata izlazi iz definisanog tolerancijskog polja i greške po zonama obrade.

3. FIZIČKA VERIFIKACIJA PUTANJE ALATA

Fizička analiza putanje alata je realizovana obradom definisanog radnog predmeta na numerički upravljanoj obradnoj mašini za glodanje/bušenje Haidenraich & Harback FM38 sa upravljačkim sistemom Siemens Sinumerik 840D sl i upravljačkim softverom Sinumerik Operate 4.5.

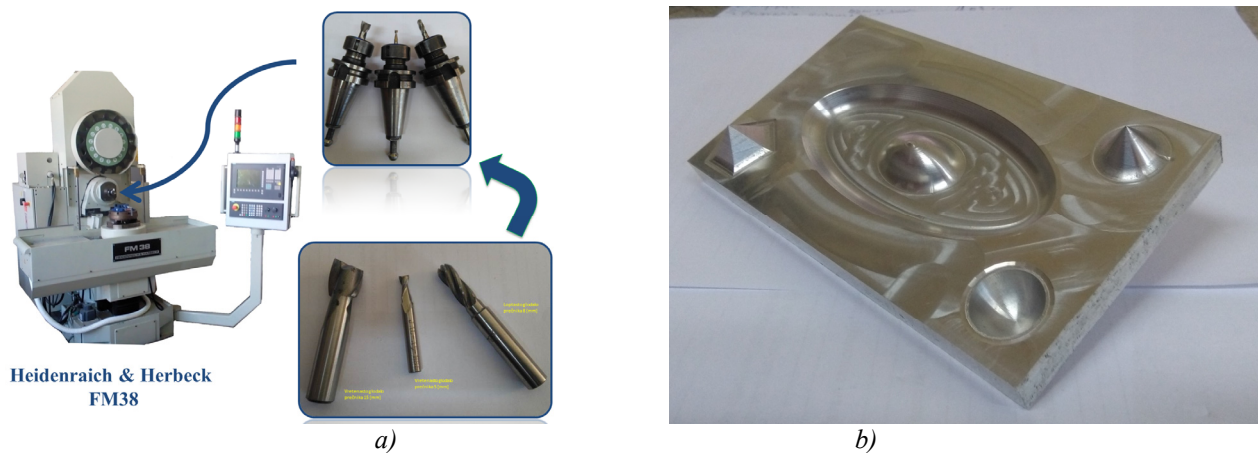
3.1 Realizacija obrade

Za analizu putanje alata u upravljačkom programu koji je generisan za konkretni test radni predmet, realizovana je obrada priprema od aluminijuma A199 u jednoj operaciji obrade glodanjem i tri zahvata kao što je prikazani na slici 3a.

Test radni predmet je prizmatičnog oblika sa više karakterističnih složenih geometrijskih oblika u koje spadaju ostrva i džepovi oblika [7]:

1. konusa,
2. petostrane piramide,
3. polusfere,
4. elipsoida, i
5. eliptičnog konusa.

Gruba i završna obrada gornje površine izvršene su vretenastim glodalom prečnika 15 [mm], a gruba obrada džepa i završna obrada dna džepa vretenastim glodalom prečnika 5 [mm], dok su završne obrade karakterističnih oblika realizovane loptastim glodalom prečnika 8 [mm].



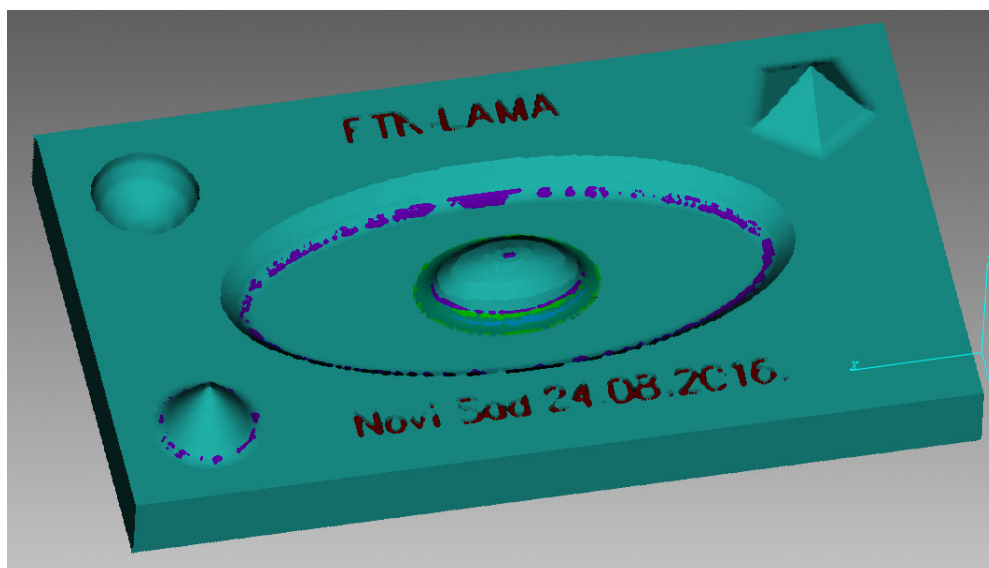
Slika 3. a) Obradni centar i alati za obradu b) izradak

4. REZULTATI I DISKUSIJA

U cilju analize grešaka aproksimacije krivolinijskih putanja upravljačkog programa generisanog u programskom sisistemu Inventor HSM, u nastavku su prikazane greške koje nastaju pri aproksimaciji karakterističnih oblika na test radnom predmetu, na kome su usvojeni oblici koji ne spadaju u standardne.

4.1 Softverska verifikacija

Model koji je generisan nakon simulacije obrade, na osnovu upravljačkog programa u programskom sistemu VERICUT, upoređen je sa CAD modelom radnog predmeta, a odstupanja su ilustrovana kao zone grešaka koji su posledica aproksimacije složene putanje (Slika 4).



Slika 4. Greške obrade nakon simulacije upravljačkog programa

Na osnovu slike može se zaključiti da kod obrade ravnih površina ne dolazi do grešaka koje su posledica aproksimacije putanje kao i što je pretpostavljeno, dok kod karakterističnih oblika greška postoji. Ona je najizraženija na prelazima između elipsoida, eliptičnog džepa i kupe i odgovarajućih ravnih površina i može se tumačiti kombinacijom greške aproksimacije putanje alata i razlika u radijusima sfernog glodala i prelaza na modelu. Analizom izveštaja je utvrđeno da su odstupanja u ovoj zoni modela između 0.08 i 0.1 mm, dok su greške aproksimacije u drugim delovima analiziranih oblika manje od 0.05 mm

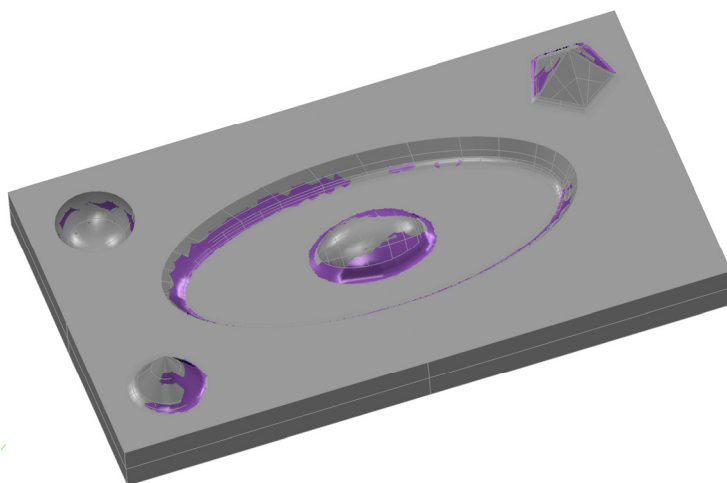
4.2 Fizička verifikacija

Nakon izrade test radnog predmeta, u cilju analize grešaka obrade, isti je digitalizovan kontaktnim skeniranjem površina na troosnoj koordinatnoj mernoj mašini Zeiss Contura G2 prikazanoj na slici 5, čime je dobijen oblak tačaka za karakteristične oblike. Oblak tačaka je primenom programskog sistema Autodesk PowerInspect 2018 Ultimate iskorišćen za rekonstrukciju merenih oblika i upoređen sa CAD modelom radnog predmeta u cilju utvrđivanja vrednosti odstupanja od nazivne mere. Dobijene mere su rezultat ukupnih grešaka koji predstavljaju kombinaciju grešaka aproksimacije putanje alata, grešaka mašine, pribora, alata kao i NU merne mašine.



Slika 5. Koordinatna merna mašina Zeiss Contura G2

Oblak tačaka koji je dobijen kontaktnom metodom skeniranja složenih geometrijskih oblika na koordinatnoj mernoj mašini, je u programskom sistemu PowerInspect upoređen sa CAD modelom. Na slici 6 su prikazane zone pojave ukupnih grešaka obrade.



Slika 6. Greške obrade na izratku

Rezultati koji su dobijeni fizičkom verifikacijom ukazuju na više vrednosti grešaka od onih dobijenih softverskom simulacijom i postoje na svim karakterističnim oblicima. Vrednosti grešaka iznose između 0.2 i 0.3 mm i delimično ukazuju na problem prostornog poravnavanja oblaka tačaka dobijenog skeniranjem sa modelom radnog predmeta. Na osnovu ovih rezultata se može zaključiti da greške aproksimacije putanje alata imaju manji uticaj na ukupne greške obrade od grešaka nastalih tokom procesa obrade, što je očekivano uzevši u obzir složenost samog obradnog sistema i procesa obrade.

5. ZAKLJUČCI

Prezentovano istraživanje predstavlja deo projektnih aktivnosti sprovedenih sa ciljem utvrđivanja relevantnih faktora koji utiču na tačnost obrade kod savremenih mašina alatki kao i mogućnosti korišćenja savremenih softverskih rešenja namenjenih unapređenju procesa pripreme proizvodnje u industriji za određivanje uzroka grešaka koji se javljaju pri obradi.

Pravci budućih istraživanja obuhvataju proširenje metoda analize grešaka aproksimacije na složene prostorne oblike definisane splajn površinama, kao i unapređenje metodologije eksperimenatalnog dela istraživanja u cilju uklanjanja grešaka nastalih usleg poravnavanja računarskog modela i oblaka tačaka u prostoru.

6. LITERATURA

- [1] Mohsen, S., Behroon, A., Mohsen, H.: *Dimensional and geometrical errors of three-axis CNC milling machines in a virtual machining system*, Computer-Aided Design, Vol. 45, pp. 1306-1313, 2013.
- [2] Hai, L., Yingguang, L., Wei, W.: *Feature Based Machine Tool Accuracy Analysis method*, 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing, Procedia CIRP 27, Elsevier, pp. 216-222, 2015.
- [3] Živanović, S., Kokotović, B., Jakovljević, Ž.: *Turning machine simulation for program verification*, 12th International Scientific Conference - Flexible Technologies-MMA 2015, Novi Sad, Serbia, September 25-26th, 2015.
- [4] Cong, H., P., N., Young, C.: *Comparison of point cloud data and 3D CAD data for one-site dimensional inspection of industrial plant piping system*, Automation in Construction, Elsevier, pp. 44-52, 2018.
- [5] Tabaković, S., Gatalo, R., Zeljković, M.: *Analiza tačnosti aproksimacije profila pri generisanju upravljačkog programa za CNC mašine primenom programskog sistema ProEngineer*, VIII Međunarodna konferencija fleksibilne tehnologije, Novi Sad, Srbija i Crna Gora, 26-27. jun, 2003.
- [6] Majerik, J., Jambor, J.: *Computer Aided Design and Manufacturing Evaluation of Milling Cutter when High Speed Machining of Hardened Steels*, 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2014, Vienna, Austria, pp. 450-459.
- [7] NCG 2004 - *Testing Guidelines and Testing Workpieces for High Speed Cutting (HSC)*, NC-Gesellschaft, 2000.

Tabaković, S¹., Knežev, M¹., Zeljković, M¹., Živanović, S²., Štrbac, B¹.

ANALYSIS AND VERIFICATION OF COMPLEX SHAPE MACHINING, BY THREE AXIS MILLING, ON NC MACHINE TOOLS ^{3) 4)}

Abstract

Milling process on three axis milling machine very often includes making a surfaces whose topology affect to appear different problems in motion systems of machine tools. As a result of the aforementioned problem, the produced surfaces have inaccuracies, which are caused by produced shape geometry and impact of moving, along the individual axis in all segments of the tool path. The aim of this paper is to examine the occur errors during the processing of complex shape. Shape analysis is realized along the two phases: comparing the CAD model and geometry obtained by tool path simulation, as well as comparing point cloud got by physical scanning produced part with CAD model.

Key word: complex shape, machining errors, tool path verification, contact method scanning