

## PJOVIMO REŽIMŲ ĮTAKOS PAVIRŠIŲ MAKROGEOMETRINIAMS NUOKRYPIAMS, APDIRBANT SUDĖTINGOS FORMOS DETALES IŠ ALIUMINIO, TYRIMAS

Ieva ŠVAGŽDYTĖ<sup>1</sup>, Mindaugas JUREVIČIUS<sup>2</sup>

*Vilniaus Gedimino technikos universitetas*

*El. paštas: <sup>1</sup>ievassm@gmail.com; <sup>2</sup>mindaugas.jurevicius@vgtu.lt*

**Santrauka.** Darbe atlikti tyrimai, kaip pjovimo režimai daro įtaką paviršiaus formai ir jo kokybei frezuojant sudėtingos formos detales ir tekinant išorinį paviršių. Pasirinktas vienas populiariausių aliuminio lydinių 6082. Frezuota vertikalaus apdirbimo CNC centru HAAS MINI MILL, naudota sferinė fasoninė freza, kurios skersmuo 8 mm, tekinta CNC tekinimo staklėmis HAAS ST 20, matavimai atlikti koordinatine matavimo mašina DEA micro-hite DCC, liestuko sferos skersmuo 3 mm, naudotas liestukas su adatėle. Tirtas paviršiaus profilio nukrypimas nuo glaustinės parabolės. Pagal gautus regresinės lygties determinantus  $R^2$  paaiškėjo, kad didžiausią įtaką profilio nuokrypiams turi pjovimo gylis, mažesnę įtaką turi pastūma, pjovimo greitis esminės įtakos neturi. Tekinant, apskritumui labiausiai įtaką darė pjovimo gylis, o cilindriškumui – pjovimo greitis.

**Reikšminiai žodžiai:** paviršiaus formos nuokrypis, frezavimas, regresijos determinantas, tekinimas.

### Įvadas

Konstruojant vis tikslesnius įrenginius didėja tikslumo reikalavimai juos sudarančioms detalėms. Naudojami brangesni, bet tvirti ir lengvi metalai (aliuminis, titanas), diegiamos naujos technologijos, kad būtų gaunamas norimas tikslumas.

Didžiausias dėmesys skiriamas detalių matmenims gauti ir paviršiaus kokybei užtikrinti. Tačiau ne mažiau svarbu, kad būtų išlaikyti tinkami makrogeometriniai reikalavimai – paviršiaus forma. Formos nuokrypiu vadiname tikrojo paviršiaus nukrypimą nuo geometriškai taisyklingo paviršiaus. Paviršiaus formos nukrypimai atskaitomi nuo glaustinio paviršiaus (Vekteris *et al.* 2000).

Šiame darbe buvo pasirinktas tirti išfrezuotas sferinis paviršius, kaip dažnai pasitaikančios sudėtingų gaminių formos pavyzdys. Tekinti kūno išoriniai cilindriniai paviršiai, kurie svarbūs sujungimuose, nuo kurių tikslumo priklauso mechanizmo tinkamas veikimas. Apžvelgus atliktus tyrimus paaiškėjo, kad didžiausias dėmesys skiriamas paviršiaus šiurkštumui, įrankio nusidėvėjimui, todėl pasirinkta nagrinėti paviršiaus formos nuokrypius (Denkena *et al.* 2008; Rawangwongas *et al.* 2013; Wang *et al.* 2013; Rao *et al.* 2013; Bhuiyan *et al.* 2013).

Apdirbimui pasirinktas vienas populiariausių gamyboje naudojamų aliuminio lydinių 6082. Aliuminio lydinys 6082 yra vidutinio stiprumo lydinys, kuris ypač gerai atsparus korozijai. Tai yra tvirčiausias iš 6000 serijos ly-

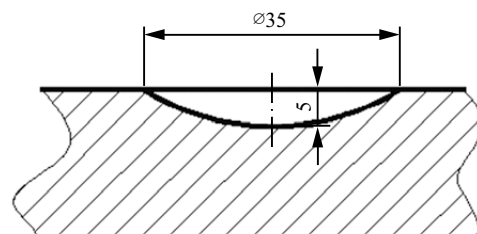
dinių. 6082 žinomas kaip konstrukcinis lydinys. Lakšto formos lydinys 6082 paprastai naudojamas mechaniniam apdirbimui. Palyginus su naujais lydiniais, stipresnis 6082 pakeitė 6061 daugelyje pritaikymo sričių. Be to, didelis kiekis mangano padeda susidaryti grūdinei struktūrai, kuri ir nulemia lydinio stiprumą (*Aluminium...* 2005).

Apdirbimas buvo vykdomas CNC apdirbimo centrais, matavimai atliekami kordinatine matavimo mašina.

Darbo tikslas – iširti, kokią įtaką paviršiaus formai turi pjovimo režimai mechaninio apdirbimo metu.

### Tyrimo objektas ir įranga

Tirta vientisa plokštelė iš aliuminio lydinio 6082, jos storis 20 mm. Joje frezuojami sferiniai paviršiai (1 pav.), kurių matmenys vienodi.



1 pav. Bandinio eskizas  
Fig. 1. Sketch of the sample

Frezuojama apskritiminiu judesiu su tam tikru parinktu įsigiliniu kaskart nuimant medžiagos sluoksnį. Naudojama sferinė fasoninė freza su dviem pjaunančiomis briaunomis, kurios skersmuo 8 mm (2 pav.). Darbai atliekami vertikaliu trijų ašių (x, y ir z) CNC apdirbimo centru HAAS MINI MILL, kurio didžiausia galia 5,6 kW, didžiausias suklio sukimosi dažnis 6 000 sūk./min.

Tekinimo eksperimentui naudoti cilindriniai ruošiniai, kurių skersmuo 70 mm, o ilgis 60 mm (3 pav.).



2 pav. Sferinė fasoninio apdirbimo freza

Fig. 2. Ball nose mill

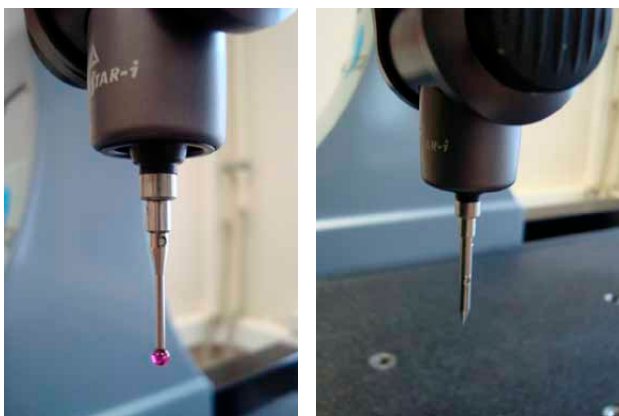


3 pav. Cilindrinis bandinys tekinimui

Fig. 3. Cylindrical sample of turning

Tekinamas išorinis cilindrinis paviršius 20 mm ilgiu. Naudojama C formos tekinimo karbidinė plokštelė. Tekinama CNC tekinimo staklėmis HAAS ST 20, didžiausia galia 14,4 kW, didžiausias suklio sukimosi dažnis 4000 sūk./min.

Matavimai atlikti koordinatine matavimo mašina Dea micro-hite DCC. Naudoti dviejų rūšių liestukai: su sferine galvute, kurios skersmuo 3 mm, ir adatėle (4 pav.).



4 pav. Matavimo galvutė su elektrokontaktiniu jutikliu. Sferinis liestukas ir adatėlė

Fig. 4. Dimensional stock equipped with an electrocontactic sensor. A spherical probe and a style

## Eksperimento aprašymas

Sudarytas visų veiksnių eksperimento planas (*full factorial design*) (1, 2 lentelės). Jis leidžia tyrėjams išnagrinėti sistemos elgseną, kuri atsiranda esant sąlygoms, kuriomis nepriklausomi kintamieji, dar vadinami veiksniais, kinta tuo pačiu metu.

Kiekvienas bandymo dydis yra skaitmeninis veiksnių lygių rezultatas (1 lentelė). Pavyzdžiui, eksperimento planas su dviejų lygių veiksniais, trijų lygių veiksniais ir keturių lygių veiksniais apima  $2 \times 3 \times 4 = 24$  bandymus. Plano projektavimas tik iš dviejų lygių veiksnių turi pavyzdžių kiekį, kuriems įtaką daro tik du veiksniai (pagal formulę 2', kur  $f$  – veiksnių skaičius). Kai turime tris veiksniai, jie tarsi sudaro kubo kraštines. Jei yra daugiau veiksnių, tuomet jie yra kaip didelio kubo viršūnių projektavimas. Visų veiksnių planas yra labiausiai tradicinis iš visų (*Full...* 2014).

1 lentelė. Frezavimo eksperimento veiksniai ir lygiai

Table 1. Milling factors and levels

Veiksny	Pavadinimas	Vienetai	Tipas	Apatinis lygis (-)	Viršutinis lygis (+)
A	Pjovimo greitis	m/min	Skaitmeninis	60	100
B	Pastūma	mm/dan.	Skaitmeninis	0,01	0,02
C	Pjovimo gylis	mm	Skaitmeninis	0,1	0,3

Kadangi staklių programoje yra nustatomi sūčiai ir minutinė pastūma. Šiems dydžiams išreikšti taikomos tokios formulės:

$$n = 1000v/\pi D, \quad (1)$$

čia  $n$  – sūčiai (sūk./min);  $v$  – pjovimo greitis (m/min),  $D$  – įrankio skersmuo (mm),  $\pi$  – skaičius (~3,14);

$$s_{\min} = sn = s_z z n, \quad (2)$$

čia  $s_z$  – pastūma vienam dančiui (mm/dan.),  $z$  – dantukų skaičius,  $n$  – sūčiai (sūk./min),  $s_{\min}$  – minutinė pastūma (mm/min).

Maksimalūs sūčiai, kuriais buvo atlikti eksperimentai, yra 5308 sūk./min, maksimali pastūma 212,32 mm/min.

2 lentelė. Tekinimo eksperimento veiksniai ir lygiai

Table 2. Turning factors and levels

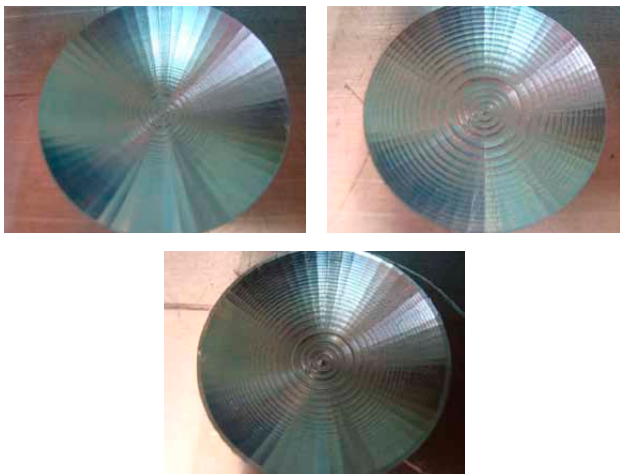
Veiksny	Pavadinimas	Vienetai	Tipas	Apatinis lygis (-)	Viršutinis lygis (+)
A	Pjovimo greitis	m/min	Skaitmeninis	200	800
B	Pastūma	mm/aps	Skaitmeninis	0,1	0,3
C	Pjovimo gylis	mm	Skaitmeninis	1	3

Sūčiai apskaičiuoti pagal pirmąją formulę. Frezuoti sferiniai paviršiai pirmiausia buvo matuoti sferiniu liestuku keturiomis įstrižainėmis skenavimo būdu, paskui matavimas pakartotas viena įstrižaine adatėle. Gautos Z ašies koordinatės suvestos į *Microsoft Excel* programą, gauti grafikai prilyginti teorinei parabolėi. Gauti regresijos determinantai  $R^2$  parodo taškų sklaidą, šis dydis turi artėti link 1.

Tekinti paviršiai matuoti sferiniu liestuku, koordinatinė matavimo mašina pateikia jau sugeneruotus apskritumo ir cilindriškumo nuokrypius.

### Rezultatai ir jų aptarimas

Frezuojant pirmiausia išryškėjo pjovimo gylio įtaka paviršiaus kokybei. Kuo pjovimo gylis didesnis, tuo didesnis paviršiaus banguotumas buvo gautas (5 pav.). Taigi frezuojant sudėtingos formos detales patartina kiek įmanoma labiau sumažinti pjovimo gylį, tuomet bus jaučiamas mažesnis paviršiaus kokybės skirtumas skirtingose paviršiaus vietose.



5 pav. Paviršius, apdirbtas skirtingais pjovimo gyliais: 0,1; 0,3 ir 0,2 mm

Fig. 5. The surface processed with different cutting depths of 0.1; 0.3 and 0.2 mm

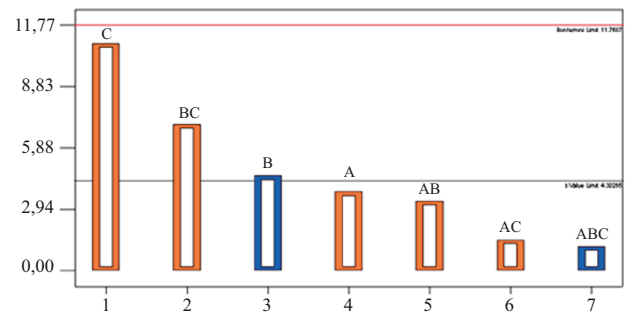
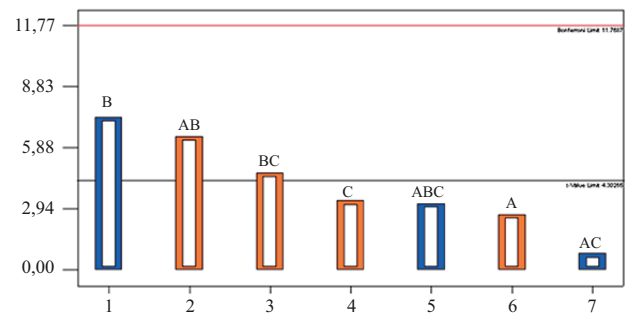
Pirmiausia matuojama sferiniu liestuku keturiomis įstrižainėmis (3 lentelė). Liestukas kopijuoja sferinio paviršiaus kontūrą, kuris pjūvyje įgauna parabolės formą. Sulyginus išmatuotą kreivę su teorine (glaustine) parabolė, gaunami regresijos determinantai, iš kurių galime matyti profilio netikslumą. Matuota keturiomis įstrižainėmis norint įverti matavimo krypties įtaką matavimo rezultatams.

Šie duomenys buvo sukelti į matematinę statistinio rezultatų apdorojimo programą „Stat-Ease Design Expert v7.0.0“. Pirmiausia gauti Pareto grafikai, pagal ku-

riuos įvertinta, kurie veiksniai daro didžiausią įtaką (6 pav.). Paskui jie aktyvuoti ir atlikta ANOVA analizė. Analizuojant pirmos ir antros įstrižainės matavimo duomenis pastebėta, kad nei vieno veiksnio negalima priskirti prie didžiausią įtaką turinčių veiksnių. Tik matuojant trečiąją ir ketvirtąją įstrižainę išryškėjo įtakos turintys veiksniai.

3 lentelė. Matavimo sferiniu liestuku duomenys  
Table 3. Data on measurements using a spherical probe

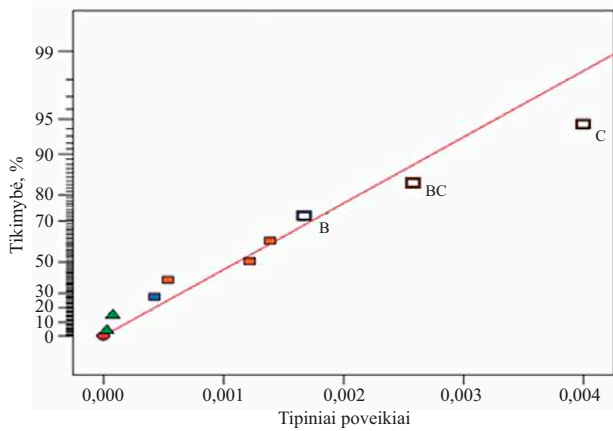
Eil. Nr.	$v$ , m/min	$s$ , mm/dan.	$t$ , mm	Matavimų rezultatai, $R^2$			
				I	II	III	IV
1	60	0,01	0,1	0,9988	0,9986	0,9985	0,9946
2	100	0,01	0,1	0,995	0,9948	0,9962	0,9939
3	60	0,02	0,1	0,9955	0,9911	0,9904	0,9894
4	100	0,02	0,1	0,9967	0,9951	0,9953	0,9916
5	60	0,01	0,3	0,9967	0,9977	0,9971	0,995
6	100	0,01	0,3	0,9967	0,9968	0,9966	0,996
7	60	0,02	0,3	0,9949	0,9969	0,9949	0,9951
8	100	0,02	0,3	0,9959	0,9974	0,9968	0,9975
9	80	0,015	0,2	0,9967	0,998	0,9978	0,9971
10	80	0,015	0,2	0,9954	0,9953	0,9968	0,9974
11	80	0,015	0,2	0,9979	0,9977	0,9976	0,9965



6 pav. Pareto diagramos. X ašyje vaizduojamos poveikių kategorijos, Y ašyje – poveikis

Fig. 6. Paret diagrams. Impact categories in the X axis, impact in the Y axis

Matuojant pagal trečią įstrižainę pastebėta, kad didžiausią įtaką paviršiaus formos nuokrypiams turi pastūma ir pastūma kartu su greičiu matuojant ketvirtą įstrižainę. Ketvirtos įstrižainės labiausiai pastebima pjovimo gylio bei pjovimo gylio ir pastūmos bendra įtaka.



7 pav. Keturios įstrižainės matavimas su pažymėtais svarbiausiais veiksniais

Fig. 7. Measurements of the 4th diagonal, including the most important factors

Matuojant pagal ketvirtą įstrižainę svarbiausi veiksniai regresijos determinantui  $R^2$  pavaizduoti įtaką darančių veiksmų grafike (7 pav.). Taškų sklaida nežymi.

4 lentelė. Matavimo adatėlė rezultatai

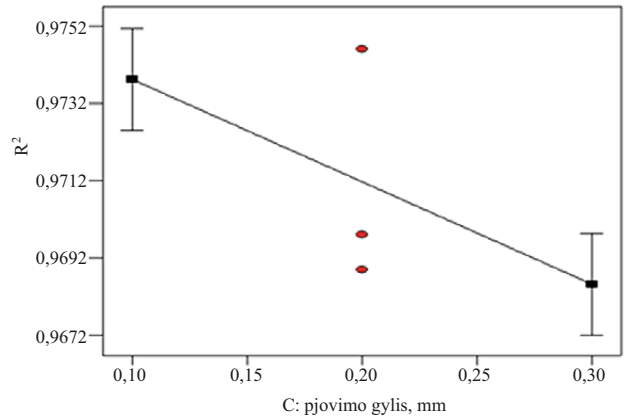
Table 4. The results of measurements using a style

Eil. Nr.	v, m/min	s, mm/dan.	t, mm	$R^2$
1	60	0,01	0,1	0,9751
2	100	0,01	0,1	0,9734
3	60	0,02	0,1	0,9735
4	100	0,02	0,1	0,9733
5	60	0,01	0,3	0,9697
6	100	0,01	0,3	0,9691
7	60	0,02	0,3	0,9678
8	100	0,02	0,3	0,9675
9	80	0,015	0,2	0,9689
10	80	0,015	0,2	0,9698
11	80	0,015	0,2	0,9746

Šiais matavimais nebuvo įvertinta paviršiaus banguotumo įtaka, todėl matavimai pakartoti adatėle viena kryptimi (4 lentelė). ANOVA analizė parodė, kad didžiausią įtaką paviršiaus profilio nuokrypiams daro pjovimo gylis (8 pav.).

Apibendrinant frezavimo tyrimo rezultatus galima teigti, kad svarbiausias veiksnys, darantis įtaką profilio nuokrypiams, yra pjovimo gylis, kuris turi būti kuo mažesnis, taip pat įtaką daro ir pastūma, kuri didėdama taip pat blogina profilio formą. Pjovimo greitis didelės įtakos neturi.

Tekinimo eksperimento matavimai buvo atliekami koordinatine matavimo mašina su sferiniu liestuku. Apskritumo ir cilindriškumo rezultatai pateikiami lentelėje (5 lentelė).



8 pav. Regresijos determinanto ir pjovimo gylis sąveikos grafikas

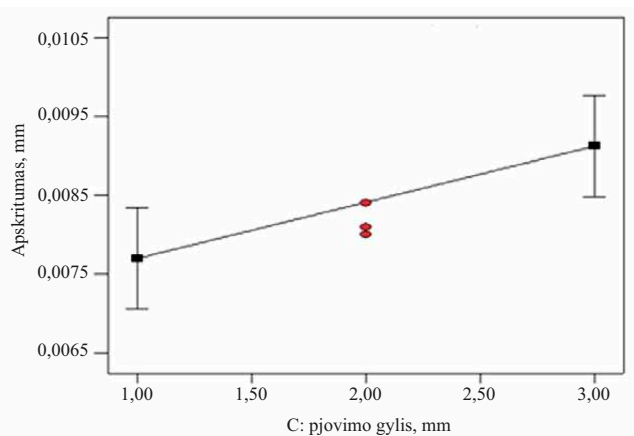
Fig. 8. Regression determinant and cutting depth interaction

5 lentelė. Cilindrų matavimo rezultatai

Table 5. The results of measuring cylinders

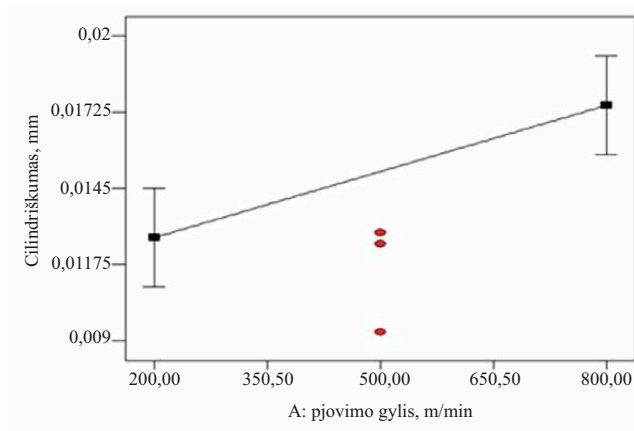
Eil. Nr.	v, m/min	s, mm/aps	t, mm	Apskritumas, mm	Cilindriškumas, mm
1	200	0,1	1	0,0079	0,0097
2	800	0,1	1	0,0077	0,0172
3	200	0,3	1	0,0065	0,0116
4	800	0,3	1	0,0087	0,0181
5	200	0,1	3	0,0087	0,0169
6	800	0,1	3	0,0071	0,0194
7	200	0,3	3	0,0105	0,0127
8	800	0,3	3	0,0102	0,0153
9	500	0,2	2	0,0084	0,0125
10	500	0,2	2	0,0080	0,0093
11	500	0,2	2	0,0081	0,0129

Atlikus ANOVA rezultatų analizę paaiškėjo, kad tik po vieną veiksnį apskritumo ir cilindriškumo nuokrypiams galima laikyti turinčiais įtakos.



9 pav. Apskritumo ir pjovimo gylis sąveikos grafikas

Fig. 9. The interaction between circularity and cutting depth



10 pav. Cilindriškumo ir pjovimo greičio sąveikos grafikas  
Fig. 10. The interaction between cylindricity and cutting speed

Apskritumo nuokrypis labiausiai priklauso nuo pjovimo gylis – kuo jis didesnis, tuo nuokrypis didesnis.

Cilindriškumas labiausiai priklauso nuo pjovimo greičio (10 pav.). Jam didėjant didėja ir cilindriškumo nuokrypis.

Tekiniant rekomenduotina sumažinti pjovimo gylį ir pjovimo greitį, bet tokiu atveju gali būti pablogintas paviršiaus šiurkštumas. Todėl parenkant pjovimo režimus būtina atsižvelgti tiek į mikronelygumams, tiek į formos nuokrypiams keliamus reikalavimus.

## Išvados

1. Frezuojant sferinius paviršius didžiausią įtaką profilio nuokrypiams turi pjovimo gylis; pastūma daro mažesnę įtaką, o pjovimo greitis lemiamos įtakos nedaro.
2. Tekinant cilindrinis paviršius apskritumui didžiausią įtaką turi pjovimo gylis, mažiausias apskritumo nuokrypis 0,0065 mm gautas pjaunant 1 mm gyliu; paviršiaus cilindriškumui daugiausia įtakos turi pjovimo greitis, mažiausi nuokrypiai gauti apdirbant 200 m/min greičiu.
3. Norint gauti mažiausius paviršiaus formos nuokrypius, frezuojant reikia parinkti kuo mažesnius pjovimo gylius ir pastūmas; tekinimui reikia palikti kuo mažesnę užlaidą, kartu pjauti mažesniu gyliu ir mažesniu greičiu.

## Literatūra

*Aluminium Alloys – Aluminium 6082 Properties, Fabrication and Applications, Supplier Data by Alcoa* [interaktyvus]. 2005 [žiūrėta 2014 m. gegužės 27 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2813>

Bhuiyan, T. H.; Ahmed, I. 2013. Optimization of cutting parameters in turning process, *Journal of Production Engineering* 16: 11–19.

Denkena, B.; Bassett, E.; Kohler, J. 2012. On the honed cutting edge and its side effects during orthogonal turning operations of AISI1045 with coated WC-Co inserts, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 5: 108–126.

*Full factorial designs* [interaktyvus]. 2014 [žiūrėta 2014 m. gegužės 28 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.jmp.com/support/help/Full\\_Factorial\\_Designs.shtml](http://www.jmp.com/support/help/Full_Factorial_Designs.shtml)

Rao, Dr. C. J.; Nageswara Rao, D.; Srihari, P. 2013. Influence of cutting parameters on cutting force and surface finish in turning operation, *Procedia Engineering* 64: 1405–1415. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.09.222>

Rawangwongas, S.; Chatthongas, J.; Boonchouytanas, W.; Burapa, R. 2013. An investigation of optimum cutting conditions in face milling aluminum semi solid 2024 using carbide tool, *Energy Procedia* 34: 854–862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.822>

Vekteris, V.; Kasparaitis, A.; Kaušinis, S.; Kanapėnas, R. 2000. *Matavimų teorija ir praktika*. Vilnius: Žiburio leidykla.

Wang, T.; Xie, L. J.; Wang, X. B.; Jiao, L.; Shen, J. W.; Xu, H.; Nie, F. M. 2013. Surface integrity of high speed milling of Al/SiC/65p aluminum matrix composites, *Procedia CIRP* 8: 475–480. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.136>

## RESEARCH ON THE INFLUENCE OF CUTTING RATES ON MACROGEOMETRY DEFLECTIONS OF SURFACES UNDER PROCESSING COMPLEX FORM PRODUCTS MADE OF ALUMINIUM ALLOYS

I. Švagždytė, M. Jurevičius

### Abstract

The article reviews the influence of cutting rates on macrogeometry deflection of milling complex form products and turning an outside surface. For that purpose, one of the most popular aluminium alloys 6082 has been chosen. A ball nose mill of 8 mm in diameter has been milled employing CNC vertical centre HAAS MINI MILL and applying CNC lathe HAAS ST 20 for turning. Measurements have been carried out using coordinate measuring machine DEA micro-hite DCC, applying the probe sphere of 3mm in diameter and the probe equipped with a needle. A deviation of the surface profile from tangent to theophore parabola has been investigated. The determinants  $R^2$  of the obtained regressive equation have disclosed that the depth of the cut has the biggest influence on macrogeometry deflections, whereas feed rate has a slighter influence and cutting speed has no radical influence. For the turning process, the depth of the cut has the strongest influence on circularity while cylindricity has been mainly affected by cutting speed.

**Keywords:** deflection of the surface form, milling, regression determinant, turning.