



VYTAUTAS MAGNUS
UNIVERSITY
— MCMXXII —

G Y T A U T A S B A L E V I Č I U S

**ULTRAGARSINIŲ
VIRPESIŲ TYRIMAI
IR TAIKYMAI KIETŲ-
SUNKIAI APDIRBAMŲ
MEDŽIAGŲ
ŠLIFAVIMUI**

D A K T A R O D I S E R T A C I J O S
S A N T R A U K A

T E C H N O L O G I J O S
M O K S L A I , M E C H A N I K O S
I N Ž I N E R I J A (T 0 0 9)

K a u n a s
2 0 2 0

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
VYTAUTO DIDŽIOJO UNIVERSITETAS

Gytautas Balevičius

**ULTRAGARSINIŲ VIRPESIŲ TYRIMAI IR TAIKYMAI KIETŲ-
SUNKIAI APDIRBAMŲ MEDŽIAGŲ ŠLIFAVIMUI**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (T 009)

2020, Kaunas

Disertacija rengta 2014 – 2019 metais Kauno Technologijos Universiteto Mechatronikos Institute.

Mokslinis vadovas

Prof. Habil. Dr. Vytautas Ostaševičius (Kauno Technologijos Universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – T 009).

Redagavo: Jūratė Lakštauskienė (IV. Nr. 937739)

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009) – **pirmininkas**;

Dr. Rolanas DAUKŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009);

Prof. dr. Dalius MAŽEIKA (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009);

Prof. dr. Arkadiusz MYSTKOWSKI (Balstogės Technologijos Universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2020 m. rugpjūčio 25 d. 14 val. Kauno technologijos universiteto disertacijų gynimo salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-403, 44249 Kaunas, Lietuva.

Tel. (370) 37 300 042; faks. (370) 37 324 144; el. Paštas doktorantura@ktu.lt.

Disertacijos santrauka išsiųsta 2020 m. liepos 25 d.

Su disertacija galima susipažinti internetinėje svetainėje <http://ktu.edu>, Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas) ir Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos bibliotekoje (Studentų g. 11, 53361 Akademija, Kauno raj.).

Turinys

IVADAS	4
1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA.....	7
2. METODOLOGIJA	14
2.1 Ultragarsinio galinio šlifavimo įrangos sužadinant įrankį paruošimas 17	
2.2 Ultragarsinio cilindrinio šlifavimo įrangos sužadinant ruošinį paruošimas	19
2.3 Ultragarsinio cilindrinio šlifavimo įrangos sužadinant ruošinį paruošimas	23
3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	26
3.1 Vibracinis galinis šlifavimas naudojant ultragarsinį sukamojo įrankio sužadinimą	26
3.2 Vibracinis galinis šlifavimas ultragarsu sužadinant nesisukantį ruošinį 27	
3.3 Vibracinis galinis šlifavimas ultragarsu sužadinant nesisukantį ruošinį 28	
4. REZULTATAI IR DISKUSIJA.....	31
4.1 Galinis ultragarsinis šlifavimas sužadinant įrankį	31
4.2 Naujas ultragarsinio žadinimo būdas cilindriniam šlifavime	34
4.3 Galinis ultragarsinis šlifavimas sužadinant ruošinį.....	37
IŠVADOS.....	41
LITERATŪROS SĄRAŠAS	42
AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS.....	49
INFORMACIJA APIE AUTORIŲ.....	51
REZIUME ANGLŲ KALBA	52
INFORMATION ABOUT THE AUTHOR	55

IVADAS

Temos aktualumas

Apdirbamoji pramonė yra bet kurios gerai veikiančios ekonomikos pagrindas. Šios pramonės šakos yra pagrindinės, diegiant svarbiausius patobulinimus, leidžiančius kurti mokslines inovacijas ir jas diegiant naujose pramonės šakose. Natūralu, kad apdirbamosios pramonės šakos siekia išlaikyti savo aktualumą įgyvendindamos įvairias naujoves. Vienas iš labiausiai paplitusių būdų norint pramonei išlaikyti savo aktualumą yra naujai sukurtų medžiagų panaudojimas.

Kietos, trapios medžiagos yra viena iš tokių medžiagų grupių, kurių pritaikymą riboja prastas jų apdirbamumo lygis, tačiau dėka technologinės pažangos šių medžiagų taikymo perspektyvos dabar tampa vis platesnės. Šios grupės medžiagos paprastai būna didelio kietumo ir mažo atsparumo deformacijoms, jos apima amorfinius stiklus, polikristalinius keraminius užpildus, mineralus ir pavienius kristalus. Šios medžiagos rado pritaikymą optikoje, elektronikoje, aviacijoje ir kitose srityse. Šių medžiagų apdirbamumą riboja trapios deformacijos, kurios lemia paviršiaus kokybę. Norint jas apdoroti įprastais metodais, būtina apriboti drožlės nuėmimo greitį, tačiau toks būdas yra brangus tiek laiko, tiek technologinių išteklių atžvilgiu. Siūloma nauja apdirbimo procesų kategorija, vadinama hibridiniais gamybos procesais. Šie procesai grindžiami vienu metu vykstančiu keleto apdirbimo procesų valdymu ir sąveika, turinčia didelę įtaką našumui ir apdirbamumui. Buvo nustatyta, kad lengviausiai pritaikomi ir lanksčiausi metodai apdirbamumui palengvinti yra procesų grupė – vibracinis mechaninis apdirbimas, būtent šlifavimas, papildomai virpesiais sužadinant ruošinį arba įrankį.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šio tyrimo tikslas – išanalizuoti ir sukurti ultragarsinius kietų trapių medžiagų šlifavimo metodus ir priemones. Siekiant tikslo buvo keliami šie uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros apie kietų trapių medžiagų šlifavimą apžvalgą, suformuoti disertacijos tikslus ir uždavinius.
2. Sukurti ir išbandyti cilindrinio šlifavimo technologiją, įgalinančią aukštais dažniais sužadinti masyvų besisukančių ruošinį.
3. Suprojektuoti ir pagaminti galinio kietų ir trapių medžiagų šlifavimo įrankio ultragarsinio sužadinimo akuatorių ir atlikti eksperimentinius tyrimus.

4. Pasiūlyti, kaip sukurti sąlygas kietos ir trapios medžiagos virsmui į takiają, pagaminti ir patentuoti ruošinio ultragarsinio sužadinimo įrenginį ir atlikti jo bandymus.

Metodai ir priemonės

Darbo metu buvo atliekami tiek teoriniai, tiek eksperimentiniai tyrimai. Vibracinio sužadinimo įrangai kurti buvo pasitelktas baigtinių elementų metodas. Modeliavimas atliktas ansys bei salome meca/code_aster paketais. Pasitelkiant sukurtą įrangą buvo atlikti eksperimentiniai apdirbimo tyrimai, gautų ruošinių paviršiai buvo charakterizuojami baltos šviesos interferometrijos, skenuojančios elektronų mikroskopijos ir kontaktinės profilometrijos pagalba. Surinktų šlifavimo dulkių morfologija buvo įvertinta pasitelkiant rentgeno spindulių difrakcijos analizę bei optinę mikroskopiją. Tyrimai buvo atliekami Kauno technologijos universiteto mechatronikos institute, Fraunhoferio gamybos technologijų institute bei UAB „Stevila“.

Mokslinis naujumas

1. Baigtinių elementų metodo pagalba suprojektuota vibracinio sužadinimo įranga.
2. Pasiūlytas ir išbandytas naujas būdas ruošinio sužadinimui išnaudojant aukštesnes vibracinio sužadinimo modas aukštesniam ruošinio sužadinimo dažniui pasiekti.
3. Paviršiaus charakterizavimo metodais nustatytas trapių, plastinių deformacijų zonų pasiskirstymas bandinių paviršiuose.

Ginami teiginiai

1. Apdirbamų kietų, trapių medžiagų ruošinių paviršių kokybė gali būti pastebimai pagerinta panaudojant vibracinį sužadinimą apdirbimo metu.
2. Apdirbamų paviršių kokybės pagerėjimas yra ne įrankio trajektorijos, bet ruošinio – įrankio sąveikos kontakte pokyčio rezultatas.
3. Apdirbimo vibracinio sužadinimo pagalba efektyvumas priklauso nuo naudojamo dažnio.

Praktinė vertė

1. Sukurtas naujoviškas būdas besisukančio ruošinio sužadinimui cilindrinio šlifavimo metu.
2. Sukurtas ir užpatentuotas naujoviškas būdas nejudančio ruošinio sužadinimui galinio šlifavimo metu.

3. Eksperimentinių tyrimų metu pastebėta paviršiaus kokybės priklausomybė tarp įrankio įsigilavimo ir sužadinimo amplitudės bus naudinga galinio šlifavimo vibracinio sužadinimo technologijos tobulinimui.

Tyrimo aprobacija

Disertacijos rezultatai buvo paskelbti mokslinėse publikacijose: 5 web of science duomenų bazėje indeksuotuose leidiniuose su cituojamumo rodikliu, 1 – web of science duomenų bazėje indeksuotuose leidiniuose be cituojamumo rodiklio, 1 patentu. Rezultatai buvo pristatyti 6 konferencijose.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus leidinių sąrašas. Bendra disertacijos apimtis yra 120 puslapiai, 18 lentelių ir 92 figūros.

1. LITERATŪROS ŠALTINIŲ APŽVALGA

Tyrimo sritys apdirbimo technologijų srityje yra labai plačios ir labai įvairios. Nors specifinę technologiją galėjo ištirti nemažas skaičius mokslininkų, ji gali pasirodyti visiškai nereikšminga, lyginant su daugybe kitų publikacijų apie kitas tos pačios srities technologijas. Todėl siekiant įvertinti esamą problemos ištyrimo laipsnį, taip pat jos aktualumą akademijoje, buvo atlikta raktinių žodžių derinių paieškos rezultatų analizė. Vertinant temos aktualumą buvo analizuojami raktinių žodžių „hard, brittle materials“ (liet. „kietos, trapios medžiagos“) ir „machining“ (liet. „apdirbimas“) bei jų kombinacijų paieškų „google scholar“ paieškos variklyje, rezultatai (Lentelė 1).

Lentelė 1 raktažodžių „machining“ ir „hard brittle materials“ paieškos rezultatų analizė

Raktažodžiai /kombinacijos	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Machining	37000	35400	35300	33500	30400	22600
Hard, brittle materials	185	146	197	227	209	150
„machining“ rezultatų %	(0.5%)	(0.41%)	(0.56%)	(0.68%)	(0.69%)	(0.66%)
Hard, brittle materials + machining	134	97	142	174	156	119
„hard, brittle materials“ rezultatų %	(72.43%)	(66.44%)	(72.08%)	(76.65%)	(74.64%)	(79.33%)

Pagal raktažodžių analizės rezultatus galima spręsti, kad didžioji dalis publikacijų (vidutiniškai 73.56%) kietų, trapių medžiagų tema yra susijusios su apdirbimu. Lyginant su publikacijų apdirbimo tema kiekiu, publikacijos kietų, trapių medžiagų tema, sudaro mažą, bet stabiliai augančią dalį. Todėl kietų, trapių medžiagų apdirbimo problema laikoma aktualia ir yra toliau sprendžiama šiame tyrime.

Paviršutiniškas termino - kieta, trapi medžiaga - apibrėžimas literatūroje dažnai interpretuojamas subjektyviai, dėl to publikacijose aprašomos medžiagos, kurioms šis apibrėžimas priskirtas neteisingai. Todėl buvo

surinktas publikacijose aptinkamų medžiagų, įvardintų kaip kieta, trapi medžiaga, sąrašas bei įvertinti jas minintys publikacijų kiekiai. Įvertinus santykį tarp publikacijų, mininčių medžiagą, ir publikacijų, mininčių kietas trapias medžiagas, kiekių, buvo pašalintos medžiagos, kurios sudarė mažiau kaip 5% publikacijų, mininčių kietas trapias medžiagas kiekio. Žemiau pateiktas (Lentelė 2) sąrašas likusių medžiagų su mechaninėmis savybėmis (kietumas pagal moso skalę ir atsparumas lūžiui) ir publikacijų kiekiu sąrašas. **Lentelė 2** patvirtintų kietų, trapių medžiagų ir jų mechaninių savybių sąrašas

Medžiaga	Kietumas	Atsparumas lūžiui	Minėjimas publikacijose
Si	7	0.68	197
Wc	9	6.9	306
Cr	8.5	120	225
Si3n4	8.5	1.8	145
Sic	9.5	4.6	492
Sio2	7	0.62	208
Bk7	6.5	0.82	147

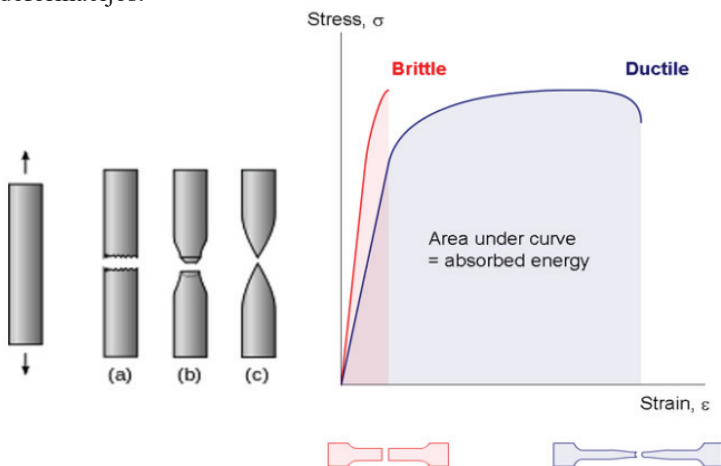
Remiantis aukščiau esančiu sąrašu (Lentelė 2) jame išvardintas medžiagas galima laikyti kietomis, trapiomis medžiagomis pagal daugumos konsensusą. Todėl jų mechaninių savybių ribinės vertės (išskyrus cr) gali būti naudojamos kaip kvalifikaciniai režiai kitų medžiagų klasifikacijai pagal kietų, trapių medžiagų apibrėžimą. Pagal aukščiau pateiktą informaciją, kieta, trapi medžiaga reikėtų traktuoti medžiagą, kurios kietumas pagal moso skalę viršija 6.5 o atsparumas lūžiui yra žemesnis negu 6.9.

Dažniausiai literatūroje sutinkamos kietos, trapios medžiagos yra volframo karbidas (wc) ir silicio karbidas (sic). Abi medžiagos yra daugiau kietos negu trapios (lyginant su sąrašu, pateiktu Lentelė 2). Sic dažnai naudojama kaip medžiaga veidrodinių, optinių elementų gamybai, o wc dažniau naudojamas įrankių bei liejimo formų gamyboje. Abiejų medžiagų pritaikymo aktualumas labai aukštas, tačiau remiantis mažesniu ištyrimo laipsniu bei didesniu prieinamumu tyrėjams, wc buvo pasirinktas kaip medžiaga šiuose tyrimuose.

Dažniausiai sutinkama bei pastaruoju metu daug susidomėjimo sulaukianti kietų, trapių medžiagų grupė, taikoma aukštosiose technologijose, yra keramika. Norint patenkinti augančią šių medžiagų pritaikymo paklausą, reikalingos didelio efektyvumo apdirbimo technologijos.

Viena iš problematiškiausių keraminių medžiagų savybių yra trapumas. Trapios medžiagos per periodą tarp tempimo ir trūkimo absorbuoja labai mažai

energijos (Redwing, 2017). Todėl medžiaga sutrūksta, nepatyrusi plastinės deformacijos. Žemiau pavaizduotas (Pav. 1 a) trapios medžiagos tempimo testo pavyzdys. Kadangi medžiagos takumas žemas, lūžis įvyksta nepatyrus plastinės deformacijos.

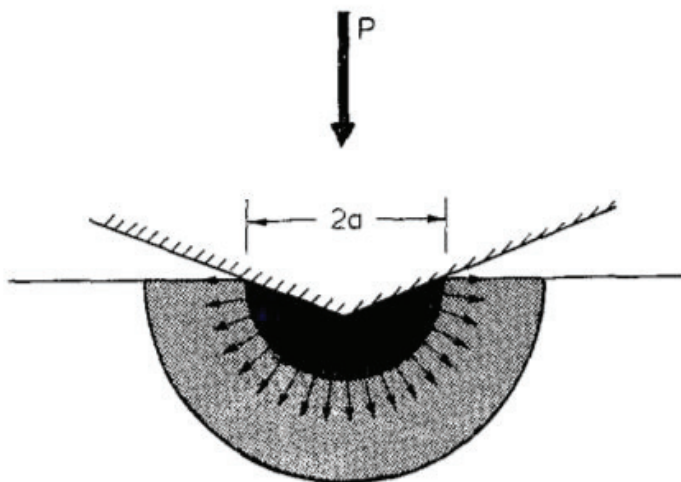


Pav. 1 Skirtingų medžiagų tempimo testų pavyzdžiai: a) trapi medžiaga; b) elasto-plastinė medžiaga; c) plastinė medžiaga (redwing, 2017).

Kiti aukščiau pavaizduotų deformacijų pavyzdžiai labiau būdingi metalams (Pav. 1 b) ir plastikams (Pav. 1c). Lyginant su metalais keramikos trapumas yra daug aukštesnis. Tai lemia tarpatominių ryšių skirtumai. Metaluose vyraujantys metališkieji ryšiai leidžia skirtingiems atomų sluoksniams pasislinkti vienas kito atžvilgiu, nesukeliant įtrūkimų, o keramikoje vyraujantys joniniai ryšiai neleidžia atomams slinkti vienas kito atžvilgiu dėl krūvių skirtumo, todėl dėl susidariusios įtampos atominiai ryšiai nutrūksta, formuojasi plyšiai ir įvyksta trapi deformacija (redwing, 2017).

Pagrindinis mechanizmas, leidžiantis apdirbti kietas, trapias medžiagas, yra trapios – tokios deformacijos virsmas. Šio virsmo metu medžiaga iš trapios deformacijos režimo, kuriame ji deformuojama nutraukiant atominius ryšius, į takų režimą, kurio metu deformacija įvyksta atominėms plokštumoms slystant viena kitos atžvilgiu. Šis virsmas yra nuo vienu metu šalinamos medžiagos kiekio priklausantis fenomenas. Jį po keleto nano-indentacijų eksperimentų kaip elasto-plastinę deformaciją 1975 m. Bandė charakterizuoti lawn ir wilshaw (Lawn & Wilshaw, 1975). Jie nustatė, kad kai medžiaga deformuojasi plastiškai, spaudimas plečiasi radialine kryptimi, sudarydamas hidrostatinį branduolį. Aplink šį branduolį susidaro dvi zonos- plastinė ir elastingė (Pav. 2).

Dėl to buvo pasiūlyta, kad bet kokia medžiaga gali būti deformuojama plastiškai, jeigu pritaikomas pakankamas spaudimas (Lawn & Wilshaw, 1975).



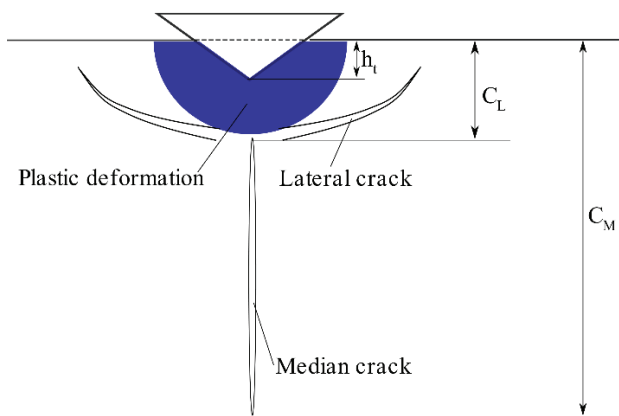
Pav. 2 Elastinės-plastinės indentacijos modelis: juodas regionas - hidrostatinis branduolys, pilkas regionas - plastinė zona, visa kita – elastinė matrica (lawn & wilshaw 1975).

Vėliau išaiškinus ryšį tarp kritinio spaudimo ir indentacijos gylio, 1990 buvo pasiūlytas kritinio gylio modelis, ties kuriuo įvyksta virsmas į trapią deformaciją (Scattergood & Blake, 1990):

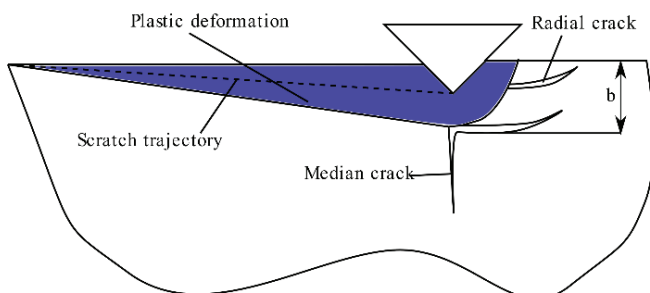
$$d = d_c \propto \left[\frac{K_c}{H} \right]^2 \quad (1.4)$$

Čia: d_c – kritinis drožlės storis, K_c – atsparumas lūžiui, H – kietumas.

Tačiau tolimesni nano-indentacijos ir nano-įbrėžimo eksperimentai parodė, kad net ir vykstant plastinei deformacijai, aplink plastinės deformacijos zoną formuojasi: indentacijos atveju - šoniniai ir medianos plyšiai (Pav. 3); nano-įbrėžimo atveju radialiniai ir medianos plyšiai (Pav. 4) (Chen, et al., 2015) (Duan, et al., 2017).

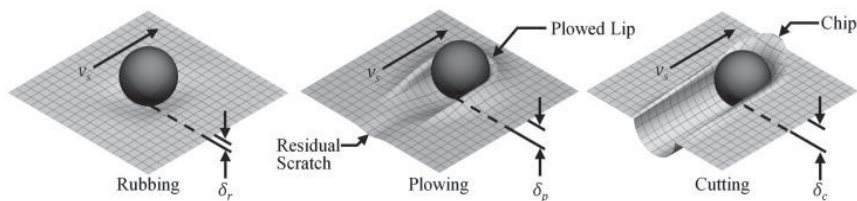


Pav. 3 Plyšių sistema indentacijoje (Duan, et al., 2017)



Pav. 4 Plyšių sistema įbrėžime (Duan, et al., 2017)

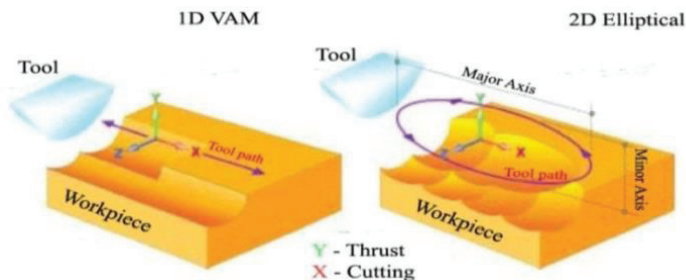
Daugiausiai žadanti ir lengviausiai pritaikoma technologija sprendžiant šią problemą yra šlifavimas vibracinio sužadinimo pagalba. Literatūroje minima daug vibracinio apdirbimo pavyzdžių, pagerinančių paviršiaus kokybę ir prailginančių įrankio tarnavimo laiką (Zhang, et al., 2014) (Gaidys, et al., 2017). Daug kur nurodoma, kad paviršiaus kokybės pagerėjimas pastebimas dėl abrazyvinio grūdėlio trajektorijos pokyčių, leidžiančių skirtingų grūdėlių trajektorijoms dalinai persidengti (Wang, et al., 2014). Tačiau irgi galimas kokybės pagerinimo mechanizmas yra papildomo, kintamo spaudimo į įrankio – ruošinio sandūrą įvedimas, kuris, galimai, sustabdo popaviršinių plyšių sklidimą ir laikinai įveda abrazyvinį grūdėlį į vieną iš trijų paviršiaus sąveikos sąlygų: trynimą – deformacija nevyksta, stūmimą – deformacija elastingė, pjovimą – deformacija plastinė arba trapi (Pav. 5) (Anderson, et al., 2011).



Pav. 5 Trys abrazyvinio grūdo sąveikos su paviršiumi režimai: trynimas, stūmimas, pjovimas (anderson et al. 2011).

Nepaisant, koks konvencinio padirbimo metodas yra papildomas ultragarsiniais virpesiais, visada galimi du sužadinimo tipai:

- 1-dimensinis, kai virpesiai pritaikomi lygiagrečiai kryptimi, pjovimo trajektorijai (a Pav. 6);
- 2-dimensinis, kai virpesiai pjovimo trajektorija yra nelygiagreti virpesių kryptčiai ir su virpesiais sudaro judėjimo plokštumą (b Pav. 6).



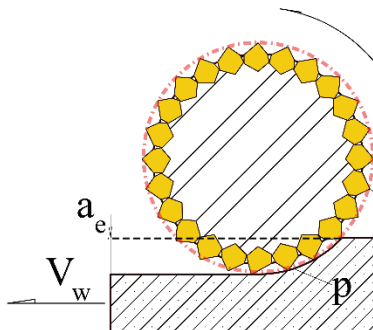
Pav. 6 Apdirbimo vibracinio sužadinimo pagalba tipai a) 1-dimensinis, b) 2-dimensinis (cerniway, 2001)

Straipsnyje (Zhong & Rui, 2005) aprašomi silicio apdirbimo naudojant deimantinį šlifavimo diską ir mikro-vibracijos prietaisą eksperimentiniai rezultatai. Geriausia paviršiaus kokybė buvo pasiekta, kai silicis buvo šlifuojamas esant 70 hz dažnio ir 6 μm amplitudės horizontaliems virpesiams, statmeniems šlifavimo kryptčiai, todėl pagal apibrėžimą tai galima laikyti apdirbimu 2-dimensinių virpesių pagalba. Nors geri rezultatai buvo pasiekti pakankamai žemais dažniais, literatūroje sutinkama tendencija rodo, kad apdirbimo procesų norimas efektyvumas yra proporcingas ultragarso sužadinimo dažniui, kuris dažnai viršija 100 kHz. Todėl akivaizdu, kad neturime duomenų apie ultragarsinio šlifavimo proceso pritaikymą kietai trapių medžiagų gamybai. Toliau šiame tyrime bus tobulinami du metodai –

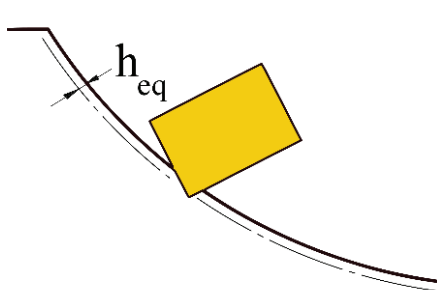
cilindrinis šlifavimas 1-dimensinio vibracinio sužadinimo pagalba ir galinis šlifavimas 2-dimensinio sužadinimo pagalba.

2. METODOLOGIJA

Pagrindinė šlifavimo proceso prielaida siejama su dideliu abrazyvinio įrankio sukimosi greičio v_s , ir ruošinio ar įrankio pastūma v_w , esant numatytam pjovimo gyliui a_e , kad atsitiktinai pasiskirstę abrazyvo grūdėliai bet kuriuo momentu liestųsi su ruošinio paviršiumi ir būtų pašalinamos nedidelės medžiagos dalys (Pav. 7). Atliekant šią analizę, nušlifuotas paviršius pažymėtas raide p bus vadinamas pasyviuoju paviršiumi, o aktyvių abrazyvo grūdelių viršūnės pažymėtos raide a , bus vadinamos aktyviuoju paviršiumi.



Pav. 7 Įrankio ir ruošinio sąveikos šlifuojant schema: a_e – pjovimo gylis, v_w – pastūma, v_s – pjovimo greitis, a – aktyvus paviršius, p – pasyvus paviršius

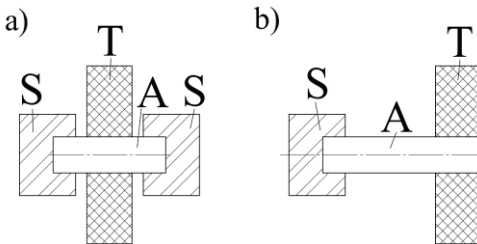


Pav. 8 Abrazyvinių dalelių įsiskverbimo į pasyvų paviršius realiaame gylyje h_{eq} schema

Bendra aktyvaus ir pasyvaus paviršių sąsaja proceso metu nuolat keičiasi. Kai įrankis dėvisi, grūdėliai ilgainiui lūžta ir nutrūksta, atitinkamai pasikeičia aktyviojo paviršiaus geometrija. Tuo tarpu pats medžiagų šalinimo procesas lemia nuolat kintančią aktyviųjų ir pasyviųjų paviršių sąsają. Jei būtų manoma, kad įrankis nėra nusidėvėjęs ir yra visiškai standus, šlifavimo grūdėliai vis tiek turės prasiskverbti į ruošinio medžiagą iki tam tikro efektyvaus gylio h_{eq} , (Pav. 8), kad nuo šlifuojamos medžiagos būtų pašalintos drožlės. Dydis h_{eq} yra dar vadinamas drožlės storiu ir yra apskaičiuojamas kaip pastūmos (V_w), pjovimo greičio (V_s) ir pjovimo gylio (a_e) funkcija (eq. 2.1) (Ilio, et al., 2009):

$$h_{eq} = a_e \frac{v_w}{v_s} \quad (2.1)$$

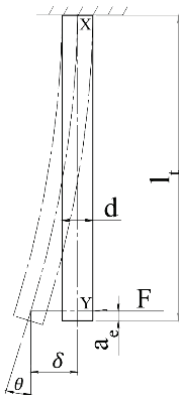
Apskritiminio cilindrinio šlifavimo atveju naudojamos dvi diskinio abrazyvinio įrankio tvirtinimo suklyje schemas-tvirtinant ant abiejuose galuose įtvirtintos (Pav. 9, a) arba ant gembiskai įtvirtintos (Pav. 9, b) ašies.



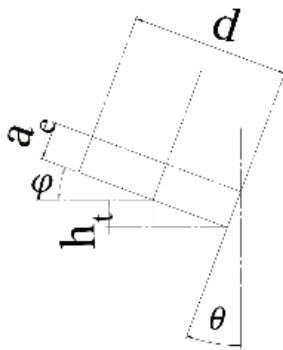
Pav. 9 Skirtingos šlifavimo įrankio tvirtinimo suklyje schemas a) dvitramė ir b) gembinė. Čia a - suklio ašis, t - šlifavimo diskas, s – suklio atrama.

Galinio šlifavimo atveju naudojami gembiskai ant besisukančios vertikalios suklio ašies įtvirtintos šlifavimo galvutės. Grūdeliai ant cilindrinio įrankio paviršiaus veiks pritvirtinus ruošinį, panašiai, kaip parodyta anksčiau Pav. 7 - Pav. 8. Šlifavimo galvutės galinio paviršiaus sąlytį su ruošiniu galima charakterizuoti arba normaline jėga, veikiančia išilgai suklio ašies arba atstojamąją šlifavimo momento jėga, kuris yra sukuriama įrankio cilindrinio paviršiaus abrazyvo grūdelių išskverbimo į ruošinį pastūmos kryptimi dėka. Ši jėga pakreipia įrankį kampu, priversdama grūdelius ant galinio įrankio paviršiaus susiliesti su šlifuojamo ruošinio paviršiumi. Įrankio įlinkio laipsnis savo ruožtu nusako grūdelių sukibimo su paviršiumi režimą - ar jis slystantis, įbrėžiantis ar pjaunantis, o tai savo ruožtu daro įtaką šlifuojamo ruošinio kokybei.

Analitiškai nustatant įrankio virtualųjį įlinkį, darant prielaidą, kad cilindro formos šlifavimo galvutė (Pav. 10), kurios skersmuo d yra įtvirtinta tam tikrame taške x , atsižvelgiant į įrankio išsikišančios dalies ilgį l_1 ir deformacijos jėgą f , veikiančią dėka šlifavimo sukimo momento taške y , priklausančią nuo įrankio sukabinimo gylio a_c .



Pav. 10 Šlifavimo galvutės didžiausio įlinkio ir įlinkio kampo nustatymo schema



Pav. 11 šlifavimo galvutės padėties schema

Maksimalus įlinkis ir įlinkio kampas gali būti apskaičiuoti naudojant šias šios įlinkio lygtis:

$$\delta = \frac{64 F(l_t - a_e)^2 (3l_t - (l_t - a_e))}{6 E \pi d^4} \quad 2.2$$

$$\theta = \frac{32 F(l_t - a_e)^2}{E \pi d^4} \quad 2.3$$

Dėl to maksimalus virtualus įrankio apatinio paviršiaus pakreipimo ir pasvirimo kampas (16 pav.), darant prielaidą, kad simetrinė pasisukimo sąlyga, kai tampriai deformuoto įrankio ilgis prilygsta pradiniam įrankio galinio paviršiaus ilgiui šio paviršiaus plokštumos ir įrankio sukimosi ašies susikirtimo taške y, kurio atstumas vertikalia kryptimi gali būti apytiksliai apskaičiuotas pagal geometrinius įrankio ir šlifavimo gylio ryšius laikant, kad įrankio posvyrio kampas $\varphi = \theta$:

$$h_t = \frac{D \sin(90 - \theta)}{2} \quad (2.4)$$

atsižvelgiant į aukščiau nurodytus ryšius ir į tipinį šlifavimo gylį ir įrankio matmenų santykį, keičiantis gyliui, įlinkis neturėtų smarkiai kisti.

2.1 Ultragarsinio galinio šlifavimo įrangos sužadinant įrankį paruošimas

Įrankių sužadinimo metodas yra dažniausiai naudojamas vibraciniame apdirbime sukamaisiais įrankiais. Šio eksperimentinio tyrimo tikslas buvo įvertinti vibracinio metodo efektyvumą apdirbant volframo karbidą (wc).

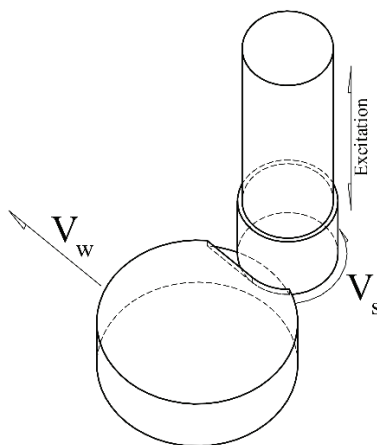
Pagrindiniai vertinimo kriterijai buvo šie:

1. Paviršiaus šiurkštumo pokyčiai įdiegus vibracinį šlifavimą.
2. Tampo režimo atsiradimo dažnio pokyčiai įrankį paveikus virpesiais.
3. Metodo universalumas ir dizaino apribojimai.

Šiame darbe sukurti „langevin“ tipo aktuatoriai, turintys daugiasluoksnius pjezo keitiklius. Šie aktuatoriai susideda iš cilindro formos pjezokeraminių elementų rinkinio (kartu su elektrodais), išdėstytų tarp dviejų masių, sujungtų varžtu, kuris suspaudžia pjezokeraminius elementus. Masė, naudojama virpesiams perduoti į įrenginio galinę dalį, paprastai vadinama priekine mase, pjezokeraminė dalis paprastai vadinama centrine mase, o atsvaro masė vadinama galine mase. Tyrimas buvo skirtas panaudoti ultragarsu sužadintą abrazyvinę šlifavimo galvutę, kad būtų galima apdirbti cilindrinį wc ruošinį (Pav. 12).

Tyrimo rezultatai pateikė keletą įžvalgų apie metodo efektyvumą. Paviršiai trapiai deformavosi ir davė aukštas vidutinio šiurkštumo reikšmes. Buvo manoma, kad prastus rezultatus lėmė įrankio sužadinimo metodas, turintis tris pagrindinius apribojimus:

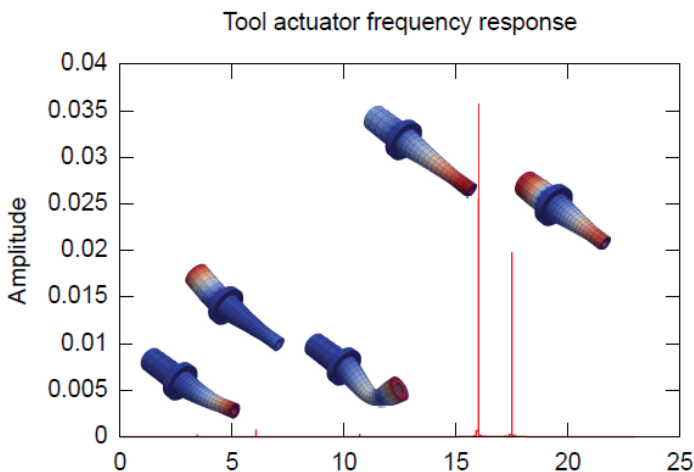
1. Mažas suklio greitis.
2. Ribotas pritaikomumas.
3. Žemas sužadinimo dažnis.



Pav. 12 Vibracinio galinio
šlifavimo schema

Pirmieji du apribojimai susiję su besisukančio ultragarsinio akuatoriaus valdymu. Pjzokeraminiams žiedams veikti reikalingas elektrinis signalas. Kadangi įrankis sukasi, buvo naudojami anglies šepetėliai ir komutatoriaus žiedo kontaktas. Todėl reikėjo papildomos konstrukcijos laikiklio, kad šepetėlių padėties būtų suderintos su komutatoriaus žiedais. Be to, anglies šepetėlio laikiklio konstrukcijos rezonansiniai dažniai turi viršyti suklio darbinis dažnius. Šiuo atveju anglies šepetėlių laikiklis dėka savo dinaminių ypatumų galėjo valdyti ultragarsinį akuatorių tik iki 5000 suklio aps/min. Viršijus šią ribą, šepetėliai pradėdavo kibirkščiuoti, dėl ko sumažėdavo ultragarsinio poveikio efektyvumas.

Baigtinių elementų metodu buvo atlikta ultragarsinio galinio šlifavimo įrankio modalinė ir dažnio-atsako analizė. Pirmoji leidžia nustatyti skirtingų virpesių tipų modalias formas, o dažnio atsako analizė padeda nustatyti dominuojančius režimus. Šios žinios yra labai svarbios užtikrinant, kad konstrukcija yra teisinga ir kad įrankis žadinamas režimais, nurodytais naudotais eksperimentinio tyrimo metu (18 pav.).



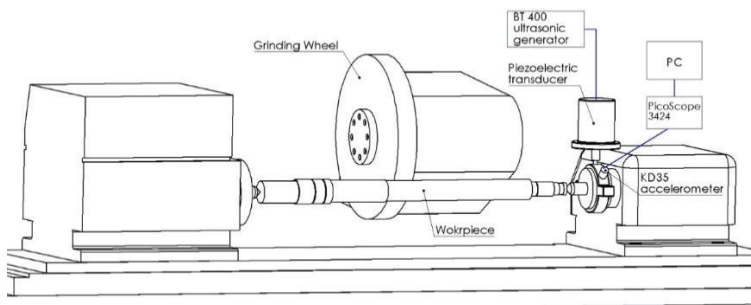
Pav. 13 galinio šlifavimo įrankio savieji dažniai ir modos

Iš pateiktos galinio šlifavimo įrankio skirtingo tipo virpesių modų nuo savųjų dažnių priklausomybės matome, kad iki 10 kHz dažnio vyrauja išimtinai skersinių virpesių modos, kurios nepasižymi aukštomis galinio šlifavimo galvutės amplitudėmis. Kadangi kietų ir trapių medžiagų būvio virsmas į tamprųjų galimas tik esant aukštiesiems sužadinimo dažniams, tai duotuoju atveju įdomesni yra įrankio išilginiai virpesiai ir iš pateiktų priklausomybių matome, kad įrankio išilginių virpesių modos stebimos 15–20 kHz dažnių diapazone. Galima pastebėti, kad įrankio žadinimo atveju pasiekiami tik 15–20 kHz dažnių diapazono režimai. Norint padidinti įrankio žadinimo dažnį, reiktų labai sumažinti ultragarsinio bangolaidžio ilgį. Tai apribotų įrankio laikiklio konstrukcinių parametrų variacijos galimybes. Jei šiame tyrime panaudotas akuatorius būtų projektuojamas veikti aukštesniais nei 40 arba 80 kHz dažniais, tai jo priekinės dalies ilgis būtų atitinkamai 0,043 m ir 0,012 m ilgio. Todėl ultragarsu žadinamo galinio šlifavimo įrankio akuatoriaus veikimo dažnis buvo apribotas iki palyginti žemo 30 kHz ultragarsinio dažnio diapazono.

2.2 Ultragarsinio cilindrinio šlifavimo įrangos sužadinant ruošinį paruošimas

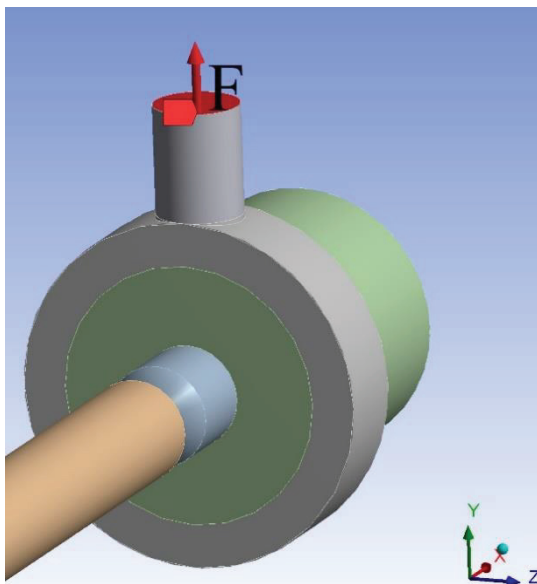
Atsižvelgiant į ankstesnio tyrimo metu pateiktą sukamosios sąsajos sužadinimo iššūkį, buvo bandoma sumažinti problemas, susijusias su signalo komutacija per besisukančias sąsajas. Pagrindinė šio klausimo sprendimo idėja yra panaikinti poreikį komutuoti per besisukančias sąsajas, pritvirtinant pavaras prie statinių konstrukcijų, kuriose yra besisukančios sąsajos, užuot

bandžius valdyti pavarą jau besisukančioje sąsajoje, bandant sukelti vibraciją ant pačios besisukančios sąsajos.



Pav. 14 cilindrinio šlifavimo ultragarsinio sužadinimo schema

Didžiausias besisukančios sąsajos sužadinimo iššūkis yra cilindrinio šlifavimo metu, kai ir įrankis, ir ruošinys yra besisukančiose sąsajose. Ultragarsinio sužadinimo taikymo schema yra pavaizduota Pav. 14. Siūlomas sprendimas - sužadinimą pritaikyti stacionariame staklių arkliuko centre (Pav. 15).



Pav. 15 Ultragarsinio žadinimo jėgos F taikymas ruošinio tvirtinimo staklių arkliuko centre

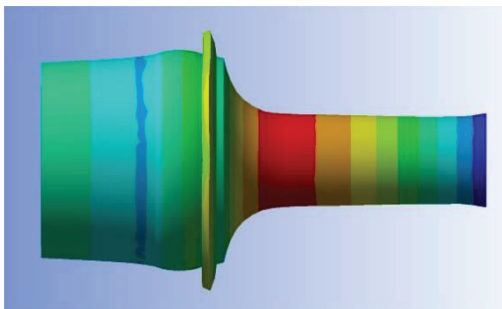
Tiriant ruošinių iš plieno vibracinio šlifavimo ypatumus 1 n žadinančios jėgos dažnis buvo keičiamas intervale nuo 15 kHz iki 25 kHz. Tinkamiausio dažnio pasirinkimas buvo supaprastintas, kad atitiktų tris kriterijus mažėjančia svarbos tvarka:

1. Pasirinktas dažnis turi būti pakankamai nutolęs nuo gretimų modų dažnių.
2. Vidutinė ruošinio virpesių amplitudė jo ilgyje turi būti pakankama vibracinio šlifavimo režimui užtikrinti.
3. Pasirinktos modos dažnis turi būti artimas abiejų medžiagų ruošiniams.

Dėl to ruošiniams buvo pasirinktas artimas 15,8 kHz sužadinimo dažnis. Atliekant sužadinimo jėgos parametrinę valdymą, vidutinė ruošinio virpesių amplitudė buvo 1,5 μm esant 2,1 n žadinimo jėgai. Todėl akuatorius veikė 15,85 kHz ir 15,794 kHz dažniais iššaukdamas 2,1 n reakcijos jėgas ruošinio įtvirtinimo vietose.

Pradinis akuatoriaus dizainas pagrįstas jau esamais jį sudarančių komponentų matmenų ir medžiagos reikalavimais, taip pat atsižvelgiant į generuojamos bangos ilgį. Akuatorius turi būti sujungtas su arkliuko centre įtvirtintu ruošiniu m30 sriegiu bangolaidžio gale, todėl tvirtinimo konstrukcijos variacijos buvo ribotos. Akuatorius sudarytas iš dviejų

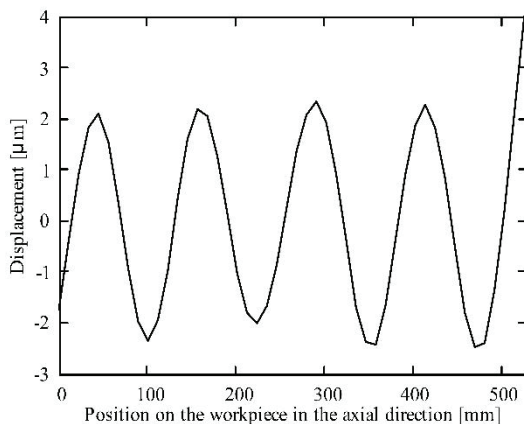
pjezokeraminių žiedų, kurių matmenys yra $80\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 12\text{ mm}$. Tai nurodo bangolaidžio antgalio skersmenį ir galinę 80 mm masę.



Pav. 16 Pradinės akuatoriaus konstrukcijos išilginiai virpesiai

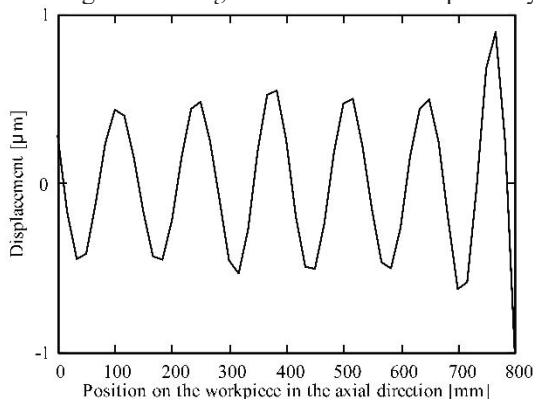
Remdamiesi visais gautais duomenimis darome išvadą, kad priekinės masės ilgis sudaro ketvirtadalį įrankinio plieno bangos ilgio. Kadangi pjezokeraminių žiedų rinkinio ilgis yra žinomas, buvo tiriama aštuntoji jo bangos ilgio dalis, kad būtų galima apskaičiuoti galinės masės dydį - aštuntąją liuminio lydinio bangos ilgio dalį. Šie dydžiai buvo panaudoti pradiniame modalinės analizės tyrime (24 pav.). Tikėtasi, kad išilginiai virpesiai vyks 15,794 kHz dažniu, tačiau keičiant ultragarsinius dažnius 15 kHz - 25 kHz diapazone buvo gauti 2 kHz didesni išilginių virpesių dažniai. Buvo atliktas parametrinis bangolaidžio ilgio koregavimas, o išilginiai virpesiai buvo stebimi 15,939 kHz dažniu, prie 111 mm bangolaidžio ilgio (24 pav.).

Harmoninės reakcijos bandymai buvo atlikti suprojektuotam akuatoriui paveikiant pjezokeraminių žiedų rinkinio galines plokštumas priešingoms ženklo jėgomis, imituojant ultragarsinį sužadinimą. Išmatuota bangolaidžio išėjimo jėga turėjo prilygti 2,1 n apdirbant laiptuotą ir vienodo skersmens cilindro formos ruošinius atitinkamai prie 15,794 kHz ir 15,850 kHz dažnių. Šių dviejų tipų ruošinių virpesių amplitudės siekia $1,5\text{ }\mu\text{m}$ žadinant laiptuotą ruošinį 19 n (Pav. 18), o vienodo skersmens cilindro formos-20 n jėga (Pav. 17).



Pav. 17 Vientiso skersmens cilindrinio ruošinio reakcija žadinant 20 n jėga 15,85 kHz dažniu

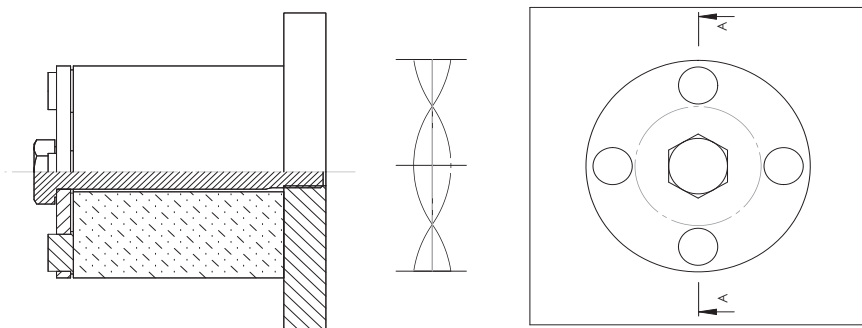
Lyginant sužadinimo amplitudes, galima matyti, kad dėl geometrijos bei medžiagos skirtumų, vientiso cilindro amplitudė yra aukštesnė negu laiptuoto.



Pav. 18 Laiptuoto cilindrinio ruošinio reakcija žadinant 19 n jėga 15,794 kHz dažniu

2.3 Ultragarso cilindrinio šlifavimo įrangos sužadinant ruošinį paruošimas

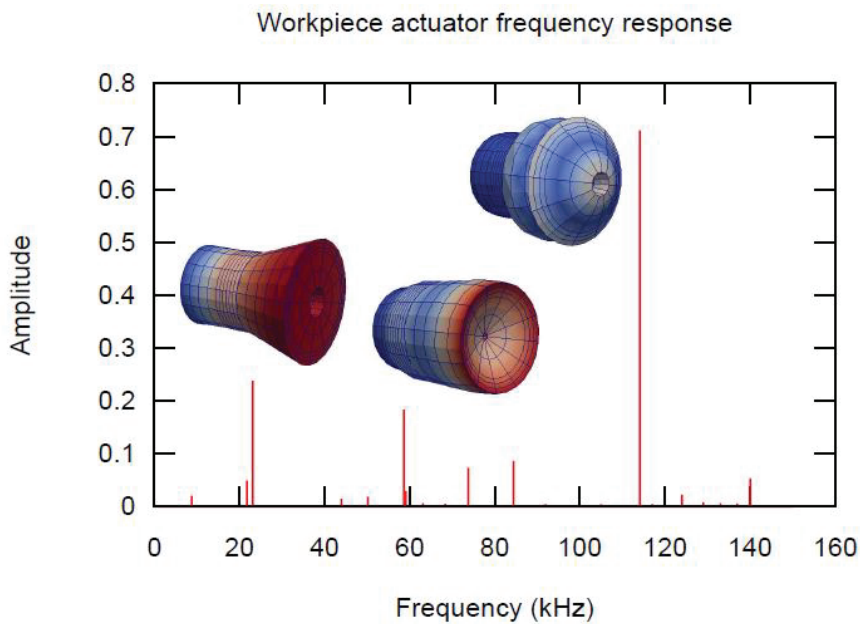
Įvertinus ankstesnėse studijose pastebėtus trūkumus buvo nuspręsta, kad patikimiausias būdas atlikti trapių medžiagų šlifavimą vibracinio sužadinimo pagalba yra ultragarsu sužadinti nejudantį ruošinį. Tam tikslui buvo sukurtas, išbandytas ir užpatentuotas ultragarso cilindrinio ruošinio aktuatorius.



Pav. 19 Ultragarsinio ruošinio aktuatoriaus schema

Parengtas dizainas skirtas išnaudoti koncentrinės vibracijų zonas, atsirandančias aukštesnėse modose aktuatoriaus paviršiuje. Tokiu būdu pasiekiami aukštesni sužadinimo dažniai.

Matome, kad grynas išilginis ruošinio pavaros režimas yra didesnis nei 20 kHz (19 pav.). Tačiau aukštesnės eilės režimai iš tikrųjų sukuria panašias ar net didesnes amplitudes aukštesniais dažniais. Šie režimai gali būti panaudoti ruošinio sužadinimui, nes jie sukuria poslinkio zonas koncentriniais žiedo raštais, kurie gali būti tinkami ruošinio sužadinimui šlifavimo metu.



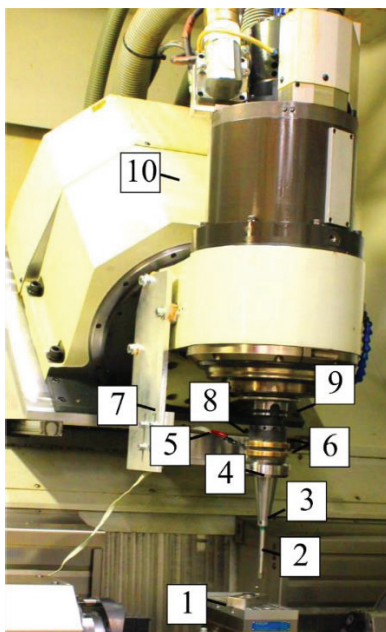
Pav. 20 Ruošinio aktuatoriaus savosios formos

3. EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI

3.1 Vibracinis galinis šlifavimas naudojant ultragarsinį sukamojo įrankio sužadinimą

Norint vykdyti galinio šlifavimo procesą, naudojant ultragarsinį įrankio sužadinimą, buvo suprojektuotas ir pagamintas įrankio laikiklis ir panaudotos aukšto tikslumo 5 ašių „starrag heckert lx 151“ frezavimo staklės, esančios „Fraunhofer IPTRobor

“ (Achenas, Vokietija) autoriaus stažuotės Fraunhoferio institute metu (Pav. 21).



Pav. 21 Galinio ultragarsinio šlifavimo stendas

1. Ruošinys 2. Galinio šlifavimo įrankis 3. Įrankio sužadinimo bangolaidis 4. Įrankio fiksavimo varžtas 5. Anglies šepetėlio jungtis 6. Komutaciniai žiedai 7. Anglies šepetėlio laikiklio konstrukcija 8. Aktuatoriaus gaubtas 9. Hsk 65a suklio sąsaja 10. Frezavimo staklių galvutė

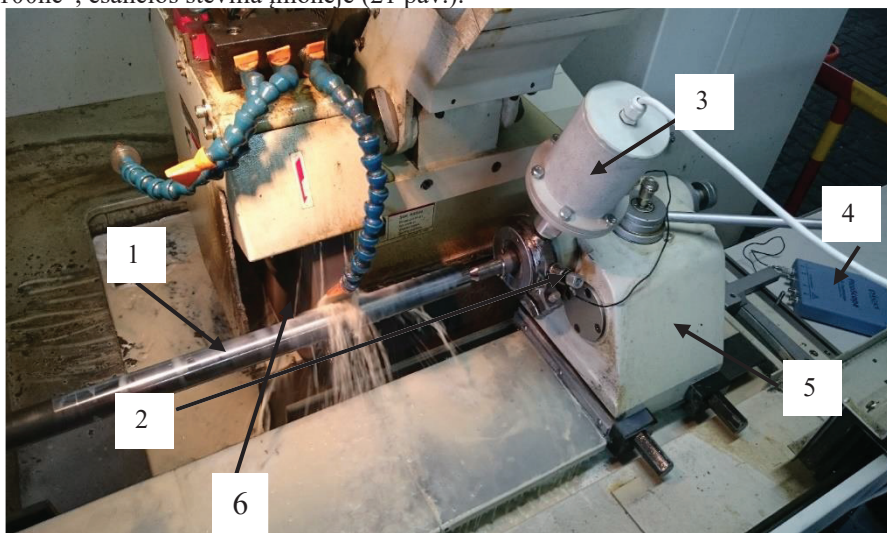
Pasinaudojus signalų stiprintuvu buvo galima pasiekti efektyvią 20 v įtampą esant 11–13 kHz įrankio žadinimo dažniui. Buvo nustatyti du virpesių

tipai - skersinių virpesių, kurie vyko prie 11,75 kHz dažnio, ir išilginių, prie 13,21 kHz dažnio. Abiejuose režimuose įrankio virpesių amplitudė siekė beveik 1 mikrometrą, tačiau dėl skirtingo virpesių tipo vibracijos režimo buvo nuspręsta naudoti abu režimus.

3.2 Vibracinis galinis šlifavimas ultragarsu sužadinant nesisukantį ruošinį

Šlifuojant ultragarsu sužadintu besisukančiu įrankiu buvo pastebėta, kad tuo atveju, kai naudojamas greitai besisukantis didelės masės šlifavimo diskas yra sudėtinga jį sužadinti aukšto dažnio virpesiais.

Norint vykdyti cilindrinio šlifavimo procesą, naudojant ultragarsinį ruošinio sužadinimą, buvo suprojektuotas ir pagamintas 400 w galios pjezoaktuatorius ir panaudotos cilindrinio šlifavimo staklės „supertec g32p-100nc“, esančios stevilla įmonėje (21 pav.).



Pav. 22 eksperimentinis ultragarsinio cilindrinio šlifavimo stendas

1. Ruošinys (plieninis strypas) 2. Akselerometras (kd35) 3. Pjezoelektrinis keitiklis 4. Virpesių matuoklis „picoScope“ (3424) 5. Cilindrinio šlifavimo staklės („supertec g32p-100nc“) arkliukas 6. Šlifavimo diskas

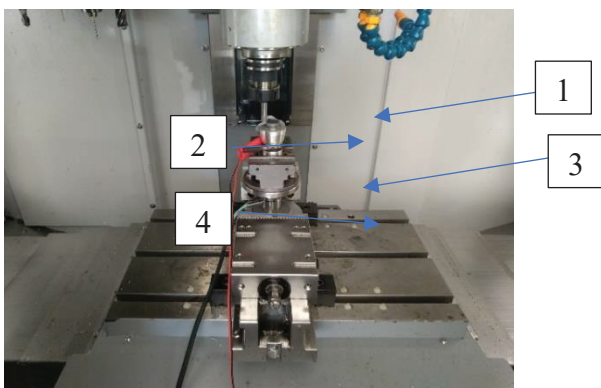
Šlifuojant cilindrinį 1.1186 plieno veleno ruošinį suklys buvo sukamas panašiai kaip ir tekimo staklės. Galingas pjezoaktuatorius buvo įtvirtintas ant arkliuko, palaikančio ruošinį, centro. Ruošinys buvo žadinamas

radialine kryptimi virpėdamas statmena besisukančio šlifavimo disko ašiai kryptimi, 16.81 kHz dažniu.

Šlifavimo bandymai buvo atliekami sauso ir šlapio šlifavimo sąlygomis. Po kiekvieno šlifavimo paviršiaus kokybė buvo matuojama naudojant paviršiaus šiurkštumo matuoklį „mitutoyo surftest sj-210“. Kiekvienas matavimas buvo atliekamas 5 kartus 0,8 mm ruošinio ilgyje.

3.3 Vibracinis galinis šlifavimas ultragarsu sužadinant nesisukantį ruošinį

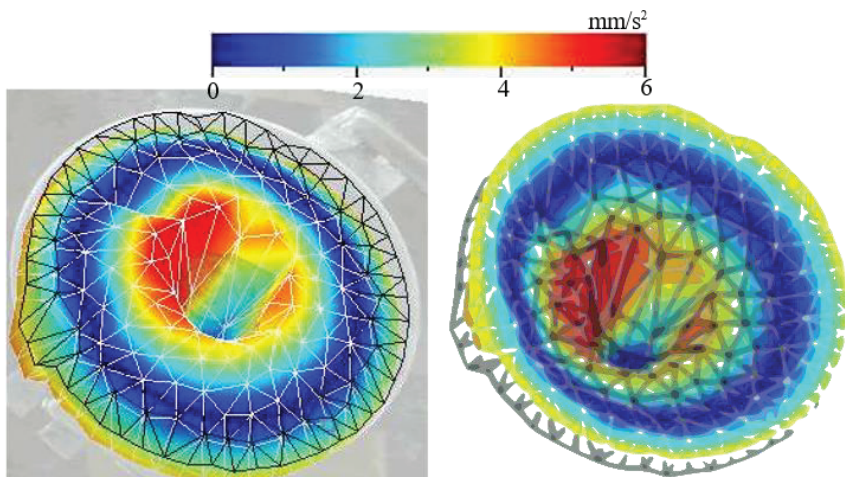
remiantis besisukančio ruošinio sužadinimo tyrimu, tiesioginis nejudančio ruošinio sužadinimas yra kitas logiškas žingsnis tiriant ultragarsinį poveikį kietoms ir trapioms medžiagoms. Didesni sužadinimo dažniai yra pasiekiami panaudojant aukštesnės eilės režimus, kurie sukelia periferines tvirtinamo ant aktuatoriaus ruošinio deformacijas. Pav. 24 pavaizduotos šlifuojamo ruošinio paviršiaus virpesių formos prie 84.5 kHz sužadinimo dažnio. Tokią galimybę suteikiančio aktuatoriaus patento numeris yra lt2019505.



Pav. 23 eksperimentinis ultragarsinio galinio šlifavimo sužadinant ruošinį stendas

1. Ruošins 2. Aktuatorius 3. Spaustuvas 4. Dinamometras

Norint vykdyti šlifavimo procesą, naudojant ultragarsinį ruošinio sužadinimą, buvo suprojektuotas ir pagamintas bei užpatentuotas ruošinio įtvirtinimo ant vibrostendo laikiklis, įgalinantis vibrostendą veikti aukštesnių nei pirmoji virpesių modų režimu (Pav. 23).



Pav. 24 ultragarsu žadinamo ruošinio paviršiaus virpesių formos prie 84,5 kHz dažnio

Galinio šlifavimo sužadinant ruošinį eksperimentinis tyrimas nuo įrankio sužadinimo tyrimo skiriasi tuo, kad šiuo atveju nereikalingas nei anglies šepetys elektros srovės padavimui, nei komutaciniai žiedai. Šiuo atveju ruošinys yra tvirtinamas ant ultragarsinio aktuatoriaus paviršiaus. Tai leidžia paprasčiau konfigūruoti visą stendą ir lengviau adaptuoti vienokioms ar kitokioms šlifavimo staklėms.

Šlifavimo gylių diapazonas buvo išplėstas, kad būtų galima įvertinti apdirbimo efektyvumą mažesniame šlifavimo gylyje (Lentelė 3). Buvo atskleista, kad sumažinus šlifavimo gylį, susidarydavo nepakankamas hidrostatinis slėgis, dėl kurio šlifavimo metu vykdavo tampriosios deformacijos, įgalinančios apdirbti kietas ir trapias medžiagas. Pasiektas ultragarsinio sužadinimo dažnis buvo 85 kHz - daugiau nei 7 kartus didesnis už dažnį, taikytą tyrime, kurio metu buvo žadinamas besisukantis įrankis. Be gylio kitimo, virpesių amplitudė taip pat buvo keičiama per 4 reikšmes (0, 0,25, 0,5, 1 μm).

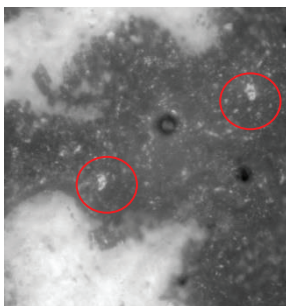
Lentelė 3 ultragarsinio šlifuojamo ruošinio žadinimo parametrai

Gylis	Žadinimo dažnis kHz	Suklio greitis aps/min	Pastūma mm/min	Žadinimo amplitudė
25	0	5000	5	0
	84.5			1
				0.5
				0.25
50	0			0
	84.5			1
				0.5
				0.25
1	0			0
	84.5			1
				0.5
				0.25
5	0			0
	84.5			1
				0.5
				0.25

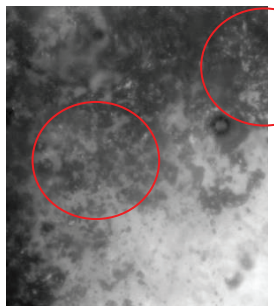
4. REZULTATAI IR DISKUSIJA

4.1 Galinis ultragarsinis šlifavimas sužadinant įrankį

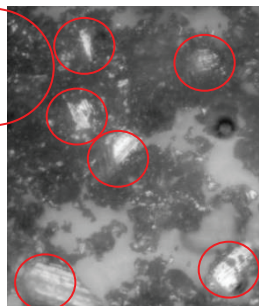
Volframo karbido mikro dalelių mėginiai buvo imami po kiekvieno bandymo. Žemiau pateiktose (100x100) μm mikroskopinėse nuotraukose (Pav. 25, Pav. 26, Pav. 27) pateikiamas 25 μm gyliu apdirbto ruošinio mikrodalelių išsidėstymas šlifuojant be ultragarsinio sužadinimo, išilginiu ir skersiniu sužadinimu.



Pav. 25 WC dalelių išsidėstymas šlifuojant be ultragarsinio sužadinimo 25 μm gyliu



Pav. 26 WC dalelių išsidėstymas šlifuojant su ultragarsiniu išilginiu sužadinimu 25 μm gyliu



Pav. 27 wc dalelių išsidėstymas šlifuojant su ultragarsiniu skersiniu sužadinimu 25 μm gyliu

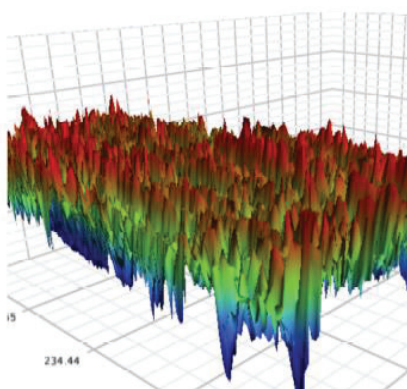
Nuotraukose galima pastebėti, kad visais trimis atvejais wc dalelės yra netaisyklingo dydžio, tačiau geriausiai dalelių dydis matomas ėminyje, gautame išilginio sužadinimo metu (Pav. 26), kai skersiniu sužadinimu gautas mėginys (Pav. 27) yra mažiausiai nuoseklus, nes kai kurių dalelių dydis yra iki 10 μm . Panašūs rezultatai gauti ir šlifuojant 50 μm gyliu. Nušlifuoto wc ruošinių paviršiaus mikronelygumo matavimo rezultatai pateikti 4 lentelėje. Kaip matome, blogiausia paviršiaus kokybė gaunama skersinio sužadinimo atveju.

Nors baltos šviesos interferometrija gali būti kiekybinis paviršiaus kokybės orientyras (nes ji suteikia apskaičiuotas paviršiaus šiurkštumo vertes), ji buvo naudojama kaip kokybinė priemonė paviršiaus morfologijos pokyčiams ištirti esant skirtingoms apdirbimo sąlygoms. Nuimdamas

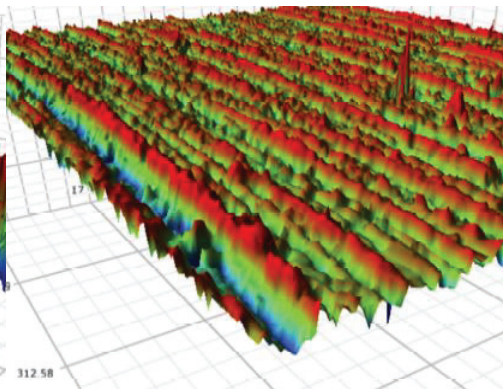
medžiagą, įrankis palieka griovelius, būdingus abrazyvo grūdelio pjovimo briaunos geometrijai, kuri šlifavimo procese nėra aiškiai apibrėžta. Žemiau pateikiamos mėginių baltos šviesos interferometrijos nuotraukos 25 μm gylio pjūvyje (Pav. 28). Paviršiaus kokybę charakterizuoja griovelių spalvinis derinys, kuris yra akivaizdus išilginio sužadinimo atveju.

Lentelė 4 WC mėginių paviršiaus šiurkštumo parametrai

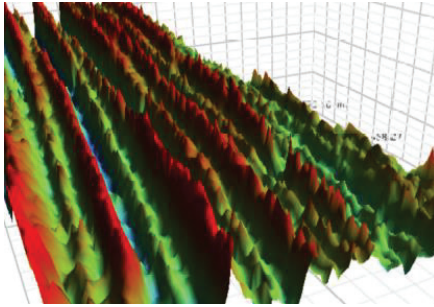
Šlifavimo gylis	Sužadinimo sąlygos	Ra	Rz
25 μm	Be sužadinimo	0.198 μm	1.8448 μm
	Išilginis žadinimas	0.1536 μm	1.0699 μm
	Skersinis žadinimas	0.2696 μm	1.8059 μm
50 μm	Be sužadinimo	0.408 μm	2.4072 μm
	Išilginis žadinimas	0.2471 μm	1.5807 μm
	Skersinis žadinimas	0.5651 μm	3.9809 μm



A.



B.



C.

Pav. 28 paviršiaus baltos šviesos interferometrija, šlifuota 25 μm gyliu

a. Be sužadavimo b. Su išilginiu sužadavimu c. Su skersiniu sužadavimu

Pjovimo jėga charakterizuoja tamprus režimo deformacijas. Tampriosios deformacijos sąlyga yra šlifavimo jėgos sumažėjimas, tačiau priklausomai nuo tamprios deformacijos mechanizmo (terminio ar aukšto slėgio sukkelto plastiškumo), šlifavimo jėgos sumažėjimas gali būti ne toks akivaizdus. Iš žemiau pateiktų grafikų (34 pav.) Matyti, kad šlifuojant be ultragarsinio sužadavimo gylio pokyčiai nežymūs, o taikant ultragarsinį sužadavimą išilgine kryptimi, 25 μm šlifavimo gylyje stebimas beveik 50%

šlifavimo jėgos ir jos pokyčių svyravimų sumažėjimas.

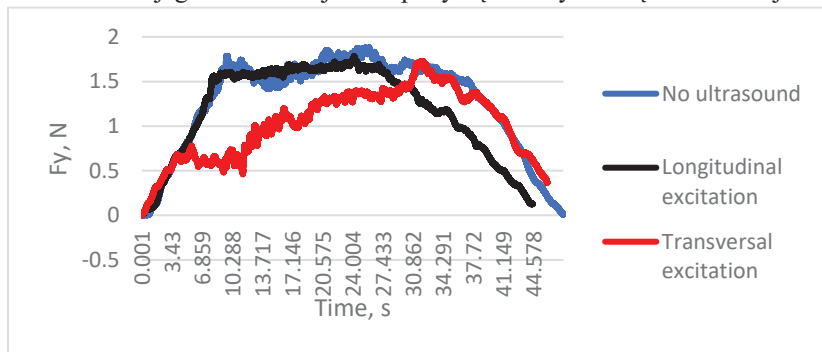


Fig. 2 Ašinė šlifavimo jėga, 25mikronų gylįje su ir be ultragarsinio sužadavimo

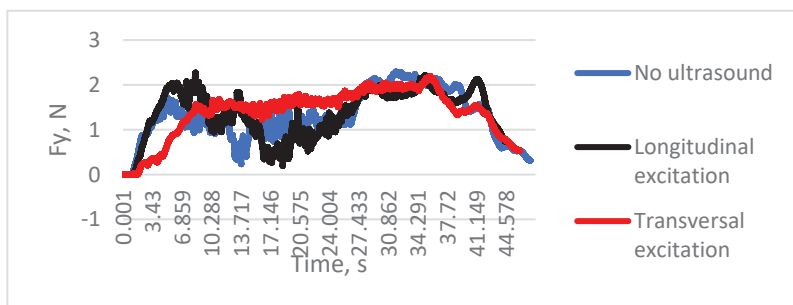
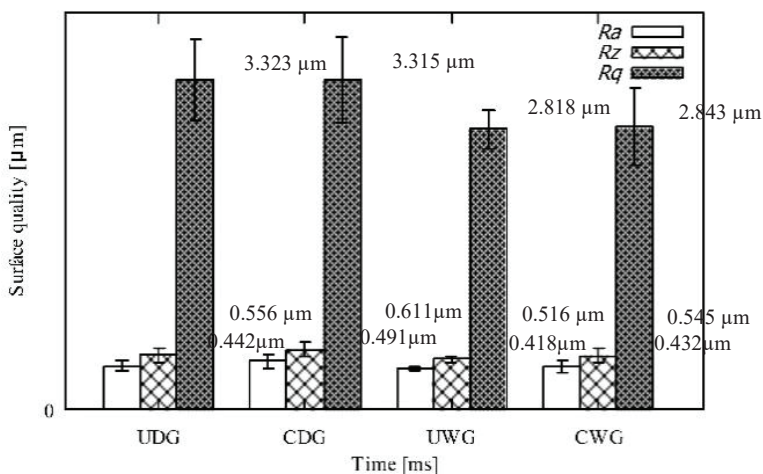


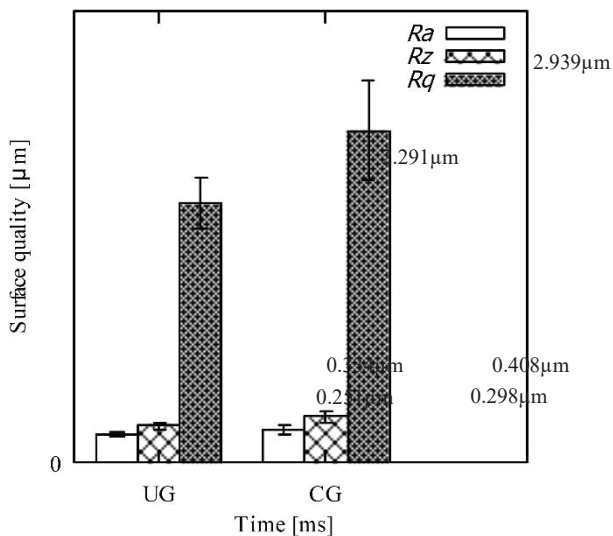
Fig. 3 Ašinė šlifavimo jėga, 25mikronų gylįje su ir be ultragarsinio sužadavimo

4.2 Naujas ultragarsinio žadinimo būdas cilindriniam šlifavimui

Eksperimento metu pasiektas veleno ir strypo šiurkštumas buvo išmatuotas paviršiaus šiurkštumo matuokliu, kad būtų galima palyginti įprastus ir sužadintus ultragarsu bei su aušinimo skysčiu ir be jo šlifuosius ruošinius. Vienodo skersmens ruošinio paviršiaus šiurkštumo matavimo rezultatai pateikti Pav. 29, veleno Pav. 30 ug ir cg reiškia šlapią šlifavimą ultragarsu ir be jo, kai jie pritaikomi pakopiniam velenui, o udg ir cdg reiškia ultragarsą ir įprastas sausas šlifavimas naudojant uwg ir cwg, atitinkamai šlapiam šlifavimui, dirbant su vientiso skersmens plieno strypu.



Pav. 29 paviršiaus šiurkštumo matavimai, šlifuojant vientiso skersmens strypą
 udg - sausas šlifavimas su ultragarsiniu sužadinimu, cdg - įprastas sausas
 šlifavimas, uwg - šlapias šlifavimas sužadinant ultragarsu, cwg – įprastas
 šlapias šlifavimas

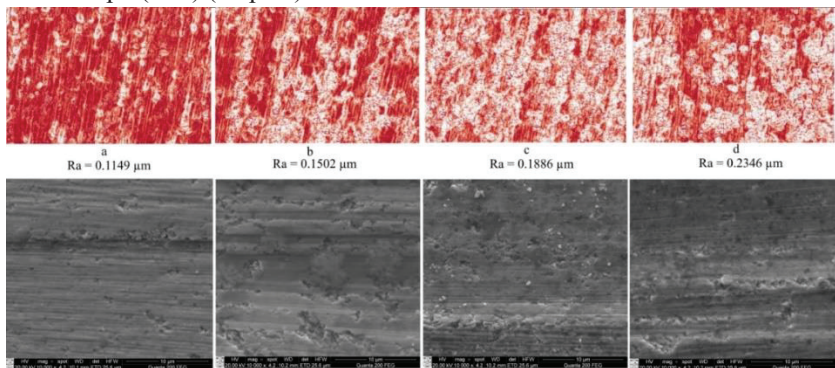


Pav. 30 paviršiaus šiurkštumo matavimai šlifuojant veleną
 ug - šlapias šlifavimas su ultragarsiniu sužadinimu, cg - įprastas šlapias
 šlifavimas

Paviršiaus šiurkštumo rezultatai, šlifuojant vientisą strypą, pritaikius ultragarsą, daug nekinta (Pav. 30), tačiau apdirbant veleną, kurio amplitudė simuliacijose buvo mažesnė, pokyčiai labiau pastebimi. Todėl galima daryti prielaidą, kad aukšta amplitudė gali turėti neigiamą poveikį paviršiaus kokybei.

4.3 Galinis ultragarsinis šlifavimas sužadinant ruošinį

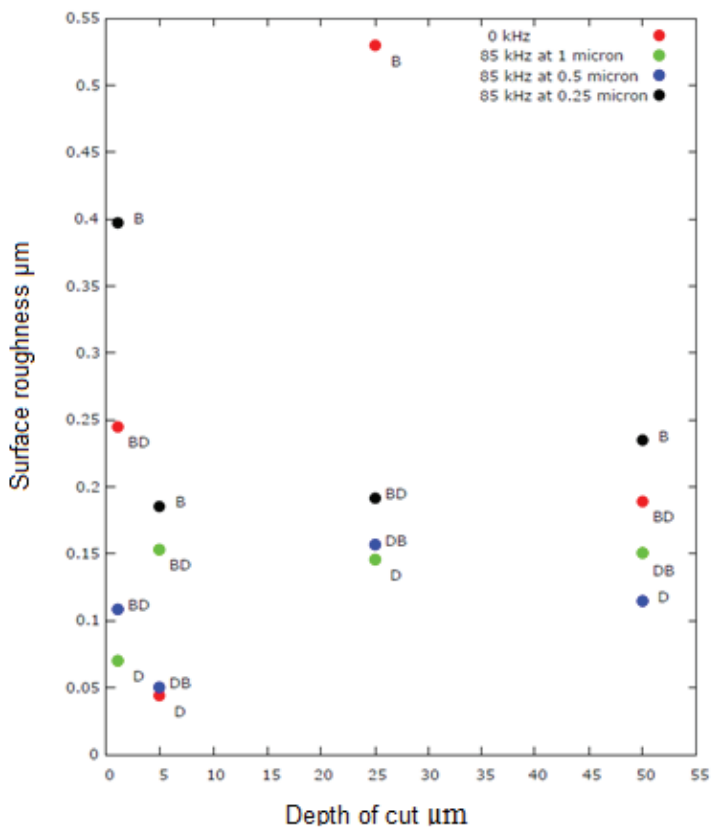
Nušlifuoti paviršiai, naudojant ruošinio sužadinimą, buvo įvertinti naudojant baltos šviesos interferometriją ir skenuojant elektroniniu mikroskopu (sem) (35 pav.).



Pav. 31 Baltos šviesos interferometrija ir sem nuotraukos apdirbant ruošinį 50 mikronų gylyje

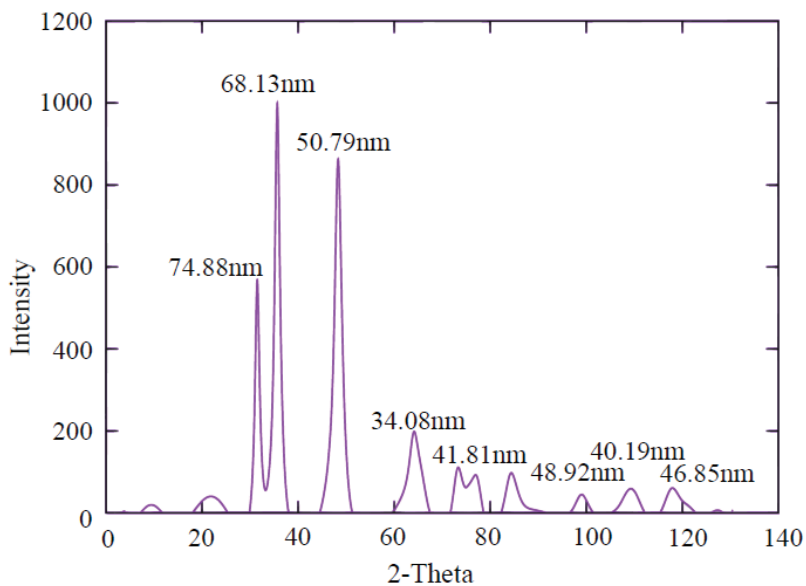
a - 50% sužadinimo amplitudės, b - 100% sužadinimo amplitudės, c - be sužadinimo, d- 25% sužadinimo amplitudės

Remiantis takiųjų ir trapiųjų skanuotų vietų procentiniu pasiskirstymu, gauti mėginio paviršiai buvo pavadinti arba trapiais, labai trapiais, labai takiais ir takiais. Buvo pastebėta, kad visais atvejais, apdirbant skirtingose amplitudėse, buvo pasiekama arba tampri, arba dalinai tampri deformacija (Pav. 32). Atlikus šlifavimo metu surinktų dulkių xrd analizę buvo nustatytas dulkių kristalitų dydis (pav. 33, pav .34).

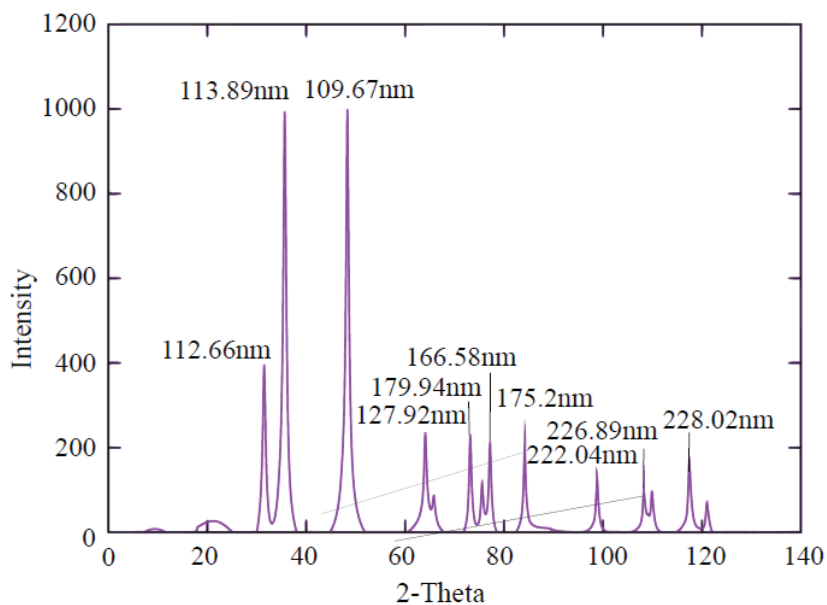


Pav. 32 Paviršiaus šiurkštumo ir deformacijų įvertinimas ultragarsinio sužadinimo metu šlifuojant 1, 5, 25 ir 50 mm gylyje

D - takioji deformacija, db –labai taki deformacija, bd - labai trapi deformacija, B - trapi deformacija



Pav. 33 Kristalitų dydžio įvertinimas xrd įprasto šlifavimo atveju



Pav. 34 Kristalitų dydžio įvertinimas xrd šlifuojuant ultragarsinio sužadinimo atveju

IŠVADOS

1. Atlikta šlifavimo technologijų tyrimų ir patentų apžvalga. Nustatytos kietų, trapių medžiagų mechaninių savybių apibrėžimo ribos ir pasirinktas tiriamas apdirbimo procesas.
2. Sukurtas cilindrinio šlifavimo matematinis modelis, atlikti skaičiavimai ir eksperimentiškai validuotas skaitinio modelio adekvatumas fiziniam panaudojant suprojektuotą ir pagamintą pjezoelektrinį akuatorių, skirtą masyvaus cilindrinio ruošinio sužadinimui. Tyrimų rezultate gauti nušlifuoto plieninio ruošinio paviršiaus šiurkštumo parametrai ra , rq ir rz beveik 9% geresni už tradiciniu būdu be papildomo ultragarsinio sužadinimo šiurkštumo parametrus šlifuojant be aušinimo, o šlifuojant su gausiu aušinimu beveik 3% nei šlifuojant tradiciniu būdu be ultragarsinio sužadinimo. Tyrimų rezultate gauti nušlifuoto veleno paviršiaus šiurkštumo parametrai ra , rq ir rz beveik 19% geresni už tradiciniu būdu be papildomo ultragarsinio sužadinimo šiurkštumo parametrus šlifuojant su aušinimu.
3. Suprojektuotas ir pagamintas galinio kietų ir trapių medžiagų šlifavimo įrankio ultragarsinio sužadinimo akuatorius ir atlikti eksperimentiniai tyrimai, kurių rezultate nušlifuoto paviršiaus šiurkštumo parametrai ra ir rz beveik 30% geresni už tradiciniu būdu be papildomo ultragarsinio sužadinimo pasiekiamus nušlifuoto paviršiaus šiurkštumo parametrus. Tyrimų rezultatai taip pat parodė, kad iki šiol naudojamame ultragarsinio kietų ir trapių medžiagų šlifavimo sužadinant įrankį procese neįmanoma pasiekti medžiagos iš trapios į tamprią virsmo, užtikrinančio šlifuoto paviršiaus kokybę dėl nepasiekiamo aukšto ultragarsinio dažnio, susijusio su šlifavimo įrankio virpesių forma ir akuatoriaus maitinimo elektros srove ypatumų.
4. Tikslu sukurti sąlygas kietos ir trapios medžiagos virsmui į tamprią ultragarsinio šlifavimo metu pasiūlyta ir patentuota ruošinio ultragarsinio sužadinimo įranga, įgalinanti pasiekti reikiamą šiam virsmui dažnį, artimą 100 kHz, su kuria atlikti eksperimentiniai bandymai leido suformuoti aukštos kokybės paviršius, kurių kokybė buvo pagerinta 41%, būtinus precizinių technologijų sukūrimui.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Abdullah, A., Shahini, M. & Pak, A., 2009. An Approach To Design A High Power Piezoelectric. *Journal Of Electroceramics*, 22(4), Pp. 369-382.
2. Agrawal, S., Khare, S. K., Pandey, V. P. & Patel, M., 2017. An Analytical Chip Thickness Model For Performance Assessment In Silicon Carbide Grinding. *45th Sme North American Manufacturing Research Conference*, 10(Doi: 10.1016/J.Promfg.2017.07.060), Pp. 298-306.
3. Alisir, S. & Cevik, S., 2019. The Effects Of Foundry Sand Components On The Cast Iron. *Research On Engineering Structures & Materials*, Issue Doi:[Http://Dx.Doi.Org/10.17515resm2019.148ma0911](http://dx.doi.org/10.17515/resm2019.148ma0911).
4. Alkhalefah, H., 2020. Precise Drilling Of Holes In Alumina Ceramic (Al₂O₃) By Rotary Ultrasonic Drilling And Its Parameter Optimization Using Moga-Ii. *Materials*, 13(1059, Doi:10.3390/Ma13051059), Pp. 1-19.
5. Anderson, D., Warkentin, A. & Bauer, R., 2011. Experimental And Numerical Investigations Of Singleabrasive-Grain Cutting. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 51(12, [Https://Doi.Org/10.1016/J.Ijmachtools.2011.08.006](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.08.006)), Pp. 898-910.
6. Arif, M., Zhang, X., Rahman, M. & Kumar, S., 2012. A Predictive Model Of The Critical Undeformed Chip Thickness For Ductile-Brittle Transition In Nano-Machining Of Brittle Materials. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 64 Tomas, Pp. 114-122.
7. Bifano, T. G., Dow, T. A., Scattergood, R. & O., 1991. Ductile-Regime Grinding: A New Technology For Machining Brittle Materials. *Journal Of Engineering For Industry*, 113(2).
8. Bifano, T. G., Dow, T. A. & Scattergood, R. O., 1991. Ductile-Regime Grinding: A New Technology For Machining Brittle Materials. *J. Eng. Ind.*, 113(2, [Https://Doi.Org/10.1115/1.2899676](https://doi.org/10.1115/1.2899676)), Pp. 184-189.
9. Bridgman, P. W. & Šimon, I., 1953. Effects Of Very High Pressures On Glass. *Journal Of Applied Physics*, 24(4), P. 405.
10. Cao, J. Et Al., 2014. Material Removal Behavior In Ultrasonic-Assisted Scratching Of Sic Ceramics With A Single Diamond Tool. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 79([Https://Doi.Org/10.1016/J.Ijmachtools.2014.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.02.002)), Pp. 49-61.

11. Cerniway, M. A., 2001. Elliptical Diamond Milling: Kinematics, Force And Tool Wear. *Ms Thesis. Nort Carolina State University*.
12. Cheng, J., Wang, C., Wen, X. & Gong, Y., 2014. Modelling And Experimental Study On Micro-Fracture Behavior And Restraining Technology In Microgrinding Of Glass. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 85 Tomas, Pp. 36-48.
13. Cheng, J. Et Al., 2017. Grinding Forces In Micro Slot-Grinding (Msg) Of Single Crystal Sapphire. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 112(<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.10.004>), P. 7–20.
14. Chen, J., Fang, Q. & Li, P., 2015. Effect Of Grinding Wheel Spindle Vibration On Surface Roughness And Subsurface Damage In Brittle Material Grinding. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, Issue <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.01.003>, Pp. 12-23.
15. Chen, S. & Jiang, Z., 2015. A Force Controlled Grinding-Milling Technique For Quartz-Glass Micro-Machining. *Journal Of Materials Processing Technology*, 216(<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.017>), Pp. 206-215.
16. Cheong, W. C. D. & Zhang, L. C., 2000. Molecular Dynamics Simulations Of Phase Transformations In Silicon Monocrystals Due To Nano-Indentation. *Nanotechnology*, 11(3, <https://doi.org/10.1088/0957-4484/11/3/307>), Pp. 173-180.
17. Dakhil, A.-B. H., 2012. Design And Analysis Of Ultrasonic Horns Operating In Longitudinal And Torsional Vibration. *Phd Thesis*, Glasgow University Tomas.
18. Duan, N., Yui, Y., Wang, W. & Xu, X., 2017. Analysis Of Grit Interference Mechanisms For Double Scratching Of Monocrystalline Silicon Carbyde By Coupling The Fem And Sph. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 120(<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.04.012>), Pp. 49-60.
19. Duan, N., Yu, Y., Wang, W. & Xu, X., 2017. Sph And Fe Coupled 3d Simulation Of Monocrystal Sic Scratching By Single Diamond Grit. *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 64(<https://doi.org/10.1016/j.jrmhm.2016.09.016>), P. 279–293.
20. Elhami, S. & Razfar, M. R., 2020. Application Of Nano Electrolyte In The Electrochemical Discharge. *Precision Engineering*, 64(<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2020.03.010>), Pp. 33-44.

21. Gaidys, R. Et Al., 2017. Ultrasonic Tooling System Design And Development For Single Point Diamond Turning (Spdt) Of Ferrous Metals. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technologies*, 93(Doi 10.1007/S00170-017-0657-7), Pp. 2841-2854.
22. Guo, B. & Zhao, Q., 2017. Ultrasonic Vibration Assisted Grinding Of Hard And Brittle Linear Micro-Structured Surfaces. *Precision Engineering*, 48(<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.11.009>), Pp. 98-106.
23. Guojun, D., Lang, C., Li, C. & Zhang, L., 2020. Formation Mechanism And Modelling Of Exit Edge-Chipping During Ultrasonic Vibration Grinding Of Deep-Small Holes Of Microcrystalline-Mica Ceramics. *Ceramics International*, Issue <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.02.008>.
24. He, P. Et Al., 2011. Development Of A Low Cost High Precision Fabrication Process For Glass Hybrid Aspherical Diffractive Lenses. *Journal Of Optics*, 13(8, [Doi:10.1088/2040-8978/13/8/085703](https://doi.org/10.1088/2040-8978/13/8/085703)).
25. Ilio, A. D., Paoletti, A. & D'addona, D., 2009. Characterization And Modelling Of The Grinding Process Of Metal Matrix. *Cirp Annals - Manufacturing Technology*, 58 Tomas, Pp. 291-294.
26. Jiang, J. Et Al., 2016. From The Microscopic Interaction Mechanism To The Grindingtemperaturefield: An Integrated Modelling On The Grinding Process. *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 110(<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.08.004>), Pp. 27-42.
27. Jiang, J. L. Et Al., 2013. 2d/3d Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing And Wear Effects In Grinding Process. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 74(<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2013.07.002>), Pp. 29-40.
28. Kailer, A., Gogotsi, Y. G. & Nickel, K. G., 1997. Phase Transformations Of Silicon Caused By Contact Loading. *Journal Of Applied Physics*, 81(7), Pp. 3057-3063.
29. King, R. & Tabor, D., 1954. The Strength Properties And Frictional Behaviour Of Brittle Solids. *Proceedings Of The Royal Society*, 223(1153), Pp. 225-238.
30. Lai, M., Zhang, X. D. & Fang, F. Z., 2012. Study On Critical Rake Angle In Nanometric Cutting. *Applied Physics A*, 108(4, <https://doi.org/10.1007/S00339-012-6973-8>), Pp. 809-818.
31. Lawn, B. R. & Marshall, D. B., 1979. Hardness, Toughness, And Brittleness: An Indentation Analysis. *Journal Of The American*

- Ceramic Society*, 62(7-8, <https://doi.org/10.1111/J.1151-2916.1979.tb19075.X>), Pp. 347-350.
32. Lawn, B. & Wilshaw, R., 1975. Indentation Fracture: Principles And Applications. *Journal Of Materials Science*, 10(6), Pp. 1049-1081.
 33. Liang, Z., Wu, Y., Wang, X. & Zhao, W., 2010. A New Two-Dimensional Ultrasonic Assisted Grinding (2d-Uag) Method And Its Fundamental Performance In Monocrystal Silicon Machining. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 50(8, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.04.005>), Pp. 728-36.
 34. Li, C. Et Al., 2017. Material Removal Mechanism And Grinding Force Modelling Of Ultrasonic Vibration Assisted Grinding For Sic Ceramics. *Ceramics International*, 43(3), P. 2981–2993.
 35. Li, H. N., Yu, T. B., Li, D. Z. & Wan, S. W., 2017. Analytical Modeling Of Ground Surface Topography In Monocrystalline Silicon Grinding Considering The Ductile-Regime Effect. *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, 17(4, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.03.010>), Pp. 880-893.
 36. Li, H. N. Et Al., 2017. Detailed Modeling Of Cutting Forces In Grinding Process Considering Variable Stages Of Grain-Workpiece Micro Interactions. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 126(<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.11.016>), Pp. 319-339.
 37. Liu, K., Li, X. P. & Liang, S. Y., 2007. The Mechanism Of Ductile Chip Formation In Cutting Of Brittle Materials. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technologies*, 33(9-10), Pp. 875-884.
 38. Liu, Y. Et Al., 2018. Smoothed Particle Hydrodynamics Simulation And Experimental Analysis Of Sic Ceramic Grinding Mechanism. *Ceramics International*, 44(11, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.278>), Pp. 12194-12203.
 39. Li, X. P., He, T. & Rahman, M., 2005. Tool Wear Characteristics And Their Effects On Nanoscale Ductile Mode Cutting Of Silicon Wafer. *Wear*, 259(7-12, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.12.020>), Pp. 1207-1214.
 40. Marshall, D. B. & Lawn, B. R., 1986. Indentation Of Brittle Materials. *Microindentation Microindentation In Materials Science And Engineering*, 889 Tomas.
 41. Mcdonald, A., Mohamed, A. O., Warkentin, A. & Bauer, R. J., 2017. Kinematic Simulation Of The Uncut Chip Thickness And Surface Finishusing A Reduced Set Of 3d Grinding Wheel Measurements. *Precision Engineering*, 49(<http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.02.005>), Pp. 169-178.

42. Mir, A., Luo, X. & Sun, J., 2016. The Investigation Of Influence Of Tool Wear On Ductile To Brittle transition In Single Point Diamond Turning Of Silicon. *Wear*, Issue [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Wear.2016.08.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2016.08.003), Pp. 233-243.
43. Nuruzzaman, M. Et Al., 2015. Structural, Elastic And Electronic Properties Of 2h- And 4h-Sic. *International Journal Of Engineering Research And Applications*, 5(5), Pp. 48-52.
44. Park, H. W. & Liang, S. Y., 2008. Force Modeling Of Micro-Grinding Incorporating Crystallographic Effects. *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 48(10.1016/J.Ijmachtools.2008.07.004), Pp. 1658-1667.
45. Patnaik Durgumahanti, U. S., Singh, V. & Venkateswara, R., 2010. A New Model For Grinding Force Prediction And Analysis. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 50(3, [Https://Doi.Org/10.1016/J.Ijmachtools.2009.12.004](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.12.004)), Pp. 231-240.
46. Redwing, R., 2017. *John A. Dutton E-Education Institute - What Is A Brittle Material?*. [Tinkle] Available At: [Https://Www.E-Education.Psu.Edu/Matse81/Node/2106](https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2106) [Kreiptasi 20 7 2019].
47. Rizzo, A. Et Al., 2020. The Critical Raw Materials In Cutting Tools For Machining Applications: A Review. *Materials*, 13(6, [Https://Doi.Org/10.3390/Ma13061377](https://doi.org/10.3390/Ma13061377)).
48. Scattergood, R. O. & Blake, N., 1990. R.O. Scattergood, N. Blake, Ductile-Regime Machining Of Germanium And Silicon. *Journal Of The American Ceramic Society*, 73(4), Pp. 949-957.
49. Setti, D., Ghosh, S. & Venkateswara Rao, P., 2017. A Method For Prediction Of Active Grits Count In Surface Grinding. *Wear*, Issue [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Wear.2017.04.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2017.04.012), Pp. 71-77.
50. Sun, J., Qin, F., Chen, P. & An, T., 2016. A Predictive Model Of Grinding Force In Silicon Wafer Self-Rotating grinding. *International Journal Of Machine Tools & Manufacture*, 109([Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Ijmachtools.2016.07.009](http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.07.009)), Pp. 74-86.
51. Tian, L. Et Al., 2015. The Influence Of Speed On Material Removal Mechanism In High Speed Grinding With Single Grit. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 89([Https://Doi.Org/10.1016/J.Ijmachtools.2014.11.010](https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.11.010)), P. 192–201.
52. Tsuno, K. Et Al., 2005. *Nt-Sic (New-Technology Silicon Carbide): Application For Space Optics*. San Diego, California, United States, [Https://Doi.Org/10.1117/12.615841](https://doi.org/10.1117/12.615841).

53. Varga, M., Leroch, S., Eder, S. J. & Rodriguez Ripoll, M., 2017. Meshless Microscale Simulation Of Wear Mechanisms In Scratch Testing. *Wear*, Issue [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Wear.2016.11.023](http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Wear.2016.11.023), Pp. 1122-1129.
54. Venkatachalam, S., Li, X. & Liang, S. Y., 2009. Predictive Modeling Of Transition Undeformed Chip Thickness In Ductile-Regime Machining Of Single Crystal Brittle Materials. *Journal Of Materials Processing Technology*, 209(7), Pp. 3306-3319.
55. Wang, W. Et Al., 2017. Elastic Stressfield Model And Micro-Crack Evolution For Isotropic Brittle materials During Single Grit Scratching. *Ceramics International*, 43([Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Ceramint.2017.05.054](http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Ceramint.2017.05.054)), Pp. 10726-10736.
56. Wang, Y., Zhang, X. & Lin, B., 2014. Research On The System Matching Model In Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 70(Doi 10.1007/S00170-013-5269-2), Pp. 449-458.
57. Yan, J., Asami, T., Harada, H. & Kuriyagawa, T., 2009. Fundamental Investigation Of Subsurface Damage In Single Crystalline Silicon Cause By Diamond Machining. *Precision Engineering*, 33(4, [Https://Doi.Org/10.1016/J.Precisioneng.2008.10.008](https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.10.008)), Pp. 378-386.
58. Yin, L. Et Al., 2005. Planar Nanogrinding Of A Fine Grained Wc-Co Composite For An Optical Surface Finish. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technologies*, 26(7-8, Doi 10.1007/S00170-004-2056-0), Pp. 766-773.
59. Yu, G. Et Al., 2019. Machining Performance Of Hard-Brittle Materials By Multi-Layer Micro-Nano Crystalline Diamond Coated Tools. *Results In Physics*, 13([Https://Doi.Org/10.1016/J.Rinp.2019.102303](https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102303)).
60. Zhang, J., Suzuki, N., Wang, Y. & Shamoto, E., 2014. Fundamental Investigation Of Ultra-Precision Ductile Machining Of Tungsten Carbide By Applying Elliptical Vibration Cutting With Single Crystal Diamond. *Journal Of Materials Processing Technology*, 214(11), Pp. 2644-2659.
61. Zhang, L.-C. & Tanaka, H., 1999. On The Mechanics And Physics In The Nano-Indentation Process. *Jsm International Journal*, 42(4), Pp. 546-559.
62. Zhang, L. & Zarudi, I., 2001. Towards Deeper Understanding Of Plastic Deformation In Mono-Crystaline Silicon. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 43(9, [Https://Doi.Org/10.1016/S0020-7403\(01\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0020-7403(01)00024-8)), Pp. 1985-1996.

63. Zhang, P. Et Al., 2013. Influence Of Double-Tip Scratch And Single-Tip Scratch On Nano-Scratching Process Via Molecular Dynamics Simulation. *In Applied Surface Science*, 280(<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.05.056>), P. 751–756.
64. Zhang, Y. Et Al., 2017. Analysis Of Grinding Mechanics And Improved Predictive Force Model Based On Material-Removal And Plastic-Stacking Mechanisms. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 122(<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2017.06.002>), Pp. 81-97.
65. Zhang, Y. N. Et Al., 2015. An Experimental Study On Mechanical Modeling Of Ceramics Based On Microstructure. *Applied Sciences*, 5(4, [Doi:10.3390/app5041337](https://doi.org/10.3390/app5041337)), P. 1337–1349.
66. Zhong, Z. W. & Peng, Z. F., 2007. Fractal Roughness Structures Of Precision-Machined Wc-Co And Inconel 625-Coated Steel Rods. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technologies*, 33(9-10, [Doi: 10.1007/S00170-006-0532-4](https://doi.org/10.1007/S00170-006-0532-4)), Pp. 885-890.
67. Zhong, Z. W. & Rui, Z. Y., 2005. Grinding Of Single-Crystal Silicon Using Microvibration Device. *Materials And Manufacturing Processes*, 20(4, [Doi: 10.1081/Amp-200055068](https://doi.org/10.1081/Amp-200055068)), Pp. 687-696.
68. Zhu, D., Yan, S. & Li, B., 2014. Single-Grit Modeling And Simulation Of Crack Initiation And Propagationin Sic Grinding Using Maximum Undeformed Chip Thickness. *Computational Materials Science*, 92(<http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2014.05.019>), Pp. 13-21.

AUTORIAUS PUBLIKACIJŲ SĄRAŠAS

Rezultatai paskelbti žurnaluose, indeksuojamuose web of science duomenų bazėse:

1. Vytautas Ostasevičius, Vytautas Jūrėnas, Gytautas Balevičius, Ramūnas Česnavičius Development Of Actuators For Ultrasonically Assisted Grinding Of Hard-Brittle Materials, The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology Vol. 106 Pages: 289-301 2020
2. Ostasevicius, V.; Jurenas, V.; Balevicius G; Zukauskas, M.; Ubartas, M. Vibrational Excitation Of A Work Piece For Drilling Force Reduction In Brittle Materials, Mechanika Issue: 6 Pages: 596-601 2014
3. Ostasevicius, V.; Karpavicius, P.; Janusas, G.; Balevicius G. Design And Implementation Of Uniform Light Guide Based, Force And Deflection Measurement Device, Mechanika Issue: 4 Pages: 279-284 2016
4. Ostasevicius, V.; Balevicius G; Zakrasas, R.; Baskutiene, J.; Jurenas, V. Investigation Of Vibration Assisted Drilling Prospects For Improving Machining Characteristics Of Hard To Machine Materials At High And Low Frequency Ranges, Mechanika Issue: 2 Pages: 125-131 2016

Rezultatai paskelbti konferencijų darbuose:

1. Ostasevicius, V.; Balevicius G; Zakrasas, R. Development Guidelines For Models Of Grinding Forces In Ultrasonically Assisted Grinding Of Binderless Tungsten Carbide, Mechanika 2016: Proceedings Of The 21st International Scientific Conference, Book Series: Mechanika Kaunas University Of Technology Pages: 193-198 2016

Rezultatai paskelbti kituose recenzuojamuose leidiniuose:

1. Ostasevicius, Vytautas; Jurenas, Vytautas; Vilkauskas, Andrius; Balevicius, Gytautas; Senkus, Andrius; Jotautiene, Egle. A

Rezultatai paskelbti tarptautinėse konferencijose:

1. V. Ostaševičius, G. Balevičius, „Overview Of Modeling Methods For Brittle Ductile Transition During Drilling Under Inverse Excitation”, 11'th Conference Mechatronic Systems And Materials, Kaunas, Lithuania 2015.
2. G. Balevičius V. Ostaševičius, V. Jūrėnas, M. Žukauskas, M. Ubartas „Investigation Prospects Of Brittle – Ductile Transition In Drilling Under Inverse Vibrational Excitation”, Mechanika 20, Kaunas, Lithuania 2015.
3. V. Ostaševičius, G. Balevičius, R. Zakrasas, „Development Guidelines For Models Of Grinding Forces In Ultrasonically Assisted Grinding Of Binderless Tungsten Carbide”, Mechanika 21, Kaunas, Lithuania 2016.
4. G. Balevičius, V. Ostaševičius, V. Jurėnas, R. Česnavičius, „Machining Of Hard-Brittle Materials: Ultrasonic Assistance And Its Role In Brittle-Ductile Transition”, Mechanika 24, Kaunas, Lithuania 2019.
5. V. Ostaševičius, G. Balevičius, „Peculiarities Of Vibration Assisted Surface Finishing Methods For Brittle Material Surfaces”, 2nd International Conference And Expo On Ceramics And Composite Materials, Berlin, Germany 2016.

Rezultatai paskelbti vietinėse konferencijose:

1. G. Balevičius, „Molekulinės Dinamikos Panaudojimas Kietų-Trapų Medžiagų Apdirbimo Modeliavimui“, Lithuanian Science Academy's 7'th Young Scientist Conference, Vilnius, Lithuania 2017

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Gytautas Balevičius gimė 1989 m. birželio 22 d. Kaune.

2008 - baigė Kauno „Varpo“ gimnaziją.

2008 - 2012 Kauno Technologijos Universiteto tarptautinių studijų centre, baigė eksporto inžinerijos studijų programą ir įgijo mechanikos inžinerijos mokslo bakalauro laipsnį.

2012 - 2014 Kauno Technologijos Universiteto mechanikos fakultete su pagyrimu baigė pramonės inžinerijos ir vadybos studijų programą ir įgijo mechanikos inžinerijos mokslo magistro laipsnį.

2014 - 2019 Kauno Technologijos Universitete studijavo mechanikos inžinerijos krypties doktorantūroje.

REZIUME ANGLU KALBA

Research and application of ultrasonic vibration grinding in ductile mode of hard – brittle materials

Abstract of doctoral dissertation

Topic importance

Machining industry is the corner stone of any well-functioning economy. Adoption of either already available or newly discovered materials has for a long time been a driving force of progress and innovation in the machining industry. One group of materials possessing high industry transformation potential, could be the group referred to in academic literature as hard, brittle materials. This group is finding increasingly crucial applications in fields of optics, medicine, aerospace etc. Commonly exhibited desirable characteristics of these materials are thermal stability, rigidity, low wear chemical inertness etc. However, the hardness and brittleness of these materials tend to negatively impact the machineability of these materials. The brittleness, quantified by a low fracture toughness results in brittle deformation, when the workpiece is exposed to an excessively high of a machining scale. This negatively influences the machining quality, by introducing cracks, and subsurface damage into the final product. In order to machine a HBM in ductile mode, using conventional methods, it is necessary to limit the material removal rate. However, such approach, is costly, with regards to both – time and machining resources (tools, energy etc.). Vibration assisted machining (vam) and namely vibration assisted grinding (vag), were found to be the most readily applicable and flexible approaches to improving machinability of HBM. However, the current research on vam applications tends to focus on auxiliary effects of vam in HBM grinding (improved cooling, extended tool lifetime etc.) Instead of improving ductile mode grinding parameters (critical depth, material removal rate etc.).

Research aim and tasks

The **aim** of this research is to analyze and develop ultrasonic vibration assisted grinding methods and devices for machining HBM. To achieve this, the following **objectives** were formulated:

1. Conduct literature analysis on the subject of hard, brittle material grinding and specify research goals;
2. Design and test a cylindrical grinding technology enabling high frequency excitation of massive rotating workpiece.

3. Design and produce an actuator for ultrasonic excitation of rotary tool in back grinding of hard, brittle materials.
4. To establish conditions for, brittle-ductile transition in machining, propose, produce and patent a device for ultrasonic excitation of a workpiece and conduct related experiments.
- 5.

Scientific novelty

4. Vibratory excitation equipment was developed using finite element analysis.
5. A novel method for vibratory excitation of static workpiece, that employs higher vibratory excitation modes to achieve higher excitation frequencies of the workpiece, was proposed.
6. Through the use of surface characterization methods, brittle and ductile deformation site distribution on sample surfaces was determined.

Practical value

4. A novel method for vibratory excitation of a rotating workpiece in cylindrical grinding was developed.
5. A novel method for vibratory excitation of a static workpiece in back grinding was developed and patented.
6. Dependence of surface roughness on excitation amplitude and tool engagement depth interaction will be useful in further studies on vibration assisted back grinding technology improvement.

Items presented for defense

1. Development and design of rotary back grinding tool, rotary cylindrical grinding workpiece, stationary back grinding workpiece actuators.
2. Computational model analysis of developed actuator performance.
3. Results of experimental investigation of designed actuator performance in grinding.

Publications and approbation of research results

The results of this dissertation were published in 6 scientific publications: 5 – in publications with impact factor indexed in web of science database, 1 – in conference proceedings.

The research results were also presented at 5 international scientific conferences: mechatronic systems and materials 2015 (Kaunas, Lithuania), mechanika 20 (Kaunas, Lithuania), mechanika 21 (Kaunas, Lithuania), mechanika 24 (Kaunas, Lithuania).

Scientific novelty of the developed static workpiece actuator is confirmed by a patent.

Throughout this research work, substantial new insight into the topic of hard, brittle material machining was gained. Two new vibration assisted grinding approaches were created and tested. The main conclusions could be summarized as follows:

1. Upon literature analysis of HBM, it was established that a material could be considered to be HBM if its fracture toughness is below 6.5 and its hardness on the moh's scale exceeds 6.9. Among these materials, sic and wc are the most prominent ones, with wc being chosen as the material of interest for the back grinding investigations in this research.
2. Two novel vibration assisted grinding approaches were proposed to combat the intrinsic limitations of the conventionally encountered rotary grinding tool excitation approach. The first attempt was to apply excitation externally to the rotating interface, without introducing the actuator into the rotating interface itself. The second approach removed the rotating interface altogether by applying excitation to the stationary workpiece instead.
3. In all the experimental runs, the ultrasonically assisted process configuration performances exceeded those of their conventional counterparts. The best performance of all the approaches was determined to be the stationary workpiece approach (41% improvement to r_a at 50 μm depth). This approach was therefore patented.
4. Despite the promising results, the performance of the presently available technology lacks consistency in terms of the attained surface quality under varying cutting depths, primarily, due to a yet unknown relation between the tool engagement depth and the excitation amplitude. It is possible that the grains could overpenetrate the surface at too high an amplitude, or, in the absence of a sufficient contact, impact the surface.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Gytautas Balevičius was born on 22nd of June in 1989 in Kaunas, Lithuania.
2008: Graduated from „Varpo“ gimnasium in Kaunas.

2008 – 2012: Studied export engineering program at International Studies Centre, Kaunas University of Technology. Acquired degree of bachelor of science in mechanical engineering.

2012-2014: Studied industrial engineering and management program at faculty of Mechanical Engineering, Kaunas University of Technology. Graduated with awards and acquired degree of master of science in mechanical engineering.

2014 – 2019: Doctoral studies at Kaunas University of Technology in the field of mechanical engineering.

UDK 534-8+621.923](043.3)

SI344. 2020-07-21, 3,5 leidyb. Apsk. L. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, k. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „technologija“ spaustuvė, studentų g. 54, 51424 Kaunas

