

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
VYTAUTO DIDŽIOJO UNIVERSITETO

AMER SODAH

**MIKROELEKTROMECHANINIO JUTIKLIO ŽMOGAUS  
SVEIKATINIMO MONITORINGUI KŪRIMAS IR TYRIMAS**

Daktaro disertacijos santrauka  
Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija (T\_009)

2020, Kaunas

Disertacija rengta 2015–2019 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete.

**Mokslinis vadovas:**

Prof. habil. dr. Arvydas PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija – T009).

**Redagavo:** (leidykla „Technologija“)

**Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:**

Prof. Habil. dr. Vytautas OSTAŠEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija T 009). – pirmininkas;

Habil. dr. Algimantas BUBULIS (Kauno technologijos universitetas, Technologijos mokslai, Mechanikos inžinerija T 009);

Prof. Habil. dr. Genadijus KULVIETIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Technologiniai mokslai, Mechanikos inžinerija T 009);

Prof. Dr. Sergei KRUCHININ (Ukrainos Bogoliubov teorinės fizikos institutas, Ukraina, gamtos mokslai, fizika – N 002);

Disertacija bus ginama viešame mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2020 m. birželio 19 d. 10:00 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](mailto:doktorantura@ktu.lt).

Disertacijos santrauka išsiųsta 2020 m. gegužės 19 d. Su disertacija galima susipažinti internete (<http://ktu.edu>), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, Kaunas) ir Vytauto Didžiojo universiteto Žemės ūkio akademijos (Studentų g. 11, Akademija, Kauno raj.) bibliotekos.

## IVADAS

### Problematika

Kasdieninis žmonių gyvenimas šiandien neįsivaizduojamas be produktų, sukurtų taikant mikro- ir nanotechnologijas, kurios padeda išspręsti daugelį problemų medicinos, mechatronikos, energijos gamybos, maisto pramonės, ekologijos ir kitose pramonės šakose. Tobulėjant aukštosioms technologijoms, naujų mikroelektromechaninių (MEMS) ir mikrooptoelektromechaninių (MOEMS) sistemų, jų struktūrinių (integruotų) elementų ir naujų medžiagų su išskirtinėmis savybėmis poreikis sparčiai didėja [1–5].

Šiuo metu vienas iš sunkiausių uždavinių inžinerijoje – pagerinti mikrosistemose naudojamų aktyviųjų optinių elementų (dvimatės periodinės mikrostruktūros) jautrumą, jų optines ir mechanines savybes, paviršiaus morfologiją, taip pat pritaikyti juos aktualiausiems medicininiams tyrimams, biochemijai, maisto ir žemės ūkio pramonei, fermentacijos proceso kontrolei bei aplinkos parametrų tyrimams.

MOEMS ir jų funkcinių elementų panaudojimas tikralaikiškai informacijai apie žmonių sveikatos būklę kaupti ir apdoroti yra viena iš svarbiausių ir įdomiausių taikymo sričių. Naudojant tokias mikrosistemas žmonių sveikatos būklei stebėti, yra galimybė išvengti netikėtų negalavimų atvejų ir anksčiau pradėti efektyvų ligų gydymą ar profilaktiką [6–11].

Dinaminės vizualiosios kriptografijos metodas ir jos algoritminis realizavimas pasiūlytas 2009 metais A. Aleksos ir M. Ragulskio. Žinomos pastaruoju metu kuriamos vizualiosios kriptografijos sveikatos monitoringo sistemos yra naudojamos pacientų regos sistemų diagnostikai [12]. Šio tipo vizualiosios kriptografijos sistemos apima tokius kompleksinius klausimus kaip laike vidurkintų muaro interferencinių juostų susidarymas. Specialūs kodavimo algoritmai naudojami įterpti slaptam vaizdui į stochastinę muaro gardelę, tačiau informacijos dekodavimui kompiuterio nereikia – slaptas vaizdas pasimato tada, kai užkoduotas vaizdas yra virpinamas pagal tam tikrą nustatytą dėsnį. Darbai dinaminės vizualiosios kriptografijos srityje glaudžiai susiję su laike vidurkintomis optinių metodų realizacijomis. Šios realizacijos išnaudojamos konstruojant eksperimentinius optinius muaro įrenginius dinaminei vizualiajai kriptografijai įgyvendinti.

Tačiau norint užtikrinti tokių sistemų didesnę funkcionalumą būtina kurti naujo tipo optinius elementus su mikrostruktūromis, kurios užtikrintų aukštesnę kriptografinį lygmenį. Vienu iš tokių optinių elementų, galinčių pakeisti ganėtinai nesudėtingą muaro gardelę, galėtų būti remiantis koherentinės optikos principais skaitmeninės realizacijos keliu sugeneruota optinė struktūra. Tokia skaitmeninė realizacija galėtų remtis skaitmeninės holografijos principais, kurie leistų

suformuoti gardeles pagal iš anksto nustatytą sudėtingumo lygmenį. Kompiuteriu sugeneruota skaitmeninė holograma taikant technologijas pervedama į fizinę laikmeną ir po atitinkamų mikrolitografinių operacijų gali būti naudojama kaip mikrooptinis elementas vizualiosios kriptografijos monitoringo sistemose. Tokiu principu pagaminto elemento savikaina ir laiko sąnaudos yra nemažos, todėl tikslinga sugeneruotą optinę struktūrą replikuoti polimerinėje medžiagoje. Egzistuojančios mikrostruktūrų replikavimo technologijos neužtikrina didelio difrakcinio efektyvumo, būtino pritaikant jas vizualiosios kriptografijos sistemose, todėl aktualu tobulinti esamas ir kurti naujas mikrostruktūrų replikavimo ir formavimo technologijas, kurios užtikrintų didelį skaitmeninės holografijos metodais sugeneruotų mikroreljefų struktūros atkartojamumą visame naudojamame elemento plote. Todėl technologijos, kurios leistų įgyvendinti tokį technologinį uždavinį ir yra pagrindinis šios disertacijos tikslas.

**Darbo tikslas** – sukurti vibracinio terminio spaudimo technologiją ir ją taikyti kuriant polimerinius mikrooptinius elementus, skirtus žmogaus sveikatinimo monitoringui sistemoje, veikiančioje vizualiosios kriptografijos principu.

Tikslui pasiekti suformuluoti šie uždaviniai:

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę siekiant įvertinti esamus tyrimus šioje mokslo srities problematikoje.
2. Ištirti vibracinio terminio spaudimo metu dinaminio poveikio įtaką naudojamoms polimerinės medžiagos spaudimo metu besiformuojančiam tos medžiagos paviršiuje plastinių deformacijų lauko pasiskirstymui.
3. Sukurti vibracinį įtaisą su įdiegta aukštojo dažnio terminio spaudimo technologija ir suformuoti polimere mikrostruktūras su tolygiu ir dideliu difrakciniu efektyvumu visame spaudimo plote.
4. Sukurti optinio elemento funkcinį prototipą sveikatos monitoringo sistemai, realizuotai vizualiosios dinaminės kriptografijos principu.

### **Tyrimo metodai**

Periodinėms mikrostruktūroms modeliuoti buvo pasitelktas *GSolver* programų paketas, o pagamintų struktūrų kokybė tirta atominės jėgos mikroskopu NANOTOP-206 ir lazeriniu difraktometru.

Sukurto sonotrodo, atliekančio virpesių šaltinio funkciją, dinaminės savybės buvo tiriamos lazeriniu dopleriniu vibrometru *Polytec*. Sukurto sonotrodo modeliavimas baigtinių elementų metodu atliktas naudojant *Comsol Multiphysics* programų paketą.

Kompiuteriu generuotos hologramos, naudojamos vizualiosios kriptografijos įrenginyje, buvo sugeneruotos *Matlab* programų paketu, o fizinių hologramų gamybai pritaikyta *Raith e-LiNEplus* elektronų pluošto litografinė sistema.

## **Ginamieji teiginiai**

1. Naudojant vibracinį terminio spaudimo įtaisą, veikiantį formuojamo paviršiaus normalės kryptimi, polimero plastinių deformacijų laukas koncentruojasi jo paviršiuje.

2. Vibracinio terminio spaudimo technologija taikant formuojamo paviršiaus normalės kryptimi aukštojo dažnio virpesius paviršiuje suformuoja polimerines mikrostruktūras su tolygiu ir dideliu difrakciniu efektyvumu visame jo spaudimo plote.

## **Mokslinis naujumas**

1. Sukurtas polimero elgsenos terminio spaudimo metu matematinis modelis, leidžiantis ištirti virpesių ir temperatūros įtaką polimero paviršiaus deformacijų koncentracijoms.

2. Sukurtas vibracinio terminio spaudimo įrenginio – sonotrodo – matematinis modelis, leidžiantis ištirti multifizikinių parametrų įtaką užtikrinant šio įrenginio funkcionalumą.

3. Sukurti eksperimentinio tyrimo metodai ir standai, leidžiantys įvertinti mikrostruktūrų kokybę, užtikrinant koherentinės optikos principų taikymą kuriamuose optiniuose elementuose.

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

5. Sukurta technologija, apimanti skaitmeninės holografijos ir vizualiosios kriptografijos metodų sinergiją pritaikant ją kūrimui optinių elementų, naudojamų vizualiosios kriptografijos žmogaus sveikatos monitoringo sistemose.

## **Praktinė darbo vertė**

Šiame darbe sukurtas vibracinio terminio spaudimo įtaisas gali būti panaudojamas standartiniuose tempimo bei gniuždymo įrenginiuose, o jo spaudimu formuojamas plotas ir reljefas gali būti modifikuojamas nustatant išankstines spaudimo charakteristikas.

Vibracinio terminio spaudimo technologija gali būti taikoma ne tik formuoti vienetiniams optiniams elementams, bet ir antrinti mikroperiodinėms struktūroms bei sumažinti dėl masinės gamybos tokių optinių elementų kainai.

Naudojant sukurtus optinius elementus, kurių gamyba paremta skaitmeninės holografijos ir vizualiosios kriptografijos principais, galima juos pritaikyti ne tik sveikatinimo monitoringo sistemose, bet ir kitose kriptografinėse sistemose, kurioms aktualus aukštas duomenų kodavimo saugumo lygis.

## **Disertacijos apimtis ir struktūra**

Disertaciją sudaro įvadas, 4 skyriai su išvadomis, bendrosios išvados, literatūros sąrašas, susidedantis iš 13 šaltinių, ir autoriaus publikacijų sąrašas. Darbą sudaro 33 puslapiai. Jame pateikti 23 paveikslai IR 2 lentelės.

## **Disertacijos aprobavimas**

Tyrimai atlikti Kauno technologijos universiteto Medžiagų mokslo institute, Mechatronikos institute, Mechanikos inžinerijos katedroje. Rezultatai gauti atliekant LMT mokslo grupių projektą „Mikromechaninių periodinių sistemų žmogaus sveikatinimo diagnostikai kūrimas ir tyrimas“, projekto numeris: MIP-026/2014, laikotarpis 2014–2016 m.

Taip pat autorius dirbo ir dirba kaip jaunesnysis mokslo darbuotojas įgyvendinant LMT mokslo grupių projektą „Inovatyvių funkcinių nano/mikro elementų biomedicininiais mikrohidrauliniais įrenginiais kūrimas ir tyrimas“, projekto numeris MIP-17-102, laikotarpis 2017–2020 m.

Disertacijos tyrimai buvo pristatyti 4 tarptautinėse konferencijose. Paskelbti 7 moksliniai straipsniai, iš jų: 3 straipsniai – ISI duomenų bazės leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą, taip pat 3 straipsniai – ISI duomenų bazės leidiniuose, neturinčiuose citavimo indekso, 2 straipsniai – kituose leidiniuose.

## **1. LITERATŪROS APŽVALGA**

Siekiant suformuluoti disertacinio darbo pagrindinį tikslą bei uždavinius jam pasiekti darbe buvo atlikta vėliausių mokslinių publikacijų analizė, apimanti terminio spaudimo metodų analizę. Tokia terminio spaudimo proceso analizė atlikta taikant baigtinių elementų metodą bei sukurtus matematinius modelius. Nagrinėtos optinių mikrostruktūrų difrakcinio efektyvumo matavimo metodų taikymo galimybės įvertinant jų efektyvumą. Aptartos sonotrodų panaudojimo galimybės ir patirties analizė naudojant juos terminiam spaudimui ir antrinimui. Išanalizuoti teoriniai vizualiųjų kriptografinių sistemų kūrimo algoritmai ir galimybė juos panaudoti žmogaus sveikatinimo sistemose. Todėl atlikus su disertacijos tematika susijusių mokslinių publikacijų analizę formuluojamas disertacijos darbo tikslas ir uždaviniai.

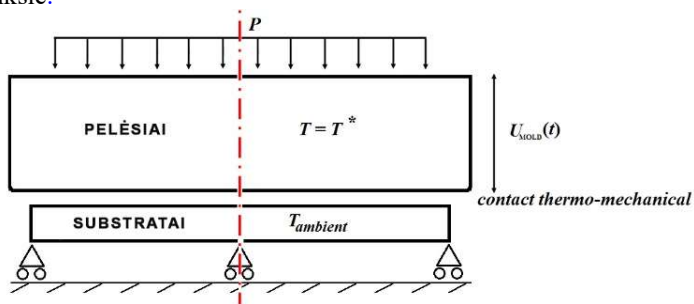
## **2. NORMALIŲJŲ VIRPESIŲ ĮTAKOS POLIMERO PLASTINĖMS DEFORMACIJOMS TERMINIO SPAUDIMO PROCESĖ TYRIMAS**

Terminio spaudimo procesas taikomas mikrostruktūroms polimerų paviršiuje antrinti. Vibracinis proceso sužadinimas intensyviu pakaitinto polimero

srautu taikomas kaip papildoma priemonė siekiant pagerinti mikrostruktūros atkartojamumą. Antra vertus, polimero elgsena virpesių metu nėra pakankamai iširta. Šiame darbe mikrostruktūros antrinimas taikant vibracinį terminį spaudimą yra modeliuojamas ir imituojamas *Comsol Multiphysics* programine įranga; taip siekiama geriau suprasti antrinimo proceso ypatumus ir šitaip patobulinti procesą. Procesas analizuojamas įvairiais aspektais: spaudimo gylio, slėgis, traukos jėgos, temperatūros lauko priklausomybės nuo proceso trukmės, taip pat nagrinėjamos plastinės polimero deformacijos ir von Mises įtempiai po proceso. Teorinis tyrimas tikrinamas eksperimentiškai. Tyrimai parodė, kad taikant vibracinį sužadinimą proceso metu gaunamas didesnis išpausto profilio gylis lyginant su mėginiais, išpaustais identiškomis proceso sąlygomis.

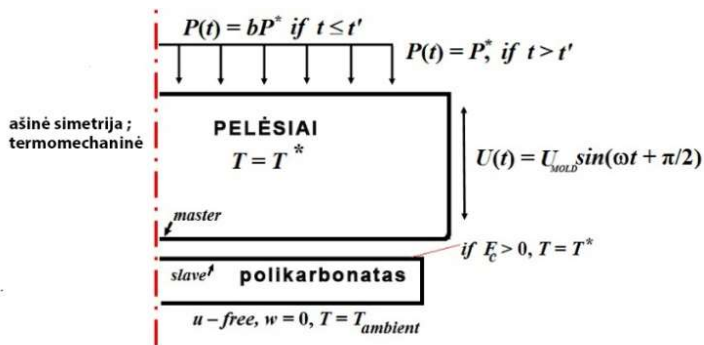
### 2.1. Terminio spaudimo procesas

Jis analizuojamas dviem aspektais: be vibracinio sužadinimo ir su harmoniniu spaudo sužadinimu  $U_{sp}(t)$ . Modelio skaičiuojamoji schema pateikta 2.1 paveiksle.



**2.1 pav.** Skaičiuojamoji schema ( $P$  – fiksuotas darbinis slėgis;  $U_{sp}(t)$  – kinematinis spaudo sužadinimas;  $t$  – laikas;  $T^*$  – proceso temperatūra)

Proceso modeliavimas apima du susietus modelius: šiluminę analizę taikant šilumos perdavimą ir mechaninę analizę naudojant plokščius struktūrinius mechanizmus. Polikarbonato storis ir plotis yra atitinkamai 2 mm ir 11 mm. Dvimačio (2-D) terminio spaudimo matematinio modelio kraštinės sąlygos pateiktos 2.2 paveiksle.



**2.2 pav.** Terminio spaudimo proceso kraštinės sąlygos ( $P$  – slėgis;  $U_{sp}$  – harmoninio sužadavimo amplitudė;  $T^*$  – spaudimo proceso temperatūra;  $P^*$  – maksimalus slėgis;  $T_{apl}$  – aplinkos temperatūra;  $b$  – parametras;  $a$  – amplitudė,  $t$  – laikas;  $\omega$  – sužadavimo dažnis;  $F_c$  – kontaktinė jėga;  $t'$  – laikas, kai pasiekiamas darbinis slėgis)

Polimero apačioje yra nuliniai vertikalios krypties ir laisvi horizontalios krypties poslinkiai. Polimero apačia yra fiksuota per visą paviršių vertikalaus poslinkio atžvilgiu ir gali laisvai judėti tik horizontalaus poslinkio atžvilgiu. Tokios ribinės sąlygos parenkamos tam, kad polikarbonato elgsena būtų apibūdinta tinkamiausiai. Polikarbonato ir spaudo pradinė temperatūra yra 293 K. Liejimo temperatūra  $T = f(T; t)$  apibrėžiama kaip spaudo temperatūros  $T$  (K) priklausomybės nuo laiko  $t$  funkcija. Modelyje taikomas deformuojančiojo ir deformuojamojo kontakto tipas. Polikarbonatas laikomas deformuojamuoju, o spaudas – deformuojančiuoju kontaktu. Modelis yra dvimatis (2-D), todėl kontaktinių kraštų porose yra nustatomos kontaktinės kraštinės sąlygos.

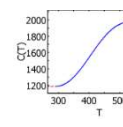
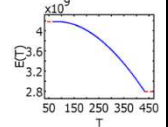
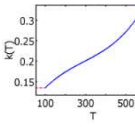
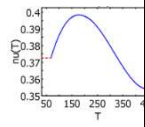
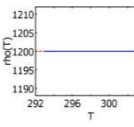
Polikarbonato elgsena modeliavimo metu buvo analizuojama be mikrostruktūros ir spaudžiant stačiakampį šablona, nes siekiama parodyti plastinių deformacijų zonas ir jų pasiskirstymą lyginant įprastinio terminio spaudimo ir vibracinio terminio spaudimo procesus.

## 2.2. Medžiagų savybės

Polikarbonato ir spaudo medžiagų savybės pateiktos 2.1 lentelėje. Spaudas pagamintas iš nikelio ir laikomas izotropiniu bei elastiniu. Polikarbonatas yra substrato medžiaga; tai amorfinis polimeras, kurio stiklėjimo temperatūra lygi maždaug 423 K. *COMSOL Multiphysics* medžiagų bibliotekos pateiktų grafikų rinkinys apibūdina polikarbonato parametrus temperatūros atžvilgiu.



2.1 lentelė. Nikelio ir polikarbonato medžiagų savybės

Medžiaga	Šilumos talpa, J/kg·K	Elastinis modulis, GPa	Šilumos laidumas, W/m·K	Puasono koeficientas	Tankis, kg/m <sup>3</sup>
Nikelis	445	200	90,9	0,31	$8,908 \times 10^3$
Polikarbonatas					

Terminio spaudimo proceso imitavimas su susieta termomechanine analize apima šilumos perdavimą, struktūrinę mechaniką ir termomechaninę kontaktinę analizę. Atsižvelgiama į šiuos medžiagų parametrus: šilumos laidumą ( $k$ ), tankį ( $\rho$ ), šilumos talpumą ( $c_p$ ), Jungo modulį ( $E$ ), Puasono santykį ( $\nu$ ) ir šiluminio plėtimosi koeficientą ( $\alpha$ ), kuris apibrėžiamas kaip temperatūros funkcija.

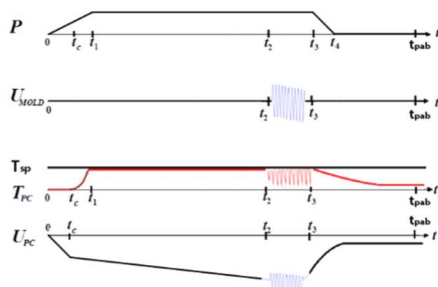
Medžiagų mechaninės savybės ir medžiagų elgsena terminio spaudimo proceso metu yra labai svarbūs nustatant optimalias proceso sąlygas tam, kad būtų galima atkartoti defektų neturinčias mikrostruktūras. Tikslus kritinių medžiagų parametrų nustatymas žemiau arba aukščiau nei  $T_g$  yra laikomas esminiu reikalavimu modeliuojant. Didelių įtempių deformacijai apibūdinti naudojamos elastingės–plastinės medžiagos.

2.3 paveiksle pavaizduota terminio spaudimo pereinamojo proceso, kuris įgyvendinamas baigtinių elementų modeliavimu, schema. Aptariami šie laiko taškai:

- $t_c$  – kontaktas tarp spaudo ir polikarbonato;
- $t_1$  – pasiekiamas spaudimo slėgis;
- $t_2$  – įjungtas vibracinis sužadinimas;
- $t_3$  – išjungtas vibracinis sužadinimas;
- $t_4$  – spaudas yra atitrauktas;
- $t_{\text{pab}}$  – procesas baigtas.

Modelyje technologinis procesas (2.3 pav.) susideda iš penkių laiko intervalų:

- pirmasis intervalas ( $0; t_1$ ) – pasiekiamas darbinis slėgis  $P = 0$  iki  $P = P^*$ ;
- antrasis intervalas ( $t_1; t_2$ ) – slėgis  $P = P^* = \text{const}$ ;
- trečiasis intervalas ( $t_2; t_3$ ) – slėgis yra pastovus  $P = P^*$ , su vertikaliu harmoniniu sužadinimu, kurio amplitudė  $U_{\text{sp}}$  ir dažnis  $\omega$ ;
- ketvirtasis intervalas ( $t_3; t_4$ ) – spaudas atkeliamas;
- penktasis intervalas ( $t_4; t_{\text{pab}}$ ) – polikarbonatas ataušinamas ir procesas baigiamas.



**2.3 pav.** Terminio spaudimo proceso parametrai technologinio proceso metu ( $P$  – slėgis;  $U_{sp}$  – spaudo poslinkis dėl vibracijų;  $U_{PC}$  – polikarbonato poslinkis;  $T_{sp}$  – spaudo temperatūra;  $T_{PC}$  – polikarbonato temperatūra;  $t$  – laikas)

Slėgis apibūdinamas funkcija:

$$P(t) = \begin{cases} bP^*, & t \leq t_1; \\ P^*, & t > t_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

čia:  $b$  – parametras;  $P^*$  – darbinis slėgis.

Spaudo temperatūra viso proceso metu visuose kontaktiniuose taškuose yra  $T^*$ . Pradedant nuo  $t = 0$  iki  $t_c$  (spaudo ir polikarbonato sąlyčio pradžia),  $P(t)$  didėja tiesiškai. Po  $t_c$  polikarbonatas yra pašildomas iki  $t_1$ , jis pasiekia temperatūrą  $T^*$ . Slėgis išlaikomas pastovus nuo įspaudimo fazės  $t_1$  iki  $t_2$  pradžios – spaudas yra įspaudžiamas į polikarbonatą. Vibracinis sužadimas taikomas nuo  $t_2$  iki  $t_3$  – spaudo poslinkis tampa harmoninis. Laiko intervale nuo  $t_2$  iki  $t_3$  įjungiamas vibracinis sužadimas ir spaudas nėra nuolatiniame kontakte su polikarbonatu, todėl vyksta temperatūriniai mikrosvyravimai. Atkėlimas vyksta nuo  $t_3$  iki  $t_4$ , spaudas yra atitraukiamas, taip užbaigiant spaudimo procesą. Laikotarpis nuo  $t_4$  iki  $t_{pab}$  apibūdina polikarbonato aušinimą ir atsistatymą.

### 2.3. Matematinis modelis

Sukurtas visiškai sujungtas terminio spaudimo proceso termomechaninis baigtinių elementų modelis. Įgyvendintas nuo laiko priklausantis šiluminis modelis. Modelio įvestys: medžiagos savybės, temperatūra, spaudo slėgis, virpesių dažnis, amplitudė ir kiekvieno proceso etapo trukmė. Modelio išvestys yra svarbiausios deformuojamojo kūno temperatūrinės bei kietumo savybės laiko atžvilgiu ir jų pasiskirstymas per šampavimo proceso etapus.

Pasiūlyta baigtinių elementų analizė, susijusi su terminiškai sujungtų šiluminių termomechaninių kontaktų sąveikos perdavimo dinamika.

Šiluma išsiskiria esant kietosios būsenos fazių transformacijai, todėl turi įtakos šiluminiam laukui. Tiek mechaninės, tiek šiluminės savybės kinta atsižvelgiant į temperatūrą ir deformaciją.

Taikant pusiausvyros ir perdavimo dėsnius lauko lygtis galima išvesti iš temperatūros  $T$ , poslinkio  $u_{PC}$  ir Navier lygčių:

$$G \nabla \nabla 2u - \frac{1}{PC} (G + 3K) \varepsilon = K \alpha T \quad (2.2)$$

Šilumos perdavimas atlieka svarbų vaidmenį spaudimo procese. Šilumos perdavimo per laidumą matematinis modelis išreiškiamas šilumos lygtimi:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla (k \nabla T) = 0 \quad (2.3)$$

Pirmiau pateiktose lygtyse  $u_{PC}$  yra substrato poslinkio vektorius,  $\varepsilon$  – bendras deformacijos tenzorius,  $T$  – temperatūra,  $G$  – šlyties modulis,  $K$  – masės modulis,  $\alpha$  – šiluminio plėtimosi koeficientas,  $k$  – šilumos laidumas,  $\rho$  – tankis,  $c_p$  – šiluminė talpa. Šilumos perdavimas apskaičiuojamas atskirai, nes dėl temperatūros lauko įtempis reikšmingai nekinta.

Polikarbonato spaudimas apibrėžiamas lygtimi:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F(t) ; \quad (2.4)$$

čia:  $M$  – masės matrica;  $C$  – slopinimo matrica;  $K$  – standumo matrica bei vektorius  $\{F\}$  apibrėžia kontaktinę jėgą:

$$\{F(t)\} = \begin{cases} \{0\}, & \text{if } u_{MOLD}^i < u_{PC}^i \text{ or } \dot{u}_{MOLD}^i < 0 \\ \{P_{CONT}(\dot{u}_{PC}^i, u_{PC}^i, t)\} & \text{if } u_{MOLD}^i \geq u_{PC}^i \text{ and } \dot{u}_{MOLD}^i \geq 0 \end{cases} ; \quad (2.5)$$

čia:  $\{P_{CONT}(\dot{u}_{PC}^i, u_{PC}^i, t)\}$  – netiesinio kontakto vektorius:

$$P_{CONT} = (k_{CONT} \cdot \dot{u}_{PC}^i)^2 + c_{CONT} \cdot \dot{u}_{PC}^i ; \quad (2.6)$$

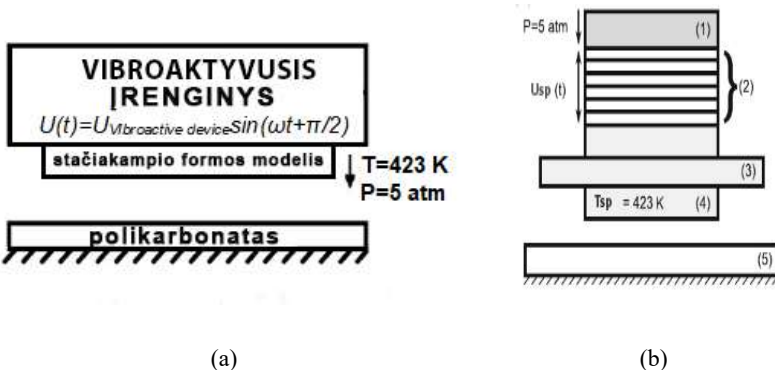
čia:  $u_{MOLD}^i$  ir  $\dot{u}_{MOLD}^i$  – vertikalūs spaudo poslinkis ir greitis laiko momentu  $t$ ,  $u_{PC}^i$  ir  $\dot{u}_{PC}^i$  – polikarbonato vertikalūs poslinkis ir greitis laiko momentu  $t$ ,  $k_{CONT}$  ir  $c_{CONT}$  – kontaktinio elemento standumo ir slopinimo koeficientai,  $i$  – indeksai, žymintys kraštinius mazgus, kurie yra kontakte.

Kontaktinis modelis įtraukiamas į šiluminio spaudimo proceso FE modelį ir aprašo kontaktines jėgas, kurios veikia taškus, esančius polikarbonato kraštuose. Trinties koeficientas tarp spaudo ir polikarbonato parenkamas pagal literatūrą, tai yra nuo temperatūros priklausantis koeficientas (Ferreira ir kt., 2001). Todėl trinties koeficiento vertė šiame darbe buvo nustatyta pagal temperatūrą.

Šiluminio spaudimo procesas yra modifikuojamas keičiant spaudimo trukmę (10 s ir 20 s), taip pat spaudimo pobūdį (pastovus spaudimas ir spaudimas taikant kinematinį spaudo sužadinimą). Virpesių amplitudė yra 1 μm, o dažnis – 600 Hz. Temperatūrinis polikarbonato procesas dar nėra pastovus 10 s spaudimo laiko momentu, jis nusistovi 20 s laiko momentu.

## 2.4. Eksperimentinio matematinio modelio tyrimo metodika

Siekiant patikrinti modelį, buvo atlikti vibracinio terminio spaudimo eksperimentai. Eksperimentiniuose tyrimuose naudojamas vibroaktyvusis įrenginys (2.4 pav., (b)), kurio darbinis dažnis – 600 Hz ir amplitudė – 1 μm.



**2.4 pav.** Terminis spaudimas taikant aukštojo dažnio vibracinį sužadinimą (a) ir vibroaktyvusis įrenginys (b)

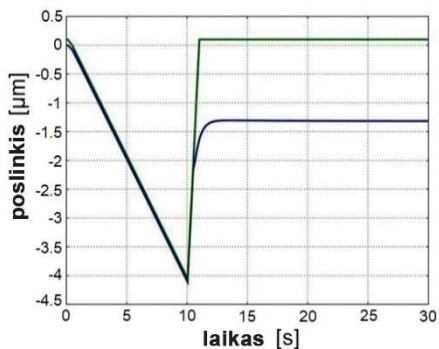
Terminio spaudimo procesas (4 pav., (a)) prasideda aplinkos temperatūroje, vėliau spaudas yra kaitinamas iki polimero lydymosi temperatūros ir įspaudžiamas į substratą. Įspaudimo slėgis taikomas nuo 10 s iki 20 s laikotarpiu, po to 0,05 s taikomi virpesiai. Galiausiai spaudas ir polimeras yra aušinami ir spaudas atkeliamas. Eksperimentiniai duomenys pateikti 2.2 lentelėje.

**2.2 lentelė.** Eksperimentinė matrica

Atspaudo trukmė, s	Vibracinio sužadavimo trukmė, s	Atspaudos temperatūra, K	Atspaudų slėgis, atm
10	–	423	5
10,05	0,05	423	5
20	–	423	5
20,05	0,05	423	5

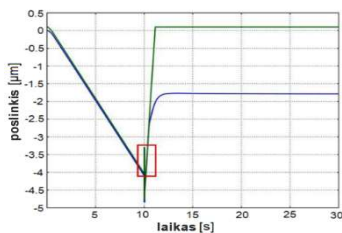
### 2.4.1. Rezultatai

2.5–2.8 pav. parodytas spaudo poslinkis ir polimero atsistatymas spaudą atitraukus. 10 s trukmės terminis spaudimas be vibracinio sužadavimo (2.5 pav.) leidžia gauti 1,3  $\mu\text{m}$  gylį.

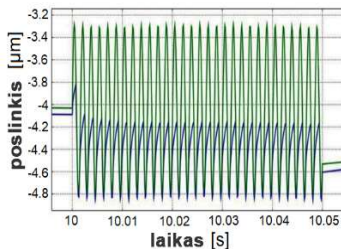


2.5 pav. Spaudos poslinkio priklausomybė nuo laiko: spaudimo trukmė  $t_2 = 10$  s, dažnis  $\omega = 0$  Hz (žalia – spaudas, mėlyna – polikarbonatas)

2.6 paveiksle pateikiamas terminis spaudimas (trukmė – 10 s) esant vibraciniam sužadavimui (trukmė – 0,05 s). Vibracinis sužadavimas leidžia pasiekti 1,75  $\mu\text{m}$  gylį. Vibracinio sužadavimo taikymas padidina profilio gylį (0,45  $\mu\text{m}$ ).



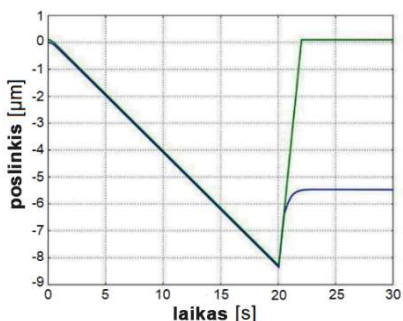
(a)



(b)

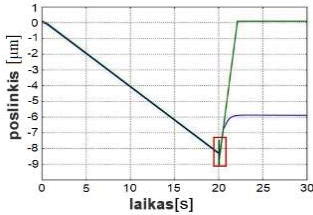
**2.6 pav.** Spaudu poslinkio priklausomybė nuo laiko: spaudimo trukmė  $t_2 = 10$  s, dažnis  $\omega = 600$  Hz (žalia – spaudas, mėlyna – polikarbonatas). Procesas vyksta nuo 0 s iki 30 s (a) ir vibracinio sužadavimo taikymo intervalas – nuo 10 s iki 10,05 s (b)

2.7 paveiksle pateikiamas terminis spaudimas, kurio trukmė yra 20 s, be vibracinio sužadavimo. Atkėlus spaudą gylis  $5,4 \mu\text{m}$ . Proceso trukmės pailgėjimas turi įtakos didesniams profilio gyliui ( $4,1 \mu\text{m}$ ), kai stebimas procesas be vibracinio sužadavimo.

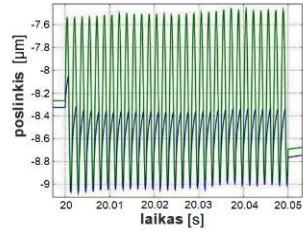


**2.7 pav.** Spaudu poslinkio priklausomybė nuo laiko: spaudimo trukmė  $t_2$ , dažnis  $\omega = 0$  Hz (žalia – spaudas, mėlyna – polikarbonatas)

Didžiausias profilio gylis stebimas atliekant 20 s trukmės terminį spaudimą su vibraciniu sužadimu (2.8 pav.). Šiuo atveju profilio gylis yra  $5,9 \mu\text{m}$ , arba  $0,5 \mu\text{m}$  didesnis lyginant su tokios pat trukmės procesu be vibracinio sužadavimo.



(a)



(b)

**2.8 pav.** Spaudo poslinkio priklausomybė nuo laiko: spaudimo trukmė  $t_2 = 20$  s, dažnis  $\omega = 600$  Hz (žalia – spaudas, mėlyna – polikarbonatas). Procesas vyksta nuo 0 s iki 30 s (a) ir vibracinio sužadavimo taikymo intervalas – nuo 20 s iki 20,05 s (b)

Rezultatai rodo, kad vibracinio sužadavimo taikymas padidina profilio gylį  $0,45 \mu\text{m}$  ir  $0,5 \mu\text{m}$ , kai proceso trukmė yra atitinkamai 10 s ir 20 s.

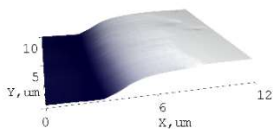
Toliau analizuojama slėgio ir traukos jėgos priklausomybė nuo laiko. Nustatyta, kad proceso trukmės pailgėjimas 10 s padidina slėgį  $0,1$  atm (iki  $5,2$  atm), todėl galima teigti, kad po 10 s procesas tampa nusistovėjęs. Tačiau traukos jėga po 10 s trukmės proceso yra beveik 10 kartų didesnė ( $5,1$  atm), lyginant su procesu po 20 s. Tai galima paaiškinti skirtingais polikarbonato temperatūriniais laukais, kurie susidaro skirtingais proceso laiko momentais. Darbe parodyta temperatūros priklausomybė nuo laiko ir akivaizdu, kad procesas dar nėra stabilus, nes vibracinio sužadavimo taikymas šiek tiek padidina temperatūrą. Tačiau po 20 s procesas jau stabilizavosi, čia vibracinio sužadavimo taikymas nesukelia reikšmingo temperatūros padidėjimo.

Parodytas polikarbonato bandinio plastinių deformacijų pasiskirstymas skerspjuvyje pasibaigus technologiniam procesui (laikas – 30 s). Nustatyta, kad vibracinio sužadavimo taikymas keičia polikarbonato skerspjuvio plastinių deformacijų pasiskirstymą į netiesinį. Plastinių deformacijų tiesiškumas išlaikomas zonoje, esančioje  $0,2 \mu\text{m}$  atstumu nuo viršutinio polikarbonato bandinio paviršiaus; čia plastinių deformacijų vertės yra didžiausios. Toks tolygumas deformuojamame kūne yra labai svarbus antrinant itin geros kokybės mikrostruktūras.

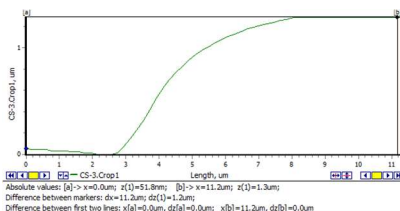
## 2.5. Eksperimentiniai rezultatai

Atlikus terminio spaudimo bandymus, bandiniai buvo analizuojami naudojant atominės jėgos mikroskopą (AJM). Pagrindinis dėmesys buvo skiriamas replikuotam profilio gyliui. 2.9 paveiksle parodyta bandinio, kuris buvo atkartotas po 10 s spaudimo (be vibracinio sužadinimo), trimatis (3-D) vaizdas ir profilio topologija.

X:11.5um Y:10.4um Z:1.3um [1.1:1]  
Ra: 500.6nm Rq: 540.0nm



(a)



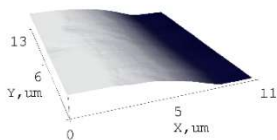
(b)

**2.9 pav.** Trimatis (3-D) vaizdas (a) ir profilio topologija (b), spaudimo trukmė 10 s (be vibracinio sužadinimo)

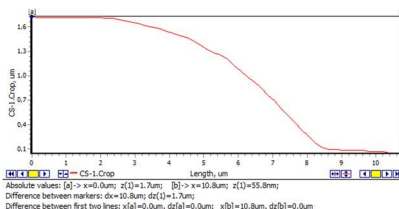
AJM vaizdai rodo, kad po terminio spaudimo proceso profilio gylis yra 1,2  $\mu\text{m}$ , modeliuojamas profilio gylis, gautas tomis pačiomis proceso sąlygomis – 1,3  $\mu\text{m}$ . Skirtumas tarp eksperimentinių ir skaitinių reikšmių – 8,3 %.

Vėlesnis eksperimentinio tyrimo etapas yra analizė bandinių, kurie pagaminti taikant 10,05 s spaudimo trukmę su vibraciniu sužadinimu (2.10 pav.).

X:11.0um Y:12.5um Z:1.7um [0.7:1]  
Ra: 614.1nm Rq: 671.6nm



(a)



(b)

**2.10 pav.** Trimatis (3-D) vaizdas (a) ir profilio topologija (b), spaudimo trukmė 10,05 s (su vibraciniu sužadinimu)

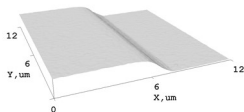
2.10 paveiksle parodoma, kad vibracinio sužadinimo taikymas padidina profilio gylį iki 1,7  $\mu\text{m}$  arba 0,5  $\mu\text{m}$ , lyginant su bandiniu, pagamintu netaikant



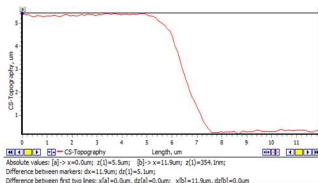
vibracinio sužadavimo. Modeliuojant replikuojamo analogiškoms proceso sąlygomis bandinio gylis vertė yra 1,75  $\mu\text{m}$ . Eksperimentinių ir skaitinių rezultatų neatitikimas – 2,9 %. Be to, 2.11 paveiksle matoma, kad žemutinis mikrostruktūros regionas yra mažiau pakilęs, nei parodytas 2.12 pav. O tai įrodo, kad vibracinis sužadavimas mažina sukibimą tarp spaudo ir polikarbonato, taip pat jis sumažina paviršiaus įtempius ne tik kraštiniame regione, bet ir bandinio centre.

2.11 paveiksle parodytas trimatis (3-D) vaizdas ir profilio topologija, spaudimo trukmė 20 s (be vibracinio sužadavimo).

X:12.0um Y:12.0um Z:5.4um [0.2:1]  
Ra: 2347.5nm Rq: 2408.7nm



(a)



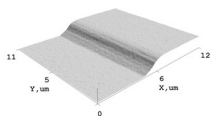
(b)

**2.11 pav.** Trimatis (3-D) vaizdas (a) ir profilio topologija (b), spaudimo trukmė 20 s (be vibracinio sužadavimo)

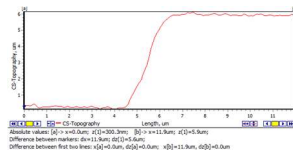
AJM vaizdai atskleidė, kad po terminio spaudimo proceso profilio gylis yra 5,1  $\mu\text{m}$ , o modeliuojamas profilio gylis, gautas tomis pačiomis proceso sąlygomis, – 5,4  $\mu\text{m}$ . Skirtumas tarp eksperimentinių ir skaitinių reikšmių – 5,9 %.

Galiausiai atliktas eksperimentinis bandinių, pagamintų taikant 20,05 s spaudimo trukmę (su vibraciniu sužadavimu) tyrimas (2.12 pav.).

X:12.0um Y:12.0um Z:6.1um [0.2:1]  
Ra: 2644.7nm Rq: 2708.9nm



(a)



(b)

**2.12 pav.** Trimatis (3-D) vaizdas (a) ir profilio topologija (b), spaudimo trukmė 20,05 s (su vibraciniu sužadavimu)

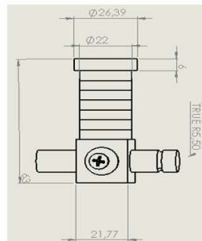
2.12 paveiksle įrodyta, kad vibracinio sužadavimo taikymas padidina profilio gylį 0,5  $\mu\text{m}$  (profilio gylis yra 5,6  $\mu\text{m}$ ) lyginant su bandiniu, pagamintu be vibracinio sužadavimo. Modeliuojant gauta 5,9  $\mu\text{m}$  gylis vertė. Eksperimentinių ir

skaitinių rezultatų neatitikimas yra 5,4 %. Vidutinis eksperimentinių ir skaitinių rezultatų neatitikimas – 5,6 %.

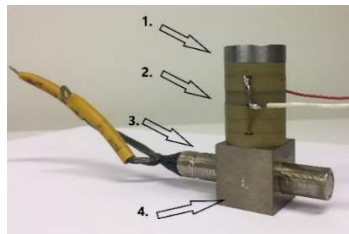
### 3. SONOTRODO KŪRIMAS IR JO PANAUDOJIMAS FORMUOJANT MIKROSTRUKTŪRAS

Sukurta optinių mikrostruktūrų naudojant originalios konstrukcijos sonotrodą formavimo technologija, kai taikoma terminio spaudimo technologija įvedant ciklinį spaudimo jėgos poveikį formavimo metu nukreipta normalės kryptimi į mikrostruktūrų formuojamąjį paviršių. Palyginus su iki šiol taikytomis technologijomis ši skiriasi tuo, kad ciklinis spaudimo poveikis generuojamas formuojamojo ruošinio paviršiaus normalės kryptimi. Pagrindiniai terminio spaudimo technologijos privalumai yra įrenginio didelis našumas, maža kaina, patogus naudojimas, pakankamai gera išpaudų raiška ir kokybė. Pagrindiniai terminio išpaudimo proceso veikimo principai: pirmiausiai polimeras yra įkaitinamas iki aukštesnės nei stiklėjimo temperatūros, tada spaudas spaudžiamas į polimerą, cikliškai veikiamas spaudimo jėgos formuojamojo ruošinio paviršiaus normalės kryptimi, sistema atšaldoma iki žemesnės nei stiklėjimo temperatūros ir atkeliamas spaudas.

Disertacijos uždaviniams įgyvendinti dėl optinių mikrostruktūrų kokybiško formavimo buvo sukurtas sonotrodas (3.1 pav. ir 3.2 pav.), veikiantis kaip aukštojo dažnio virpesių generatorius ir užtikrinantis geresnį įkaitinto nanokompozito tekėjimą į mikroertmes.



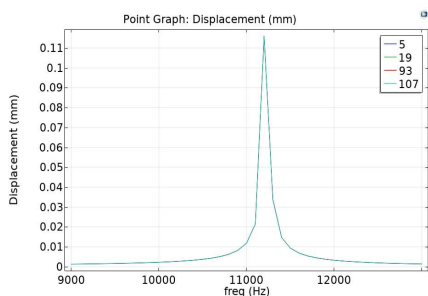
3.1 pav. Sonotrodo schematinis brėžinys



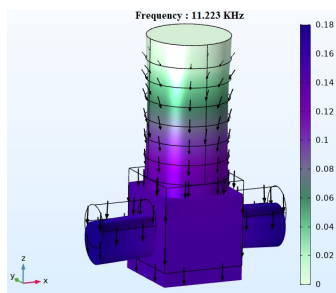
**3.2 pav.** Sonotrodo nuotrauka: 1 – metalinis žiedas; 2 – pjezokeraminiai žiedai; 3 – kaitinamasis elementas; 4 – sonotrodo antgalis

Sonotrodą sudaro magnetinis tvirtinimo elementas (išorinis skersmuo – 26,39 mm, vidinis skersmuo – 6 mm, storis – 6 mm), plieninis žiedas (išorinis skersmuo – 22 mm, vidinis skersmuo – 6 mm, storis – 5 mm), šeši PZT-5H žiedai (išorinis skersmuo – 22 mm, vidinis skersmuo – 10 mm, storis – 5 mm), kaitinamasis elementas (skersmuo – 11 mm, ilgis – 52 mm), plieninis antgalis (kubo kraštinė – 21,77 mm). Visos dalys sujungtos naudojant varžtą M5×40. Pagrindinė sonotrodo funkcija – perduoti mechaninę virpesių energiją į ruošinį. Jei reikia, vibracijų energiją galima sustiprinti įdiegiant stiprintuvą, kuris padidintų ultragarso bangos amplitudę.

Sonotrodo darbiniais režimams nustatyti atliktas impedanso matavimas skirtingomis sąlygomis, t. y. keičiant temperatūrą ir spaudimo jėgą. Atlikta 15 skirtingų eksperimentų su periodiškai sužadintu ir mechaniškai bei termiškai paveiktu sonotrodu. Atliekant eksperimentą, pagal įprastą terminės mikrostruktūros terminį formavimo procesą buvo parinktos 3 skirtingos apkrovos (0 kPa, 7,7 kPa ir 12,5 kPa), taip pat 5 kaitinimo temperatūros (0 °C, 80 °C, 100 °C, 130 °C ir 160 °C). Tipinis impedanso matavimo rezultatas pateiktas 3.3 paveiksle. Atliktas sonotrodo darbo režimų nustatymas baigtinių elementų metodu.

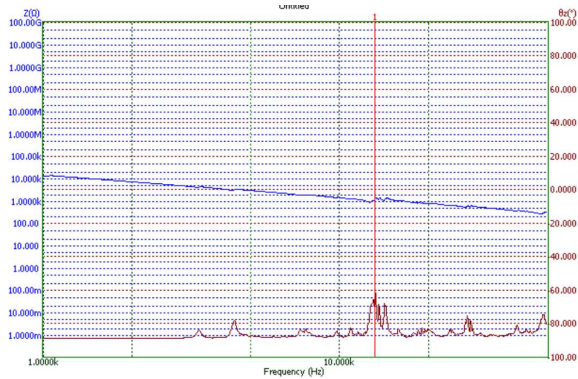


(a)



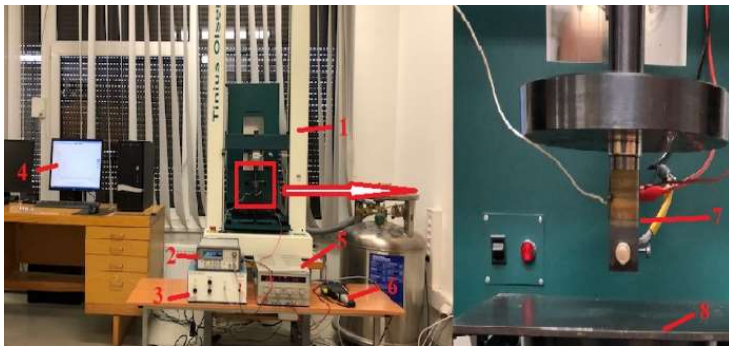
(b)

**3.3 pav.** Sonotrodo amplitudinė-dažnuminė priklausomybė: (a) poslinkių pasiskirstymas; (b) bendras vaizdas



**3.4 pav.** Mechaninio slėgio ir temperatūros paveikto sonotrodo impedanso kreivė ( $P = 12,5 \text{ kPa}$ ,  $T = 130 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

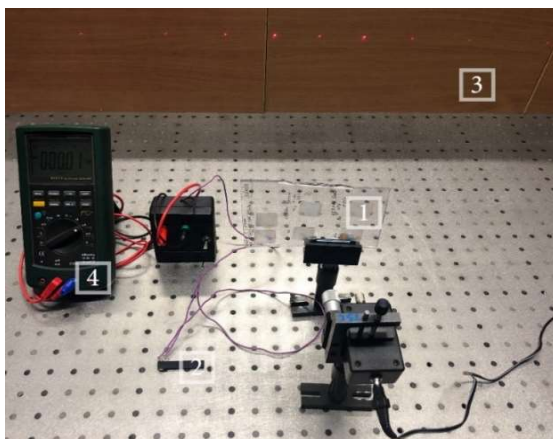
Principinė terminio formavimo schema pateikta 2.4(a) pav. Nikelyje pagaminta periodinė mikrostruktūra, pritvirtinta prie sonotrodo, yra įkaitinta iki polimero lydymosi temperatūros ir spaudžiama į PZT nanokompozitą. Atliekant terminio formavimo bandymus įspaudimas trunka 10 s, o ultragarsinis sužadėjimas – 1 s. Tada spaudas atšaldomas ir atkeliamas.



**3.5 pav.** Terminis mikrostruktūrų formavimo pasitelkiant virpesius stendas: 1 – *Tinius Olsen* automatinė spaudimo mašina; 2 – signalų generatorius; 3 – maitinimo šaltinis; 4 – spaudimo mašinos kompiuterinė valdymo sistema; 5 – nuolatinės srovės voltmetras; 6 – temperatūros matuoklis (*Testo 845*); 7 – vertikaliai išstatytas sonotrodas; 8 – pagrindas mikrostruktūroms formuoti

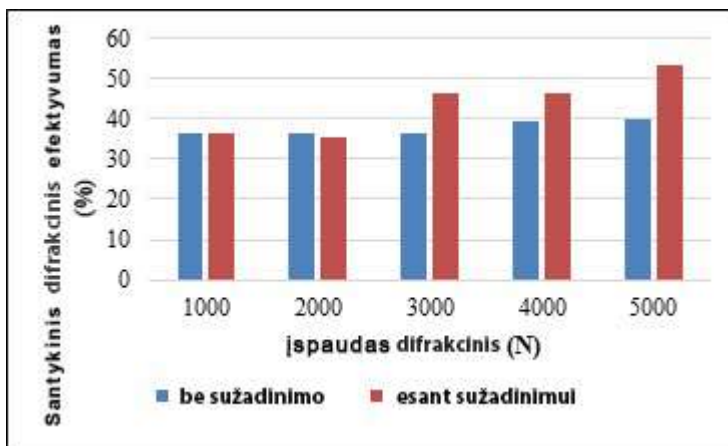
Lazerinis difraktometras (He-Ne lazeris,  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ , 50 mW) buvo naudojamas registruoti periodinių mikrostruktūrų, suformuotų PZT nanokompozitinėje medžiagoje, atspindžio ir pralaidumo difrakciniam spektrui

(3.6 pav.). Difrakcinis efektyvumas buvo matuojamas fotiodiodu visuose spektro maksimumuose ( $0, \pm 1, \pm 2$  ir t. t.), vienodu atstumu nuo bandinio.



**3.6 pav.** Difraktometras ir matavimo schema: 1 – bandinys; 2 – fotiodiodas; 3 – maksimumų pasiskirstymas; 4 – matuoklis

Atliktas sukurtų optinių mikrostruktūrų įvertinimas nustatant santykinę difrakcinę efektyvumą, kai taikomas vibracinis sužadninimas, ir be jo (3.7 pav.).



**3.7 pav.** Santykinis suformuotų periodinių mikrostruktūrų efektyvumas su ir be vibracinio sužadninimo esant temperatūrai  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir spaudimo trukmei 10 s

Nustatyta, kad panaudojant aukštojo dažnio virpesius ir spaudimo jėgą, nukreiptą optinės mikrostruktūros formuojamojo paviršiaus normalės kryptimi,

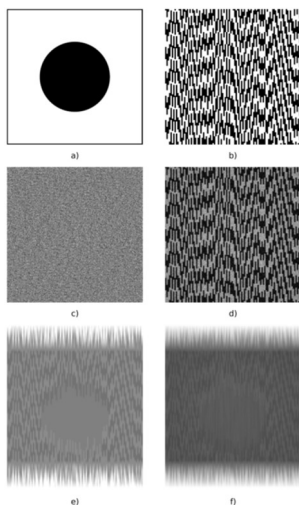
difrakcinis efektyvumas kur kas didesnis nei gaunamas įprastu terminio spaudimo būdu. Suformuotų optinių mikrostruktūrų pralaidumą naudojant virpesius patvirtina ir matavimai optiniu mikroskopu, kurie yra pateikti disertaciniame darbe.

#### **4. OPTINIO ELEMENTO, SKIRTO VIZUALIOSIOS KRIPTOGRAFIJOS SISTEMAI, KŪRIMAS**

Mikrooptinio elemento kūrimui taikyta 3 skyriuje sukurta vibracinė spaudimo technologija bei disertaciniame darbe pasiūlytas originalus sinerginis skaitmeninės holografijos ir dinaminės vizualiosios kriptografijos praktinio realizavimo metodas.

Vizualioji kriptografija – tai šifravimo metodas, kai vaizdinė informacija užšifruojama taip, kad dekodavimas gali būti atliekamas vien žmogaus akimis, net neturint kompiuterio, tačiau tam būtina žinoti užkodavimo parametraž – virpesio amplitudę.

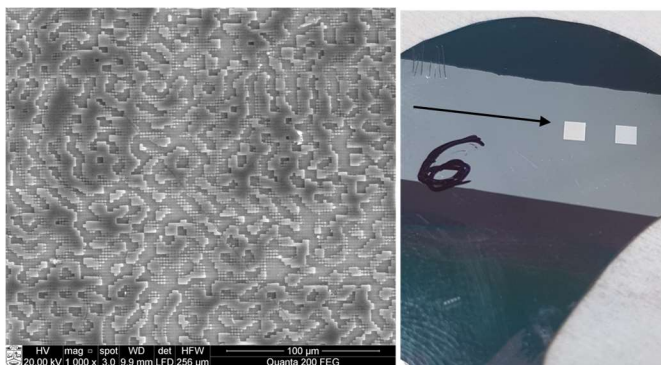
Vizualiojoje kriptografijoje informacijos kodavimas pagrįstas muaro gardelės efektu. Dinaminės vizualiosios kriptografijos metodo pagrindas yra laike vidurkintos muaro juostos. Šis metodas paremtas laike vidurkintu geometriniu muaru vienam koduotam paveikslui. Tai vieno vaizdo metodas, informacija nėra skaidoma į sudėtinės dalis. Slapta informacija yra užkoduojama į stochastinę muaro gardelę statiniame vaizde. Ji gali būti vizualizuojama laike vidurkintų muaro interferencinių juostų pavidalu, jei tik užkoduotas vaizdas virpinamas pagal griežtai nustatytą kryptį ir amplitudę. Tokia teorinė vizualiosios kriptografijos panaudojimo galimybė buvo pademonstruota darbe [13]. Dinaminės vizualiosios kriptografijos ir skaitmeninės holografijos taikymo pavyzdys pateiktas 4.1 paveiksle. Metodikos demonstravimui pasirinktas skritulys (4.1(a) pav.). Pradinis vaizdas buvo užkoduotas dinaminės vizualiosios kriptografijos būdu (4.1(b) pav.). Tada jis suglaudintas naudojant skaitmenines hologramas iki 1 mm<sup>2</sup> dydžio (4.1(c) pav.) ir atkurtas naudojant koherentinį šviesos šaltinį (4.1(d) pav.). Vėliau periodiškai virpinant vaizdus, pateiktus 4.1(b) ir 4.1(d) paveiksluose, atkurtas pradinis vaizdas (4.1(e) pav. ir 4.1(f) pav.).



**4.1 pav.** Pradinis vaizdas (a), dinaminės vizualiosios kriptografijos būdu koduotas vaizdas (b), fazinės hologramos vaizdas (c), skaitmeniškai atkurto hologramos vaizdas (d), atkurtas dinaminės vizualiosios kriptografijos būdu užkoduotas vaizdas (e), atkurta dinaminės vizualiosios kriptografijos būdu užkoduoto vaizdo holograma (f)

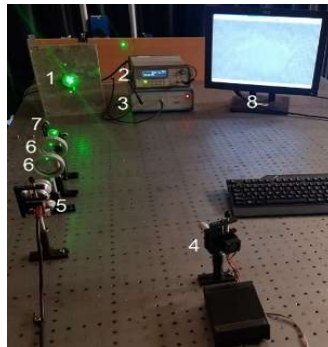
Skaitmeninės hologramos fazei apskaičiuoti taikytas Gerchberg–Saxton algoritmas.

Disertaciniame darbe skaitmeninės hologramos kūrimui taikytas Gerchberg–Saxton algoritmas, gaminta elektroninės litografijos būdu, o mikrooptinis elementas, naudojamas vizualiosios kriptografijos sistemoje, suformuotas taikant 3 skyriuje pristatytą technologiją.

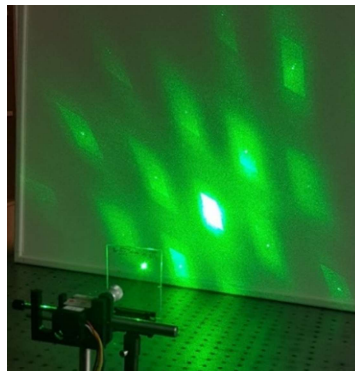


**4.2 pav.** Pagamintos hologramos SEM vaizdas (a) ir nuotrauka (b); joje rodykle nurodytas  $1 \times 1$  mm plotas)

Taikant tokį šių metodų sinergijos principą sukurtas optinis elementas, kuriame skaitmeninės holografijos būdu užkoduojama informacija, juos pasitelkiant galima identifikuoti įvairius dinامينius procesus, kurie yra įvertinami *a priori* užkoduojant optinį elementą. Panaudojant optinį elementą dinaminiai procesai yra atpažįstami tikroju laiku, jiems sutapus (užkoduoto vaizdo ir realaus proceso sutapimo atveju galime nustatyti proceso dinamines charakteristikas). Toks sukurtas mikrooptinis elementas tvirtinamas ant dinaminės valdymo platformos ir integruojamas į vizualiosios kriptografijos optinę sistemą. Identifikacijos procese naudojamo mikrooptinio elemento pavyzdys – 4.3 pav.



**4.3 pav.** Vizualiosios kriptografijos optinė sistema: 1 – mikrooptinis elementas, kuriame užkoduota procesų atpažinimui naudojama informacija; 2 – aukštojo dažnio generatorius; 3 – įtampos stiprintuvas; 4 – puslaidininkinis lazeris; 5 – skaitmeninė fotokamera; 6 – dviejų lęšių sistema; 7 – lazerio spindulio intensyvumo korektorius; 8 – kompiuterio monitorius



**4.4 pav.** Vizualiosios kriptografijos sistemos mikrooptinio elemento, suformuoto polikarbonate, difrakcinis vaizdas (4.3 pav. 1 – optinis elementas, integruotas vizualiosios kriptografijos schemoje)



Pateiktuose 4.3 pav. ir 4.4 pav. iliustruojamas sukurtos vizualiosios kriptografinės sistemos funkcionalumas, atkuriant eksperimentiniu keliu 4.1 paveiksle užkoduotą vaizdą (skritulį), kurio rekonstrukcijos pavyzdys matosi 4.3 paveiksle, kompiuterio monitoriaus ekrane (8).

## IŠVADOS

1. Sudėtingų trimatinių (3-D) mikrostruktūrų, generuojamų pasitelkiant kompiuterinės skaitmeninės holografijos principus, pritaikymas ir panaudojimas žmogaus sveikatinimo technologijoms tobulinti vizualiosios kriptografijos pagrindu taikant optinį vaizdo šifravimo metodą yra aktualus disertacijos tikslas, kuriuo siekiama per mikrooptinių elementų formavimą terminio spaudimo būdu, analizuojant tiek formuojamos medžiagos savybes, tiek formuotuvo (sonotrodo) dinamines savybes, išgauti optinių elementų didelį difrakcinį efektyvumą.
2. Atliktas priverstinių aukštojo dažnio virpesių, jėgos, veikiančios normalės kryptimi, įtakos atspaustam paviršiui teorinis ir eksperimentinis tyrimas. Modeliavimo rezultatai rodo, kad vibracinis sužadinimas gali užtikrinti gilesnį profilį nei tas, kuris gaunamas be vibracinio sužadinimo. Buvo pastebėtas mikrostruktūros gylio padidėjimas 0,45  $\mu\text{m}$  ir 0,5  $\mu\text{m}$ , kai proceso trukmė buvo atitinkamai 10 s ir 20 s esant vibraciniam sužadinimui. Antra vertus, sonotrodo FEM modelis buvo patvirtintas eksperimentiškai, t. y. abiem metodais išpausto profilio gylis 1,2  $\mu\text{m}$  ir 1,7  $\mu\text{m}$ , vertinant jį be ir su vibraciniu sužadinimu ir trukme 10 s. Modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatai skiriasi ne daugiau kaip 9 %. Gauti eksperimentinio ir skaičiavimų profilio gylio verčių skirtumai yra priimtinos ribose. Vibracinis sužadinimas terminio formavimo metu padidina išpaudų gylį ir tolygiai paskirsto plastines deformacijas bei von Mises įtempius. Rezultatai rodo, kad sukurtas procesas padedant vibracijai pagerina mikrostruktūrų atkartojamumą.
3. Suprojektuoto sonotrodo nustatytas slopinimo koeficientas 0,02, taip pat rezonanso dažnis svyruoja nuo 15,1 kHz iki 10,5 kHz, atsižvelgiant į antrinimo slėgį, o antirezonanso dažnis svyruoja nuo 15,5 kHz iki 10,3 kHz. Be to, sonotrodo paviršiaus temperatūrinio lauko analizė parodė, kad sonotrodas gerai funkcionuoja turėdamas vienodą temperatūros pasiskirstymą visame savo kontaktiniame paviršiuje. Sukurto sonotrodo baigtinių elementų analizė parodė, kad sonotrodo jėga veikia formuojamąjį paviršių normalės kryptimi 11,223 kHz dažniu, o apatinio kontaktinio paviršiaus poslinkis yra 180  $\mu\text{m}$ . Siekiant nustatyti mikrostruktūros formavimo režimus atlikti difrakcinio efektyvumo matavimai ir nustatyta spaudimo jėga, temperatūrinis režimas, priverstinio žadinimo dažnis bei laikas, darantys įtaką formuojamų mikrostruktūrų kokybei. Nustatyta, kad esant 5000 N apkrovai, 150 °C

temperatūrai, 11,223 kHz priverstinio sužadavimo dažniui ir trukmei 10 s difrakcinis efektyvumas pirmos eilės maksimumuose siekia 53,42 % lyginant su 40,12 % rezultatu, gautu be vibracinio sužadavimo. Taip pat mikroskopinių vaizdų analizė optiniu mikroskopu esant 100 kartų didinimui parodo, kad suformuotos mikrostruktūros kokybė yra geresnė, kai taikomas vibracinis sužadimas.

4. Sukurta vizualioji optinė kriptografinė sistema, kurioje integruotas mikrooptinis elementas, skirtas vizualiai diagnozuoti tiriamos biologinės aplinkos dinaminį pokyčius tuo praplečiant žmogaus sveikatinimo monitoringo sistemų įvairovę. Optinis elementas, leidžiantis užkoduoti ir po to atpažinti monitoringo procese informaciją, sukurtas litografijos būdu taikant skaitmeninės holografijos ir skaitmeninės vizualiosios kriptografijos principus. Jį naudojant galima identifikuoti įvairius dinaminį procesus, kurie yra įvertinami *a priori* užkoduojant optinį elementą. Pasitelkus optinį elementą dinaminiai procesai yra atpažįstami tikruoju laiku, jiems sutapus (užkoduoto vaizdo ir realaus proceso sutapimo atveju galime nustatyti proceso dinamines charakteristikas). Unikalių savybių derinimas leidžia tikruoju laiku ir tiesiogiai stebėti bei nustatyti giminingus bioryšius ir biologinius procesus vizualiuoju būdu kompiuterio monitoriuje.

## LITERATŪROS ŠARAŠAS

1. Yang, F., Murugan, R., Ramakrishna, S., Wang, X., Ma, Y.-X., and Wang, S. 2004. Fabrication of nano-structured porous PLLA scaffold intended for nerve tissue engineering. *Biomater.* 25: 1891–1900.
2. Smith, L.A., Liu, X., and Ma, P.X. 2008. Tissue engineering with nano-fibrous scaffolds. *Soft Matter* 4(11): 2144–2149.
3. Weilbaecher, C.R., Hossain, M., Gangopadhyay, S., and Grant, S. 2007. *Development of a novel nanomaterial-based optical platform for a protease biosensor.* Proc. SPIE, Vol. 6759.
4. Naeemi, A. and Meindl, J.D. 2009. Carbon nanotube interconnects. *Ann. Rev. Mater. Res.* 39: 255–275.
5. Nanostructured materials in information storage. *MRS Bull.* 33: 831–834.
6. Zhang, Y., Lu, J., Shimano, S., Zhou, H., and Maeda, R. 2007. Nanoimprint of proton exchange membrane for MEMS-based fuel cell application. Proc. 6th Int. IEEE Conf. on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics, pp. 91–95.
7. Zhang, Y., Lu, J., Wang, Q., Takahashi, M., Itoh, T., and Maeda, R. 2009. Nanoimprint of polymer electrolyte membrane for micro direct methanol fuel cell application. *ECS Trans. Micro Power Sources* 16: 11–17.

8. Tawarayama, K., Aoyama, H., Magoshi, S., Tanaka, Y., Shirai, S., and Tanaka, H. 2009. *Recent progress of EUV full field exposure tool in Selete*. Proc. SPIE, Vol. 7271.
9. Smith, H.I., Carter, D.J.D., Ferrera, J., Gil, D., Goodberlet, J., Hastings, J.T. *et al.* 2000. Soft X-rays for deep sub-100 nm lithography, with and without masks. *Proc. Mater. Res. Soc. Symp.* 584: 11–21.
10. Lu, B., Xie, S.-Q., Wan, J., Yang, R., Shu, Z., Qu, X.-P. *et al.* 2009. Applications of nanoimprint lithography for biochemical and nanophotonic structures using SU-8. *Int. J. Nanosci.* 8: 151–155.
11. Kawata, S., Sun, H.-B., Tanaka, T., and Takada, K. 2001. Finer features for functional microdevices. *Nature* 412(6848): 697–698.
12. Vilma Petrauskienė (2015). Dynamic visual cryptography based on non-linear oscillations, The Doctoral Dissertation.
13. P. Palevicius, M. Ragulskis, Image communication scheme based on dynamic visual cryptography and computer-generated holography, *Optics Communications* 335, 161 (2015)

## PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA ŠARAŠAS

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

1. 1. [S1; DE] Sodah, Amer; Gaidys, Rimvydas; Narijauskaitė, Birutė; Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Palevičius, Arvydas; Palevičius, Paulius. Analysis of microstructure replication using vibratory assisted thermal imprint process // *Microsystem technologies*. Berlin : Springer. ISSN 0946-7076. eISSN 1432-1858. 2019, vol. 25, iss. 2, p. 477-486. DOI: 10.1007/s00542-018-3976-1. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus] [IF: 1,513; AIF: 4,793; IF/AIF: 0,315; Q3 (2018, InCites JCR SCIE)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,148]
2. 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]
3. [S1; LT] Sodah, Amer; Palevicius, Arvydas; Janusas, Giedrius; Palevicius, Paulius; Patel, Yatinkumar. Numerical and experimental investigation of sonotrode for formation of piezocomposite functional elements // *Mechanika*.

Kaunas : KTU. ISSN 1392-1207. eISSN 2029-6983. 2019, vol. 25, iss. 6, p. 463-472. DOI:10.5755/j01.mech.25.6.24793. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; Academic Search Complete] [IF: 0,500; AIF: 2,950; IF/AIF: 0,169; Q4 (2018, InCites JCR SCIE)] [CiteScore: 0,53; SNIP: 0,419;SJR: 0,202; Q4 (2018, Scopus Sources)] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,200]

***Web of Science* duomenų bazėje indeksuotuose leidiniuose be  
cituojamumo rodiklio  
Tarptautinėse leidyklose**

1. [P1a; NL] Palevicius, A.; Janusas, G.; Ragulskis, M.; Palevicius, P.; Sodah, A. Design, analysis and application of dynamic visual cryptography for visual inspection of biomedical systems // Nanostructured materials for the detection of CBRN: [proceedings of the NATO advanced research workshop on nanostructured materials for the detection of CBRN, Kiev, Ukraine, 14–17 August 2017] / edited by J. Bonča and S. Kruchinin. Dordrecht : Springer, 2018. ISBN 9789402413038. eISBN 9789402413045. p. 223-232. (NATO science for peace and security series A: Chemistry and biology, ISSN 1874-6489). DOI: 10.1007/978-94-024-1304-5\_17. [Conference Proceedings Citation Index - Science (Web of Science); Scopus] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,200]

**Konferencijų pranešimų medžiagoje  
Tarptautinėse leidyklose**

1. Sodah, Amer; Palevicius, Arvydas; Janusas, Giedrius. Design and analysis of computer generated optical element for visual cryptographic system // 2019 IEEE XVth international conference on the perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH), Polyana, May 22-26, 2019: proceedings. Piscataway, NJ : IEEE, 2019. ISBN 9781728140285. eISBN 9781728140292. eISSN 2573-5373. p. 28-31. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2019.8817398. [Scopus] [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,334]

**Nacionalinėse leidyklose**

1. Sodah, Amer; Palevicius, Arvydas; Janusas, Giedrius; Jurenas, Vytautas; Patel, Yatinkumar Rajeshbhai. Sonotrode for formation of piezocomposite functional elements // *Mechanika* 2018: proceedings of the 23rd international scientific conference, 18 May 2018, Kaunas University of Technology,

Lithuania / Kaunas University of Technology, Lithuanian Academy of Science, IFTOMM National Committee of Lithuania, Baltic Association of Mechanical Engineering. Kaunas : Kaunas University of Technology. ISSN 1822-2951. 2018, p. 150-153. [M.kr.: T 009] [Indėlis: 0,200]

**MOKSLINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ SKELBIMAS KONFERENCIJOSE**  
**Kitos konferencijų tezės ir straipsniai nerecenzuojamoje konferencijų pranešimų medžiagoje**

1. Sodah, Amer. Development and analysis of microelectromechanical sensors for human health care monitoring // IRWBM 2019: International research workshop in biomechanical microsystems 2019, October 23, 2019, Kaunas University of Technology, Lithuania: program and abstracts. Kaunas : [KTU]. 2019, p. [17]. [M.kr.: T 009]
2. Palevičius, Arvydas; Šakalys, Rokas; Janušas, Giedrius; Sodah, Amer. Investigation of diffractive optical element of biosensor for human health monitoring // International conference on advanced technology & sciences : 4th international conference, ICAT'Rome, Rome, Italy, November 23-25, 2016 : abstracts / editors: Ismail Saritas, ... [et al.]. Konya : Aybil, 2016. eISBN 9786059119771. p. 64. [M.kr.: T 009]

**INFORMACIJA APIE AUTORIŲ**

Gimė 1984 m. gegužės 24 d. Sirijoje.

Išsilavinimas – aukštasis

2003–2007 m. – Kauno technologijos universiteto Tarptautinių studijų centras, mechanikos inžinerijos bakalauro laipsnis.

2007–2009 m. – Kauno technologijos universiteto Tarptautinių studijų centras, mechanikos inžinerijos magistro laipsnis.

2015–2019 m. – Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas, mechanikos inžinerijos (09T) doktorantūros studijos.

El. paštas amer.sodah@ktu.lt

## SUMMARY

In order to ensure higher functionality of human health monitoring systems on the basis of method visual cryptography, it is necessary to develop a new type of optical elements with microstructures which guarantee a higher cryptographic level. One of these optical elements, which can replace a rather simple moire cell, could be an optical structure generated by the principles of coherent optical digital realization. Such digital realization could be based on the digital holography principles', which would allow to form cells according to the assigned level of complexity. The computer-generated digital hologram is transferred to physical media using certain technologies, and after appropriate micro lithographic operations can be used as a micro-optic element in visual cryptographic monitoring systems. The cost of the element produced in this way as well as time consumption is high enough, therefore it would be appropriate to replicate the generated optical structure into the polymeric material. Existing microstructure replication technologies do not provide the high diffraction efficiency required for their use in visual cryptographic systems, therefore it is important to improve existing and develop new microstructure replication and forming technologies which ensure high reproducibility of the structure of micro-reliefs generated by digital holographic methods throughout the area of the element used. Therefore, technology that enable such a technological task to be achieved (solved) is the main objective of this thesis.

**The aim of the dissertation:** To create vibration based thermal imprint technology on polymer type material for manufacturing functional micro optical elements of sensors applied in visual cryptographic human health monitoring systems

### **The objectives:**

1. To perform scientific literature review on thermal imprint technology of micro periodical structures and their usage in sensors for human health monitoring
2. To investigate influence of forced high frequency vibration, acting in normal direction to imprinted surface, on distribution of plastic deformations on the surface of thermal imprinted polymer
3. To design and investigate sonotrode and apply in vibration based thermal imprint technology on polymer for manufacturing optical microstructures in the scale useable for coherent optics

4. To design and investigate active-thermal sonotrode for vibration based thermal formation technology of polymer microstructures used in the coherent optics technologies
5. To manufacture functional element of sensors applied in visual cryptographic human health monitoring system

### **Defended statements**

1. Using a vibration based thermal imprint device acting in the normal direction of the formed surface, the polymer plastic deformation field is concentrated on its surface.
2. Vibration based thermal imprint technology using high-frequency oscillations in the normal direction of the composed surface forms polymer microstructures with continuous and high diffraction efficiency throughout its imprint area.

### **GENERAL CONCLUSIONS**

1. The improvement of complex 3D microstructures dependent on computer created holography and their utilization for biomedical applications to create visual cryptography framework new idea of novel microsystem stage with a small-scale optical component for the field of biomechanics utilizing an optical method of picture encryption and correspondence dependent on computer produced holography ought to be the main purpose of dissertation.
2. Investigation of the influence of the forced high vibrational frequency acting in the normal direction to the imprinted surface has been performed. Simulation results show that the vibratory excitation can lead to a deeper profile than that obtained without vibratory excitation. The increase of depth by 0.45 or 0.5  $\mu\text{m}$  was observed when the process duration was 10 and 20 s respectively with vibration. On the other side the FEM model of the sonotrode verified experimentally the profile depth of 1.2  $\mu\text{m}$  and 1.7  $\mu\text{m}$  observed without and with vibratory excitation at time duration was 10 sec. The results of simulation and experimental research do not differ more than by 9%. Differences between experimental and computational profile depth values obtained are within acceptable limits.  
The application of vibration excitation during the thermal imprint process increases the depth of imprinted profiles and results in a uniform distribution of plastic deformations and Von Misses stresses. The results show that the developed process reveals that with assistance of the vibratory excitation the profile depth and the quality of the printed structure are better than without vibratory excitation.
3. Damping ratio of the designed sonotrode 0.02 found from the bump test analysis. Resonant frequency of the designed sonotrode varies from 15.1 kHz

to 10.5 kHz depending on working conditions and anti-resonance frequency varies from 15.5 kHz to 10.3 kHz. Also, the thermal camera analysis determines that sonotrode functions well and it shows the equal temperature distribution on whole contact surface of the sonotrode. Finite element analysis of the developed sonotrode demonstrates the sonotrode acting in the normal direction of the formed surface at 11.223 kHz and the contact points were analysed the highest displacement of bottom contact surface is 180  $\mu\text{m}$ .

4. Diffraction efficiency measurement was performed to analyse the operating regime of the printed microstructure. The RDE 53.42 % and 40.12 % achieved with and without vibratory excitation when the replica produced with load 5000 N, 150 °C temperature and duration of the printing 10 sec. from the changing parameters such as decrement in the applied load, temperature of printing, the duration of printing and application of vibratory excitation leads to decrement in the diffraction efficiency as well as the quality of the printing. Also, microscopic images reveal that the quality of the printed microstructure are better with vibratory excitation
5. A concept of novel cantilever-type microsystem platform in the field of biomechanics using optical technique of image encryption and communication based on computer generated holography is proposed. The computer-generated hologram is then formed on a piezoelectric cantilever-type microsystem platform. Electron beam lithography is exploited for physical 3D patterning. It serves as an optical element for visual inspections of dynamical changes in investigated biological environment. Combination of unique properties allows a real time and direct observations of affinity interactions. The proposed sensing platform with piezoelectric effect employs the active method for measurements in medical or pharmaceutical fields.



UDK 678.02+534.232+004.932](043.3)

SL344. 2017-\*-\* , \* leidyb. apsk. I. Tiražas \* egz.

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