

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ALEKSANDRO STULGINSKIO UNIVERSITETAS

ROKAS ŠAKALYS

**AUKŠTADAŽNIŲ VIRPESIŲ ĮTAKOS MIKROSTRUKTŪRŲ,
ANTRINAMŲ TERMINIO SPAUDIMO METODAIS, KOKYBEI
TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka
Technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija (09T)

2017, Kaunas

Disertacija rengta 2012–2017 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Mokslinis vadovas:

Prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija – 09T).

Redagavo:

Inga Nanartonytė (leidykla „Technologija“)

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Prof. habil. dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T) – **pirmininkas**;

Dr. Rolanas DAUKŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Prof. dr. Vytenis JANKAUSKAS (Aleksandro Stulginskio universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – 09T);

Prof. dr. Sergej KRUCHININ (Ukrainos nacionalinės mokslo akademijos Bogoliubov teorinės fizikos institutas, fiziniai mokslai, fizika – 02P).

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2017 m. gegužės 5 d. 10 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 2017 m. balandžio 5 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu> ir Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, 44239 Kaunas) ir Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, 53361 Akademija, Kauno r.) bibliotekose.

ĮVADAS

Problematika

Šiuolaikinės visuomenės gyvenimas yra neįsivaizduojamas be mikroelektromechaninių (MEMS) ir mikrooptoelektromechaninių (MOEMS) sistemų, kurios naudojamos informacijos apdorojimo, medicinos, lazerinių technologijų, elektronikos, matavimų, optikos ir kitose srityse. Plėtojant technologijas ir augant poreikiams, didėja šių sistemų svarba, taigi reikia tobulinti jų gamybos technologijas siekiant didesnio mikrostruktūrų gamybos našumo ir kokybės. Jautrumas, patikimumas ir didelė raiška yra laikomi svarbiausiais mikrosistemų kokybės reikalavimais.

Įprastinės mikrostruktūrų gamybos technologijos, pvz., ėsdinimas, fotolitografija ir galvanizavimas, tampa nebeefektyvios dėl ilgos gamybos trukmės ir didelių išlaidų. Kaip alternatyva siūloma našesnė gamybos metodika – mikrostruktūrų antrinimas taikant terminį spaudimą. Kita vertus, ši technologija turi trūkumų, pvz., ją taikant nevysiškai atkartojama mikrostruktūra arba atsiranda įtrūkių. Šie trūkumai neleidžia išnaudoti viso šios technologijos potencialo. Ankstesniais tyrimais buvo nustatyta, kad terminio spaudimo proceso metu panaudojant aukštadažnius virpesius galima pagerinti mikrostruktūrų atkartojamumą skatinant pakaitinto polimero tekėjimą link etaloninės mikrostruktūros (Narijauskaitė, Palevicius *et al.*, 2013). Kita vertus, nėra nustatyta, kokią įtaką proceso parametrai turi mikrostruktūrų kokybei, be to, nėra sukurta technologija, kuri leistų užtikrinti, kad visa mikrostruktūra bus atkartota tolygiai. Įvertinus mikrosistemų poreikį, svarbą ir ankstesnių tyrimų rezultatus, yra aktualu atlikti tolesnius tyrimus terminio spaudimo proceso panaudojant aukštadažnius virpesius tobulinimo srityje, nes tai sudaro prielaidas našiai gaminti itin kokybiškas mikrostruktūras.

Darbo tikslas – ištirti aukštadažnių virpesių įtaką mikrostruktūrų, antrinamų taikant terminio spaudimo technologijas, kokybei.

Tiksliui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:

1. Pasirinkti metodus, įrangą ir medžiagas, tinkamas kurti, gaminti ir antrinti mikrostruktūroms taikant aukštadažniu žadinimu paremtas terminio spaudimo technologijas.

2. Sukurti etaloningą mikrostruktūrą mikrostruktūroms įspausti polimere pasitelkiant aukštadažniu žadinimu paremtas terminio spaudimo technologijas.

3. Sukurti mikrostruktūrų antrinimo technologiją, užtikrinančią gerą atkartojamumą ir tolygų aukštadažnių virpesių poveikį visame antrinamos mikrostruktūros plote.

4. Apibūdinti mikrostruktūras, pagamintas taikant aukštadažniais virpesiais paremtas antrinimo technologijas.

Tyrimo metodai

Kompiuteriu generuota holograma buvo sukurta naudojantis *Matlab* programų paketu, o hologramai realizuoti panaudota *Raith e-LiNEplus* elektronų pluošto litografinė sistema.

Sukurtų vibropadų, kurie atlieka virpesių šaltinių funkciją, dinaminėms savybėms tirti buvo naudojama holografinės interferometrijos principu veikianti sistema PRISM ir lazerinis doplerinis vibrometras *Polytec*. Vibropadų modeliavimas baigtinių elementų metodu atliktas naudojant *Comsol Multiphysics* programų paketą.

Mikrostruktūroms antrinti buvo naudojama Medžiagų mokslo institute sukurta terminio spaudimo įranga ir ultragarsinio karštojo spaudimo įrenginys HiQ DIALOG 1200, pagamintas *Herrmann Ultrasonics* įmonėje.

Periodinėms mikrostruktūroms modeliuoti buvo pasitelktas *GSolver* programų paketas, o pagamintų struktūrų kokybei tirti buvo naudojami atominės jėgos mikroskopas NANOTOP-206 ir lazerinis difraktometras.

Ginamieji teiginiai

1. Sudėtingo reljefo etaloninė mikrostruktūra, sukurta taikant skaitmeninės holografijos technologiją, efektyviai naudojama mikrostruktūrų antrinimo procese.

2. Sukurta mikrostruktūrų antrinimo technologija pagerina mikrostruktūrų atkartojamumą esant temperatūrai, žemesnei nei polimero stiklėjimo proceso temperatūra.

3. Sukurta mikrostruktūrų antrinimo technologija pagerina mikrostruktūrų atkartojamumą, nepriklausomai nuo terminio spaudimo slėgio pokyčių.

4. Ultragarsinio karštojo spaudimo metu panaudojant struktūruotas plėveles galima minimizuoti proceso trukmės ir išspaudimo jėgos parametrus, taip pat pagerinti antrinamų mikrostruktūrų kokybę.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta skaitmeninės holografijos technologija, leidžianti kurti etalonines mikrostruktūras virtualiojoje erdvėje.

2. Sukurta skaitmeninių hologramų pagrindu veikianti technologija, leidžianti elektronų pluošto litografijos būdu gaminti etalonines mikrostruktūras.

3. Sukurti ir matematiškai modeliuojant ištirti vibropadai, leidžiantys terminio spaudimo metu generuoti tolygias amplitudes visame darbiniam paviršiuje.

4. Nustatyti terminio spaudimo proceso technologiniai parametrai, užtikrinantys kokybišką mikrostruktūrų antrinimo procesą visame antrinamame plote.

5. Nustatyta struktūruotų plėvelių naudojimo įtaka ultragarsinio karštojo spaudimo proceso trukmės ir išspaudimo jėgos parametrams, taip pat antrinamų mikrostruktūrų kokybei.

Praktinė darbo vertė

Šiame darbe terminis spaudimas mikrostruktūroms antrinti buvo patobulintas tinkamai pritaikius aukštadažnį žadinimą, dėl to pavyko sumažinti gamybos išlaidas – šis procesas nereikalauja didelių sąnaudų, palyginti su kitomis antrinimo technologijomis. Kita vertus, iki šiol iškildavusios problemos neleido išnaudoti viso mikrostruktūrų antrinimo metodo potencialo.

Rengiant disertaciją daugiausia dėmesio buvo skiriama antrinamų mikrostruktūrų kokybės gerinimui tinkamai pritaikant aukštadažnį žadinimą. Šiuo tikslu buvo sukurti ir pagaminti du vibropadai, generuojantys tolygias amplitudes visame darbiniam paviršiuje. Pagamintų įrenginių darbiniai dažniai nustatyti modeliuojant baigtinių elementų metodu, ir gauti rezultatai verifikuoti eksperimentiškai.

Atlikus terminio spaudimo naudojant aukštadažnius virpesius eksperimentus, buvo pagamintos mikrostruktūros, kurių kokybė yra artima teoriškai idealiai. Tai atveria naujų galimybių didžiausiu tikslumu antrinti mikrostruktūras taikant nebrangią ir prieinamą antrinimo metodiką.

Rengiant disertaciją, taip pat buvo pritaikyta ultragarsinio karštojo spaudimo technologija mikrostruktūroms antrinti. Per struktūruotus sluoksnius buvo papildomai generuojama šiluma ir nustatyta, kaip tai veikia proceso parametrus ir mikrostruktūrų kokybę.

Disertacijos apimtis ir struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai su išvadomis, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, susidedantis iš 129 šaltinių, ir autoriaus publikacijų sąrašas. Darbą sudaro 96 puslapiai. Jame pateikti 78 paveikslėliai ir 20 lentelių.

Disertacijos aprobavimas

Tyrimai buvo atlikti Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo institute, Mechatronikos institute, Mechanikos inžinerijos katedroje, taip pat Acheno technikos universiteto *KEmikro* institute (Achene, Vokietijoje). Rezultatai gauti atliekant LMT mokslo grupių projektą „Mikromechaninių periodinių sistemų žmogaus sveikatinimo diagnostikai kūrimas ir tyrimas, projekto numeris: MIP-026/2014“. Projekto laikotarpis 2014–2016 m.

Disertacijoje nagrinėjama tematika yra pristatyta keturiuose mokslinėse konferencijose. Paskelbta šešiolika mokslinių straipsnių, iš jų: septyni straipsniai ISI duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, trys straipsniai ISI duomenų bazės leidiniuose, neturinčiuose citavimo indekso, šeši straipsniai kituose moksliniuose leidiniuose.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

Mikrostruktūrų antrinimo technologinis procesas prasideda nuo etaloninės mikrostruktūros dizaino sukūrimo. Tolesni žingsniai – etaloninės mikrostruktūros pagaminimas ir kokybiškas antrinimas. Kad viskas būtų įvykdyta sklandžiai ir maksimaliai kokybiškai, reikia kiekvienam žingsniui parinkti tinkamiausias technologijas. Kompiuteriu generuojama holografija literatūroje yra įvardijama kaip tinkamiausia priemonė sudėtingo reljefo mikrostruktūroms projektuoti dėl galimybės matematiškai, t. y. neturint esamo fizinio objekto, suprojektuoti norimą vaizdą (Giuseppe, Cirino, 2011; Jahns, 1999). Suprojektuotai etaloninei mikrostruktūrai pagaminti skirtingi autoriai siūlo reaktyvųjį joninį ęsdinimą (Lagoski, Coutu *et al.*, 2009) ir elektronų pluošto litografiją. Reaktyviojo joninio ęsdinimo metu reaktyvioji plazma pašalina ęsdinamo paviršiaus sluoksnį, taip sukurdamą norimą mikrostruktūrą. Elektronų pluošto litografija naudoja elektronų pluoštą mikrorezisto, kuris dengia pagrindą, tirpumui pakeisti. Kitas etapas yra mikrorezisto ištirpinimas ir mikrostruktūros metalizavimas tam, kad ją būtų galima naudoti terminiuose spaudimo procesuose.

Elektronų pluošto litografija pasirinkta dėl šių privalumų: didelio tikslumo ir galimybės pagreitinti procesą naudojant keletą lygiagrečių elektronų pluoštų vienu metu (Mohammad, Muhammad *et al.*, 2012).

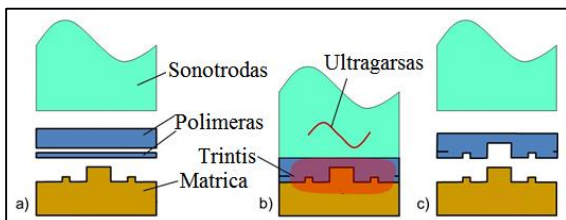
Mikrostruktūroms antrinti plačiausiai taikomos ultragarsinio karštojo spaudimo, terminio spaudimo ir mikroliejimo technologijos (Velten, Schuck *et al.*, 2009). Ultragarsinio karštojo spaudimo (1.1 pav.) metu polimeras sonotrodo yra prispaudžiamas prie matricos ir sonotrode įjungus aukštadažnį žadinimą (dažniausiai nuo 10 kHz iki 75 kHz, priklausomai nuo įrangos) dėl pakartotinių aukštojo dažnio deformacijų pakyla polimero temperatūra – jis pradeda lydėtis. Kadangi tuo pačiu metu polimerą veikia slėgis, tai polimere yra atkartojamas matricos reljefas (Khuntontong, Blaser *et al.*, 2008; Liao, Gerhardy *et al.*, 2014). Procesas susideda iš šių etapų:

1. Sonotrodas juda link polimero, esančio ant matricos.
2. Sonotrodas paliečia polimero paviršių ir ima jį spausti link matricos; spaudimo jėga auga, kol pasiekia nustatytą ribinę jėgą.
3. Pasiekus ribinę spaudimo jėgą sonotrode įjungiamas aukštadažnis žadinimas.
4. Išjungiamas aukštadažnis žadinimas, polimeras kietėja.
5. Sonotrodas atkeliamas, ir išimama pagaminta mikrostruktūra (Tollkötter, Sackmann *et al.*, 2015).

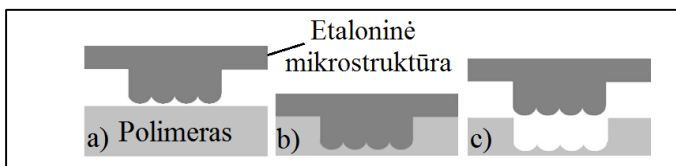
Terminio spaudimo proceso (1.2 pav.) metu naudojama įkaitinta etaloninė mikrostruktūra norimam reljefui polimere įspausti. Procesą tradiciškai yra priimta dalyti į šiuos etapus:

1. Pakaitinimas. Etaloninė mikrostruktūra yra pakaitinama iki polimero stiklėjimo (T_g) arba aukštesnės ($T > T_g$) temperatūros.

2. Etaloniinės mikrostruktūros įspaudimas į polimerą.
3. Etaloniinės mikrostruktūros atkėlimas (Park, Kim *et al.*, 2008).



1.1 pav. Ultragarsinis karštasis spaudimas: sonotrodas juda link polimero (a), įjungiamas ultragarsinis žadinimas (b), ir sonotrodas atitraukiamas (c)



1.2 pav. Terminis spaudimas: etaloniinės mikrostruktūros ir polimero pakaitinimas (a), spaudimas (b) ir etaloniinės mikrostruktūros atkėlimas (c) (Park, Kim *et al.*, 2008)

Liejimo proceso metu polimeras yra išlydomas ir išvirkščiamas į formą, tuomet vyksta aušinimo procesas, ir gauta detalė išimama iš formos (Julien, Thierry *et al.* 2007).

Mikrostruktūroms antrinti dėl tikslumo, įrangos paprastumo ir mažų gamybos sąnaudų buvo pasirinktos ultragarsinio karštojo spaudimo ir terminio spaudimo technologijos (Khuntontong, 2008; Kolew, Münch *et al.*, 2010; Sackmann, Burlage *et al.*, 2015). Vis dėlto šios technologijos turi trūkumų, kuriuos darbo metu reikia pašalinti siekiant, kad būtų išgaunamos kokybiškos mikrostruktūros. Ultragarsinis karštasis spaudimas praktikoje nėra taikytas antrinti mikrostruktūroms, kurių elementai mažesni nei 10 μm . Literatūroje minimi šie terminio spaudimo trūkumai:

1. Dėl nevienodo polimero ir etaloniinės mikrostruktūros šiluminio plėtimosi kaitinant ir aušinant, taip pat dėl trinties tarp etaloniinės mikrostruktūros ir polimero etaloniinės mikrostruktūros atitraukimo etape polimere atsiranda įtrūkių (Liu, Li *et al.*, 2010; Worgull, Hecke *et al.*, 2005).

2. Nevisiškai tiksliai atkartojama etaloniinė mikrostruktūra (Liu, Dung, 2005).

Skirtingi autoriai pateikia įvairių minėtų problemų sprendimo būdų. Tarp populiariausių yra vakuuminis terminis spaudimas, kurį taikant galima sumažinti dujų intarpų tikimybę (Kolew, Heilig *et al.*, 2011), ir aukštadažnių virpesių

taikymas. Aukštadažniai virpesiai sumažina paviršinius įtempius spaudimo bei atitraukimo metu ir taip padeda išvengti polimero įtrūkimų, taip pat skatina polimero tekėjimą link etaloninės mikrostruktūros, taip gerindami atkartojamumą (Li, Shen *et al.*, 2006; Mena, Manero *et al.*, 1979). Dėl lankstesnio taikymo aukštadažnis žadinimas pasirinktas kaip pagalbinė priemonė antrinamų mikrostruktūrų kokybei gerinti. Kita vertus, literatūroje pateikiama mažai informacijos apie tai, kokią įtaką proceso parametrai ir kitos ypatybės daro mikrostruktūros kokybei, taigi svarbu atlikti nuodugnų tyrimą.

Kaip pirminis pagamintų periodinių mikrostruktūrų (difrakcinių optinių elementų) kokybės vertinimo kriterijus yra pasirinktas santykinis difrakcinis efektyvumas +1 ir -1 maksimumuose. Šis metodas leidžia įvertinti difrakcinio optinio elemento geometriją neatsižvelgiant į tai, iš kokios medžiagos jis pagamintas. Laikoma, kad kuo šių maksimumų vertės yra arčiau teoriškai idealaus difrakcinio optinio elemento verčių, tuo mikrostruktūra yra kokybiškiau atkartota (Popov, Hirai, Yoshida *et al.*, 2003).

Analizuojant literatūrą nustatyta, kad terminio spaudimo technologija yra naši ir tinkama metodika mikrostruktūroms antrinti. Kita vertus, yra nustatyta, kad mikrostruktūros, pagamintos taikant minėtą technologiją, turi kokybinių trūkumų. Yra iširta, kad aukštadažnio žadinimo, kaip pagalbinės priemonės, taikymas proceso metu leidžia pagerinti mikrostruktūros atkartojamumą ir sumažinti defektų tikimybę. Tačiau nėra nustatytos kokybės ir proceso parametrų priklausomybės, taip pat nėra sukurtos technologijos, užtikrinančios tolygų aukštadažnių virpesių poveikį visame antrinamos mikrostruktūros plote. Siekiant, kad mikrostruktūros proceso metu būtų atkartotos labai tiksliai, būtina spręsti minėtus uždavinius.

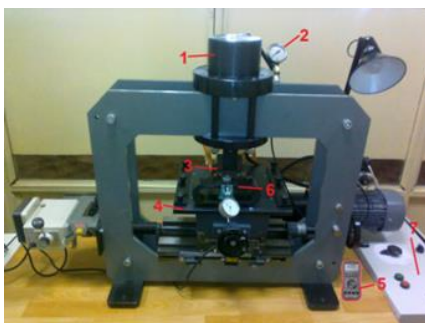
2. MEDŽIAGOS IR ĮRANGA

Etaloninei mikrostruktūrai gaminti pasirinkta *Raith e-LiNEplus* elektronų pluošto litografijos sistema. Naudojantis šiuo įrenginiu galima pagaminti 100×100 mm dydžio mikrostruktūras. Lazeris gali judėti 2 nm tikslumu, taip suteikdamas mikrostruktūroms didelę raišką. Gaminama mikrostruktūra įprastai būna 100 μm² ploto, o vienas pikselis yra 2 nm² dydžio. Elektronų pluoštas yra naudojamas atskirai kiekvienam pikseliui užrašyti. Gaminant didesnių matmenų mikrostruktūras, visas mikrostruktūros plotas gali būti išdalijamas į mažesnius laukelius, kurie vėliau bus sujungiami į vieną norimą vaizdą.

Mikrostruktūroms antrinti terminio spaudimo procese buvo naudotas Medžiagų mokslo instituto mokslininkų pagamintas hidraulinis terminio spaudimo įrenginys (2.1 pav.). Naudojantis šiuo įrenginiu galima keisti temperatūrą nuo 20 iki 200 °C, slėgį – nuo 0 iki 10⁶ N/m² ir galima gaminti mikrostruktūras iki 20×20 mm matmenų.

Ultragarsinio karštojo spaudimo eksperimentams buvo pasirinktas HiQ DIALOG 1200 įrenginys (2.2 pav.), pagamintas *Herrmann Ultrasonics* įmonėje.

Šio įrenginio darbinis dažnis yra 35 kHz. Svarbiausias prietaiso elementas yra sonotrodas, kuris išspaudžia polimerą ir veikiamas pjezopavaros vibruoja.



2.1 pav. Terminio spaudimo įrenginys: hidraulinis cilindras (1), slėgio matuoklis (2), etaloninė mikrostruktūra (3), pagrindas (4), termometras (5), dinamometras (6), temperatūros, laiko ir slėgio reguliatorius (7)



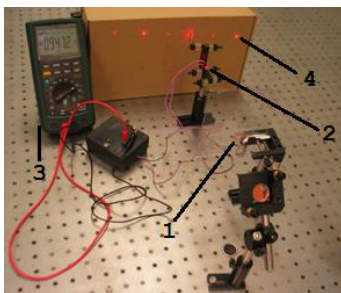
2.2 pav. HiQ DIALOG 1200 ultragarsinio karštojo spaudimo įrenginys: monitorius (1), sonotrodas (2), matrica su polimeru (3) ir kaitinimo įrenginys (4)

Optinei mikrostruktūrų kokybei tirti buvo panaudotas savadarbis difraktometras (2.3 pav.), kurio pagrindas yra 632,8 nm bangos ilgio (raudonos spalvos) lazeris. Lazerio šviesa, perėjusi per bandinį, difraguoja, tuomet difragavę maksimumai yra registruojami fotodiodo, kuris yra sujungtas su ampermetru. Fotodiodu tekėjusios srovės stipris yra tiesiogiai priklausomas nuo šviesos intensyvumo. Srovės stipris yra registruojamas ampermetru. Santykinis difraccinis efektyvumas apskaičiuojamas naudojantis 2.1 ir 2.2 formulėmis:

$$RE_{i,j} = \frac{I_{i,j}}{I_j} , \quad (2.1)$$

$$I_j = \sum_i I_{i,j} ; \quad (2.2)$$

čia $RE_{i,j}$ – santykinis difraccinis efektyvumas; $I_{i,j}$ – šviesos intensyvumas pasirinktame maksimume; I_j – visų šviesos intensyvumo verčių suma.



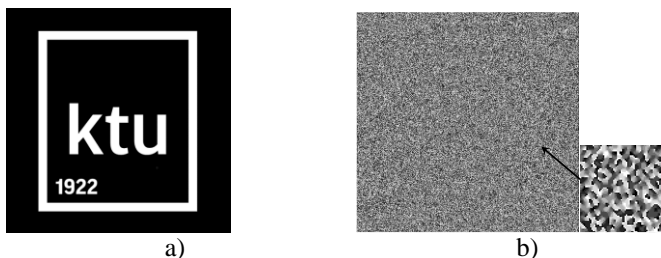
2.3 pav. Difrakcinio efektyvumo matavimo stendas: bandinys (1), fotodiodas (2), ampermetras (3) ir difrakcijos maksimumų pasiskirstymas (4)

Mikrostruktūroms antrinti buvo pasirinktas polikarbonatas. Šis amorfinis termoplastikas tinkamas naudoti terminio ir ultragarsinio karštojo spaudimo procesuose. Amorfiniai termoplastikai yra labiau nuspėjami dėl savo tiesinių slėgio, specifinio tūrio ir temperatūros savybių. Visa tai leidžia išvengti kristalizacijos sukeltų įtrūkimų, kurie būdingi pusiau kristaliniams termoplastikams (Worgull, Heckeke *et al.*, 2003).

3. MIKROSTRUKTŪRŲ PROJEKTAVIMAS, GAMYBA IR ANTRINIMAS

Periodinio reljefo mikrostruktūra yra pagaminama taikant elektronų pluošto litografiją. Siekiant sukurti sudėtingo reljefo mikrostruktūrą, reikia ją projektuoti naudojant kompiuteriu generuojamą holografiją. Šiame darbe sudėtinga mikrostruktūra yra projektuojama naudojant Gerchbergo ir Saxtono algoritmą su greitąja Furjė transformacija (Gerchberg, 1972). Algoritmas vykdomas iteracijomis, norint baigti proceso iteracijas, reikia pasiekti tokį hologramos kokybės lygį, kuris tenkintų iš anksto užsibrėžtus tikslus, t. y. papildomos iteracijos neleistų pasiekti geresnio rezultato.

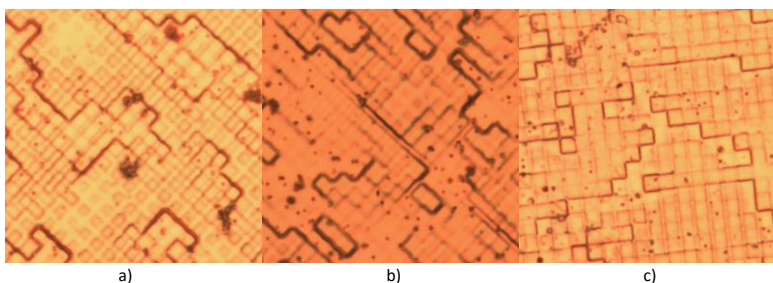
Technologiniam procesui buvo pasirinkta 2×2 mm (10^6 pikselių) KTU emblema (3.1 pav.). Įvedant pradinis duomenis buvo pasirinkta, kad holograma bus eksponuojama 632,8 nm bangos ilgio (raudonos spalvos) lazeriu. Holograma yra aštuonių pilkumo lygių – juodas plotas reiškia didžiausią rezisto storį (mažiausią ekspoziciją), balta spalva mažiausią rezisto storį (maksimalią ekspoziciją).



3.1 pav. KTU emblema (a) ir kompiuteriu generuota jos holograma (b)

Gaminant mikrostruktūrą silicio plokštelė buvo 5 min. eksponuojama deguonies plazmoje, tuomet 30 min. kaitinta 150 °C temperatūroje, galiausiai plokštelė buvo padengta polimetilmetakrilato (PMMA) rezistu. Kitas etapas – elektronų pluošto litografija ir PMMA rezisto tirpinimas 1:3 metilzobutilketono ir izopropilo alkoholio tirpaluose. Galiausiai bandiniai buvo nuplauti vandeniu ir išdžiovinti suspausto oro srove.

Įprastai eksponuojant kiekvieną hologramos pikselį iš eilės, dėl elektroninės litografijos spindulio pasiskirstymo pagal Gauso dėsnį buvo gaunamos apvalios pikselių viršūnės ir jų sanklota (3.2 pav.), tai lėmė prastesnę hologramos kokybę. Taigi kaip sprendimas buvo pasiūlyta eksponuojant dalyti pikselius į keturias dalis. Dalijant pikselius gamybos laikas pailgėja keturis kartus, nes reikia eksponuoti 4×10^6 pikselių, tačiau pagerėja hologramos kokybė.



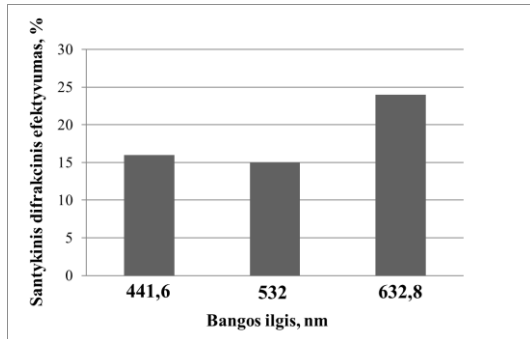
3.2 pav. Elektronų pluošto litografijos būdu pagaminta holograma: eksponavimo klaida (a), pikselių sanklota (b) ir be klaidų pagaminta holograma (c)

Pagamintos mikrostruktūros difrakcinis efektyvumas naudojant 632,8 nm bangos ilgio lazerį sudaro 58 %, tai yra 29 % daugiau nei hologramą eksponuojant įprastai. Difrakcinį kompiuteriu generuotos KTU emblemos hologramos vaizdą galima matyti 3.3 pav. Vėliau pagaminta mikrostruktūra buvo metalizuota, kad ją būtų galima naudoti terminiuose antrinimo procesuose. Metalizuotos mikrostruktūros difrakcinio efektyvumo matavimai (3.4 pav.) parodė, kad

didžiausias difrakcinis efektyvumas (24 %) išgautas, kai holograma buvo apšviesta 632,8 nm bangos ilgio lazeriu. Kita vertus, difrakcinis efektyvumas po metalizavimo sumažėjo 34 %. Apšvietus 441,6 nm bangos ilgio (mėlynos spalvos) ir 532 nm bangos ilgio (žalios spalvos) lazeriais, atitinkamai buvo gautos 16 ir 15 % difrakcinio efektyvumo vertės.

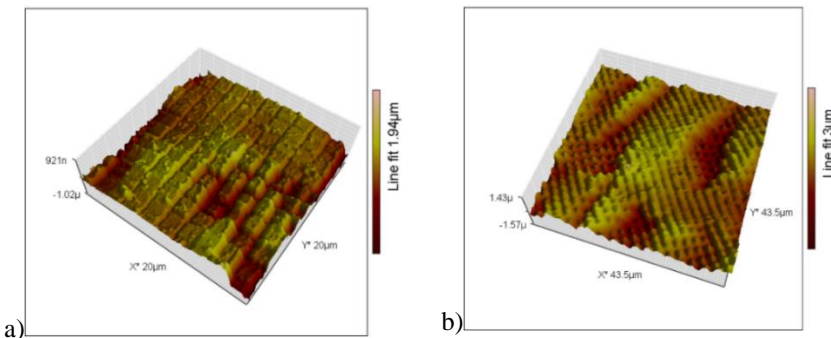


3.3 pav. Kompiuteriu generuota KTU emblemos holograma



3.4 pav. Santykinio difrakcinio efektyvumo priklausomybė nuo lazerio bangos ilgio

Kitas žingsnis yra terminis sudėtingo reljefo etaloninės mikrostruktūros spaudimas į polikarbonatą. Atlikus antrinimą, naudojantis atominės jėgos mikroskopu buvo lyginama etaloninės mikrostruktūros ir įspaudo polikarbonate paviršių topologija (3.5 pav.).



3.5 pav. Sudėtingo reljefo antrinimo etaloninės mikrostruktūros (a) ir jos terminio įspaudo polikarbonate (b) palyginimas

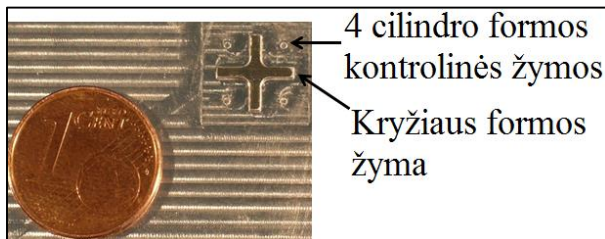
Lyginant matyti, kad antrinimo etaloninė mikrostruktūra nėra tiksliai atkartota, t. y. gauti apvalūs kampai ir kt., taigi reikia toliau tobulinti antrinimo procesą pasitelkiant aukštadažnį žadinimą.

Ultragarsinio karštojo spaudimo procesas priklauso nuo temperatūros pasiskirstymo tarp termoplastiko sluoksnių. Ultragarso energija yra sukoncentruota į kontakto plotą tarp sonotrodo ir termoplastiko. Mažinant kontakto plotą, didėja trintis ir kartu intensyviau generuojama šiluma. Tyrimo tikslas yra nustatyti, kaip papildomas šilumos generavimas per struktūruotus sluoksnius (3.6 pav. (b)), pagamintus į polikarbonatą išspaudžiant piramidinę matricą (3.6 pav. (a)), t. y. turinčius pastovų paviršiaus šiurkštumą, veikia proceso parametrus. Polimeras struktūruojamas antrinant (ir kartu sulydant) dvi 250 μm storio polikarbonato plėveles, taip yra gaunama viena struktūruota 500 μm storio polikarbonato plėvelė.

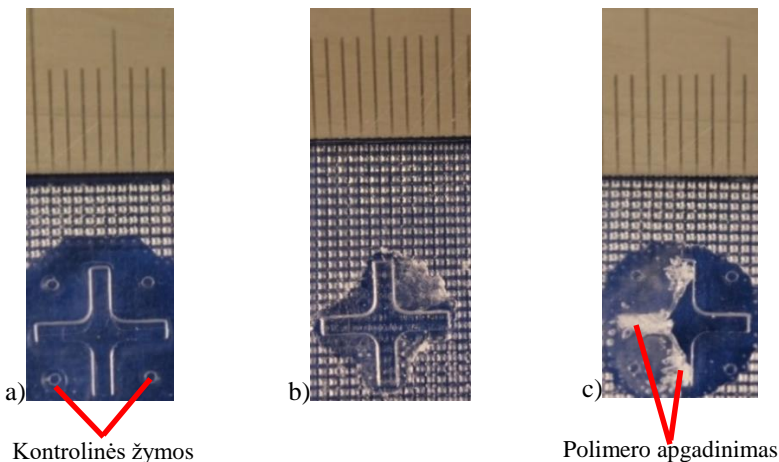


3.6 pav. Piramidinė matrica (a) ir piramidinė matrica, išspausa į polikarbonatą (b)

Nustatyti proceso parametrus buvo pagaminta matrica, kuri turi išsikišusius elementus: kryžių (ilgis – 8 mm, aukštis – 500 μm) ir keturias cilindro formos (skersmuo – 500 μm , aukštis – 50 μm) kontrolines žymas (3.7 pav.). Į polikarbonatą išspausa matrica pavaizduota ir bandinių kokybė apibūdinta 3.8 pav.



3.7 pav. Ultragarsinio karštojo spaudimo matrica



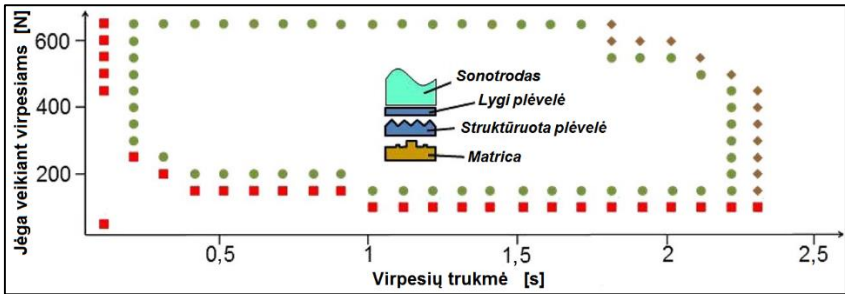
3.8 pav. Matrica, įspausta į polikarbonatą: sėkmingai įspaustas bandinys (a) nepakankamai įspaustas bandinys (b) ir sugadintas bandinys (c)

Nustatant proceso parametrus buvo keičiami ultragarso veikimo trukmės ir įspaudimo jėgos parametrai, visi kiti parametrai buvo pastovūs (3.1 lentelė).

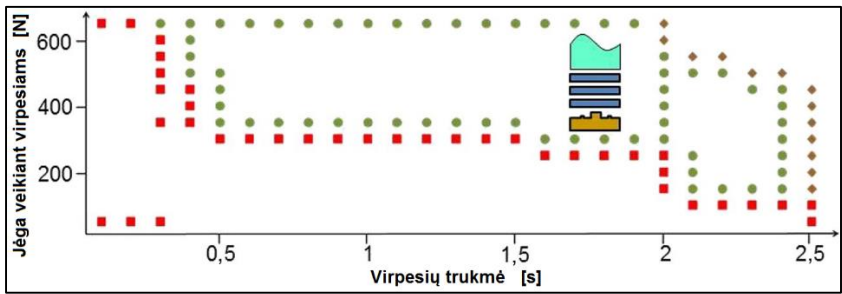
3.1 lentelė. Ultragarso karštojo spaudimo proceso parametrai

Proceso parametras	Parametro dydis
Virpesių dažnis, kHz	35
Virpesių amplitudė, μm	16,3
Jėga veikiant virpesiams, N	Kintama
Virpesių laikas, s	Kintama
Aušinimo laikas, s	1,5
Jėga vykstant aušinimui, N	300

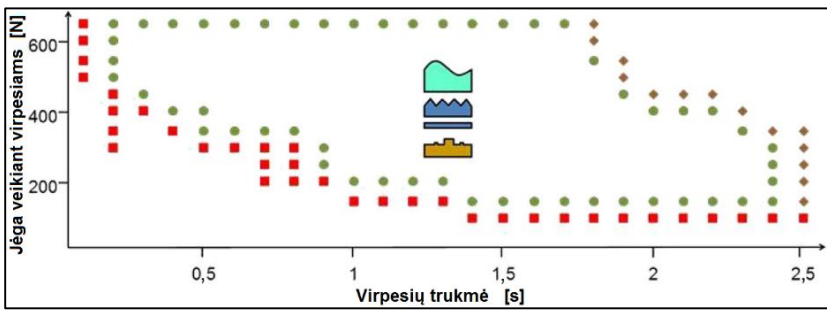
Visi gauti tinkamų proceso parametrų rinkiniai yra pavaizduoti 3.9–3.13 pav. Šiose diagramose kvadratai reiškia nepakankamai atkartotas matricas, apskritimai – gerai atkartotas matricas, rombai – polikarbonato apgadinimus dėl viršytos ultragarso veikimo trukmės ar jėgos.



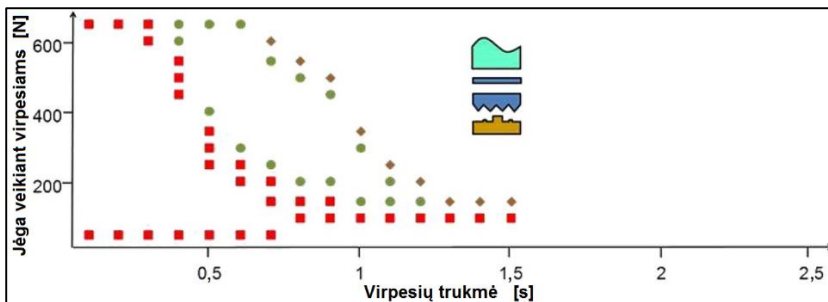
3.9 pav. Struktūruota plėvelė nukreipta į viršų, o ant jos padėta lygi plėvelė



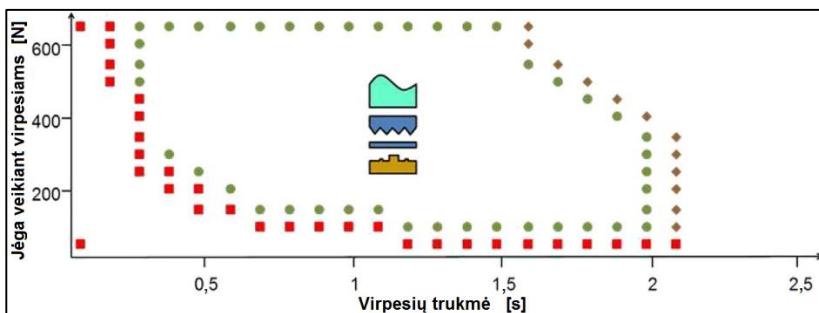
3.10 pav. Trys lygios plėvelės



3.11 pav. Struktūruota plėvelė kontaktuoja su sonotrodu



3.12 pav. Struktūruota plėvelė kontaktuoja su matrica



3.13 pav. Struktūruota plėvelė nukreipta žemyn į ant matricos uždėtą lygią plėvelę

Iš 3.9 pav. matyti, kad šiuo atveju gerai išpausta mikrostruktūra yra gaunama esant mažiausiai jėgai ir ultragarso veikimo trukmei (300 N ir 0,2 s), be to, tinkamų proceso parametų rinkinys yra pats didžiausias, t. y. daugiausia parametų derinių, kuriems esant gaunamos gerai išpaustos mikrostruktūros. Naudojant tris lygias plėveles (3.10 pav.) gerai išpausta mikrostruktūra buvo gauta esant šiems proceso parametrams: 0,3 s ultragarso veikimo trukmei ir 650 N jėgai. Mažiausias tinkamų proceso parametų rinkinys, taip pat didžiausi minimalūs proceso parametrai (0,4 s ir 600 N), kuriems esant gaunama gerai išpausta mikrostruktūra, yra 3.12 pav. Tai gali būti paaiškinta tuo, kad papildomai šiluma generuojama toje vietoje, kur jau ir taip yra sugeneruojama daugiausia šilumos dėl pasikartojančių aukštojo dažnio deformacijų tarp matricos ir polimero. Be to, akustinė energija yra sugerama kontakto zonoje, dėl to polimero sluoksniai, esantys virš kontakto, nėra papildomai kaitinami. Kai struktūruotas sluoksnis kontaktuoja su sonotrodu (3.11 pav.), tinkamų proceso parametų rinkinys yra mažesnis ir minimalūs parametrai (0,2 s ir 500 N) didesni nei 3.9 pav. Taip yra dėl to, kad papildomai šiluma generuojama ten, kur dėl trinties tarp sonotrodo ir polimero ji išsiskiria savaime. Kai struktūruotas sluoksnis yra nukreiptas į ant

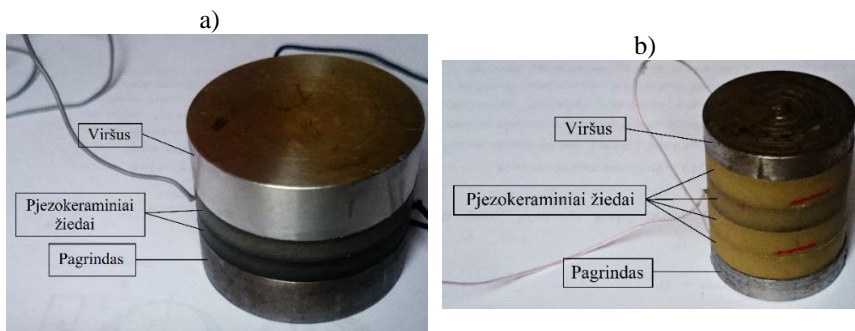
matricos padėtą lygią plėvelę (3.13 pav.), minimalūs proceso parametrai yra 0,3 s ir 500 N.

Tobulinant terminio spaudimo taikant aukštadažnį žadinimą technologiją, daugiausia dėmesio buvo sutelkta į vibropadų, gebančių generuoti vienodus poslinkius visame darbiniam paviršiuje, kūrimą. Vibropadai naudoja atvirkštinį pjezoeftą. Tolygūs poslinkiai užtikrina, kad antrinama mikrostruktūra bus vienodai paveikta aukštadažnių virpesių visuose taškuose. Šiuo tikslu buvo pasiūlytos dvi konstrukcijos: vibropadas 1 ir vibropadas 2 (3.14 pav.). Abi konstrukcijos buvo suprojektuotos naudojant *SolidWorks 2013* programų paketą. Įrenginiai turi išankstinius geometrijos apribojimus:

- Hidraulinio terminio spaudimo įrenginio eiga yra 37 mm, į ją turi tilpti vibropadas su ant jo padėta 2 mm storio polikarbonato plokštele.
- Išorinis pjezokeraminių PZT-5 žiedų skersmuo yra 40 mm, o PZT-4 žiedų skersmuo – 22 mm. Išorinis pjezokeraminių žiedų skersmuo turi sutapti su išoriniu konstrukcijos skersmeniu tam, kad būtų išvengta membranos virpesių modų.

Vibropadas 1 susideda iš dviejų nerūdijančio plieno dalių (skersmuo 40 mm) ir tarp jų esančių dviejų PZT-5 pjezokeraminių žiedų (išorinis skersmuo – 40 mm, vidinis skersmuo – 32 mm, aukštis – 5 mm). Visi įrenginio komponentai yra suveržti M5×25 matmenų varžtu.

Antrasis įrenginys yra vibropadas 2, jo konstrukcija turi dvi nerūdijančio plieno dalis (skersmuo 22 mm), kurios sudaro konstrukcijos rėmą, ir 4 PZT-4 pjezokeraminius žiedus (išorinis skersmuo – 22 mm, vidinis skersmuo – 10 mm, aukštis – 5 mm). Konstrukcija suveržta panaudojant spyruoklę, kurios standumas $k = 4700 \text{ N/m}$.

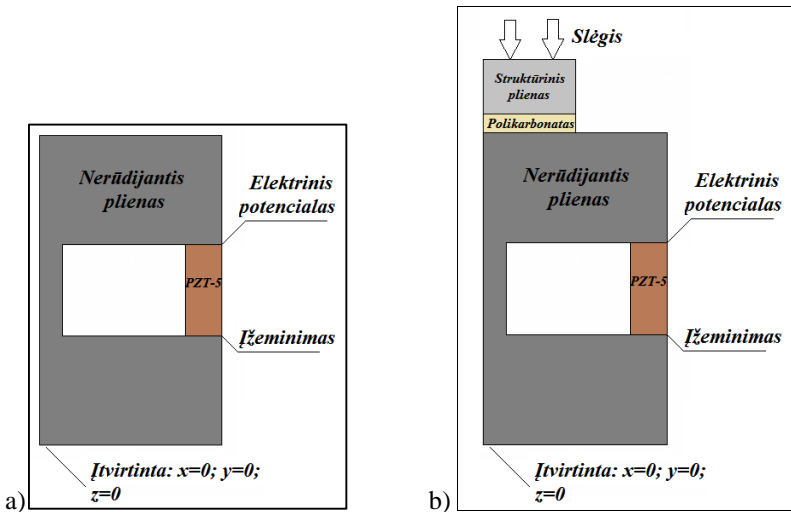


3.14 pav. Vibropadų prototipai: vibropadas 1 (a) ir vibropadas 2 (b)

Įrenginių baigtinių elementų modeliavimas atliktas naudojant *Comsol Multiphysics 3.5a* programų paketą. Buvo sukurtas trimatis modelis, nes

modeliavimo tikslas yra rasti dažnius, kuriems esant visi vibropadų darbinių paviršių taškai virpa tolygiais poslinkiais.

Modeliuojant vibropadą *I* buvo pasirinktos šios kraštinės sąlygos: bendras pjekokeraminės dedamosios aukštis – 10 mm, visos konstrukcijos aukštis – 32,5 mm, skersmuo – 40 mm. Kai konstrukcija yra įveržiama terminio spaudimo proceso sąlygomis, tuomet polikarbonato aukštis – 2 mm, etaloninės mikrostruktūros aukštis – 6 mm. Modeliuoti vibropadui 2 buvo pasirinktos šios kraštinės sąlygos: bendras pjekokeraminės dedamosios aukštis – 20 mm, visos konstrukcijos aukštis – 29 mm, skersmuo – 22 mm. Abiejų vibropadų pagrindai yra nejudamai įtvirtinti visomis koordinačių ašies kryptimis. Kintamoji įtampa pjekokeramikoje varijuoja tarp 5 ir 100 V. Vibropado *I* 2D skaičiuojamosios schemas su kraštinėmis sąlygomis yra pavaizduotos 3.15 pav.



3.15 pav. Skaičiuojamoji 2D schema su kraštinėmis sąlygomis: neįveržtas (a) ir įveržtas (b) vibropadas *I*

Modeliuojant aktyvioji vibropadų dalis buvo žadinama kintamąja įtampa. Elektrinis potencialas išreiškiamas taip:

$$Q = A \sin \omega ; \tag{4.1}$$

čia *A* – amplitudė, ω – dažnis.

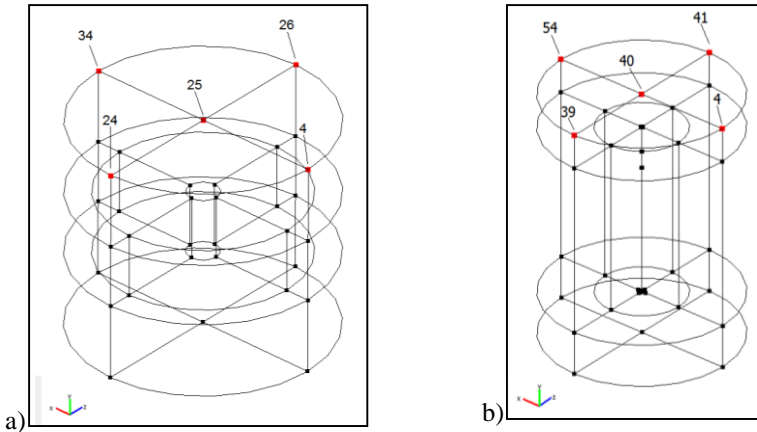
Neįveržtos konstrukcijos dažninis atsakas buvo nustatytas naudojantis šia formule:

$$\begin{bmatrix} K_{UU} - \varpi C_{UU} - \varpi^2 M_{UU} & K_{U\phi} \\ K_{\phi U} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}. \quad (4.2)$$

Modeliuojant įveržtus įrenginius slėgis buvo pritaikytas kaip viršutinio etaloninės mikrostruktūros paviršiaus poslinkis U neigiama y ašies kryptimi. Šie poslinkiai atitinka slėgio (100–500 kPa) sukuriamus poslinkius. Dažninis įveržtų įrenginių atsakas buvo rastas naudojantis šia formule:

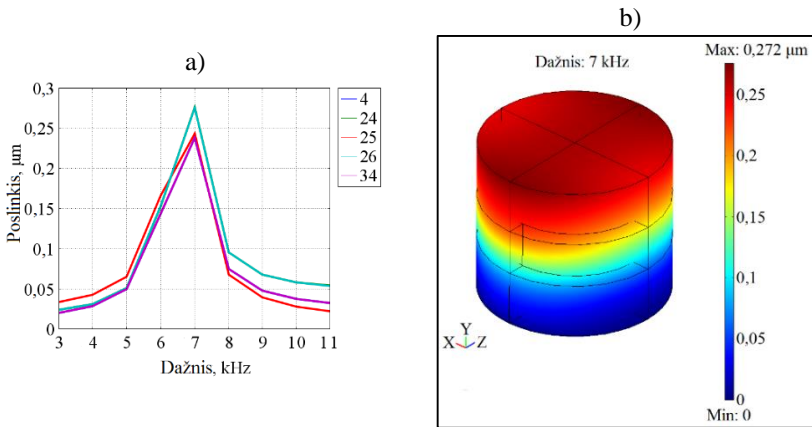
$$\begin{bmatrix} K_{UU} - \varpi C_{UU} - \varpi^2 M_{UU} & K_{U\phi} \\ K_{\phi U} & K_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{U\} \\ \{\phi\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F(U_0)\} \\ \{Q\} \end{Bmatrix}. \quad (4.3)$$

3.16 pav. yra pavaizduoti baigtinių elementų metodu nagrinėti neįveržtų konstrukcijų taškai.



3.16 pav. Baigtinių elementų metodu nagrinėti neįveržtų konstrukcijų taškai: vibropadas 1 (a) ir vibropadas 2 (b)

Daugiausia dėmesio buvo skiriama darbinio paviršiaus poslinkiams y kryptimi, t. y. statmenai polikarbonatui. Sumodeliuotos vibropado 1 dažninio atsako kreivės visuose nagrinėtuose taškuose ir esant nustatytam darbiniam dažniui gautas poslinkių laukas yra pavaizduoti 3.17 pav.



3.17 pav. Sumodeliuotos neįveržto vibropado *I* dažninio atsako kreivės (a) ir poslinkių lauko vizualizacija (b)

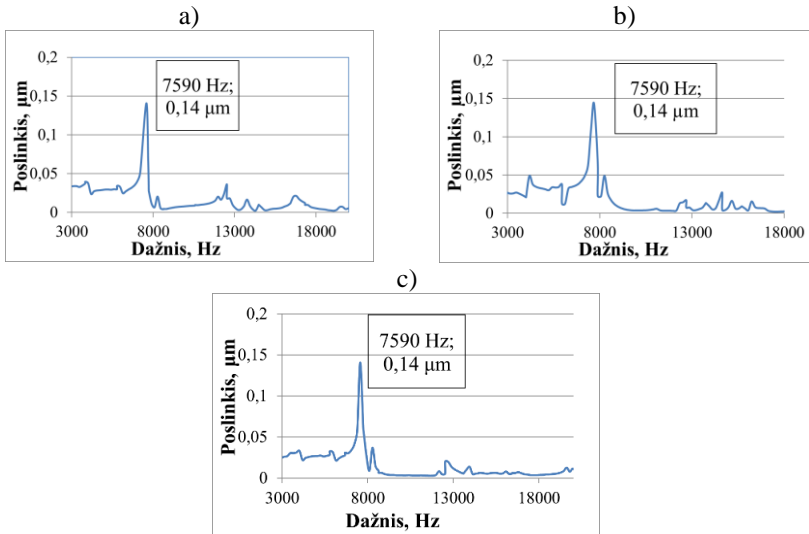
Dažninio atsako kreivė rodo, kad neįveržtas vibropadas *I* virpa tolygiomis amplitudėmis visame darbiniam paviršiuje esant 7 kHz dažniui. Poslinkių lauko vizualizacijos metu gautas vienodos spalvos darbinis paviršius leidžia patvirtinti amplitudžių tolygumą. Modeliui verifikuoti buvo panaudota holografinės interferometrijos principu veikianti sistema PRISM ir lazerinis doplerinis vibrometras. Eksperimentiškai gauti rezultatai yra pavaizduoti 3.18 pav. Baltos zonos yra mazginės linijos, t. y. vietos, kur poslinkiai yra lygūs nuliui, o juodos yra su tam tikrais poslinkiais vibruojančios zonos. Holografiniai vaizdai, kai visas paviršius tampa juodas, yra interpretuojami kaip paviršiai su tolygiais poslinkiais.



3.18 pav. Vibropado *I* paviršiaus poslinkių lauko vizualizacija, atlikta naudojantis PRISM sistema: esant 30,98 kHz (a) ir 7,5 kHz (b) dažniui

Poslinkių lauko vizualizacija leidžia patvirtinti, kad esant 7,5 kHz dažniui įrenginys generuoja tolygias amplitudes visame darbiniam paviršiuje.

Kitas etapas yra neįveržto vibropado *I* dažninė analizė naudojantis lazeriniu dopleriniu vibrometru. Buvo nagrinėjami trys paviršiaus taškai: centras, 1 ir 2 cm nuo centro. Dažninio atsako analizės rezultatai yra pavaizduoti 3.19 pav.

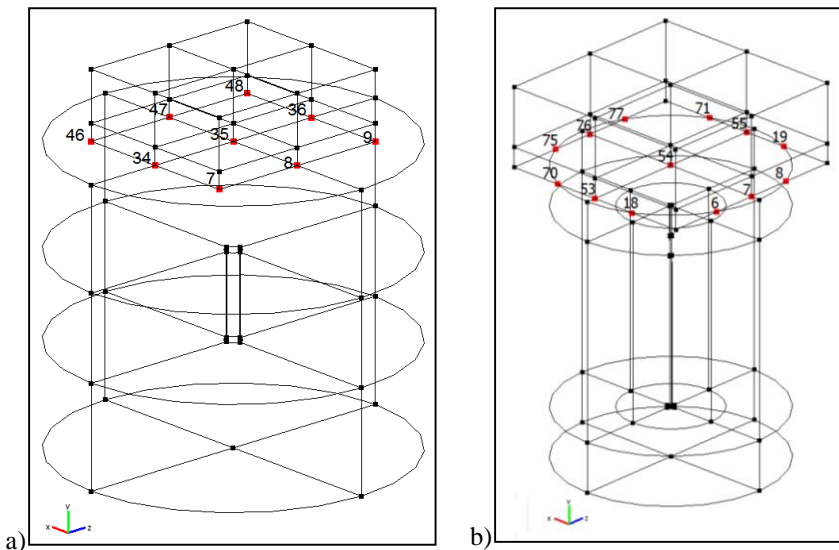


3.19 pav. Vibropado 1 dažninės analizės rezultatai: 1 cm (a), 2 cm nuo konstrukcijos centro (b), konstrukcijos centre (c)

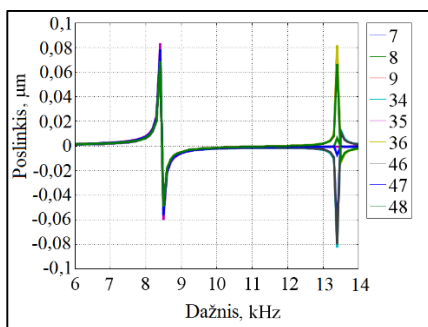
Iš gautų grafikų matyti, kad visos trys smailės sutampa esant 7,59 kHz dažniui, šiuo atveju matomas 0,14 μm poslinkis.

Tas pats yra atliekama ir su vibropadu 2. Baigtinių elementų modelis parodė, kad konstrukcija generuoja tolygius poslinkius esant 3,6 kHz dažniui. Holografinės interferometrijos metodu atlikta analizė parodė, kad įrenginys virpa tolygiomis amplitudėmis esant 3,1 kHz dažniui, lazerinis doplerinis vibrometras parodė 3,15 kHz dažnį. Neįveržtų konstrukcijų baigtinių elementų modelio verifikavimas parodė, kad modelis atitinka eksperimentines sąlygas ir neatitikimas tarp sumodeliuotų ir eksperimentiškai gautų darbinių dažnių neviršija 17 %.

Kitas etapas yra įveržtų konstrukcijų dažninio atsako analizė. Tuo tikslu buvo modifikuotas baigtinių elementų modelis. Nagrinėti polikarbonato kontakto su vibropadu taškai (3.20 pav.). 3.21 pav. pavaizduota sumodeliuota vibropado 1 dažninio atsako kreivė.



3.20 pav. Baigtinių elementų modelyje nagrinėti įveržtų įrenginių taškai: vibropadas 1 (a) ir vibropadas 2 (b)

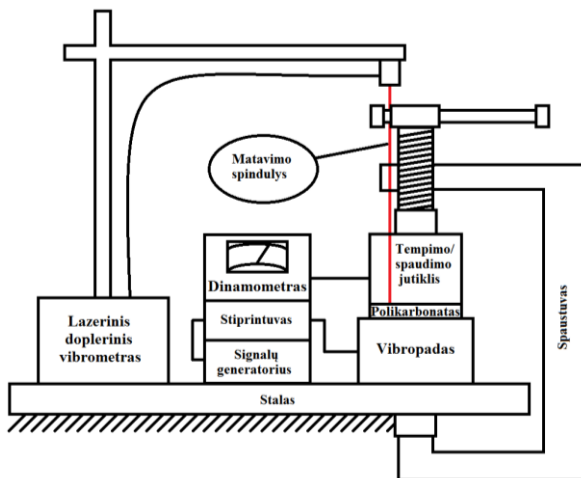


3.21 pav. Vibropado 1 baigtinių elementų modelio dažninio atsako kreivės

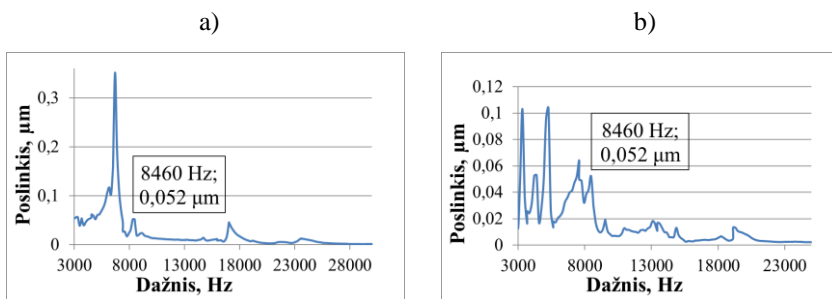
Sumodeliuotos kreivės rodo, kad tolygios visų taškų amplitudės yra gaunamos esant 8,35 kHz žadinimo dažniui.

Kitas etapas yra modelio verifikavimas naudojantis lazeriniu dopleriniu vibrometru *Polytec*. Eksperimentinei įveržtų vibropadų analizei buvo sukonstruotas poslinkių matavimo stendas (3.22 pav.). Matavimo metu vibropadas (su ant jo esančia 20×20 mm dydžio polikarbonato plokštele ir dinamometru

įveržimo jėgai matuoti) buvo įveržtas su spaustu. Įveržtų vibropadų generuojami poslinkiai buvo registruojami vibrometru. Gautos įveržto vibropado 1 dažninio atsako kreivės yra pavaizduotos 3.23 pav.



3.22 pav. Matavimo stendas įveržtų vibropadų dažninėms charakteristikoms tirti

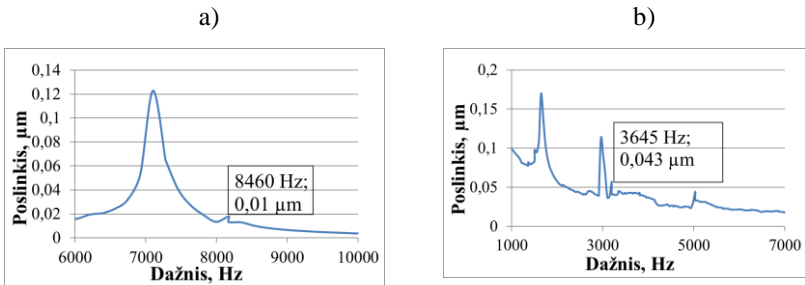


3.23 pav. Įveržto vibropado 1 dažninės analizės rezultatai: 1 cm (a) ir 0,5 cm nuo konstrukcijos centro (b)

Iš gautų kreivių matyti, kad įveržto vibropado 1 nagrinėti taškai vibruoja vienoda $0,052 \mu\text{m}$ amplitude esant $8,46 \text{ kHz}$ dažniui. Baigtinių elementų modelio ir eksperimentiniai rezultatai vertinant dažnius skiriasi $1,3 \%$. Sumodeliuotas įveržto vibropado 2 darbinis dažnis yra $4,1 \text{ kHz}$. Eksperimentiškai verifikuojant baigtinių elementų modelį, gautas $3,645 \text{ kHz}$ dažnis, neatitikimas tarp dažnių – $12,5 \%$. Įveržus konstrukciją neatitikimas sumažėja, palyginti su neįveržta

konstrukcija. Taip yra todėl, kad įveržus konstrukciją padidėja jos standumas ir sumažėja nepageidaujami šalutiniai virpesiai.

Paskutinis dažninės analizės etapas yra įveržtų konstrukcijų tangentinių poslinkių nustatymas šoniniuose viršutiniuose taškuose konstrukcijoms virpant darbiniais dažniais. Atliekant terminio spaudimo eksperimentus bus tiriama, kokią įtaką šie poslinkiai daro antrinamos mikrostruktūros kokybei. Abiejų įrenginių pirmųjų taškų tangentinių poslinkių dažninės analizės rezultatai grafiškai pavaizduoti 3.24 pav. Kitų taškų dažninio atsako analizės rezultatai yra pateikti 3.2 lentelėje.



3.24 pav. Tangentinių poslinkių dažninio atsako analizės rezultatai, gauti matuojant: pirmą įveržto vibropado 1 (a) ir vibropado 2 (b) tašką

3.2 lentelė Tangentinių poslinkių dažninio atsako analizės rezultatai, gauti 2, 3 ir 4 konstrukcijų taškuose

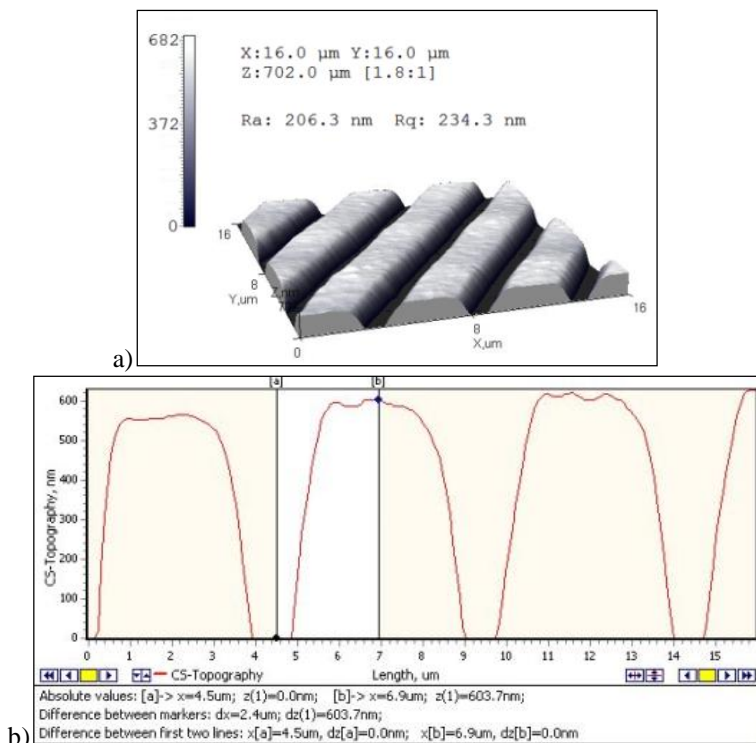
Vibropado tipas	Taškas	Poslinkis (μm)
Vibropadas 1	2	0,011
Vibropadas 1	3	0,0105
Vibropadas 1	4	0,0104
Vibropadas 2	2	0,024
Vibropadas 2	3	0,018
Vibropadas 2	4	0,022

Gautų vibropado 1 tangentinių poslinkių vidurkis yra 0,0105 μm, o vibropadas 2 generuoja 0,026 μm, arba 2,47 karto didesnius, vidutinius tangentinius poslinkius.

4. MIKROSTRUKTŪRŲ ANTRINIMO EKSPERIMENTAI

Ultragarinio karštojo spaudimo būdu antrinant mikrostruktūras siekiama iširti papildomo šilumos generavimo per struktūruotą sluoksnį įtaką antrinamų periodinių etaloninių mikrostruktūrų (4.1 pav.) (gylis 603,7 nm, o periodas 4 μm) kokybei, t. y. santykinį difrakcinį efektyvumą. *GSolver* programų paketu

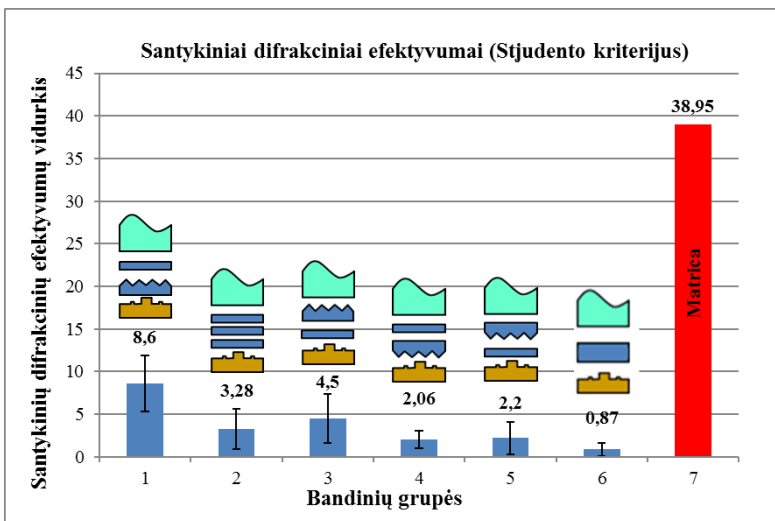
sumodeliuotos teoriškai idealios minėtų geometrinėjų parametų etaloninės mikrostruktūros difracinis efektyvumas +1 ir -1 maksimumuose yra 38,95 %.



4.1 pav. Periodinė etaloninė mikrostruktūra: 3D nuotrauka (a) ir profilio vaizdas (b)

Pagaminti bandiniai buvo suskirstyti į šešias grupes atsižvelgiant į struktūroto sluoksnio padėtį, taip pat buvo atlikti eksperimentai su 2 mm storio polikarbonato plokštele.

Gauti rezultatai (4.2 pav.) parodo vidutinį kiekvienos bandinių grupės difracinį efektyvumą. Taip pat naudojantis SPSS 13.0 programų paketu atlikta statistinė analizė taikant Stjudento kriterijų su 95 % pasikiojimo intervalu.



4.2 pav. Statistinė šešių bandinių grupių santykinio difrakcinio efektyvumo analizė taikant Stjudento kriterijų su 95 % pasiklovimo intervalu

Gauti rezultatai rodo, kad pirmą ir trečią grupę pasižymi didžiausiu vidutiniu santykinio difrakcinio efektyvumu: 8,6 ir 4,5 %. Mažiausia vertė yra šeštoje bandinių grupėje (bandiniai su 2 mm storio polikarbonato plokšte), čia santykinis difrakcinis efektyvumas sudaro 0,87 %. Gauti eksperimentiniai rezultatai yra 4,52 ir daugiau kartų mažesni už teoriškai idealias vertes.

Terminio spaudimo taikant aukštadažnį žadinimą eksperimentų tikslas yra nustatyti, kaip skirtingi veiksniai, pvz., virpesių pobūdis, normaliniai ir tangentiniai vibropado poslinkiai, proceso temperatūra, slėgis, veikia antrinamų mikrostruktūrų kokybę, ir nustatyti proceso priklausomybes. Eksperimentų metu buvo naudojama ta pati periodinė etaloninė mikrostruktūra kaip ir ultragarsinio karštojo spaudimo eksperimentuose. Eksperimentams buvo sudaryta eksperimentinė matrica (4.1 lentelė).

4.1 lentelė. Eksperimentinė matrica

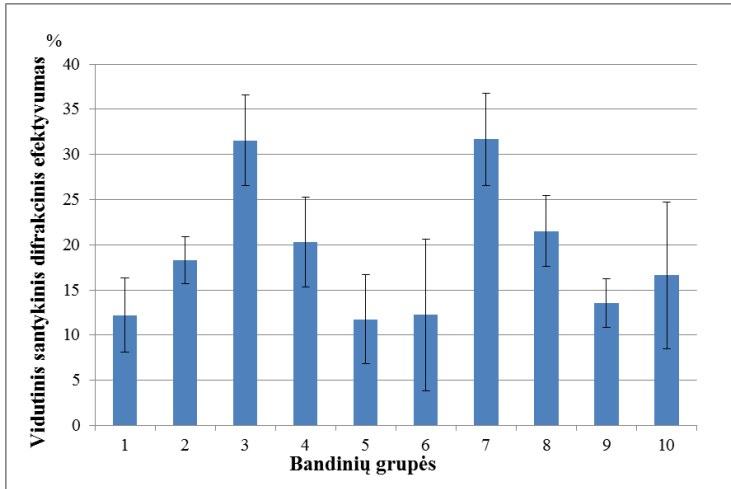
Vibropadas ir virpesių forma (žadinimo dažnis, kHz)	Slėgis, kPa	Temperatūra, °C	Spaudimo laikas, s
Aukštadažnis žadinimas netaikomas	100	148 152	10
Vibropadas 1, sinusinis žadinimas (8,46)	200		
Vibropadas 2, sinusinis žadinimas (3,645)	300		
Vibropadas 1, pjūklinis žadinimas (8,46)	400		
Vibropadas 2, pjūklinis žadinimas (3,645)	500		

Toliau analizuojant rezultatus bandiniai buvo suskirstyti į grupes, kurios priklauso nuo temperatūros, vibropado tipo bei virpesių formos. Į kiekvieną grupę patenka visos slėgio reikšmės nuo 100 iki 500 kPa (4.2 lentelė).

4.2 lentelė. Terminio spaudimo eksperimento bandinių grupės

Grupė	Vibropado tipas ir virpesių forma	Temperatūra, °C
1	Aukštadažnis žadinimas netaikomas	148
2	Aukštadažnis žadinimas netaikomas	152
3	Vibropadas 1 (sinusinis žadinimas)	148
4	Vibropadas 1 (sinusinis žadinimas)	152
5	Vibropadas 2 (sinusinis žadinimas)	148
6	Vibropadas 2 (sinusinis žadinimas)	152
7	Vibropadas 1 (pjūklinis žadinimas)	148
8	Vibropadas 1 (pjūklinis žadinimas)	152
9	Vibropadas 2 (pjūklinis žadinimas)	148
10	Vibropadas 2 (pjūklinis žadinimas)	152

Pamatavus bandinių difrakcinį efektyvumą kiekvienos grupės rezultatai buvo suvidurkinti, taip gautos vidutinio santykinio difrakcinio efektyvumo reikšmės +1 ir -1 maksimumuose kiekvienai grupei. Taip pat naudojantis SPSS 13.0 programų paketu atlikta statistinė slėgio įtakos analizė taikant Stjudento kriterijų (su 95 % pasiklivimo intervalu) kiekvienai bandinių grupei. Rezultatai, gauti išmatavus bandinių santykinį difrakcinį efektyvumą ir atlikus statistinę rezultatų analizę, yra pavaizduoti 4.3 pav.



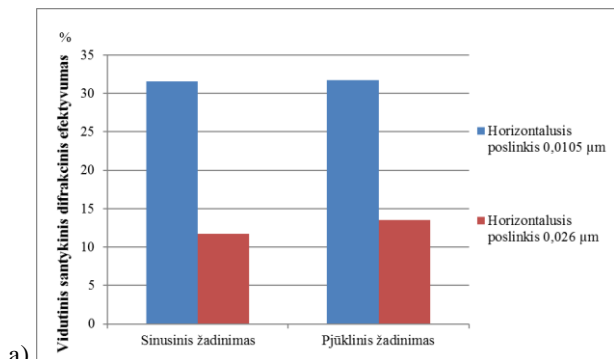
4.3 pav. Statistinė bandinių grupių vidutinio santykinio difrakcinio efektyvumo analizė taikant Stjudento kriterijų su 95 % pasiklovimo intervalu

Bandiniai, esantys pirmoje (148 °C) ir antroje (152 °C) grupėse, gaminti netaikant aukštadažnio žadinimo, atitinkamai pasižymi 12,2 ir 18,3 % vidutiniu santykinio difrakcinio efektyvumu.

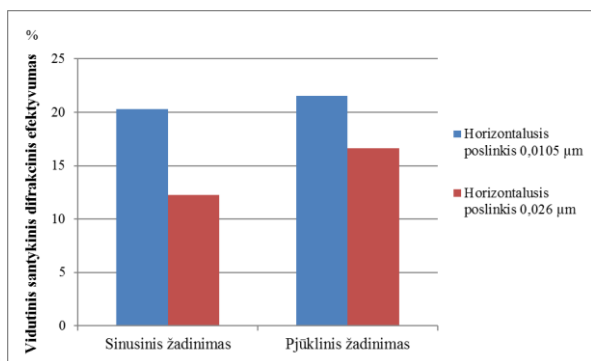
Mikrostruktūrų, antrintų taikant sinusinį žadinimą, analizė rodo, kad aukščiausias vidutinis santykinis difrakcinis efektyvumas gautas trečioje grupėje – 31,56 %, o mažiausias – 11,73 % – penktoje grupėje. Statistinė bandinių, esančių 3–6 grupėse, analizė rodo, kad trečia grupė skiriasi nuo kitų, t. y. nulinė hipotezė apie vidutinių reikšmių lygybę yra atmetama ($p < 0,05$). Tarp bandinių, esančių 4, 5 ir 6 grupėse, nėra reikšminio skirtumo.

Analizuojant mikrostruktūras, gautas taikant pjūklinį žadinimą, nustatyta, kad septinta bandinių grupė pasižymi didžiausiu vidutiniu santykinio difrakcinio efektyvumu – 31,68 %. Ši vertė yra arčiausiai sumodeliuotos teoriškai idealios mikrostruktūros santykinio difrakcinio efektyvumo. Mažiausia vertė buvo devintoje grupėje – 13,54 %. Bandinių, esančių 7–10 grupėse, statistinė analizė rodo, kad septinta grupė skiriasi nuo kitų, t. y. nulinė hipotezė apie vidutinių reikšmių lygybę yra atmetama ($p < 0,05$).

4.4 pav. atvaizduotas ryšys tarp vibropado generuojamų vidutinių tangentinių (vibropadas 1 – 0,0105 μm , o vibropadas 2 – 0,026 μm) poslinkių dydžio ir vidutinio santykinio difrakcinio efektyvumo.



a)



b)

4.4 pav. Vidutinio santykinio difrakcinio efektyvumo priklausomybė nuo vibropado generuojamų vidutinių tangentinių poslinkių: kai spaudimo temperatūra yra 148 °C (a) ir 152 °C (b)

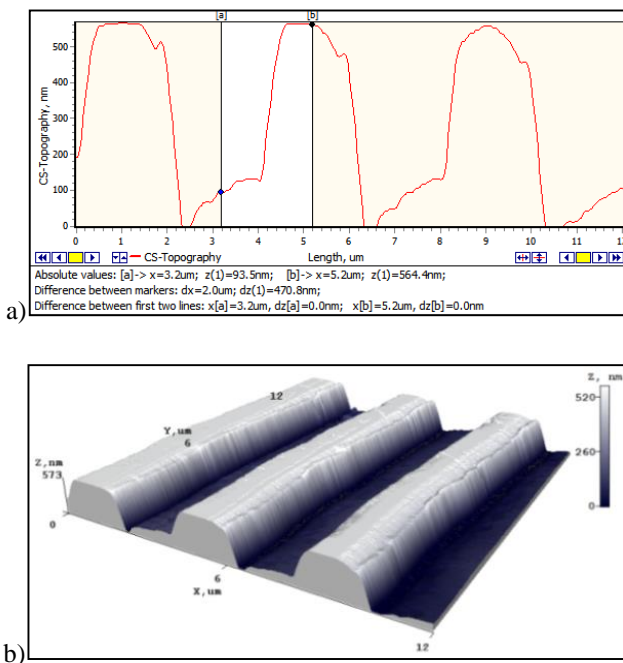
Iš paveikslų matoma, kad santykinis difrakcinis efektyvumas yra atvirkščiai proporcingas tangentiniams vibropadų poslinkiams. Ši priklausomybė buvo mažesnė, kai eksperimentai buvo atliekami esant 152 °C spaudimo temperatūrai. Didėjant tangentiniams poslinkiams, santykinis difrakcinis efektyvumas mažėja nuo 21,52 iki 16,61 %, kai taikomas pjūklinis žadinimas, ir nuo 20,28 iki 12,23 %, kai taikomas sinusinis žadinimas.

Ryškesnė vidutinio santykinio difrakcinio efektyvumo mažėjimo tendencija didėjant vidutiniams tangentiniams poslinkiams pastebėta esant 148 °C proceso temperatūrai. Taikant pjūklinį žadinimą buvo nustatytas mažėjimas nuo 31,68 iki 13,54 %, o taikant sinusinį žadinimą – nuo 31,56 iki 11,73 %.

Šios tendencijos gali būti paaiškintos tuo, kad didesni tangentiniai poslinkiai lemia tai, jog polimeras teka ne statmenai link etaloniškos mikrostruktūros, o jai lygiagrečiai kryptimi ir todėl pasireiškia tangentinės deformacijos. Aukštesnėje

temperatūroje polimero klampumas yra mažesnis ir jis geriau sugrįžta į pradinį būvį, o žemesnėje temperatūroje jis yra klampesnis, dėl to labiau išryškėja liekamosios plastinės deformacijos. Kita vertus, esant žemesnei temperatūrai ir mažesniems tangentiniams poslinkiams, santykinio difrakcinio efektyvumo vertės išauga. Daroma išvada, kad polimeras yra geriau valdomas, kai temperatūra yra žemesnė. Tuomet tinkamai taikant aukštadažnius virpesius ir minimizuojant tangentinius poslinkius galima kokybiškiau atkartoti mikrostruktūrą.

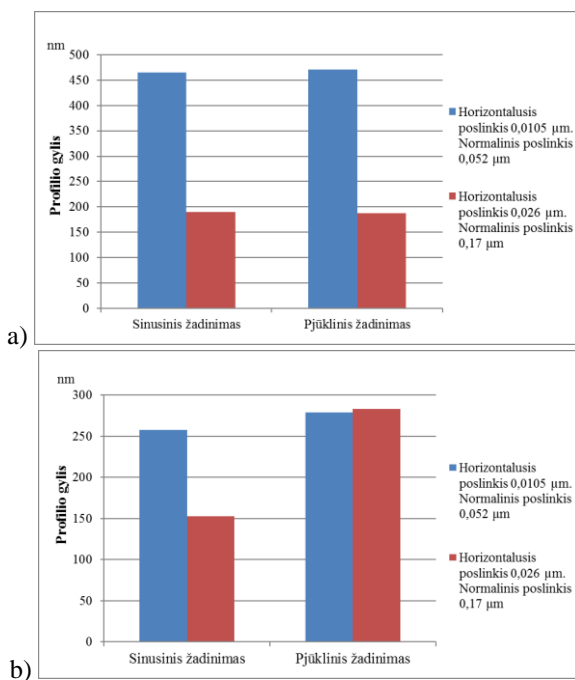
Toliau naudojantis atominės jėgos mikroskopu buvo tiriama mikrostruktūrų paviršiaus topologija. Daugiausia dėmesio buvo skiriama gautos mikrostruktūros gyliui, žinant, kad etaloninės mikrostruktūros gylis yra 603,7 nm. 4.5 pav. pavaizduota mikrostruktūra antrinta naudojant vibropadą 1, esant 148 °C temperatūrai ir veikiant pjūkliniam žadinimui. Visi kiti atominės jėgos mikroskopu gauti rezultatai yra pateikti 4.3 lentelėje. 4.6 iliustracijoje pateiktos profilio gylio priklausomybės nuo tangentinių ir normalinių poslinkių.



4.5 pav. Mikrostruktūros, kuri pagaminta naudojant vibropadą 1, taikant pjūklinį žadinimą ir esant 148 °C spaudimo temperatūrai, profilio topologinis (a) ir 3D (b) vaizdai

4.3 lentelė. Profilio gylio priklausomybė nuo proceso režimų

Vibropano tipas ir virpesių forma	Temperatūra, °C	Gautos mikrostruktūros gylis, nm
Aukštadažnis žadinimas netaikomas	148	196,6
Aukštadažnis žadinimas netaikomas	152	250,7
Vibropanas 1 (sinusinis žadinimas)	148	464,9
Vibropanas 1 (sinusinis žadinimas)	152	258,0
Vibropanas 2 (sinusinis žadinimas)	148	189,5
Vibropanas 2 (sinusinis žadinimas)	152	152,6
Vibropanas 1 (pjūklinis žadinimas)	148	470,8
Vibropanas 1 (pjūklinis žadinimas)	152	279,1
Vibropanas 2 (pjūklinis žadinimas)	148	188,0
Vibropanas 2 (pjūklinis žadinimas)	152	283,1



4.6 pav. Profilio gylio priklausomybė nuo tangentinių ir normalinių poslinkių: kai buvo spaudžiama esant 148 °C (a) ir 152 °C (b) temperatūrai

Atlikus gautų bandinių profilių gylių analizę galima teigti, kad normalinės amplitudės skatina polimerą tekėti link etaloninės mikrostruktūros, todėl gerėja mikrostruktūrų atkartojamumas. Kita vertus, kuriant vibropadą reikia minimizuoti jo tangentinis poslinkius, nes jie iškraipo gautą mikrostruktūrą, dėl to nukenčia antrinamų mikrostruktūrų kokybė.

IŠVADOS

1. Sudėtingo reljefo mikrostruktūrai projektuoti parinkta kompiuteriu generuotos holografijos technologija. Renkantis mikrostruktūros gamybos technologiją pagrindiniai kriterijai yra greitas pagaminimas ir tikslumas. Tam labiausiai tinka elektronų pluošto litografijos technologija. Norint tiksliai ir išvengiant didelių sąnaudų antrinti mikrostruktūras, tikslinga naudoti terminio spaudimo taikant aukštadažnį žadinimą ir ultragarsinio karštojo spaudimo technologijas.
2. Etaloninės mikrostruktūros gamyboje buvo pritaikytas bandinio ir pikselių dalijimas. Visa tai leido išvengti apvalių kampų ir pikselių sanklotos, taip padidinant etaloninės mikrostruktūros tikslumą. Santykinio difrakcinio efektyvumo matavimai parodė, kad minėtos priemonės leido pasiekti 58 % vertę, t. y. 29 % didesnę santykinę difrakcinę efektyvumą nei taikant įprastinį eksponavimą.
3. Ultragarsinio karštojo spaudimo proceso metu racionaliai panaudojant struktūruotus sluoksnius galima minimizuoti proceso trukmę ir spaudimo jėgą (0,2 s ir 300 N) ir pagerinti antrinamų mikrostruktūrų kokybę pasiekiant aukštesnę santykinę difrakcinę efektyvumą (8,6 %).
Vibropadai, kurie generuoja tolygias amplitudes visame darbiniam paviršiuje, buvo sukurti, modeliuoti ir eksperimentiškai ištirti siekiant nustatyti jų darbinis dažnius. Vibropado 1 įveržimas lemia darbinio dažnio padidėjimą 11,5 %, įveržus vibropadą 2 darbinis dažnis išauga 15,7 %. Vibropadas 2 generuoja 2,47 karto didesnes tangentes amplitudes nei vibropadas 1.
4. Mikrostruktūros, kurios buvo antrinamos naudojant vibropadą 1 ir taikant pjūklinį žadinimą (esant 148 °C proceso temperatūrai), pasižymi 31,68 % vidutiniu santykiniu difrakciniu efektyvumu ir 470,8 nm profilio gyliu. Naudojant vibropadą 1 ir taikant sinusinį žadinimą (esant 148 °C proceso temperatūrai), buvo pasiektas 31,56 % vidutinis santykinis difrakcinis efektyvumas ir 464,9 nm profilio gylis. Mikrostruktūros, pagamintos parinkus minėtus parametrus, pasižymi mažu jautrumu slėgio pokyčiams. Tai leidžia patvirtinti technologijos taikomumą tais atvejais, kai didelis slėgis yra nerekomenduojamas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. GERCHBERG, R. W., W. O. SAXTON. A Practical Algorithm for the Determination of Phase from Image and Diffraction Plane Pictures. *Optik*. 1972, **vol. 35, no. 2**: 237–250.
2. GIUSEPPE, A., P. V. CIRINO, R. D. MANSANO, J. C. PIZOLATO Jr., D. B. MAZULQUIM and L. G. NETO. Digital Holography: Computer-Generated Holograms and Diffractive Optics in Scalar Diffraction Domain. *Holography – Different Fields of Application*. 2011, 29–52.
3. HIRAI, Y., S. YOSHIDA and N. TAKAGI. Defect Analysis in Thermal Nanoimprint Lithography. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 2003, **21(6)**: 2765–2770.
4. HOLMGREN, H., E. LJUNGSTRÖM, A.-C. ALMSTRAND, B. BAKE and A.-C. OLIN. Size Distribution of Exhaled Particles in the Range from 0.01 to 2.0 μm . *Journal of Aerosol Science*. 2010, **41(5)**: 439–446.
5. JAHNS, J., J. TURUNEN and F. WYROWSKI. Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications. *Laser and Particle Beams*. 1997, **17(01)**: 139–141.
6. JULIEN, G., C. THIERRY and M. PATRICE. Microinjection Molding of Thermoplastic Polymers: a Review. *Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2007, **17(6)**: R96.
7. KHUNTONTONG, P. (2008). "Fabrication of Polymer Micro Devices by Ultrasonic Hot Embossing. Doctoral thesis."
8. KHUNTONTONG, P., T. BLASER and W. K. SCHOMBURG. *Ultrasonic Micro Hot Embossing of Polymers Exemplified by a Micro Thermal Flow Sensor. Integration Issues of Miniaturized Systems – MOMS, MOEMS, ICS and Electronic Components (SSI), 2008 2nd European Conference & Exhibition*.
9. KOLEW, A., D. MÜNCH, K. SIKORA and M. WORGULL. Hot Embossing of Micro and Sub-micro Structured Inserts for Polymer Replication. *Microsystem Technologies*. 2010, **17(4)**: 609–618.
10. KOLEW, A., M. HEILIG, K. SIKORA, M. D, and M. WORGULL. *Multi-component Hot Embossing of Micro- and nanosystems. Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP), 2011 Symposium*.
11. LAGOSKI, T. J., J. R. A. COUTU and L. A. STARMAN. *Retroreflector for Photonic Doppler Velocimetry*, 2009.
12. Li, Y., K. SHEN and J. ZHAN. Improving Rheological Property of Polymer Melt via Low Frequency Melt Vibration. *Journal of Applied Polymer Science*. 2006, **102(6)**: 5292–5296.
13. LIAO, S., C. GERHARDY, J. SACKMANN and W. K. SCHOMBURG. Tools for Ultrasonic Hot Embossing. *Microsystem Technologies*. 2014, **21(7)**: 1533–1541.

14. LIU, C., J. M. Li, J. S. LIU and L. D. WANG. Deformation Behavior of Solid Polymer During Hot Embossing Process. *Microelectronic Engineering*. 2010, **87**(2): 200–207.
15. LIU, S.-J. and Y.-T. DUNG. Hot Embossing Precise Structure onto Plastic Plates by Ultrasonic Vibration. *Polymer Engineering & Science*. 2005, **45**(7): 915–925.
16. MENA, B., O. MANERO and D. M. BINDING. Proceedings of the IUTAM Symposium on Non-Newtonian Fluid Mechanics Complex flow of Viscoelastic Fluids Through Oscillating Pipes. Interesting Effects and Applications. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1979, **5**: 427–448.
17. MOHAMMAD, M. A., M. MUHAMMAD, S. K. DEW and M. STEPANOVA. *Fundamentals of Electron Beam Exposure and Development. Nanofabrication: Techniques and Principles*. Vienna, Springer Vienna, 2012, 11–41.
18. NARIJAUSKAITE, B., A. PALEVICIUS, P. NARMONTAS, M. RAGULSKIS and G. JANUSAS. High-Frequency Excitation for Thermal Imprint of Microstructures Into a Polymer. *Experimental Techniques*. 2013, **37**(5): 41–47.
19. PARK, J. M., N. H. KIM, B.-K. LEE, K.-H. LEE and T. H. KWON. Nickel Stamp Fabrication and Hot Embossing for Mass-production of Micro/nano Combined Structures Using Anodic Aluminum Oxide. *Microsystem Technologies*. 2008, **14**(9): 1689–1694.
20. POPOV, E., E. GRATINGS. Theory and Numeric Applications, Popov, Institut Fresnel.
21. SACKMANN, J., K. BURLAGE, C. GERHARDY, B. MEMERING, S. LIAO and W. K. SCHOMBURG. "Review on Ultrasonic Fabrication of Polymer Micro Devices". *Ultrasonics*. 2015, **56**: 189–200.
22. TOLLKÖTTER, A., J. SACKMANN, T. BALDHOFF, W. K. SCHOMBURG and N. KOCKMANN. Ultrasonic Hot Embossed Polymer Microreactors for Optical Measurement of Chemical Reactions. *Chemical Engineering & Technology*. 2015, **38**(7): 1113–1121.
23. VELTEN, T., H. SCHUCK, W. HABERER and F. BAUERFELD. Investigations on Reel-to-reel Hot Embossing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009, **47**(1): 73–80.
24. WORGULL, M., M. HECKELE and W. K. SCHOMBURG. *Analyse des Mikro-Heißprägeverfahrens*, FZKA, 2003.
25. WORGULL, M., M. HECKELE and W. K. SCHOMBURG. Large-scale Hot Embossing. *Microsystem Technologies*. 2005, **12**(1): 110–115.

PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai *Web of Science* duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą Tarptautinėse pripažintose leidyklose

1. Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Palevičius, Arvydas; Čekas, Elingas; Jūrėnas, Vytautas; Sodah, Amer. Microstructures replication using high frequency excitation // *Microsystem technologies*. Berlin: Springer. ISSN 0946-7076. 2016, vol. 00, p. [1–13]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); SpringerLINK]. [IF: 0,875; AIF: 3,485; IF/AIF: 0,251; Q3; 2014 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,167]
2. Kosloh, Julia; Sackmann, Johannes; Šakalys, Rokas; Liao, Sijie; Gerhardy, Christof; Schomburg, Werner Karl. Heat generation and distribution in the ultrasonic hot embossing process // *Microsystem technologies*. Berlin: Springer. ISSN 0946-7076. 2016, vol. 00, p. [1–11]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); SpringerLINK]. [IF: 0,875; AIF: 3,485; IF/AIF: 0,251; Q3; 2014 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,167]
3. Palevičius, Arvydas; Janušas, Giedrius; Čekas, Elingas; Šakalys, Rokas. Analysis of the influence of high-frequency excitation into quality of the replicated microstructure // *Experimental techniques*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell. ISSN 0732-8818. 2015, vol. 39, iss. 00, p. [1–12]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science)]. [IF: 0,545; AIF: 1,482; IF/AIF: 0,368; Q3; 2014 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,250]
4. Narijauskaitė, Birutė; Palevičius, Arvydas; Gaidys, Rimvydas; Janušas, Giedrius; Šakalys, Rokas. Polycarbonate as an elasto-plastic material model for simulation of the microstructure hot imprint process // *Sensors*. Basel: MDPI AG. ISSN 1424-8220. 2013, vol. 13 issue 9, p. 11229–11242. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Academic Search Complete]. [IF: 2,048; AIF: 2,677; IF/AIF: 0,765; Q1; 2013 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,200]
5. Palevičius, Arvydas; Ponelytė, Sigitą; Guobienė, Asta; Prosyčėvas, Igoris; Puišo, Judita; Šakalys, Rokas. Design and fabrication of piezoelectric nanocomposite structures for microdevice applications // *Journal of micro/nanolithography, MEMS, and MOEMS*. Bellingham: SPIE. ISSN 1932-5150. 2013, vol. 12, iss. 4, art. no. 043004, p. [1–5]. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Compendex]. [IF: 1,205; AIF: 3,128; IF/AIF: 0,385; Q3; 2013 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,167]

6. Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Palevičius, Arvydas; Bendikienė, Regita; Palevičius, Ramutis. Microstructure replication using high frequency vibroactive pad // *Mechanika / Kauno technologijos universitetas, Lietuvos mokslų akademija, Vilniaus Gedimino technikos universitetas*. Kaunas: KTU. ISSN 1392-1207. 2015, vol. 21, no. 2, p. 134–140. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Compendex; Academic Search Complete; FLUIDEX; Scopus]. [IF: 0,292; AIF: 1,862; IF/AIF: 0,157; Q4; 2014 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,200]
7. Narijauskaitė, Birutė; Palevičius, Arvydas; Janušas, Giedrius; Šakalys, Rokas. Numerical investigation of dynamical properties of vibroactive pad during hot imprint process // *Journal of vibroengineering / Vibromechanika, Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University*. Kaunas: Vibroengineering. ISSN 1392-8716. 2013, vol. 15, no. 4, p. 1983–1990. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); INSPEC; Academic Search Complete; Central & Eastern European Academic Source (CEEAS); Computers & Applied Sciences Complete; Current Abstracts; TOC Premier]. [IF: 0,660; AIF: 2,255; IF/AIF: 0,293; Q3; 2013 Journal Citation Reports® Science Edition (Thomson Reuters, 2016)]. [Indėlis: 0,250]

**Web of Science duomenų bazės leidiniuose, neturintčiuose citavimo
indekso
Tarptautinėse pripažintose leidyklose**

1. Palevičius, Arvydas; Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Narmontas, Pranas. Investigation of dependency of microstructure quality on vibration mode // *Nanotechnology in the security systems : NATO advanced research workshop on nanotechnology in the security systems, Yalta, Ukraine, September 29 – October 03, 2013 / Edited by J. Bonča, J. Kruchinin*. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2015. (NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, ISSN 1874-6519), ISBN 9789401790048. p. 49–54. [Conference Proceedings Citation Index; SpringerLINK]. [Indėlis: 0,250]
2. Palevičius, Arvydas; Janušas, Giedrius; Čekas, Elingas; Šakalys, Rokas; Palevičiūtė, Ieva; Ramoška, Evaldas. Microstructures replication using high frequency excitation // *Proceedings of SPIE : Smart sensors, actuators and MEMS VII and Cyber Physical systems, Barcelona, Spain, May 4, 2015 [elektroninis išteklius] / Edited by José Luis Sánchez-Rojas; Riccardo Brama*. Bellingham, WA: SPIE. ISSN 0277-786X. 2015, vol. 9517, Article 951722, p. [1–9]. [Conference Proceedings Citation Index- Science]. [Indėlis: 0,167]
3. Janušas, Giedrius; Guobienė, Asta; Prosyčėvas, Igoris; Palevičius, Arvydas; Ponelytė, Sigita; Baltrušaitis, Valentinas; Šakalys, Rokas. Novel composite

piezoelectric material for energy harvesting applications // Proceedings of SPIE : Electroactive polymer actuators and devices (EAPAD) 2015, San Diego, California, US, March 08, 2015 [elektroninis išteklius]. Bellingham: SPIE. ISSN 0277-786X. 2015, vol. 9430, Article 943030, p. 1–6. [Conference Proceedings Citation Index-Science]. [Indėlis: 0,143]

**Straipsniai kitų tarptautinių duomenų bazių leidiniuose
(periodiniuose leidiniuose ir vienkartinuose straipsnių rinkiniuose
bei konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai)
Nacionalinėse leidyklose**

1. Janušas, Giedrius; Čekas, Elingas; Šakalys, Rokas; Palevičiūtė, Ieva; Ramoška, Evaldas. Experimental and modeling means for analysis and replication periodical microstructures // Journal of measurements in engineering / Lithuanian Academy of Sciences, Kaunas University of Technology, Vilnius Gediminas Technical University. Kaunas: Vibroengineering. ISSN 2335-2124. 2015, vol. 3, iss. 1, p. 23–34. [Inspec; Academic OneFile]. [Indėlis: 0,200]
2. Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Palevičius, Arvydas; Čekas, Elingas. Optical evaluation of periodical microstructure, replicated using ultrasonic hot imprint, according to process regimes // Vibroengineering procedia : international conference Vibroengineering - 2014, Katowice, Poland, 13–15 October, 2014. Kaunas: JVE International. ISSN 2345-0533. 2014, vol. 3, p. 204–208. [Compendex; Academic OneFile]. [Indėlis: 0,250]
3. Šakalys, Rokas; Palevičius, Arvydas; Janušas, Giedrius. Vibroactive pad improvement using stack type piezoactuator // Vibroengineering procedia : international conference Vibroengineering - 2013, Druskininkai, Lithuania, 17–19 September 2013. Kaunas: Vibroengineering. ISSN 2345-0533. 2013, vol. 2, p. 109–112. [Compendex; Scopus]. [Indėlis: 0,333]

**Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose paskelbti straipsniai
Konferencijų pranešimų medžiagoje paskelbti straipsniai
Tarptautinėse pripažintose leidyklose**

1. Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Palevičius, Arvydas. Quality analysis of periodical microstructures, created by using high frequency vibration excitation // International electronic conference on sensors and applications, 1–16 June, 2014 [elektroninis išteklius]. Basel: MDPI AG, 2014. p. 1–6. [Indėlis: 0,333]
2. Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Palevičius, Arvydas. Vibroactive pad for replication of microstructure and its experimental analysis // Mechanika 2014 : proceedings of the 19th international conference, 24, 25 April 2014, Kaunas

University of Technology, Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas: Technologija. ISSN 1822-2951. 2014, p. 225–227. [Indėlis: 0,333]

3. Narijauskaitė, Birutė; Palevičius, Arvydas; Janušas, Giedrius; Šakalys, Rokas. Numerical investigation of dynamical properties of vibroactive pad // Vibroengineering procedia : international conference Vibroengineering- 2013, Druskininkai, Lithuania, 17–19 September, 2013. Kaunas: Vibroengineering. ISSN 2345-0533. 2013, vol. 1, p. 15–18. [Indėlis: 0,250]

INFORMACIJA APIE AUTORIŲ

Gimė 1986 m. rugsėjo 25 d. Kaune.

Išsilavinimas

2006–2010 m. – Kauno technologijos universiteto Tarptautinių studijų centras, mechanikos inžinerijos bakalauro laipsnis.

2010–2012 m. – Kauno technologijos universiteto Tarptautinių studijų centras, pramonės inžinerijos magistro laipsnis.

2012–2016 m. – Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, mechanikos inžinerijos (09T) doktorantūros studijos.

Pedagoginis darbas

2016 m. iki dabar – Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto Mechanikos inžinerijos katedra, dėstytojas valandininkas, vėliau – lektorius.

El. paštas rokas.sakalys@ktu.lt

SUMMARY

The development of MEMS and MOEMS started with silicon etching and polymer processing (Finne and Klein 1967) (Nathanson, Newell et al. 1967) (Bartolini, Hannan et al. 1970). Nowadays, it is hard to imagine daily life without such systems; they are exploited in information processing, medicine, laser technologies, electronics, measurements, optics etc. In order to produce high-quality microsystems and improve the production process, it is necessary to enhance microstructure fabrication technologies. Sensitivity, reliability and high-definition are distinguished as the main quality requirements of advanced MEMS and MOEMS.

Classic microstructure fabrication technologies like etching, photolithography and electroplating today have become inefficient due to the long process and high expenses. Therefore, microstructure replication using thermal imprint is proposed as an alternative. However, the process presents some quality related issues, such as incompletely replicated microstructures and cracks. Previous studies have demonstrated that the application of high-frequency vibratory excitation during the process enhances the replicability of the microstructure (Narijauskaitė, Palevicius et al. 2013). On the other hand, there are no established relationships between process parameters and the quality of the replicated microstructure, and there is no developed technology which ensures the uniform effect of high-frequency excitation throughout the replicated microstructure. Considering the importance and demand of precise microsystems as well as the results of previous studies, it is worth to implement further investigations regarding the improvement of high-frequency-assisted thermal imprint process, since it creates preconditions for efficient replication of high-quality microstructures.

The aim of the dissertation: to investigate the influence of high-frequency vibratory excitation on the quality of microstructures replicated with thermal imprint technologies.

The objectives:

1. To select the methods, equipment and materials enabling to design, fabricate and replicate microstructures by using high-frequency-assisted thermal imprint technologies.
2. To develop a master microstructure for the replication on polymer by using high-frequency-assisted thermal imprint technologies.
3. To develop the microstructure replication technology which operates on the basis of high-frequency vibrations and ensures high replicability and uniformity of the replicated microstructures.

4. To characterize microstructures replicated by applying imprint technologies with the assistance of high-frequency vibrations.

Defended statements

1. The topologically complex master microstructure developed using the CGH technology is effectively applicable in the process of microstructure replication.
2. The technology developed for microstructure replication increases microstructure replicability under lower temperature than polymer glass transition.
3. The technology developed for microstructure replication results in increased microstructure replicability independently of changes in thermal imprint pressure.
4. The application of pre-structured foils in the process of UHE enables to minimize the process duration and imprint force parameters, and enhances the quality of the replicated microstructures.

GENERAL CONCLUSIONS

1. CGH technology was selected to design a topologically complex master microstructure. The technology of EBL is the most applicable method to rapidly fabricate precise microstructures. In order to replicate microstructures with high-precision and low-cost, high-frequency-assisted thermal imprint and UHE technologies are the most suitable.
2. During the process of EBL, the pixels were divided into portions. This allowed avoiding rounded corners and pixels overlapping, thereby improving the fidelity of the fabricated image. The study of diffraction efficiency demonstrates that the applied measures result in 58 % diffraction efficiency value, what is by 29 % more when compared to the initial trials.
3. Pre-structured pyramids in the second upper third of the stack during the UHE process result in the largest set of appropriate process parameters. This foil orientation reduces temporal and force parameters (0.2 s and 300 N) and produces the highest mean RDE of the embossed periodical microstructure (8.6 %).

Device designs which vibrate with uniform displacement fields over the operating surface have been developed, numerically simulated, fabricated and experimentally analysed. Pre-stressing the VAP-1 increases the operating frequency by 11.5 % when compared to the unstressed device. The operating frequency of the pre-stressed VAP-2 increases by 15.7 %. VAP-2 vibrates with 2.47 times higher lateral amplitudes (0.03 μm) when compared to VAP-1 (0.01 μm).

4. The application of VAP-1 and ramp waveform vibrations (at the imprint temperature of 148 °C) in thermal imprint leads to a mean RDE of 31.68 % and a profile depth of 470.8 nm. The application of VAP-1 and sine waveform (at the temperature of 148 °C) results in RDE of 31.56 % and the profile depth of 464.9 nm. In addition, microstructures replicated by applying the aforementioned parameters are characterised by low sensitivity to changes in pressure. This validates the applicability of this technology when high pressure is not recommended.

UDK 678.02+534.232+004.932](043.3)

SL344. 2017-03-20 2,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 50 egz.

Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas