



J U S T A S C I G A N A S

**M A G N E T O S T R I K C I N I O
K E I T I K L I O , S K I R T O
M I K R O S T R U K T Ū R Ų
T E R M I N I A M
F O R M A V I M U I ,
K Ū R I M A S I R T Y R I M A S**

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

K a u n a s
2 0 2 4

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

JUSTAS CIGANAS

MAGNETOSTRIKCINIO KEITIKLIO, SKIRTO
MIKROSTRUKTŪRŲ TERMINIAM
FORMAVIMUI, KŪRIMAS IR TYRIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (T 009)

2024, Kaunas

Disertacija rengta 2020–2024 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete, Mechanikos inžinerijos katedroje. Mokslinius tyrimus rėmė Lietuvos mokslo taryba.

Doktorantūros teisė Kauno technologijos universitetui suteikta kartu su Vytauto Didžiojo universitetu.

Mokslinis vadovas

prof. dr. Giedrius JANUŠAS (Kauno technologijos universitetas, technologiniai mokslai, mechanikos inžinerija, T 009).

Mokslinis konsultantas

doc. dr. Paulius PALEVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, gamtos mokslai, matematika, N 001).

Redagavo: lietuvių kalbos redaktorė Aurelija Gražina Rukšaitė (leidykla „Technologija“), anglų kalbos redaktorius dr. Armandas Rumšas (leidykla „Technologija“).

Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

prof. dr. Valdas EIDUKYNAS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009) – **pirmininkas**;

prof. dr. Regita BENDIKIENĖ (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009);

prof. dr. Vytenis JANKAUSKAS (Vytauto Didžiojo universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija, T 009);

prof. dr. Sergei KRUCHININ (Ukrainos nacionalinė mokslo akademija, Ukraina, gamtos mokslai, fizika, N 002).

Disertacija bus ginama viešame Mechanikos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2024 m. birželio 7 d. 10 val. Kauno technologijos universiteto Rektorato salėje.

Adresas: K. Donelaičio g. 73-402, Kaunas, LT-44249, Lietuva.

Tel. (+370) 608 28 527; el. paštas doktorantura@ktu.lt

Disertacija išsiųsta 2024 m. gegužės 7 d.

Su disertacija galima susipažinti interneto svetainėje <http://ktu.edu>, Kauno technologijos universiteto bibliotekoje (Gedimino g. 50, Kaunas, LT-44239, Lietuva) ir Vytauto Didžiojo universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 52, Kaunas, LT-44244, Lietuva).

KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUSTAS CIGANAS

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF A
MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCER FOR
MICROSTRUCTURE THERMAL FORMATION

Doctoral dissertation
Technological Sciences, Mechanical Engineering (T 009)

2024, Kaunas

This doctoral dissertation was prepared at Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design, Department of Mechanical Engineering during the period of 2020–2024. The studies were supported by the Research Council of Lithuania.

The doctoral right has been granted to Kaunas University of Technology together with Vytautas Magnus University.

Scientific Supervisor

Prof. Dr. Giedrius JANUŠAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009).

Scientific Advisor

Assoc. Prof. Dr. Paulius PALEVIČIUS (Kaunas University of Technology, Natural Sciences, Mathematics, N 001).

Edited by: Lithuanian language editor Aurelija Gražina Rukšaitė (Publishing House *Technologija*), English language editor Dr. Armandas Rumšas (Publishing House *Technologija*).

Dissertation Defence Board of the Mechanical Engineering Science Field:

Prof. Dr. Valdas EIDUKYNAS (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009) – **chairperson**;

Prof. Dr. Regita BENDIKIENĖ (Kaunas University of Technology, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009);

Prof. Dr. Vytenis JANKAUSKAS (Vytautas Magnus University, Technological Sciences, Mechanical Engineering, T 009);

Prof. Dr. Sergei KRUCHININ (National Academy of Sciences of Ukraine, Ukraine, Natural Sciences, Physics, N 002).

The public defence of the dissertation will be held at 10 a.m. on 7 June 2024 at the public meeting of the Dissertation Defence Board of Mechanical Engineering Science Field in Rectorate Hall at Kaunas University of Technology.

Address: K. Donelaičio 73-402, Kaunas, LT-44249, Lithuania.

Phone (+370) 608 28 527; email doktorantura@ktu.lt

The doctoral dissertation was sent out on 7 May 2024.

The doctoral dissertation is available on the internet at <http://ktu.edu> and at the library of Kaunas University of Technology (Gedimino 50, Kaunas, LT-44239, Lithuania) and at the library of Vytautas Magnus University (K. Donelaičio 52, Kaunas, LT-44244, Lithuania).

© J. Ciganas, 2024

TURINYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS.....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS.....	8
SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS.....	11
ĮVADAS.....	12
1. MIKROSTRUKTŪRŲ FORMAVIMO TECHNOLOGIJŲ IR JŲ NAUDOJIMO FUNKCINĖSE MEDŽIAGOSE APŽVALGA.....	15
1.1. Mikrostruktūrų tipai ir savybės.....	15
1.1.1. Dažniausiai naudojami struktūriniai komponentai.....	16
1.1.2. Mikrostruktūrų pagrindinės savybės.....	17
1.1.3. Mikrogeometrijos keitimas.....	18
1.2. Mikrostruktūrų formavimo technologijos, jų klasifikavimas ir taikymas.....	19
1.2.1. Fotolitografija.....	20
1.2.2. Kietėjimo arba šampavimo procesai.....	21
1.2.3. Ėsdinimo procesai.....	22
1.2.4. Nusodinimo metodai.....	23
1.2.5. Karšto spaudimo technologija.....	23
1.2.6. Nauji struktūrų formavimo metodai.....	25
1.2.7. Mikrostruktūrų formavimo technologijų palyginimas.....	25
1.3. Funkcinės medžiagos.....	26
1.4. Mikrostruktūrų formavimo tyrimai Kauno technologijos universitete.....	29
1.5. Disertacijos uždaviniai.....	30
2. MIKROSTRUKTŪRŲ FORMAVIMO PROCESO ANALIZĖ NAUDOJANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ MODELĮ DINAMINĖJE APLINKOJE.....	31
2.1. Plastikų mechaninių savybių nustatymas iki viskoelastinės būsenos.....	31
2.2. Karštojo šampavimo proceso modeliavimas baigtinių elementų metodu.....	34
2.3. Viskoelastinėmis savybėmis pasižyminčių plastikų mechaninių savybių nustatymas.....	36
2.4. Karštojo šampavimo proceso, naudojant vibracijas, modeliavimas baigtinių elementų metodu.....	42
3. MAGNETOSTRIKCINIO KEITIKLIO, SKIRTO MIKROSTRUKTŪROMS FORMUOTI, KŪRIMAS.....	46
3.1. Teorinė formavimo įrankio analizė.....	46
3.2. Magnetostriktoriaus gamyba ir analizė.....	51
4. FUNKCINIO PROTOTIPO EKSPERIMENTINIS TESTAVIMAS.....	58
4.1. Karšto šampavimo pilotinis tyrimas.....	58
4.2. Karšto šampavimo tyrimas su magnetostrikciniu keitikliu.....	63
5. IŠVADOS.....	68
6. SUMMARY.....	69
6.1. Analysis of the microstructure formation process using a finite element model in a dynamic environment.....	72
6.1.1. Determination of Mechanical Properties of Plastics up to the Viscoelastic Temperature.....	72

6.1.2. Finite Element Modeling of Hot Stamping.....	73
6.1.3. Determination of Mechanical Properties of Plastics with Viscoelastic Properties	75
6.1.4. Finite Element Modeling of Hot Stamping Using Vibrations	77
6.2. Development of a magnetostrictive transducer for the formation of microstructures.....	79
6.3. Experimental testing of the functional prototype.....	82
6.3.1. Pilot Test of Hot Stamping	82
6.3.2. Study of Hot Stamping with a Magnetostrictive Transducer.....	83
CONCLUSIONS	84
LITERATŪROS SARAŠAS.....	86
CURRICULUM VITAE.....	96
PADĒKA.....	100

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1.1 lentelė. Mikrostruktūrų gamybos metodų palyginimas	26
2.1 lentelė. Mechaninės PP, PETG, PVC, SAN plastikų savybės [77–79]	31
2.2 lentelė. PP, PETG, PVC ir SAN termoplastikų Jungo modulis skirtingose temperatūrose	34
2.3 lentelė. Karšto štamavimo simuliacijų rezultatai	36
2.4 lentelė. Tinkamumo koeficientai ir funkcijos atitikimo vertės	40
2.5 lentelė. Tinklelio patikimumo tyrimo rezultatai	44
3.1 lentelė. Magnetostrikinės medžiagos savybės	50
4.1 lentelė. SAN difrakcinio efektyvumo matavimo rezultatai	62
4.2 lentelė. PETG difrakcinio efektyvumo matavimo rezultatai	63
4.3 lentelė. PVC difrakcinio efektyvumo matavimo rezultatai	63
Table 6.1. Properties of PP, PETG, PVC, SAN plastics [77–79].....	73
Table 6.2. Young’s modulus of thermoplastics at different temperatures.....	73
Table 6.3. Results of hot stamping simulations.....	74
Table 6.4. Results of diffraction efficiency measurement of SAN.....	82
Table 6.5. Results of diffraction efficiency measurement of PETG.....	83
Table 6.6. Results of diffraction efficiency measurement of PVC.....	83

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Publikacijų skaičius su raktiniu žodžiu „„Microstructure““ (duomenys iš „Science Direct“ duomenų bazės)	15
1.2 pav. Mikroskystinis elementas, skirtas dviem skysčiams maišyti	16
1.3 pav. Mikrosistemų surinkimo būdai	19
1.4 pav. Mikrostruktūrų formavimo technologijų klasifikacija	20
1.5 pav. Fotolitografijos proceso principinė schema	21
1.6 pav. Principinės liejimo procesų schemas: (a) liejimas į formą; (b) karštas štapavimas	22
1.7 pav. Principinės ęsdinimo procesų schemas: (a) abrazyvinis apdirbimas; (b) lazerinis apdirbimas	22
1.8 pav. Principinė galvanizavimo ir oksidacijos proceso schema	23
1.9 pav. Karštojo štapavimo principinės schemas: (a) vienpakopis metodas; (b) ritinėlio į ritinėlių metodas; (c) kaitinimo stadijos	24
1.10 pav. Principinė dręgnojo štapavimo proceso schema	25
1.11 pav. Linijinio magnetrostrikcinio keitiklio schema	28
2.1 pav. Tempimo eksperimentas: (a) PVC (1.7–1.12) ir SAN (3.7–3.11) ruošiniai po eksperimento; (b) PP (4.7–4.11) ir PETG (2.7–2.11) ruošiniai po eksperimento; (c) tempimo bandymų mašina „Instron E10000“: 1 – valdymo kompiuteris, 2 – šildymo kamera ir bandymų mašina; (d) ruošinys, įstatytas į griebtuvus, šiluminėje kameroje	32
2.2 pav. Termoplastikų įtempių ir deformacijų kreivės: (a) PP; (b) PETG; (c) PVC; (d) SAN	33
2.3 pav. Mikrostruktūra: (a) eksperimentinė nikelio matrica; (b) pagrindinės matricos pusės vieno elemento modelis su ribinėmis sąlygomis: 1 – termoplastiko modelis, 2 – matricos elementas, 3 – fiksuota atrama, 4 – simetrijos linija, 5 – išorinė jėga; (c) matricos skerspjūvio modelis, suskaidytas baigtiniais elementais, ir analizuojamo modelio suvaržymai: 1 – fiksuota atrama, 2 – atrama be trinties, 3 – apkrova	35
2.4 pav. PP termoplastiko įtempių ir deformacijų pasiskirstymas esant 80 °C temperatūrai: (a) ekvivalentiniai Von–Mises įtempiai esant didžiausiai deformacijai; (b) ekvivalentinė elastinė deformacija	35
2.5 pav. Dinaminio tempimo eksperimentas: (a) teorinis fazės skaičiavimo grafikas; (b) ruošinys; (c) ruošinys, įstatytas į tempimo mašinos griebtuvus	37
2.6 pav. PETG plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės	38
2.7 pav. PP plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės	38
2.8 pav. PVC plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės	39
2.9 pav. SAN plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės	39
2.10 pav. PVC plastiko pagrindinės teorinės kreivės	41
2.11 pav. PETG plastiko pagrindinės teorinės kreivės	41
2.12 pav. PP plastiko pagrindinės teorinės kreivės	41
2.13 pav. SAN plastiko pagrindinės teorinės kreivės	42
2.14 pav. Baigtinių elementų analizė: (a) modelis su ribinėmis sąlygomis: 1 – poslinkis, 2 – atrama be trinties, 3 – fiksuota atrama; (b) modelis su tinkleliu; (c) deformacijos vaizdas; (d) ekvivalentinių įtempių ir elastinės deformacijos vaizdai	43

2.15 pav. PETG ir SAN plastikų modeliavimo rezultatai	44
2.16 pav. PP ir PVC plastikų modeliavimo rezultatai	45
3.1 pav. Magnetrostrikinis karšto štam pavimo įrankis: (a) izometrinis konstrukcijos vaizdas; (b) konstrukcijos pjūvio vaizdas; (c) matematinis supaprastintas įrenginio vaizdas dvimatėje erdvėje.....	47
3.2 pav. Savybių priklausomybės nuo temperatūros: (a) vandens; (b) plieno [96] ..	48
3.3 pav. Šilumos mainų analizė: (a) matematinis modelis; (b) magnetinio srauto tankis; (c) temperatūros pasiskirstymas esant aušinimo sistemai; (d) temperatūros pasiskirstymas be aušinimo	49
3.4 pav. Magnetrostriktoriaus deformacijų simuliacijos rezultatai: (a) magnetrostrikinės deformacijos vaizdas; (b) magnetrostrikinės deformacijos priklausomybė nuo srovės tankio	51
3.5 pav. Sukurtas magnetrostriktoriaus įrenginys.....	52
3.6 pav. Temperatūros kitimo grafikai	52
3.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas magnetrostriktoriuje: (a) temperatūros eksperimento įranga: 1 – nuolatinės srovės maitinimo šaltinis, 2 – signalo generatorius, 3 – stiprintuvas, 4 – varža, 5 – termokamera, 6 – magnetrostriktorius; (b) temperatūros pasiskirstymas pradiniu laiko momentu; (c) temperatūros pasiskirstymas po 3 minučių; (d) temperatūros pasiskirstymas 8-ą proceso minutę	53
3.8 pav. Virpesių analizė naudojant PRISM sistemą: (a) „PRISM“ sistemos principinė veikimo schema; (b) eksperimento nuotrauka: 1 – magnetrostriktorius, 2 – valdymo blokas, 3 – kamera, 4 – apšvietimo galvutė.....	54
3.9 pav. Virpesių analizės rezultatai: (a) virpesių forma be formavimo įrankio ir be žadinimo; (b) virpesių forma be formavimo įrankio esant 12,05 kHz žadinimo dažniui; (c) virpesių forma su formavimo įrankiu ir be žadinimo; (d) virpesių forma su formavimo įrankiu esant 10,1 kHz žadinimo dažniui.....	55
3.10 pav. Virpesių analizė naudojant „Polytech PSV–500–3D–HV“ sistemą: (a) magnetrostriktoriaus tyrimo eksperimentas naudojant „Polytech“ lazerinį duplerio vibrometrą: 1 – lazerinis dupleris, 2 – magnetrostriktorius, 3 – kompiuterio ekranas; (b) „Polytech“ sistemos veikimo principas; (c) virpesių amplitudės ir dažnių grafikas; (d) baigtiniais elementais suskaidytas formavimo įrankis, vaizduojantis virpesių amplitudę esant 10,0625 kHz dažniui.....	56
3.11 pav. Virpesių analizė naudojant „Polytech“ vieno lazerio sistemą: (a) magnetolaidžio virpesių amplitudės; (b) formavimo įrankio virpesių amplitudės; (c) naudotos įrangos nuotraukos	57
4.1 pav. Mikrostruktūrų formavimas: (a) eksperimentinė įranga: 1 – kompiuteris, 2 – temperatūros valdiklis, 3 – kaitinimo elementas, 4 – plastiko lakštas; (b) pagrindinės nikelio mikrostruktūros SEM vaizdas; (c) PETG; (d) PP; (e) PVC; (f) SAN	59
4.2 pav. AFM topografijos ir paviršiaus profilio vaizdai: (a) ir (b) PETG; (c) ir (d) PP; (e) ir (f) PVC; (g) ir (h) SAN; (i) ir (j) pagrindinė nikelio mikrostruktūra.....	60
4.3 pav. Difrakcijos efektyvumo matavimas: (a) difrakcijos maksimumų susidarymas; (b) matavimo įranga: 1 – lazeris, 2 – matrica, 3 – fotodiodas, 4 – rezultatų atvaizdavimo ekranas	61
4.4 pav. Plastikų teorinė difrakcinio efektyvumo priklausomybė nuo mikrostruktūros gylio.....	62

4.5 pav. Karštas štamavimas su magnetrostrikciniu keitikliu: (a) temperatūros kitimo kreivė esant karšto išspaudimo procedūrai naudojant magnetrostrikcinį keitiklį; (b) magnetrostriktoriaus veikimo principas.....	64
4.6 pav. Mikrostruktūrų formavimo įranga: 1 – tempimo bandymo mašina, 2 – magnetrostriktorius, 3 – formavimo mikrostruktūra, 4 – stiprintuvas, 5 – signalo generatorius, 6 – maitinimo šaltinis, 7 – termometras.....	64
4.7 pav. Difrakcijos matavimo įranga: 1 – lazeris, 2 – lazerio šviesos detektorius, 3 – monitorius, 4 – suformuota mikrostruktūra, 5 – kompiuteris.....	65
4.8 pav. Difrakcijos efektyvumo PVC plastike matavimo rezultatai	65
4.9 pav. Difrakcijos efektyvumo PETG plastike matavimo rezultatai	66
4.10 pav. Difrakcijos efektyvumo SAN plastike matavimo rezultatai	67
Fig. 6.1. Tensile experiment: (a) PVC (1.7–1.12) and SAN (3.7–3.11) blanks after the experiment; (b) PP (4.7–4.11) and PETG (2.7–2.11) blanks after the experiment; (c) tensile testing machine <i>Instron E10000</i> : 1 – control computer, 2 – heating chamber and testing machine; (d) the sample placed in grippers in a heating chamber.....	72
Fig. 6.2. Microstructure: (a) experimental nickel matrix; (b) single element model of the main matrix side with boundary conditions: 1 – thermoplastic model, 2 – matrix element, 3 – fixed support, 4 – line of symmetry, 5 – external force; (c) cross-sectional model of the matrix decomposed into finite elements and constraints of the analyzed model: 1 – fixed support, 2 – frictionless support, 3 – load.....	74
Fig. 6.3. Theoretical curves of PVC plastic.....	75
Fig. 6.4. Theoretical curves of PETG plastic.....	76
Fig. 6.5. Theoretical curves of PP plastic.....	76
Fig. 6.6. Theoretical curves of SAN plastic.....	76
Fig. 6.7. Finite element analysis: (a) model with boundary conditions: 1 – displacement, 2 – frictionless support, 3 – fixed support; (b) meshed model; (c) deformation image; (d) equivalent stress and elastic strain images.....	77
Fig. 6.8. Results of thermoplastics modeling.....	78
Fig. 6.9. Magnetrostrictive hot stamping tool: (a) isometric view of the structure; (b) cross-sectional view of the structure: 1 – core, 2 – transition, 3 – forming tool, 4 – cooling chamber, 5 – intermediate, 6 – cooling chamber cover, 7 – nut, 8 – wire coils, 10 – insert; (c) mathematical simplified device 2D model.....	79
Fig. 6.10. Magnetrostrictor device.....	80
Fig. 6.11. Temperature distribution in the magnetrostrictor: (a) temperature experiment equipment: 1 – DC power supply, 2 – signal generator, 3 – amplifier, 4 – resistance, 5 – thermal camera, 6 – magnetrostrictor transducer; (b) temperature distribution at the initial time instant; (c) temperature distribution after 3 minutes; (d) temperature distribution at minute 8 of the process.....	81

SANTRUMPŲ IR TERMINŲ SĄRAŠAS

Santrumpos:

ϵ_0 – virpesių amplitudė, mm;
 a, b, c, d – tinkamumo koeficientų vertės;
 C_H – standumo matrica;
 C_p – savitoji šiluminė talpa, J/(kg·K);
DMA – dinaminė mechaninė analizė;
 E_0 – pusiausvyros modulis;
 G'' – klampumo modulis, Pa;
 G' – tamprumo modulis, Pa;
 g_i – atsipalaidavimo modulis, MPa;
 k – šiluminis laidumas, W/(m·K);
MEMS – mikroelektromechaninės sistemos;
PDMS – polidimetilsiloksanas;
PETG – polietileno tereftalato glikolis;
 $P_{i,j}$ – didžiausia šviesos intensyvumo galia;
PP – polipropilenas;
PRISM – tikslus realaus laiko prietaisas paviršiui matuoti;
PVC – polivinilchloridas;
PZT – švino cirkonato titanatas;
 Q – šilumos šaltinio tankio funkcija;
 q – tankis, kg/m³;
 $RDE_{i,j}$ – santykinis difrakcijos efektyvumas;
SAN – stireno akrilnitrilas;
 T_g – stiklėjimo temperatūra;
 T_i – atsipalaidavimo trukmė, s;
TTS – superpozicijos principas;
UV – ultravioletiniai;
 w – dažnis, Hz;
 δ – fazė tarp įtempių ir deformacijų kreivių;
 ϵ – deformacijos, mm/mm;
 ϵ_{me} – magnetostrikinė deformacija, mm/mm;
 σ – įtempiai, Pa.

IVADAS

Pastaraisiais metais intensyviai kuriamos įvairios technologijos, skirtos mikro- ir nanostruktūroms formuoti. Skirtingose pramonės srityse mikro- ir nanostruktūros gaminamos iš įvairių medžiagų, kurios pasižymi skirtingais parametrais. Sukurtos struktūros naudojamos tokiuose įrenginiuose, kaip biologiniai jutikliai, optiniai įrenginiai, mikroskystiniai prietaisai, elektronikos komponentai, skysčių maišymo įrenginiai, dalelių atskyrimo ar maišymo įrenginiai ir vienos molekulės analizės įrenginiai.

Mikrostruktūra – tai struktūra, kuriai pagaminti yra reikalingi itin preciziški gamybos sprendimai, o šiuolaikiniai mikrostruktūrų gamybos technologijų trūkumai trukdo plėtotis šiam sektoriui. Tokie tradiciniai gamybos procesai, kaip fotolitografija, apdirbimas lazeriu ar ėsdinimas, yra dažnai taikomi, tačiau gamyba trunka ilgai, todėl yra reikalingi specifiniai technologiniai sprendimai. Karšto šampavimo technologija yra viena iš technologijų, kurią taikant struktūros gali būti formuojamos dideliu greičiu, naudojant sąlyginai nedaug sąnaudų. Pagrindiniai karšto šampavimo technologijos privalumai yra mažas defektų skaičius ir galimybė pasirinkti įvairias skirtingas medžiagas, o trūkumas – liekamieji įtempiai. Naudojant karšto šampavimo technologiją, mikrostruktūroms formuoti dažniausiai naudojami šie termoplastikai: polipropilenas (PP), polietileno tereftalato glikolis (PETG), polivinilchloridas (PVC) ir stireno-akrilnitrilas (SAN).

Pagerinti karšto šampavimo technologiją siekiant sumažinti formavimo jėgą, laiką ir temperatūrą buvo mėginama daugelio mokslininkų. Tuo tikslu tyrėjai sukūrė pjezoelektrinį keitiklį, kuris generuoja ultragarsinius virpesius. Buvo nustatyta, kad ultragarso sukurtos vibracijos leidžia sumažinti kontaktinį spaudimo laiką ir jėgą, esant vienodai formavimo temperatūrai. Tačiau pagrindinis šios technologijos trūkumas, kad pjezoelektrinis keitiklis praranda savo vibracines savybes esant aukštesnei nei 120 °C temperatūrai. Šiame tyrime nuspręsta pjezoelektrinį keitiklį pakeisti į magnetrostrikinį. Patobulintas keitiklis suteiktų galimybę ne tik formuoti struktūras aukštesnėje temperatūroje, bet taip pat būtų galima atsisakyti papildomo kaitinimo elemento dėl proceso metu išsiskiriančio didelio šilumos kiekio ir taip optimizuoti įrenginį.

Sukurtoje sistemoje svarbu nustatyti darbinius struktūrų formavimo parametrus, nuo kurių priklauso struktūros kokybė ir atkartojamumo galimybė. Analizuojant mikrostruktūrų formavimo procesą taip pat svarbu nustatyti virpesių įtaką medžiagų elgsenai ir jos parametrus. Be to, analizuojant suformuotų struktūrų parametrus svarbu nustatyti pokytį, kuris įvyksta naudojant naują karšto šampavimo technologiją su magnetrostrikinio keitikliu.

Tyrimo objektas – magnetrostrikinis keitiklis, skirtas terminiam mikrostruktūrų formavimui.

Darbo tikslas – sukurti magnetrostrikinį keitiklį, skirtą mikrostruktūroms formuoti funkcinėse medžiagose, pasižymintį aukšto dažnio žadinimu ir formavimo temperatūra iki 150 °C.

Suformuluotam tikslui pasiekti yra išskelti šie uždaviniai:

1. Įvertinti mikrostruktūrų formavimo technologijas ir pateikti funkcinių medžiagų taikymo sritis.
2. Sukurti valdomų parametrų mikrostruktūrų formavimo proceso su virpesiais baigtinių elementų modelį.
3. Sukurti mikrostruktūrų formavimo įrenginio funkcinių prototipą, kurio pagrindinis formavimo įrankis – magnetrostrikcinis keitiklis su laisvame gale įtvirtinta formavimo matrica.
4. Atlikti magnetrostrikcinio keitiklio funkcinio prototipo eksperimentinį testavimą, nustatant darbinius režimus, tinkamus mikrostruktūroms antrinti funkcinėse medžiagose.

Tyrimo metodologija ir metodai

Mikrostruktūrų formavimo funkcinėse medžiagose technologijai naudota magnetrostrikcinė medžiaga, kurianti aukšto dažnio virpesius. Naudota spaudimo mašina „Tinius Olsen H10KT“ (*Tailored Test Solutions Ltd.*, Pensilvanija, Jungtinės Valstijos), skirta spaudimo sąlygoms užtikrinti. Nikelio formavimo įrankio matrica pagaminta naudojant litografijos ir ęsdinimo procesus. Formavimo įrankio geometrija ir gautos mikrostruktūros tirtos naudojant skenuojamąjį elektroninį mikroskopą „Hitachi S–3400N“ (*Hitachi Ltd.*, Tokijas, Japonija) ir atominės jėgos mikroskopą „NT – 206“ (*Microtestmachines Co.*, Minskas, Baltarusija). Gautų mikrostruktūrų optinės savybės tirtos matuojant difrakcijos efektyvumo maksimumus naudojant lazerį ir didelės galios lazerio šviesos detektorius su monitoriumi „11UP12 Gentec“ (*Gentec*, Kvebekas, Kanada). Teoriniai difrakcijos efektyvumo skaičiavimai atlikti naudojant „GSolver“ (*Grating Solver Development Company*, Saratoga Springsas, Jungtinės Valstijos) programą.

Plastikų mechaninės savybės nustatytos naudojant tempimo mašiną „Instron E10000“ (*Instron*, Bostonas, Jungtinės Valstijos). Tempimo rezultatai analizuoti „MCalibration“ ir „Excel“ programomis. Teorinės spaudimo simuliacijos atliktos su „Ansys 17.0“ (*Ansys®*, Pensilvanija, Jungtinės Valstijos) programine įranga. Magnetrostriktoriaus teoriniai modeliavimai atlikti naudojant „Comsol Multiphysics 5.4“ (*COMSOL®*, Berlingtonas, Jungtinės Valstijos) programą. Baigtinių elementų geometriniai modeliai sukurti naudojant „Inventor“ (*Autodesk*, San Franciskas, Jungtinės Valstijos) programą. Eksperimentiškai magnetrostriktoriaus terminės savybės tirtos šilumine kamera „FLIR T420“ (*Flir*, Oregonas, Jungtinės Valstijos), darbiniai virpesių režimai ir formos analizuotos pasirinkus „PRISM“ (*Hytec*, Los Alamosas, Jungtinės Valstijos) holografinę sistemą, o virpesių amplitudės ir rezonansiniai dažniai analizuoti „Polytech PSV–500–3D–HV“ (*Polytech*, Dieburgas, Vokietija) vibrometru.

Mokslinis darbo naujumas

1. Sukurtas mikrostruktūrų formavimo įrankis, skirtas mikrostruktūroms formuoti termoplastikuose naudojant magnetrostrikcinį keitiklį.
2. Nustatytos PP, PETG, PVC, SAN termoplastikų mechaninės ir dinaminės savybės, įskaitant tamprumo ir klampumo modulius iki viskoelastinės būsenos.

Ginamieji teiginiai

1. Magnetrostrikciniu formavimo įrankiu termoplastikuose formuojamos mikrostruktūros, pasižyminčios mažesniais liekamaisiais įtempiais.
2. Valdomų parametų mikrostruktūrų baigtinis modelis leidžia kiekybiškai ir kokybiškai įvertinti mikrostruktūrų formavimo termoplastikuose procesą.
3. Mikrostruktūrų formavimo procese naudojami virpesiai gerina termoplastikų tekėjimą į mikrostruktūras, taip pagerinant geometrinių parametų atkartojamumą.

Praktinė vertė

1. Sukurtas naujo tipo mikrostruktūrų formavimo įrankis naudojant magnetrostrikcinį keitiklį, skirtą virpesiams ir temperatūrai generuoti.
2. Eksperimentiniai termoplastikų dinaminų savybių tyrimai leidžia atlikti dinaminis teorinius skaičiavimus iki viskoelastinės temperatūros.
3. Sukurti mikrostruktūrų formavimo termoplastikuose baigtinių elementų modeliai, leidžiantys įvertinti plastiko tekėjimą, liekamuosius įtempius mikrostruktūrose ir mikroformavimo darbinis parametrus.

Tyrimo apibavimas

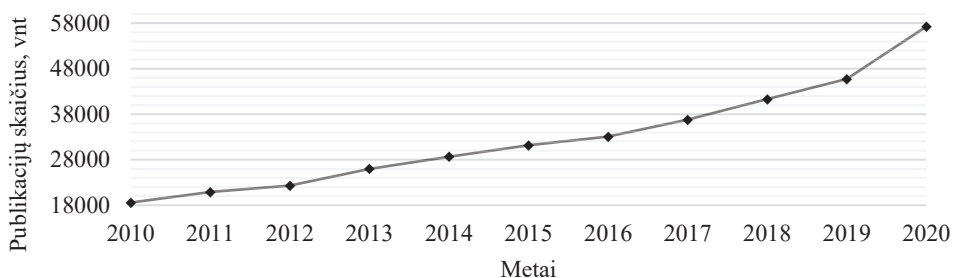
Disertacijos rezultatai paskelbti 2 moksliniuose straipsniuose, kurie yra įrašyti į „Web of Science“ duomenų bazę, turi citavimo indeksą ir yra „2 kvartilio“ žurnaluose. Europos patentų biure įregistruotas patentas „Mikrostruktūrų formavimo polimerinėse medžiagose sistema“ (ang. *System for the formation of microstructures in polymeric materials*) (EP4166245) ir pateikta patentinė paraiška „Mikrostruktūrų formavimo polimerinėse medžiagose sistema su 2D pjezopavara“ (ang. *System for formation of microstructures in polymeric materials with 2D piezoelectric drive*) (K158-98EP). Rezultatai taip pat publikuoti 7 tarptautinėse konferencijose ir 2 tarptautiniuose seminaruose.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Disertaciją sudaro įvadas, literatūros apžvalga, keturi pagrindiniai skyriai, bendrosios baigiamojo darbo išvados, santrauka anglų kalba, literatūros sąrašas, gyvenimo aprašymas, padėka. Iš viso 102 puslapiai, 48 paveikslai, 10 lentelių ir 102 literatūros šaltiniai.

1. MIKROSTRUKTŪRŲ FORMAVIMO TECHNOLOGIJŲ IR JŲ NAUDOJIMO FUNKCINĖSE MEDŽIAGOSE APŽVALGA

Mikroelektronika XXI a. turi didelę įtaką ir prisideda prie įvairių technologijų plėtros. Šiuo metu analogiška revoliucija vyksta mikrostruktūrų ir sistemų kūrimo, plėtojimo ir taikymo srityse [1]. Mikrostruktūrų technologijos tampa vis aktualesnės, o mikrostruktūros vis plačiau taikomos skirtingose srityse. Kylanti susidomėjimą mikrostruktūrų technologijomis parodo kasmet didėjantis naujų mokslinių straipsnių skaičius. Straipsnių, susijusių su raktiniu žodžiu „Microstructure“, skaičiaus didėjimas kiekvienais metais matomas duomenų bazėje „Science Direct“. Publikacijų augimo kreivė pateikta 1.1 pav.



1.1 pav. Publikacijų skaičius su raktiniu žodžiu „Microstructure“ (duomenys iš „Science Direct“ duomenų bazės)

Mikrostruktūrai būdingas matmuo yra mažesnis nei 1 mm. Įprastai mikrostruktūrų sistemos turi kapiliarinius kanalus, kurie sujungti su išoriniais įrenginiais, tokiais kaip siurbiai, vožtuvai, jutikliai, šilumos šaltiniai [2] ir kt. Mikrosistemos turi privalumą, palyginti su tradicinėmis sistemomis. Vykdamas mikrosistemose chemines reakcijas, galima gauti tikslesnius rezultatus naudojant mažiau medžiagos per trumpesnę laiko intervalą [3]. Cheminis jutiklis, pagamintas mikrosistemos pagrindu, gali aptikti medžiagos koncentracijas, tokias kaip viena dalis iš milijardo [4]. Naudojant mikrosistemas medicinoje galima gauti informaciją apie pasikeitusius sveikatos rodiklius [5]. Mikrostruktūros ir mikrosistemos suteikia galimybę kurti kompaktiškesnius, tikslesnius ir efektyvesnius įrenginius, todėl yra perspektyvios [6].

Toliau šiame skyriuje pateikiamos mikrostruktūrų formavimo technologijos, jų klasifikavimas, taikymas ir aprašomi mikrostruktūrų tipai, savybės bei pristatomos funkcinės medžiagos.

1.1. Mikrostruktūrų tipai ir savybės

Naujos gamybos technologijos suteikia galimybę kurti vis sudėtingesnę geometriją. Įvairios struktūros, tokios kaip grioveliai, pasvirusių stulpų ar spiralių matricos, gali pakeisti optines, drėkinimo ar sukibimo savybes, laidumą šilumai ar elektros srovei. Tokių savybių pasikeitimas yra svarbus atliekant praktinius sprendimus, kai įvairių savybių struktūros naudojamos mikroelektronikoje, energijos

konvertavimo ar bioinžinerinių sistemų kūrimo srityse. Atsižvelgiant į pritaikymo sritis yra kuriamos dvimatės ir trimatės geometrijos.

Dvimatė geometrija laikoma tokia, kurios kraštinių santykis yra mažesnis už vieną ($AR < 1$) ir geometrija nekinta vertikalia kryptimi. Dvimate geometrija galima laikyti griovelius, vamzdelius, taškus ar skyles.

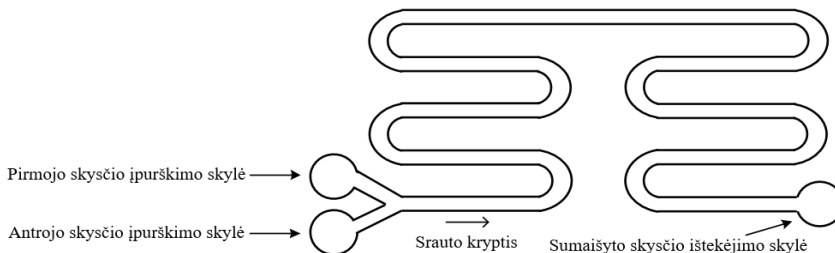
Trimatės geometrijos kraštinių santykis yra didesnis už vieną ($AR > 1$) ir geometrija keičiasi vertikalia kryptimi. Trimačių struktūrų pavyzdys gali būti sulenkti, pasvirę, zigzaginiai ir sraigtiniai stulpai.

Dažniausiai praktikoje vyraujančios sistemos yra trimatės, nes, pavyzdžiui, dvimatės konstrukcijos nepakanka norint valdyti skysčio srautą, todėl yra reikalingi papildomi elementai. Tokiose konstrukcijose pagrindines funkcijas atlieka dvimatės struktūros, o trimatės yra naudojamos kaip pagalbinės. Skysčiams valdyti kuriamos sistemos iš dažniausiai naudojamų komponentų, tokių kaip ertmės ir skylės, mikrokanalai, membranos ar gembės. Šių struktūrinių komponentų geometriniai matmenys yra vienodi visomis kryptimis.

1.1.1. Dažniausiai naudojami struktūriniai komponentai

Ertmės ir skylės yra vieni iš pagrindinių mikrostruktūrų elementų. Ertmių kontūras yra apibrėžtas, o skylių ertmė tęsiasi per visą medžiagos sluoksnį. Ertmių kontūrai gali būti stačiakampės, trapecinės, varpo ir suapvalintos formos. Stačiakampė forma gali būti gaunama naudojant litografinę techniką. Trapecinė forma gaunama taikant drėgno įsodinimo metodą. Ši forma išsiskiria iš kitų, nes jos gylį galima lengvai nustatyti turint vaizdą iš viršaus [3]. Varpo formą galima gauti struktūrą formuojant lazeriu arba abrazyviniu apdirbimu [7]. Apvalios formos struktūra gaunama naudojant liejimo technologiją, tuo metu, kai medžiaga traukiasi, aštrios briaunos suapvalėja [8].

Mikrokanalų skiriamasis bruožas yra tas, kad vienas matmuo yra daug didesnis už kitus. Mikrokanalai yra plačiai naudojami sujungiant du ar daugiau skirtingų mikroįtaisų. Kai kuriais atvejais šis konstrukcinis elementas yra naudojamas siekiant sumaišyti skysčius [9]. Skysčių maišymo proceso mikroskystiniame elemente pavyzdys pateiktas 1.2 pav.



1.2 pav. Mikroskystinis elementas, skirtas dviem skysčiams maišyti

Įvairiose sistemose taip pat naudojama kita struktūra – membrana. Membranos yra struktūros, kur vienas matmuo yra kur kas mažesnis už kitus, todėl membranos yra plokščios. Membranos dažnai naudojamos kuriant mikrosistemas. Šis konstrukcinis elementas naudojamas projektuojant ir gaminant mikrosiurblius. Membrana tokioje konstrukcijoje yra naudojama kaip lankstus siurbimo ir išmetimo

elementas [10]. Kai membrana išgaubta, skystis arba dujos patenka į kamerą, nes sumažėja slėgis. Kai membrana įgaubta, slėgis kameroje padidėja, ir skystis arba dujos pašalinamos iš kameros. Taip skystis arba dujos teka iš vienos sistemos į kitą. Membranos išgaubimą gali valdyti skirtinga pavara. Vienose sistemose tai gali atlikti pjezoelektrinis elementas [11], kitose elektromagnetinis keitiklis [12] ar slėgis [13]. Membranos yra universalus elementas ir gali būti naudojamos srautui reguliuoti. Esant mažam kanalui ar kamerai, kurioje yra sukonstruota membrana, paveikus slėgiu ji išsilenkia, pasiekdama kitą sienos pusę. Prigludus membrana prie kitos sienos kanalą uždaro, ir skystis negali tekėti toliau. Taip galima užtikrinti skysčio valdymą. Membrana taip pat gali būti naudojama skysčiui maišyti ir dozuoti [14].

Mikrogembė – tai sija su vienu fiksuotu galu. Tokios gembės, kurios yra sudarytos iš elektrostatinių rezonatorių, domina tyrėjus dėl didelio pritaikymo potencialo. Geminės struktūros yra jautrios cheminiams aplinkos pokyčiams, dėl to siekiama kurti naujo tipo cheminius jutiklius. Gembės, pagamintos iš biologiškai suderinamų medžiagų, gali būti naudojamos kaip biologiniai jutikliai [15]. Taikant žinomus gamybos metodus, tokius kaip litografija, liejimas ar 3D spausdinimas, gembės yra nesudėtinga sukurti [16]. Derinant gamybą su pjezoelektrinėmis savybėmis pasižyminčiomis medžiagomis galima gauti aukšto dažnio mikrovibracinius įrenginius [17].

Mikrostruktūros, sudarytos iš didelio skaičiaus siaurų griovelių, gali sukurti difrakcijos efektą. Tokios mikrostruktūros atlieka esminį vaidmenį įvairiose optinėse sistemose. Dėl padidėjusio poreikio minimalizuoti sistemas difrakcinės mikrostruktūros pradėtos derinti su mikroelektromechaninių sistemų (MEMS) technologijomis, o tai leidžia sukurti miniatiūrines optines sistemas. Tokių sistemų efektyvumas priklauso nuo sukurtos mikrostruktūros kokybės. Formuojant mikrostruktūrą svarbu, kad medžiaga būtų skaidri, todėl dažniausiai naudojamas stiklas arba skaidrios polimerinės medžiagos. Stiklas dėl savo mechaninių savybių yra sunkiai apdirbamas ir turi ribotas galimybes [18]. Polimerinėse medžiagose formuoti struktūras ne taip sudėtinga, nes jų stiklėjimo temperatūra yra žemesnė nei stiklo. Dažniausiai mikrostruktūra formuojama karšto štamavimo metodu. Polimerinės plonos plėvelės su mikrostruktūra yra naudojamos mikroelektronikos įrenginiuose, optiniuose komponentuose ir funkcinėse dangose. Dėl naujausių bioelektronikos, nešiojamųjų ir implantuojamųjų prietaisų pažangios polimerinės plėvelės tapo dar paklausesnės. Dėl polimerinių plėvelių lankstumo ir lengvumo jos gali būti suprojektuotos ir pagamintos taip, kad tam tikru momentu suirtų, taip sukuriant galimybę jas naudoti implantuojamiesiems įrenginiams ar vaistų tiekimo sistemose [19].

1.1.2. Mikrostruktūrų pagrindinės savybės

Mikrostruktūroms būdingos įvairios savybės, kurios turi įtakos praktiniam jų pritaikymui. Viena iš svarbiausių mikrostruktūrų charakteristikų yra geometrija, kuri gali būti klasifikuojama pagal profilį, laisvės laipsnius ir paviršiaus šiurkštumą [20]. Esant galimybei kontroliuoti šias charakteristikas, išsiplečia mikroprocesų praktinis pritaikymas įvairiose srityse.

Gamybos metodai ir technologijos, naudojamos gaminant mikrostruktūras, turi reikšmingą įtaką mikrosistemų profiliams ir jų savybėms, todėl kūrimo procese turi būti numatytas ir tiksliai apgalvotas gamybos būdas. Parinkus netinkamą gamybos technologiją, sukurta geometrija gali įgyti maišymo, skysčio valdymo ar filtravimo savybių [21]. Taip pat blogai parinkta gamybos technologija gali turėti neigiamos įtakos kuriamos struktūros našumui, paskirčiai ir veikimo principui.

Mikrosistemose yra iki galo išnaudojamas ir medžiagų plastiškumas. Mikrostruktūrų plastiškumas gali padėti valdyti skysčius kaip vožtuvai. Kitose sistemose judančios struktūros gali turėti kelis laisvės laipsnius. Tikslingai išnaudotos judančios sistemos gali parodyti skysčio srauto pokytį [22]. Mikrostruktūrose ir mikrosistemose laisvės laipsnis yra plačiai taikomas ir naudojamas.

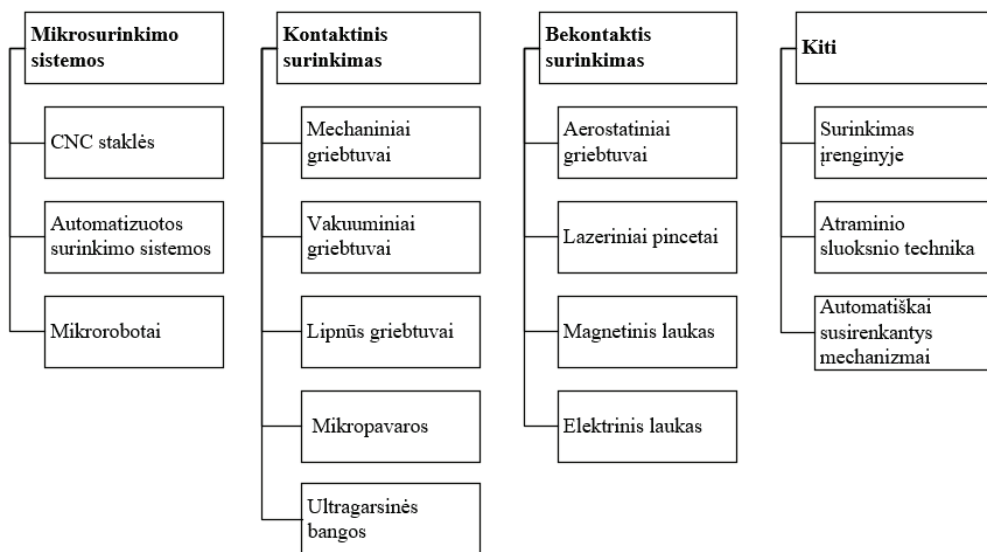
Šiurkštumas parodo paviršiaus kokybę ir yra nustatomas tiek makro-, tiek mikrostruktūrose. Abiejų tipų struktūrose šiurkštumas gali būti ir naudingas, ir nepageidaujamas. Šiurkštumas apibrėžia geometrinę paviršiaus tekstūrą ir įvertina tikrojo paviršiaus nuokrypį nuo idealios formos [23]. Mikrosistemose šiurkštumas gali būti naudingas, pavyzdžiui, kai norima padidinti paviršiaus plotą. Tačiau šiurkštumas taip pat gali sukelti papildomą nepageidaujamą skysčio maišymosi procesą. Tinkamai įvertinus šiurkštumą, jis gali būti naudingas kuriamos sistemos veikimui, tačiau jeigu nėra tinkamai įvertintas – gali turėti neigiamo poveikio ir skatinti atsirasti nepageidaujamus procesus.

1.1.3. Mikrogeometrijos keitimas

Mikrostruktūros sudėtingumas ir paskirtis gali būti keičiami jungiant dvi ar daugiau mikrostruktūrų. Kadangi konstrukcija yra mikromasto, mikrostruktūros surinkimas reikalauja tikslų judesių, o surinkimo neatitiktis gali būti minimali. Netinkamai surinkta konstrukcija gali būti nesandari, veikti netiksliai arba neveikti. Skirtingi metodai sukurti siekiant išvengti prastos kokybės, neatitinkančių standartų gaminių surinkimo metu priklausomai nuo kuriamos struktūros [24]. Skirtingi metodai pavaizduoti 1.3 pav.

Surinkimo metodai mikro- ir makroskalėje yra skirtingi. Mikroskalėje naudojamiems surinkimo įrankiams būtinas didesnis tikslumas. Mikrosurinkimo sistemos yra kuriamos tam, kad būtų užtikrintas matmenų tikslumas. Tokios sistemos gali būti skirstomos į tris pagrindines kategorijas: CNC stakles, automatinius surinkimo įrenginius ir mikrorobotus. CNC ir automatinių surinkimo įrenginių tikslas yra užtikrinti tikslų detalių pozicionavimą [25]. Mikrorobotai yra maži valdomi įrenginiai, kurie gali padėti surinkti mikrosistemą. Dėl mažo dydžio mikrorobotai dažnai yra valdomi magnetiniu lauku [26].

Naudojant surinkimo įrankių sistemas struktūras galima surinkti kontaktiniu ir nekontaktiniu būdu. Naudojant kontaktinį būdą objektas, kurį norima transportuoti / perkelti, turi kontaktą su įrankiu, o nekontaktinis būdas naudoja jėgą, kuri daro poveikį nekontaktuojant su objekto paviršiumi. Perkėlimo metu taikant kontaktinį objekto perkėlimo metodą yra naudojami mechaniniai, lipnūs ar vakuuminiai griebtuvai [27]. Nektaktinio perkėlimo metu galima naudoti tokį perdavimo būdą, kaip elektrinis ar magnetinis laukas, lazeriniai pincetai ar aerostatiniai griebtuvai [28].



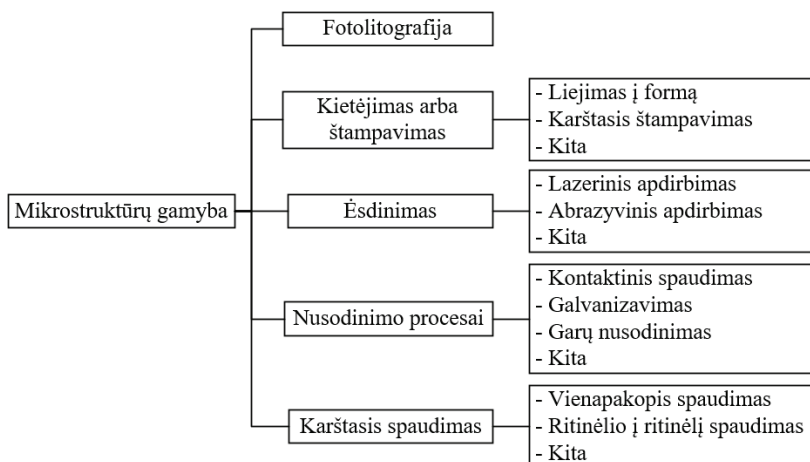
1.3. pav. Mikrosistemų surinkimo būdai

Pastaruoju metu vis dažniau naudojamos savarankiškai susirenkančios struktūros, kurias paveikus papildoma jėga, jos keičia formą [29]. Pavyzdžiui, naudojant origamio struktūras ir geometriją galima išgauti besilenkiančius ar atsiverčiančius mechanizmus. Kuriant savaime susirenkančias sistemas svarbu parinkti tinkamą gamybos būdą ir medžiagos tipą.

1.2. Mikrostruktūrų formavimo technologijos, jų klasifikavimas ir taikymas

Formuoti mikrostruktūras galima įvairiais gamybos būdais. Norint suformuoti mikrostruktūras reikia pasirinkti gamybos metodus atsižvelgiant į skirtingus kriterijus: mikrostruktūros formavimą pasirinktoje medžiagoje, struktūros geometriją, turimą įrangą, į tai, ar gamybos trukmė turi didelę įtaką, ir pan. Vieni metodai labiau tinka formuojant struktūras laboratorijose siekiant užtikrinti kokybę, kiti metodai tinkamesni yra masinėje gamyboje, nes gamybos metodas yra tvaresnis [30].

Mikrogamybos technologijas galima suskirstyti į penkias pagrindines kategorijas: fotolitografiją, kietėjimo arba štapavimo procesus, ėsdinimą, nusodinimo procesus ir karštąjį spaudimą. Šie procesai taip pat gali būti analizuojami ir klasifikuojami pagal apdirbamos medžiagos tipą, konstrukcijos matmenis ar kitas alternatyvas. Skirstymas pagal gamybos technologijos tipą pateiktas 1.4 pav.



1.4 pav. Mikrostruktūrų formavimo technologijų klasifikacija

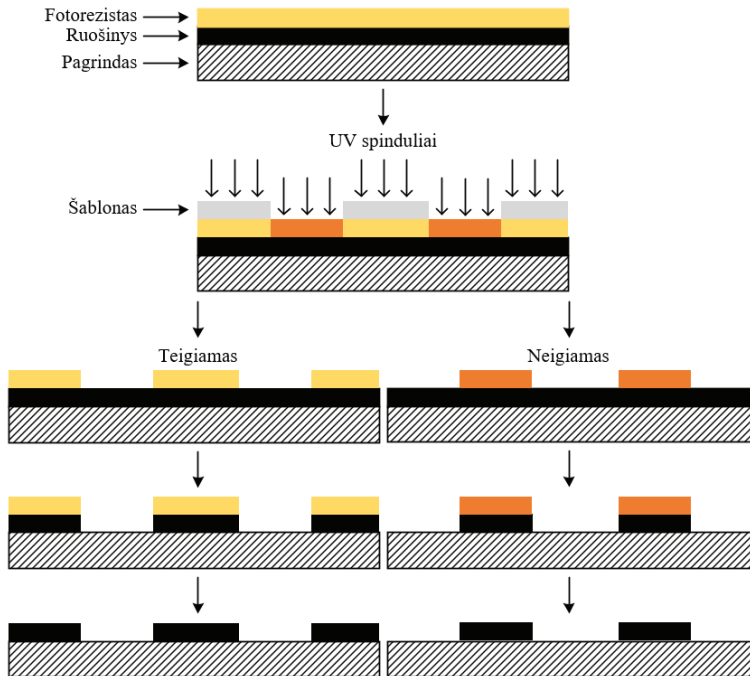
Be minėtų mikrostruktūrų gamybos technologijų, yra kitų svarbių mikrogamybos procesų, tokių kaip atkaitinimas ir difuzija, kurie gali pakeisti struktūros morfologiją ir paviršiaus savybes [31]. Nors šių technologijų svarba ir įtaka formavimui yra didelė, jos mokslinėje literatūroje nėra išskiriamos į atskirą grupę.

1.2.1. Fotolitografija

Fotolitografija yra formavimo technologija, paremta 1950 m. aprašyta litografijos technika. Skirtumas tarp šių dviejų technologijų tas, kad fotolitografijoje yra naudojamas fotošablonas. Fotolitografijos metodas susideda iš trijų pagrindinių žingsnių: fotorezistinės dangos padengimo, paviršiaus eksponavimo ir paviršiaus ėsdinimo. Fotolitografijos proceso eiga pateikta 1.5 pav.

Atliekant pirmąjį žingsnį ant plokštumos uždedamas plonas fotorezistinės medžiagos sluoksnis. Tada plokštelė uždedama ant besisukančio mechanizmo tam, kad būtų išlygintas fotorezistinės medžiagos sluoksnis. Sluoksnio storis priklauso nuo sukimosi greičio, sukimo trukmės ir medžiagos klampumo. Kaip viena iš lyginimo proceso alternatyvų gali būti dozavimas iš robotizuotos rankos [32].

Antro žingsnio metu naudojant per fotošabloną ultravioletinę (UV) šviesą yra kuriama mikrostruktūra. Įprastai UV šviesos šaltinis yra speciali UV lempa, kurios šviesos srautas yra išsklaidytas. Naudojant tokį šviesos šaltinį yra taikomas kontaktinis fotolitografijos metodas. Naudojant šį metodą galima gauti aukštą skiriamąją gebą, tačiau kai tarp medžiagos ir fotošablono yra kontaktas, gaminys gali būti pažeistas ar deformuotas. Siekiant išvengti medžiagų kontaktavimo, metodas patobulintas ir fotošablonas uždedamas 10–20 μm atstumu. Toks patobulinimas padidina šviesos difrakciją, o dėl šios priežasties nepavyksta pasiekti maksimalios skiriamosios gebos. Norint išvengti atsiradusio trūkumo pasiūlyta taikyti projekcinės ekspozicijos sistemą. Ši sistema veikia panašiai kaip projektorius ir gali pasiekti iki 1 μm detalių skiriamąją gebą naudojant 300–400 nm bangos ilgio šviesą [33].



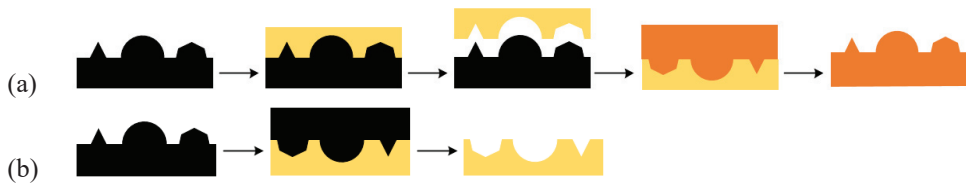
1.5 pav. Fotolitografijos proceso principinė schema

Trečias žingsnis – paviršiaus ėsdinimas. Šio proceso metu nuo paviršiaus pašalinama nereikalinga medžiaga. Parenkant cheminį tirpiklį medžiagų paviršiu pašalinti, svarbu, kad tirpiklis neužterštų suformuotos struktūros. Esant sudėtingai struktūrai ir siekiant išvalyti medžiagos likučius iš gilesnių struktūros vietų, gali būti naudojamas ultragarsinis valymas [34].

1.2.2. Kietėjimo arba štampavimo procesai

Kietėjimas yra procesas, kurio metu pagrindinis dėmesys skiriamas gamybos metodui, kai keičiasi medžiagos būseną iš skystos į kietą. Viena iš labiausiai paplitusių medžiagų, naudojamų šioje formavimo technologijoje, yra polidimetilsiloksanas (PDMS). Tokios formavimo technologijos vienas iš trūkumų, kad negalima pagaminti sąlyginai plonos ir aukštos struktūros, nes ši trūkinėja atskyrimo metu. Plačiausiai paplitę yra du formavimo metodai: liejimas į formą (ang. *replica molding*) ir termoplastikų pertvarkymas (ang. *thermoplastic reshaping*).

Šiuo metu liejimo į formą metodas yra plačiausiai naudojamas mikrostruktūroms formuoti. Ši technologija lengvai pritaikoma masinei gamybai, nes ilgiausiai užtrunkantis procesas yra matricos gamyba. Matrica pagaminama naudojant kitus gerai žinomus mikrostruktūrų apdirbimo / formavimo procesus. Pagaminus matricą, gaminama tarpinė matrica, o ši naudojama liejimui. Toks gamybos metodas išsiskiria žemomis masinės gamybos kainomis ir galimybe rinktis iš plataus medžiagų spektro, kai medžiagos iš skystos būsenos gali virsti kietą [35]. Liejimo į formą technologija pateikta 1.6. pav., a.

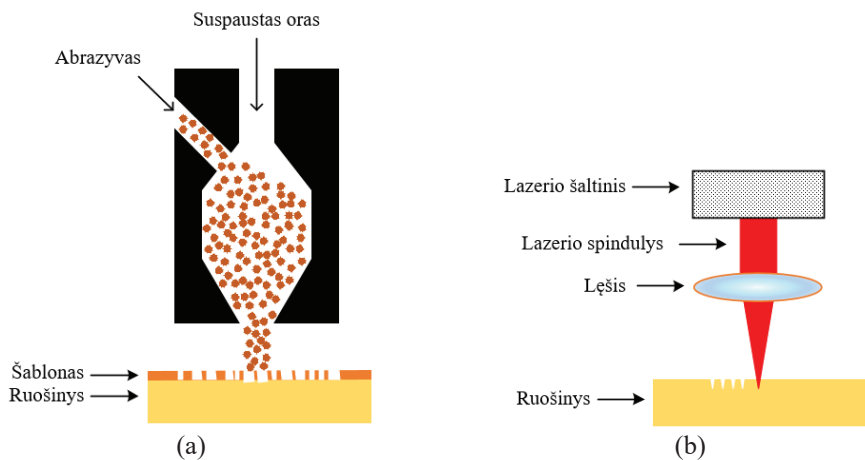


1.6. pav. Principinės liejimo procesų schemas: (a) liejimas į formą; (b) karštas štapavimas

Kietėjimo metu temperatūrai atspari matrica deformuoja termoplastiką kontakto metu. Judanti matrica yra kaitinama ir, pasiekusi plastiką, ją slekia. Kai plastikas pasiekia lydymosi temperatūrą, deformuojasi atkartodamas matricos struktūrą. Termoplastikų pertvarkymo metodas yra greitesnis nei liejimo metodas. Šio formavimo metodo didžiausias trūkumas, kad negalima sukurti sudėtingesnių struktūrų, nes tokiu atveju sudėtinga atskirti matricą ir plastiką dėl naujai suformuotos geometrijos [36]. Termoplastikų karšto štapavimo procesas parodytas 1.6 pav., b.

1.2.3. Ėsdinimo procesai

Mikrokanalai ar mikroskylės gali būti suformuoti naudojant ėsdinimo procesus. Šie metodai yra plačiai paplitę gaminant matricas kitoms technologijoms [37]. Remiantis literatūra, šis metodas turi keturis skirtingus gamybos tipus: drėgną ėsdinimą, sausą ėsdinimą, dalelių nusodinimą ir mechaninius apdirbimo procesus. Plačiau bus apžvelgiami du dažniausiai naudojami mikrostruktūrų formavimo ėsdinimo metodai: abrazyvinis ir lazerinis ėsdinimas. Abu šie metodai priskiriami mechaninio apdirbimo procesams.



1.7 pav. Principinės ėsdinimo procesų schemas: (a) abrazyvinis apdirbimas; (b) lazerinis apdirbimas

Abrazyvinio ėsdinimo metu yra naudojamos abrazyvinės dalelės, kurios nukreipiamos purkštuku į reikiamą vietą. Dalelės dideliu greičiu trenkiasi į medžiagą ir ją atskelia. Abrazyvinių dalelių dydis gali svyruoti nuo 30 μm iki 100 μm . Abrazyvo srovė gali būti sukoncentruota ir naudojama kaip grąžtas arba įrankis formuojant

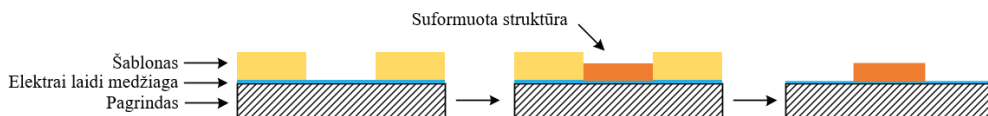
kanalus. Taip pat galima naudoti abrazyvinį šabloną, kuris uždengia tas vietas, kurių apdirbimas nėra reikalingas. Tokiu atveju neuždengtos vietos yra apdirbamos abrazyvu [38]. Abrazyvinis apdirbimas srove pateiktas 1.7 pav., a.

Lazerinis apdirbimas yra plačiai paplitęs dėl nesudėtingo veikimo principo. Šis metodas naudoja fokusuotos šviesos srautą garinant medžiagą. Lazerio šaltinis, naudojamas mikrostruktūroms formuoti, yra dviejų tipų: anglies dioksido (CO_2) ir eksimerinis lazeris. Anglies dioksido lazeris yra pigesnė sistema, tačiau eksimerinis lazeris pašalina medžiagą be terminio poveikio. Taikant šiuos lazerinius metodus gaunama apversto varpo formos mikrostruktūra, o kanalo dydis ir gylis gali būti modifikuojami keičiant galios intensyvumą, perėjimų skaičių ir formavimo greitį [39]. Lazerinio apdirbimo formavimo procesas pateiktas 1.7 pav., b.

1.2.4. Nusodinimo metodai

Anksčiau minėti gamybos metodai yra plačiai taikomi, tačiau jų trūkumas, kad negalima formuoti skirtingų savybių ar funkcijų struktūrų, kai naudojamos skirtingos medžiagos. Tam tikslui yra žinomi tokie nusodinimo procesai (angl. *additive processes*), kaip galvanizavimas ar oksidavimas. Taikant šiuos metodus, medžiagą galima nusodinti ant kitos medžiagos paviršiaus ir taip pakeisti struktūros savybes.

Galvanizavimo procesas yra tinkama alternatyva garų nusodinimo procesui, nes efektyviau formuojamos didesnio aukščio struktūros. Taikant galvanizavimo metodą galima gauti kokybišką struktūrą nuo 1 μm iki 200 μm . Galvanizavimo metu metalo jonų dalelės nusodinamos ant paviršiaus. Šis procesas pavaizduotas 1.8 pav. Šiam procesui reikalingas elektrai laidus arba padengtas elektrai laidžia medžiaga pagrindas. Mikrostruktūra yra formuojama naudojant šabloną, kuris uždengia tam tikrą dalį elektrai laidžios medžiagos. Procesas vyksta naudojant elektrolizę. Pašalinus šabloną gaunama suformuota struktūra [40].



1.8 pav. Principinė galvanizavimo ir oksidacijos proceso schema

Oksidacija yra natūraliai gamtoje vykstantis procesas, kai medžiagos paviršius chemiškai reaguoja su deguonimi susidarant oksidams. Oksidacijos procesą galima sustabdyti paviršių padengiant apsauginiu sluoksniu. Jei šablone yra paviršių formuojanti struktūra, galima gauti išskirtinių savybių oksidacinę struktūrą. Oksidaciniam procesui pagreitinti ir aukštesnei struktūrai sukurti įprastai naudojamas kaitinimo elementas [41].

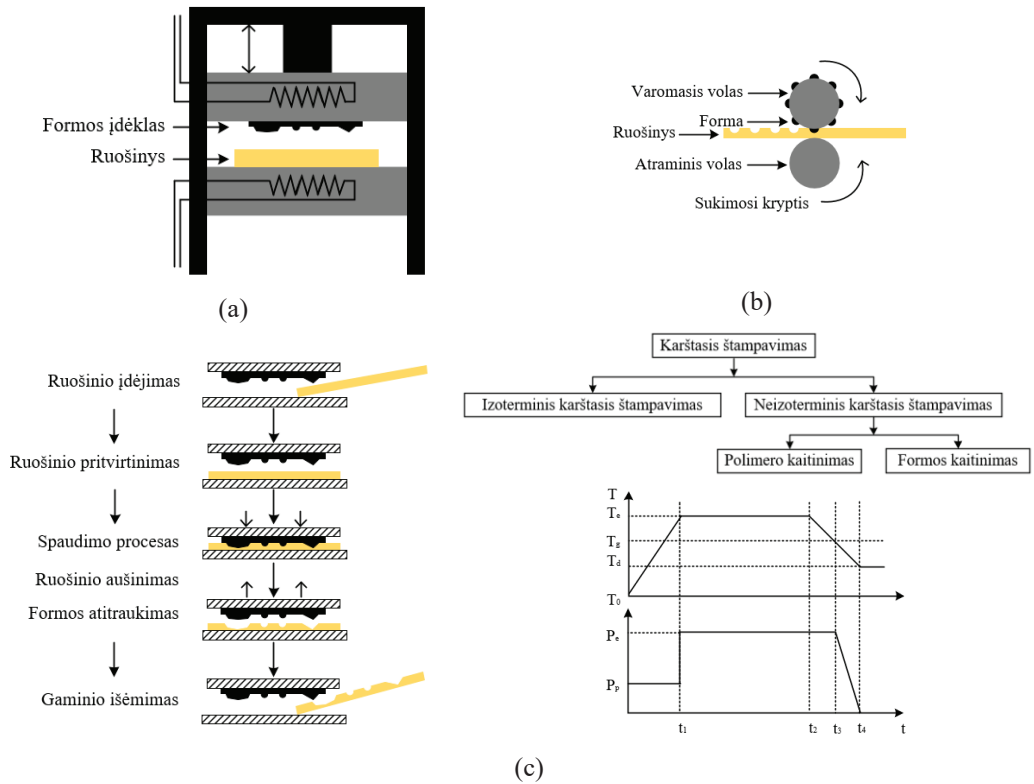
1.2.5. Karšto spaudimo technologija

Mikrokanalų formavimas termoplastikuose plačiai naudojamas dėl savo išskirtinių savybių. Palyginti su stiklo pagrindu sukurtomis struktūromis, plastikinės struktūros yra atsparesnės smūgiams, pasižymi didesniu skaidrumu, mažesnėmis formavimo sąnaudomis ir galimybe formuoti sudėtingesnes struktūras. Dėl žemos lydymosi temperatūros dažniausiai tokiose medžiagose, kaip termoplastikai,

naudojama karšto spaudimo technologija. Karšto spaudimo technologija pasižymi dideliu tikslumu, mažomis gamybos sąnaudomis, todėl neretai naudojama masinėje gamyboje. Priklausomai nuo formuojamos struktūros tipo ir gamybos masto, yra du formavimo būdai – vienpakopis ir ritinėlio į ritinėlių karštas įspaudimas.

Įprastą formavimo metodą (vienpakopį) sudaro dvi plokštės. Darbo medžiaga, dažniausiai polimeras, padedama ant pagrindo plokštės, o formuojama struktūra pritvirtinama prie viršutinio pado. Darbo medžiaga kaitinama iki stiklėjimo temperatūros naudojant šildymo elementą. Tada viršutinis padas spaudžia darbinę medžiagą su apkrova, ir taip pakeičiama medžiagos geometrija. Tada plokštės atskiriamos [42]. Vienpakopis karštas štapavimas pateiktas 1.9 pav., a.

Ritinėlio į ritinėlių metodo metu naudojami du volai, kur vienas yra mikrostruktūra, o kitas naudojamas kaip atraminis volas. Pagrindinis volas šildomas iki tokios temperatūros, kad darbinė medžiaga pasiektų stiklėjimo temperatūrą. Tarp volų ridenamas darbinės medžiagos lakštas, kuriame formuojama struktūra. Tokiu būdu gali būti užtikrinama besitęsianti mikrostruktūra [43]. Ritinėlio į ritinėlių metodas pateiktas 1.9 pav., b.



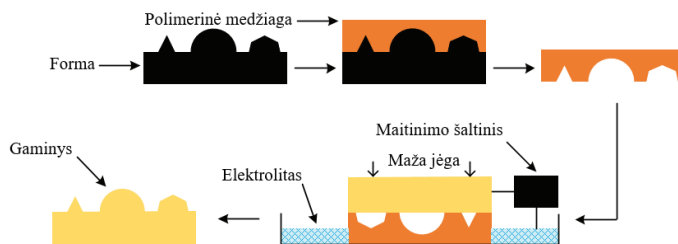
1.9 pav. Karštojo štapavimo principinės schemos: (a) vienpakopis metodas; (b) ritinėlio į ritinėlių metodas; (c) kaitinimo stadijos

Vienas iš didžiausių uždavinių, su kuriuo susiduriama formuojant mikrostruktūrą karšto spaudimo technologijos metu, jog sudėtinga užtikrinti formavimo proceso parametrų lygius, kad būtų užtikrintas įrankio ertmės užpildymas.

Parinkus netinkamus parametrus gaunama nekokybiška ar sugadinta struktūra. Siekiant geresnių kokybės rezultatų, stengiamasi karšto štapavimo metodu automatizuoti parenkant reikalingus gamybos parametrus [44].

1.2.6. Nauji struktūrų formavimo metodai

Plėtojant technologijas, nuolatos yra kuriami geresni ir daugiau adaptyvūs metodai. Inovatyvūs mikrostruktūrų formavimo būdai turi savų privalumų, kurie gali būti taikomi specifinėse srityse. Pavyzdžiui, drėgnojo štapavimo technika yra viena iš naujausių technologijų, kurios metu naudojamas gelinis šablonas tam, kad būtų lokalizuojami elektrocheminiai procesai. Šios technologijos vienas iš trūkumų, kad suformuota struktūra yra be aštrių briaunų [45]. Drėgnojo štapavimo technika pateikta 1.10 pav.



1.10 pav. Principinė drėgnojo štapavimo proceso schema

Femtosekundinis lazeris – sąlyginai geresnė mikrostruktūrų formavimo technologija nei anksčiau minėta eksimerinio lazerio technologija. Femtosekundinio lazerio technologija nepalieka jokių mikroįtrūkimų ar liekamosios lydymosi zonos, tačiau pati technologija nėra dar iki galo išplėtota [46]. Erdvinės mikrogeometrijos kūrimui svarbi 3D spausdinimo technologija. Ši technologija yra viena greičiausių formavimo technologijų kuriant prototipines mikrostruktūras. 3D spausdinimo technologija turi daug skirtingų formavimo technologijų, tačiau visos šios technologijos turi vieną esminį trūkumą – jos nėra pritaikomos masinėje gamyboje, nes struktūros formavimo procesas sąlyginai ilgas [47].

1.2.7. Mikrostruktūrų formavimo technologijų palyginimas

Visos formavimo technologijos turi privalumų ir trūkumų. Nėra vienos technologijos, kurią naudojant būtų galima formuoti įvairaus sudėtingumo mikrostruktūras visuose tipuose medžiagų. Gamybos metodų palyginimas pateiktas 1.1 lent.

Fotolitografija, karštas štapavimas, abrazyvinis apdirbimas, lazerinis apdirbimas ir 3D spausdinimo technologijos reikalauja daug sudėtingos įrangos, o galvanizavimas ir oksidacija yra sudėtingiausi gamybos metodai, nes reikia žinoti, suprasti ir valdyti cheminius procesus, kurie dažnai būna kelių stadijų [48–55]. Lyginant 3D spausdinimo technologiją su abrazyviu apdirbimu, 3D spausdinimo technologija pasižymi didesniu tikslumu ir galimybe kurti neriboto sudėtingumo geometriją [55].

1.1 lentelė. Mikrostruktūrų gamybos metodų palyginimas

Gamybos metodas	Smulkiausi geometriniai elementai	Gamybos sudėtingumas*	Reikalinga įranga**	Medžiagos tipas	Šaltinis
Fotolitografija	~ 1 μm	2	3	Fotorezistai	[48]
Karštas štapavimas	~ 1 μm	1	3	Polimerai	[49] [50]
Abrazyvinis apdirbimas	~ 2–4 μm	3	3	Įvairūs	[51]
Lazerinis apdirbimas	~ 1 μm	2	3	Įvairūs	[52]
Galvanizavimas	~ 10 μm	3	1	Laidininkai	[53]
Oksidacija	–	3	1	Metalai	[54]
3D spausdinimas	100 nm	3	3	Įvairūs	[55]

* 1 – lengva atlikti, 2 – vidutiniškai sudėtinga atlikti, 3 – sudėtinga atlikti.

** 1 – nereikia daug įrankių, 2 – reikia vidutiniškai sudėtingos įrangos, 3 – reikia sudėtingos įrangos.

Abrazyvinio apdirbimo technologijos metu galima efektyviai ir našiai formuoti geometriją [51].

1.3. Funkcinės medžiagos

Funkcinės medžiagos apibūdinamos kaip medžiagos, kurios turi tam tikrų joms būdingų savybių ar funkcijų. Pavyzdžiui, viena iš savybių gali būti pjezoelektriškumas, magnetizmas ar energijos kaupimas. Taip pat funkcinėmis medžiagomis galima vadinti ir tokias medžiagas, kurios savo medžiagų grupėje turi išskirtines savybes. Pavyzdžiui, tarp metalų kaip funkcinė medžiaga gali būti išskiriamas aliuminis, pasižymintis mažu tankiu, kas suteikia galimybę šią medžiagą naudoti kuriant lengvas konstrukcijas.

Kuriant mikrostruktūras, funkcinės medžiagų savybės tampa dar svarbesnės. Tinkamas medžiagos parinkimas gali suteikti konstrukcijai reikalingų savybių. Skirtingas funkcinės medžiagas galima suskirstyti į skirtingas grupes [56], tai silicis, polimerai, metalai, stiklas ir kiti.

Silicis yra labai plačiai naudojama medžiaga mikroelektronikos srityje. Silicis kaip funkcinė medžiaga išsiskiria savo puslaidininkinėmis savybėmis. Šios medžiagos savybės leidžia keisti laidininko varžą. Žemas šiluminis plėtimosi koeficientas leidžia naudoti silicį mikrosistemose, kurios yra veikiamos aukštos temperatūros [57]. Silicis taip pat pasižymi geromis mechaninėmis savybėmis. Šios medžiagos savybės yra plačiai naudojamos tokiuose įrenginiuose, kaip mikrosiurbliai, slėgio jutikliai ar akcelerometrai.

Polimerai šiuo metu labai plačiai naudojami ne tik dėl jų mechaninių savybių, bet ir dėl didėjančio pasirinkimo ir vykdomų intensyvių tyrimų kuriant, analizuojant ir pritaikant šias medžiagas. Polimerai yra dielektrikai, pasižymintys mažu mechaniniu stiprumu ir žema lydymosi temperatūra. Vienas iš pagrindinių polimerų privalumų yra jų funkcionalumas. Polimerai gali būti termoplastikai arba reaktoplastai. Reaktoplastai, palyginti su termoplastikais, yra stabilesni ir geriau išlaiko pagrindinius matmenis keičiantis aplinkos sąlygoms. Termoplastikai yra

plačiau naudojami gamyboje, nes juos galima lengvai performuoti naudojant paprastas technologijas [58]. Dažniausiai naudojami termoplastikai yra polipropilenas (PP), polietileno tereftalato glikolis (PETG), polivinilchloridas (PVC) ir stireno-akrilitrilas (SAN).

PP termoplastikas išsiskiria biologiniu suderinamumu, aukšta eksploataavimo temperatūra, maža makromolekuline adsorbcija ir netoksiškumu [59]. Biologijoje ir medicinos srityse PP plastikas naudojamas kuriant reakcijos vamzdelius, skirtus įvairiems tyrimams, antgaliams. Taip pat plastikas medicinoje naudojamas gaminant žmogaus implantus [59]. Maisto pramonėje iš šio plastiko gaminamos dėžutės maistui. Kuriant mikroskystinius lustus PP plastikas leidžia pasiekti didelį konstrukcinį stiprumą, standumą ir žemą adsorbciją [60]. PP plastiką MEMS įrenginiuose taip pat galima naudoti šiluminei mikropavarai [61].

PETG plastikas pasižymi labai geromis optinėmis savybėmis, biologiniu suderinimu ir galimybe naudoti šį plastiką su 3D spausdintuvu. Šios galimybės leidžia sukurti neribotos geometrijos skaidres mikrosistemas, kurias naudojant galima kurti kuro elementus ar mikromaišytuvus [62]. PETG plastikas turi aukštesnę stiklėjimo temperatūrą (T_g), o dėl šios priežasties šis plastikas gali būti naudojamas kaip šablonas plastikams, kurių stiklėjimo temperatūra yra žemesnė [63]. PETG plastikas taip pat taikomas kaip pagrindas elektrocheminiams mikroskystiniams prietaisams ir jutikliams kurti [64].

PVC plačiai taikomas mikroskystinių lustų gamybai. Šis plastikas pasižymi geru biologiniu suderinamu, todėl taip pat plačiai naudojamas medicinos prietaisų pramonėje įvairiems skysčiams (dializės, kraujo ar kraujo produktų tirpalams) laikyti [65]. PVC polimero vienas iš pagrindinių trūkumų yra prastas cheminis atsparumas aromatiniams ir angliavandeniliams tirpikliams, kurie riboja cheminių reaktorių taikymą [66]. PVC plastike suformuota mikrostruktūra gali būti naudojama kaip antirefleksinis sluoksnis ant saulės elementų [67]. Šiame plastike sukurtas mikroskystinis prietaisas gali būti taikomas ląstelių biologijoje, bioinžinerijoje ar cheminėje junginių analizėje [66].

SAN termoplastikas pasižymi dideliu tvirtumu, atsparumu cheminėms medžiagoms, tirpikliams ir puikiomis apdirbimo savybėmis [68]. Tačiau prastas tvirtumas ir neatsparumas įtrūkimams lemia mažesnę šios medžiagos pritaikymą [69]. Nepaisant minėtų trūkumų, SAN plastikas plačiai naudojamas srityse, kur geriausiai atsiskleidžia jo gerosios savybės. Tyrėjai SAN plastiką naudoja kurdami membranas, nes plastikas pasižymi geromis šiluminės varžos savybėmis, todėl tai leidžia sumažinti nuostolius, patiriamus naudojant membraną [70]. SAN plastiko stiklėjimo temperatūra yra aukštesnė nei 100 °C, todėl šis plastikas gali būti naudojamas su verdančiu vandeniu [71].

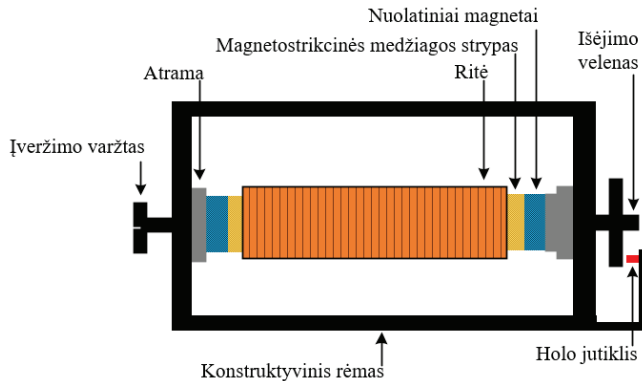
Metalai pasižymi dideliu mechaniniu atsparumu, elektros laidumu ir aukšta lydymosi temperatūra. Įprastai metalai yra naudojami mikroįrenginių ir sistemų kontaktams. Dėl jų gerų mechaninių savybių ir laidumo tokie kontaktai tampa patvariu ir ilgaamžišku sprendimu. Metalai taip pat naudojami elektromagnetiniam efektui sukurti ir taip valdyti mikrodaleles. Mechaninės metalų savybės išnaudojamos ir mikrosistemose, kur yra aukštas slėgis, tačiau apdorojant metalus dėl jų mechaninių savybių yra taikomi sudėtingesni gamybos metodai [72].

Stiklas pasižymi labai geromis optinėmis savybėmis, jo aukštesnė lydymosi temperatūra ir geresnės mechaninės savybės nei skaidrių plastikų. Stiklą sudaro silicio dioksidas (SiO_2). Taip pat stiklo sudėtyje gali būti papildomų priemaišų, kurios suteikia specifines optines arba mechanines savybes. Dėl didelio trapumo šioje medžiagoje sunku suformuoti mikrostruktūras, o gamybos metodai taip pat yra sudėtingesni ir rečiau naudojami, pavyzdžiui, drėgnasis stiklo ėsdinimas [73].

Paminėtos keturios pagrindinės medžiagų grupės, kurios yra naudojamos mikrostruktūrų gamyboje, tačiau taip pat yra ir kitų funkcinių medžiagų, kurios gali būti plačiai naudojamos. Tokie medžiagų junginiai, kaip silicio nitridas / dioksidas, gali būti naudojami mikroelektrinių prietaisų gamyboje [74]. Silicio karbidas naudojamas sistemose, kur yra matuojama aukšta temperatūra [75]. Švino cirkonato–titanato keramika, dar kitaip žinoma kaip PZT, plačiai naudojama kuriant mikropavaras ar membranas [76]. Toks platus funkcinių medžiagų pasirinkimas leidžia sukurti išskirtinėmis savybėmis pasižyminčius mikrorenginius.

Dar viena funkcinė medžiaga, kurią 1842 m. atrado Džeimsas Preskotas Džaulis, yra magnetrostrikinė medžiaga, pasižyminti jai būdingomis savybėmis. Tyrėjas nustatė, kad tokios funkcinės medžiagos, kaip plienas, gali keisti savo ilgį, kai yra veikiamos magnetiniu lauku. Pailgėjimas atsiranda, kai kūnas yra įmagnetinamas. Tačiau dėl mažos deformacijos šio magnetrostrikinio efekto pritaikymas buvo menkas [77]. Vėliau pastebėtas atvirkščias procesas, kai, paveikus magnetrostrikinę medžiagą apkrova, medžiaga keičia savo magnetines savybes. Toliau apie šimtmetį nebuvo atliktų jokių reikšmingų magnetrostrikcijos srityje tyrimų, iki kol dėmesys buvo atkreiptas į retųjų metalų naudojimą kuriant įvairius junginius. Buvo tirti skirtingi junginiai, bet vienomis iš geriausių savybių pasižymėjo terfenolis [78].

Standartiškai magnetrostrikinę sistemą sudaro magnetrostrikinė medžiaga, magnetinė grandinė, maitinimo ritė, konstrukcinis rėmas ir jutiklis, skirtas grįžtamajam ryšiui. Standartinės komplektacijos magnetrostrikinė sistema pateikta 1.11 pav.



1.11 pav. Linijinio magnetrostrikinio keitiklio schema

Magnetrostrikinės medžiagos pradėtos naudoti įvairaus tipo keitikliuose ir jutikliuose. Mikropozicionavime magnetrostrikinės medžiagos naudojamos junginėjant jungiklius, kurie pasižymi dideliu tikslumu [79]. Varikliai, sukurti

naudojant magnetrostrikcines medžiagas, pasižymi geromis jėgų ir sukimo momento charakteristikomis [80]. Nors aktyvių vibracijų sistemose dažniausiai naudojama pjezokeramika, bet magnetrostrikcinis keitiklis leidžia užtikrinti didesnę energijos tankį ir didesnę smūginę jėgą [81].

1.4. Mikrostruktūrų formavimo tyrimai Kauno technologijos universitete

Karšto šampavimo proceso tobulinimas ir virpesių taikymas skirtingose srityse buvo analizuojamas ir Kauno technologijos universitete. Šiame skyriuje trumpai pristatomi mokslo daktarų Birutės Narijauskaitės, Roko Šakalio, Alfredo Bruniaus, Amer Sodah ir Tomo Janušo atlikti tyrimai.

Dr. Birutė Narijauskaitė baigė doktorantūros studijas 2013 m. ir atliko tyrimus, susijusius su mikroreljefo formavimo metodo kūrimu. Tyrėja analizavo mikrostruktūrų formavimą naudojant karšto spaudimo metodą ir vibracijas. Taip pat atliko eksperimentinius ir teorinius skaičiavimus bei palygino juos tarpusavyje. Formavimo procese buvo naudojama nikelio stačiakampė 4 μm periodo ir 100 nm gylio matrica, o įspaudimui naudotas polikarbonatas [82].

Dr. Rokas Šakalis baigė doktorantūros studijas 2016 m. ir atliko tyrimus analizuodamas aukšto dažnio virpesių įtaką mikrostruktūrų antrinimui karšto spaudimo metu. Karštas šampavimas buvo atliekamas ultragarsiniu karšto spaudimo įrenginiu „HIQ Dialog 1200“. Mikrostruktūros analizuotos naudojant difrakcinio efektyvumo matavimus. Tyrimo metu nustatyta, kad dėl virpesių pasiekta didesnė santykinė difrakcinė vertė [83].

Dr. Alfredas Brunius, įgijęs mokslų daktaro laipsnį 2018 m., studijų metu atliko tyrimus kurdamas kompozicinę pjezoelektrinę medžiagą. Disertacijos pagrindinis tikslas buvo sukurti mikrokompozitinę medžiagą funkciniais elementams. Kuriant biomedicininį jutiklį pasirinkta dvimatė struktūra, kuri formuota karštu įspaudimu. Suformuota struktūra gali būti pritaikyta biomedicinoje, mikropavarose ar mikrojutikliuose [84].

Dr. Amer Sodah baigė doktorantūros studijas 2020 m. ir atliko tyrimus kuriant bei analizuojant mikroelektromechaninį jutiklį. Tyrimų metu naudoti aukšto dažnio virpesiai, orientuoti normaline kryptimi. Atlikti modeliavimai parodė, kad naudojant virpesių sužadimą galima suformuoti gilesnę struktūrą paviršiuje. Suprojektuotas sanatrodas, kurio rezonansinis dažnis 11,223 kHz. Taip pat suformuotos mikrostruktūros ir išmatuotas difrakcinis efektyvumas, o rezultatai parodė, kad formavimo procese naudoti virpesiai padidino difrakcinį efektyvumą [85].

Dr. Tomas Janušas, įgijęs mokslų daktaro laipsnį 2022 m., studijų metu atliko tyrimus, susijusius su funkciniais mikroskystiniais elementais. Mikrokanalams formuoti buvo naudojamas terminis formavimo įrenginys, kurį sudarė virpesių koncentratorius, pjezokeraminiai žiedai, kaitinimo elementas ir valdiklis. Formavimo įrenginio pagrindinis tikslas buvo sumažinti vidinius įtempius. Po atliktų eksperimentų nustatyta, kad vibracinis žadinimas sumažina liekamuosius įtempius [86].

1.5. Disertacijos uždaviniai

Šiuolaikiškos mikrostruktūros yra naudojamos plačiai pramonėje kuriant mikrosistemas. Tokiose mikrostruktūrose svarbu užtikrinti kokybę ir pašalinti įtempius, liekančius po gamybos proceso. Todėl svarbu kurti ir tobulinti esamas mikrostruktūrų formavimo technologijas siekiant sukurti kokybiškesnę, mažiau defektų turinčią mikrostruktūrą. Todėl šios disertacijos tikslas yra sukurti magnetrostrikcinį keitiklį, skirtą mikrostruktūroms formuoti funkcinėse medžiagose, pasižymintį aukšto dažnio žadinimu ir formavimo temperatūra iki 150 °C. Tikslui pasiekti suformuluojami keturi uždaviniai:

1. Įvertinti mikrostruktūrų formavimo technologijas ir pateikti funkcinių medžiagų taikymo sritis.
2. Sukurti valdomų parametrų mikrostruktūrų formavimo proceso su virpesiais baigtinių elementų modelį.
3. Sukurti mikrostruktūrų formavimo įrenginio funkcinį prototipą, kurio pagrindinis formavimo įrankis – magnetrostrikcinis keitiklis su laisvame gale įtvirtinta formavimo matrica;
4. Atlikti magnetrostrikcinio keitiklio funkcinio prototipo eksperimentinį testavimą, nustatant darbinis režimus, tinkamus mikrostruktūroms antrinti funkcinėse medžiagose.

2. MIKROSTRUKTŪRŲ FORMAVIMO PROCESO ANALIZĖ NAUDOJANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ MODELĮ DINAMINĖJE APLINKOJE

Kadangi šios disertacijos tikslas yra sukurti magnetrostrikinį keitiklį, skirtą mikrostruktūroms formuoti funkcinėse medžiagose, pasižymintį aukšto dažnio žadinimu ir formavimo temperatūra iki 150 °C, todėl vienas iš disertacijos uždavinių yra sukurti valdomų parametrų mikrostruktūrų formavimo proceso su virpesiais baigtinių elementų modelį.

Standartiniuose deformacijų modeliavimuose naudojamos medžiagų savybės, kurios aprašo medžiagų elgseną kambario temperatūroje. Esant karštam štam pavimui formavimo temperatūra viršija medžiagos stiklėjimo temperatūrą, dėl šios priežasties reikia praplėsti ir aprašyti medžiagų savybes platesniame temperatūrų intervale. Esant karštam štam pavimui su virpesiu, medžiagoje pradeda vykti papildomi procesai, kuriuos galima aprašyti viskoelastiniu modeliu. Medžiagų savybės yra nustatomos eksperimentiškai išmatavus įtempius, deformacijas, kampą tarp įtempių ir deformacijų.

2.1. Plastikų mechaninių savybių nustatymas iki viskoelastinės būsenos

Vienas iš tinkamiausių aukštos kokybės mikrostruktūros kūrimo ir tyrimo būdų yra naudoti baigtinių elementų modelį. Sukurtas modelis, nepriklausomai nuo geometrijos, yra lengvai adaptuojamas prie naujos pasikeitusios geometrijos. Toks modelis leidžia nesudėtingai nustatyti reikalingus struktūros formavimo parametrus.

Standartiškai matematiniuose modeliuose yra analizuojama elastingos savybės pasižymintios medžiagos elgsena. Tai tokia medžiagos elgsena, kai kūnas, paveiktas deformacijos, sugeba grįžti į pradinę formą, kai apkrova pašalinama. Priešingas procesas yra plastiškumas, kai objektas lieka deformuotas ir negrįžta į pradinę formą apkrovą pašalinus.

Plastikų mechaninėms savybėms nustatyti buvo pasirinkti keturi literatūroje aprašomi termoplastikai: polipropilenas (PP), polietileno tereftalato glikolis (PETG), polivinilchloridas (PVC) ir stireno akrilonitrilas (SAN). Teorinės PP, PETG, PVC ir SAN plastikų mechaninės savybės, įskaitant Jungo modulį ir Puasono santykį, yra pateiktos 2.1 lent.

2.1 lentelė. Mechaninės PP, PETG, PVC, SAN plastikų savybės [77–79]

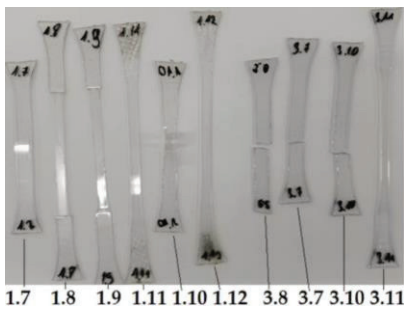
	PP	PETG	PVC	SAN
Tamprumo modulis, MPa	1325	2950	3275	3650
Puasono santykis	0,43	0,40	0,40	0,35
Tūrinis modulis, MPa	3889	4868	5458	4056
Šlyties modulis, MPa	1296	1054	1170	1352
Šiluminio plėtimosi koeficientas, 1/°C	$6,8 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$6,8 \cdot 10^{-5}$
Stiprumo riba, MPa	26,1	58,7	54,8	83,4

Termoplastikų plastinėms deformacijoms nustatyti reikia žinoti papildomas medžiagų savybes. Tampriosios dalies deformacijas galima apibūdinti naudojant Jungo modulį, tačiau esant plastinėms deformacijos naudojama daugiatisinė

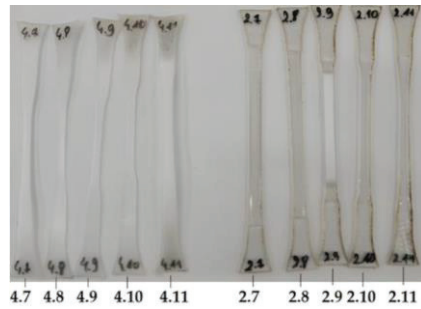
izotropinė tamprumo kreivė. Šiai kreivei nustatyti atliekami plastikų tempimo bandymai.

Termoplastikų elgseną atliekant tempimo bandymus plastinės deformacijos stadijoje galima apibūdinti ir aprašyti keliais būdais. Šiame tyrime naudojama daugiatisinė tamprumo kreivė, kuri taikoma tais atvejais, kai yra pasiekama arba viršijama stiklėjimo temperatūra (T_g). Visų pirma atlikti keturių termoplastikų tempimo bandymai kambario temperatūroje. Vėliau, siekiant nustatyti daugiatisinį izotropinį tamprumą, pasirinktos kitos temperatūros.

Tempimo bandymas atliktas „Instron E10000“ bandymo mašina. Bandymo mašiną sudarė standartiniai tempimo komponentai ir papildomai tyrimui naudojama šiluminė kamera. Tyrime naudota šiluminė kamera, skirta nustatytos temperatūros aplinkai sukurti. Tempimo eksperimentui naudotas standartinis ISO 527–2 bandinys, kuris dar kitaip vadinamas „šuns kaulu“ (ang. *dog bone*). Bandiniai pagaminti iš PP, PETG, PVC ir SAN plastiko lakštų. Bandiniai suformuoti naudojant kompiuterizuotas (ang. *computer numerical control*) lazerines stakles. Paruošti penki bandiniai iš kiekvieno termoplastiko buvo tempiami skirtingose temperatūrose. Visi PP, PETG ir PVC plastikų bandiniai buvo ištempti, tačiau SAN plastiko, pasižyminčio trapumu, keletas bandinių sulūžo. Pavykus pasiekti SAN stiklėjimo temperatūrą, bandinys pakeitė savybes ir išsitempė. Tempimo bandinių ir eksperimento nuotraukos pateiktos 2.1 pav.



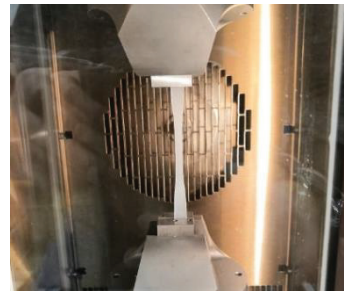
(a)



(b)



(c)

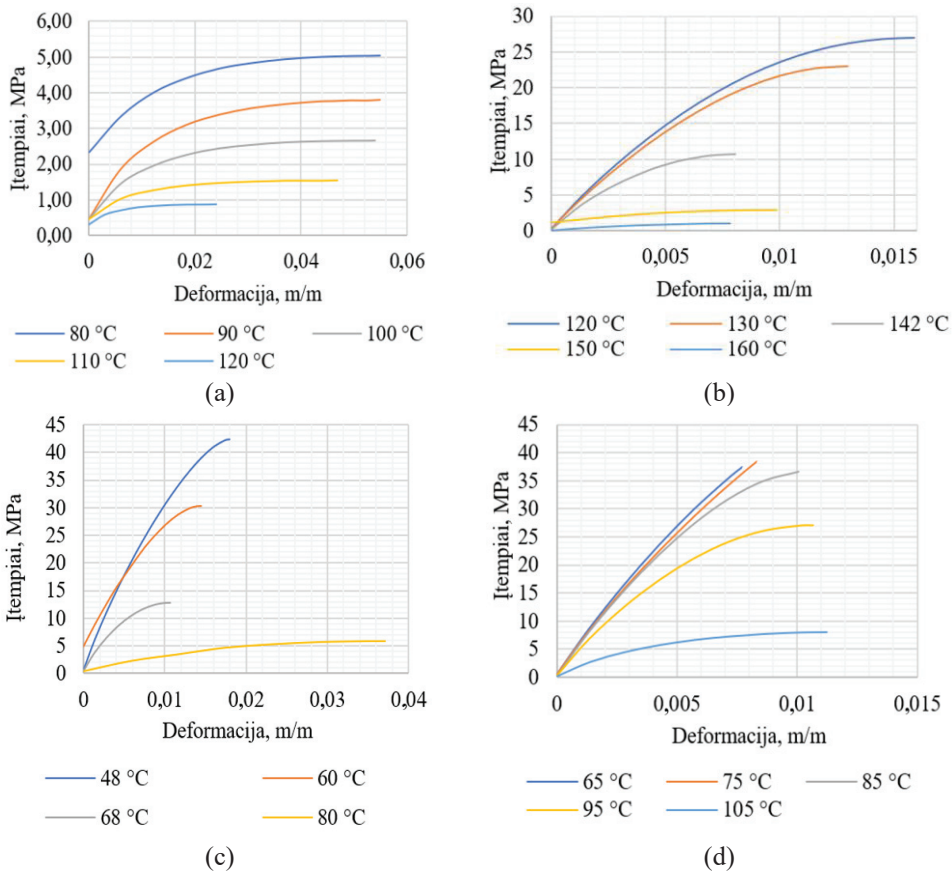


(d)

2.1 pav. Tempimo eksperimentas: (a) PVC (1.7–1.12) ir SAN (3.7–3.11) ruošiniai po eksperimento; (b) PP (4.7–4.11) ir PETG (2.7–2.11) ruošiniai po eksperimento;

(c) tempimo bandymų mašina „Instron E10000“: 1 – valdymo kompiuteris, 2 – šildymo kamera ir bandymų mašina; (d) ruošinys, įstatytas į griebtuvus, šiluminėje kameroje

Atliekant eksperimentą ruošiniai buvo tempiami, kol nutrūko arba buvo pasiekta maksimali tempimo mašinos riba. Vienas griebtuvas judėjo pastoviu 20 mm/min greičiu. Kad ruošinys būtų reikiamos temperatūros, jis buvo įdėtas ir laikomas nusistovėjusios temperatūros šiluminėje kameroje, kol pasiekė nustatytą temperatūrą. Gauti termoplastikų deformacijos ir įtempių eksperimento rezultatai pateikti 2.2 pav.



2.2 pav. Termoplastikų įtempių ir deformacijų kreivės: (a) PP; (b) PETG; (c) PVC; (d) SAN

Naudojant gautas įtempių ir deformacijų kreives apskaičiuotas kiekvieno termoplastiko Jungo modulis. Jungo modulis apskaičiuotas įtempius padalinus iš deformacijų. Gauti rezultatai parodė, kad Jungo modulis mažėja, didėjant aplinkos temperatūrai. Rezultatai pateikti 2.2 lent.

2.2 lentelė. PP, PETG, PVC ir SAN termoplastikų Jungo modulis skirtingose temperatūrose

PP	Temperatūra, °C	80	90	100	110	120
	Jungo modulis, MPa	420	320	240	152	113
PETG	Temperatūra, °C	120	130	142	150	160
	Jungo modulis, MPa	3125	3000	2667	333	250
PVC	Temperatūra, °C	48	60	68	80	90
	Jungo modulis, MPa	3750	2917	2333	188	–
SAN	Temperatūra, °C	65	75	85	95	105
	Jungo modulis, MPa	3000	2846	2571	2111	923

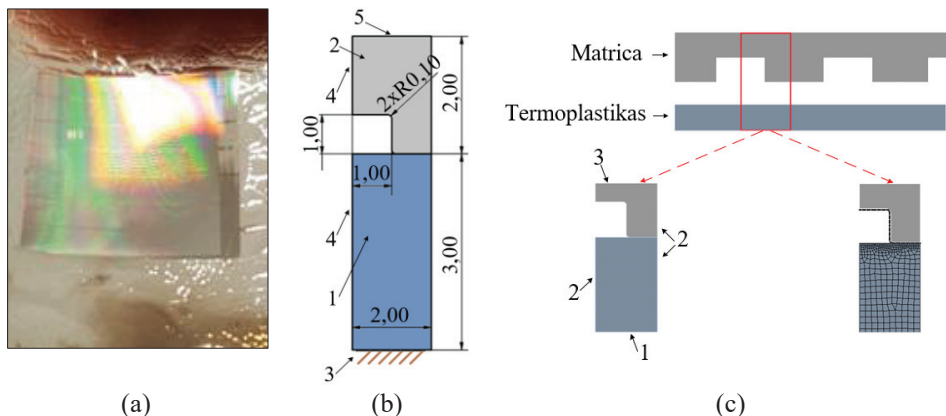
Darbinės eksperimentinės temperatūros parinktos pagal teorines šiluminės savybes. Eksperimento rezultatai parodė, kad PP termoplastiko Jungo modulis sumažėjo temperatūrai didėjant nuo 80 °C iki 120 °C. Atliekant eksperimentą su PETG termoplastiku, esant 142 °C temperatūroje plastiko ruošinys pradėjus temptis staiga tapo matinis. PVC termoplastiko temperatūros intervalas buvo pasirinktas nuo 48 °C iki 90 °C, tačiau esant 90 °C pagreitis buvo per mažas, palyginti su įtempiais, todėl eksperimentas nepavyko. Tai nutiko dėl to, kad medžiagoje greičiau pasireiškė relaksacijos savybės nei susidarė įtempiai. SAN plastiko eksperimentinis temperatūrinis intervalas buvo pasirinktas nuo 65 °C iki 105 °C, o Jungo modulis mažėjo nuo 3000 MPa iki 923 MPa.

2.2. Karštojo šampavimo proceso modeliavimas baigtinių elementų metodu

Norint teoriškai įvertinti PP, PETG, PVC ir SAN plastikų elgseną karšto šampavimo proceso metu, sukurtas baigtinių elementų modelis. Modelis analizuoja karšto šampavimo technologiją mikrolygiu naudojant eksperimento metu nustatytus parametrus. Modelį sudarė dvi dalys: įtvirtintas plastiko modelis ir šampo matrica. Modeliavimas vyko dvimatėje erdvėje.

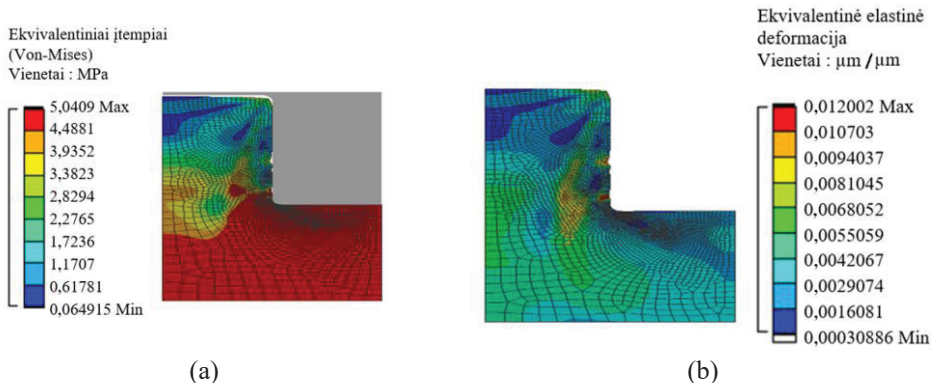
Karšto šampavimo procesui pasirinkta nikelio matrica, kurios dvimatė struktūra pagaminta naudojant litografiją ir ęsdinimo procesus. Matricai pasirinkta nikelio medžiaga dėl patvarumo ir galimybės gauti tikslią struktūrą naudojant nesudėtingai valdomą anodacijos procesą. Matricą sudarė dvimačiai grioveliai, kurių plotis 2 μm, periodiškumas 4 μm ir gylis 1 μm. Baigtiniams elementams modeliuoti sudarytas supaprastintas iki pusės vieno griovelio vieneto modelis ir tinkamo dydžio plastiko modelis tam, kad plastikas galėtų laisvai tekėti į formą. Nikelio matrica ir baigtinių elementų modelis pateiktas 2.3 pav.

Karšto šampavimo proceso analizei pasirinkta „Ansys“ programinė įranga. Matricos ir plastiko modelio geometriniai parametrai ir ribinės sąlygos pateikti 2.3 pav. Analizėje naudojamas Mooney-Rivlin modelis, o eksperimentiškai nustatytos savybės interpoliuojamos ir apskaičiuojami įtempiai bei deformacijos skirtingose temperatūrose.



2.3 pav. Mikrostruktūra: (a) eksperimentinė nikelio matrica; (b) pagrindinės matricos pusės vieno elemento modelis su ribinėmis sąlygomis: 1 – termoplastiko modelis, 2 – matricos elementas, 3 – fiksuota atrama, 4 – simetrijos linija, 5 – išorinė jėga; (c) matricos skerspjūvio modelis, suskaidytas baigtiniais elementais, ir analizuojamo modelio suvaržymai: 1 – fiksuota atrama, 2 – atrama be trinties, 3 – apkrova

Matematinį modelį sudaro deformuojamo termoplastiko modelis ir matematiškai aprašyta nesideformuojanti mikrostruktūra. Tarp plastikų ir nikelio matricos nustatytas trinties koeficientas 0,2. Siekiant optimizuoti skaičiavimus, modelis suskaidytas į 0,2 μm elementus, siekiant gauti tikslius rezultatus, ties kontaktine sritimi skalė sumažinta iki 0,05 μm . Pagrindas įtvirtintas standžiai. Šonuose siekiant įvertinti modelio vientisumą naudota atrama be trinties. Nustatyta, kad forma (matrica) juda automatiškai link plastiko iki 2,25 μm ir tada atsitraukia. Siekiant dar tikslesnių rezultatų naudota netiesinė adaptyvi sritis, kuri, esant didesniai geometrijos pokyčiui, perskaičiuoja baigtinių elementų tinklą. Pasirinkti išvesties duomenys: bendra deformacija, ekvivalentiniai įtempiai ir reakcijos jėga. Įtempių vaizdai, kuriuose pateikti maksimalūs ir liekamieji įtempiai, pateikti 2.4 pav.



2.4 pav. PP termoplastiko įtempių ir deformacijų pasiskirstymas esant 80 °C temperatūrai: (a) ekvivalentiniai Von-Mises įtempiai esant didžiausiai deformacijai; (b) ekvivalentinė elastingė deformacija

Atlikus modeliavimą gauti maksimalūs įtempiai, deformacijų ir reakcijos jėgos rezultatai. Rezultatai pateikti 2.3 lent. Reakcijos jėga apskaičiuota 2000 μm^2 plotui. Turint kitokių matmenų matricas ir norint užtikrinti mikrostruktūrų formavimo procesui reikalingą formavimo jėgą, reikia atitinkamai padidinti formavimo jėgą.

2.3 lentelė. Karšto šampavimo simuliacijų rezultatai

PP	Temperatūra, °C	80	90	100	110	120
	Įtempiai, MPa	5,041	3,793	2,668	1,537	0,865
	Deformacija, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,012	0,011	0,011	0,010	0,008
	Reakcijos jėga, μN	16655	12458	8736	5025	2805
PETG	Temperatūra, °C	120	130	142	150	160
	Įtempiai, MPa	26,923	22,966	10,703	2,927	1,059
	Deformacija, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,009	0,008	0,004	0,009	0,004
	Reakcijos jėga, μN	87723	74711	35215	9585	3455
PVC	Temperatūra, °C	48	60	68	80	90
	Įtempiai, MPa	42,387	30,351	12,750	5,793	–
	Deformacija, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,011	0,010	0,005	0,031	–
	Reakcijos jėga, μN	138500	99140	41886	18974	–
SAN	Temperatūra, °C	65	75	85	95	105
	Įtempiai, MPa	37,457	38,379	36,660	26,987	8,050
	Deformacija, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0,006	0,007	0,007	0,006	0,004
	Reakcijos jėga, μN	125080	126100	119700	88337	26436

Modeliavimo rezultatai suteikia galimybę tinkamai pasirinkti formavimo parametrus siekiant optimizuoti formavimo procesą. Gauti rezultatai parodė, kad reakcijos jėga mažėja didėjant formavimo temperatūrai. Medžiagų savybių žinojimas padeda nustatyti, kokia reakcijos jėga yra reikalinga norint atlikti karštą šampavimą. Optimizuotas modelis suteikia galimybę pakeitus geometriją ar medžiagą nesudėtingai nustatyti formavimo parametrus, o tai išplečia mikrostruktūrų formavimo technologijų galimybes ir prisideda prie aukštesnės kokybės mikrostruktūrų kūrimo.

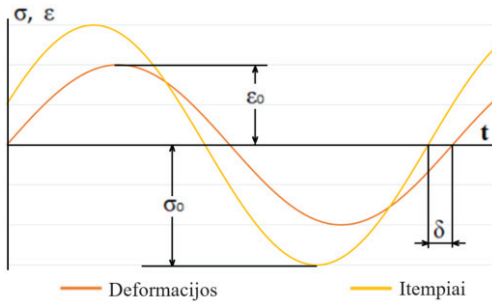
2.3. Viskoelastinės savybės pasižyminčių plastikų mechaninių savybių nustatymas

Šiame skyriuje pateikiamas polimerų viskoelastinių savybių nustatymo tyrimas esant skirtingoms temperatūroms ir dinaminėms apkrovoms. Viskoelastinėms savybėms aprašyti galima naudoti įvairius metodus. Šiame tyrime viskoelastinės savybės nustatytos iš eksperimentiškai nustatytų tamprumo (kaupimo) modulio (G'), klampumo (nuostolių) modulio (G'') ir slopinimo faktoriaus ($\tan\delta$) duomenų.

Šiame tyrime naudoti prieš tai aprašyti PP, PETG, PVC ir SAN plastikų bandiniai. Siekiant nustatyti viskoelastines medžiagų savybes, atlikta dinaminė mechaninė analizė (DMA). Šis tyrimas skiriasi nuo standartinio tempimo, nes naudojama ciklinė apkrova, kai keičiamas apkrovos cikliškumo intensyvumas, o ne pačios apkrovos dydis. Šis eksperimentas atliktas naudojant ISO 6721–4 standartą, kuris aprašo polimerinių medžiagų savybių nustatymą esant nerezonansiniam dažniui nuo 0,01 Hz iki 100 Hz. Pagal standartą atliktas tyrimas leido gauti tamprumo (G') ir

klampumo modulių (G'') reikšmes ir apskaičiuoti fazę tarp įtempių ir deformacijų kreivių (δ).

Dinaminiam tempimo bandymui naudota tempimo mašina „Instron E10000“, kuri pavaizduota 2.1 pav. Eksperimentą sudaro aktyvūs tempimo mašinos elementai: pasyvus ir aktyvus griebtuvas, šiluminė kamera ir ruošinys. Analizės metu kiekvienas ruošinys laikomas nustatytoje temperatūroje pagal ISO 6721–1 standartą, kad temperatūra tolygiai pasiskirstytų per visą bandinį. Bandinys, įstatytas į griebtuvą, pateiktas 2.5 pav.



(a)



(b)



(c)

2.5 pav. Dinaminio tempimo eksperimentas: (a) teorinis fazės skaičiavimo grafikas; (b) ruošinys; (c) ruošinys, įstatytas į tempimo mašinos griebtuvus

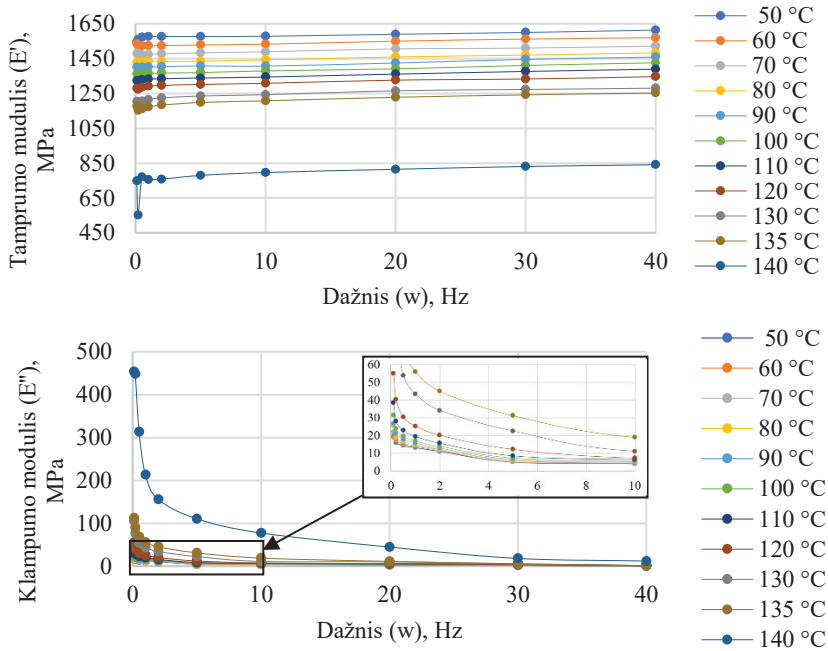
Eksperimento metu PVC plastiko bandiniui nustatyta pastovi 70 N įtempimo jėga, o maksimali dinaminė amplitudė 80 N. PP plastikui nustatyta pastovi 35 N įtempimo jėga, o maksimali dinaminė amplitudė 25 N. PETG ir SAN plastikams nustatyta pastovi 150 N įtempimo jėga, o maksimali dinaminė amplitudė 100 N. Eksperimentai atlikti naudojant 0,1, 0,2, 0,5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, ir 40 Hz dažnius. PVC plastikas analizuotas nuo 30 °C iki 66 °C temperatūroje, PP plastikas nuo 40 °C iki 100 °C, PETG plastikas nuo 50 °C iki 140 °C, o SAN plastikas nuo 20 °C iki 95 °C. Viršijus stiklėjimo temperatūros maksimalią ribą bandiniai nutrūkdavo arba iššėdavo iki maksimalių bandymų mašinos ribų. Tamprumo (G') ir klampumo modulio (G'') konstantos nustatomos naudojant formules:

$$G' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos\delta; \quad (2.1)$$

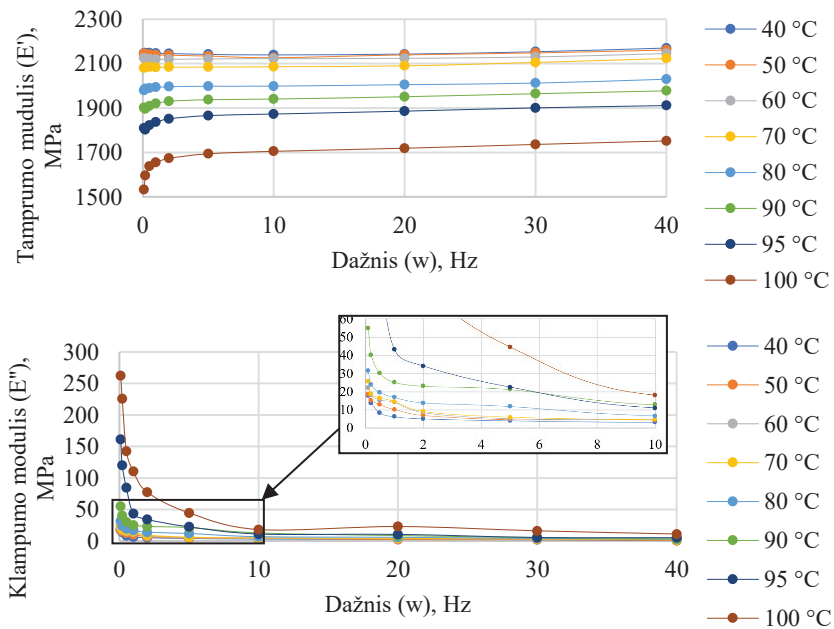
$$G'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin\delta; \quad (2.2)$$

- čia G' – tamprumo modulis, Pa;
- G'' – klampumo modulis, Pa;
- ϵ – deformacijos, mm/mm;
- σ – įtempiai, Pa;
- δ – fazė tarp įtempių ir deformacijų kreivių.

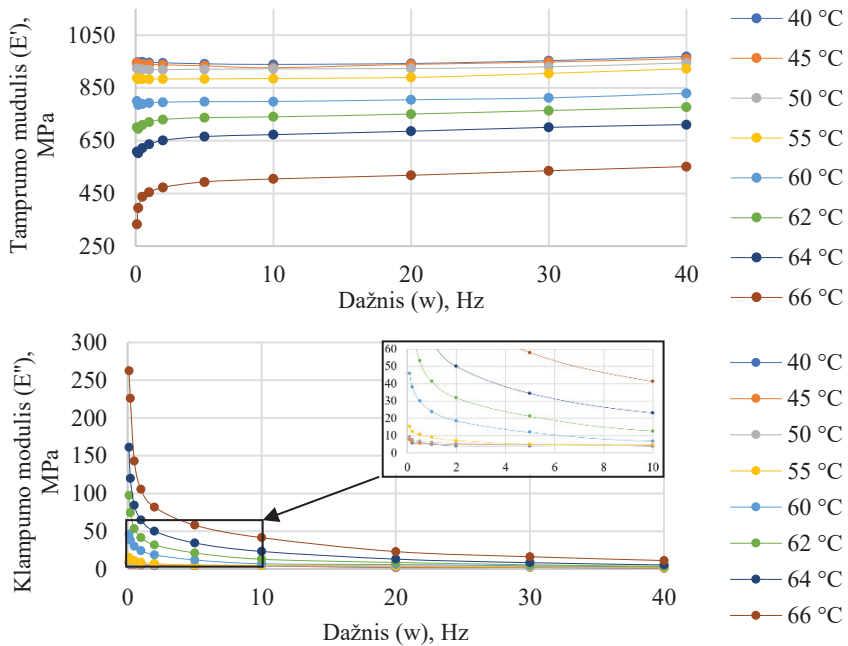
Gauti tamprumo ir klampumo moduliai esant skirtingoms temperatūroms pateikti 2.6–2.9 pav. Šios kreivės pateikia medžiagos elgseną iki 40 Hz žadinimo dažnio.



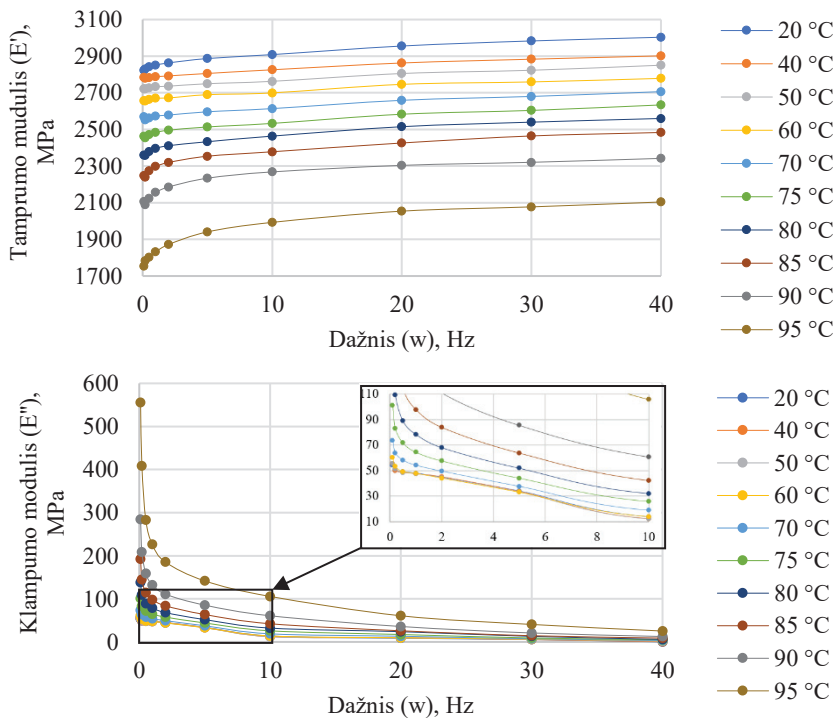
2.6 pav. PETG plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės



2.7 pav. PP plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės



2.8 pav. PVC plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės



2.9 pav. SAN plastiko eksperimentinės tamprumo ir klampumo vertės

Bandyto mašina „Instron E10000“ turi gamyklinę apribojimą žadinamajam dažniui sukurti, todėl eksperimentas vykdomas žemo dažnio diapazone (iki 40 Hz). Karšto štapavimo formavimo proceso metu numatyta naudoti aukšto dažnio žadinimą, todėl eksperimente gautos medžiagos elgsenos vertės būtina praplėsti iki numatyto dažnio. Šiam tikslui naudojamas temperatūros ir dažnio superpozicijos (TTS) principas. Ši analizė leido nustatyti polimero reologinę medžiagos elgsenos priklausomybę ir išplėsti nežinomų temperatūrų dažnių ribas [80].

Norint analizuoti kreivę, kuri gauta superpozicijos principu, aukštu dažniu, kreivė turi būti ekstrapoliuojama naudojant pritaikymo funkciją su pasirinktais koeficientais. Tokio tipo kreivėms ekstrapoliuoti naudojama sigmoidinė funkcija, kuriai nustatyti pritaikomi koeficientai. Pagrindines tamprumo ir klampumo kreives reikia aproksimuoti su Kramers-Kronig santykiu naudojant sigmoidinę funkciją su koeficientais [91]. Sigmoidinės funkcijos:

$$G'(w) = a \cdot \tanh(b(\log(w) + c)) + d; \quad (2.3)$$

$$G''(w) = \frac{\pi \cdot a \cdot b}{2} \operatorname{sech}(b(\log(w) + c))^2; \quad (2.4)$$

čia a , b , c , d – tinkamumo koeficientai;

$\log(w)$ – natūralusis logaritmas;

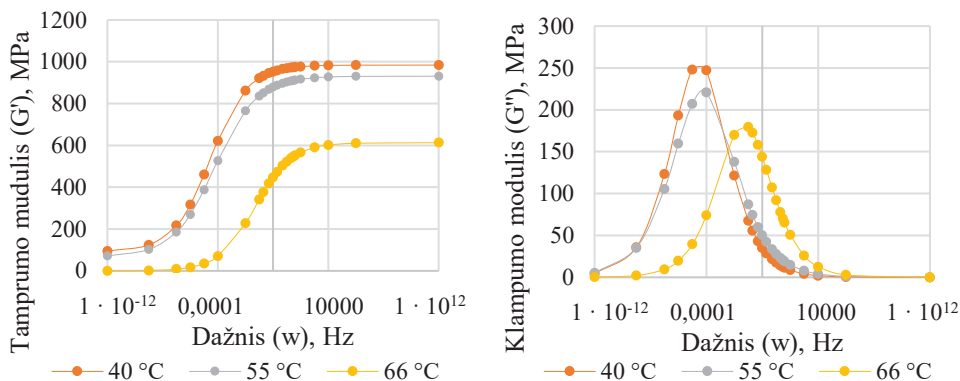
\tanh – hiperbolinis tangentas.

Po ekstrapoliacijos gauti tinkamumo koeficientai ir funkcijos grafikų atitikimas. Šie tinkamumo koeficientai skaičiuoti dviem skirtingomis programomis: „Excel“ ir „MCalibration“. Gautos vertės lygintos tarpusavyje pasirenkant optimalias. Gautos vertės pateiktos 2.4 lentelėje.

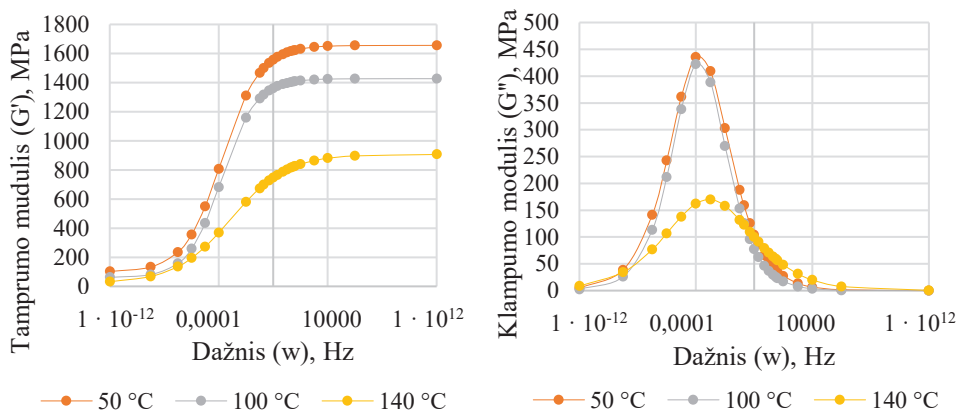
2.4 lentelė. Tinkamumo koeficientai ir funkcijos atitikimo vertės

Temperatūra, °C	a	b	c	d	R ²
PVC					
40	446,385	0,3652	4,516	537,750	0,997
55	432,425	0,3267	4,195	498,642	0,998
66	306,397	0,3784	1,306	306,332	0,996
PETG					
50	779,148	0,3593	3,748	876,984	0,990
100	683,686	0,3968	3,769	743,451	0,987
140	443,176	0,2442	3,102	463,790	0,981
PP					
40	1016,881	0,4966	3,345	1187,273	0,980
70	1023,922	0,5156	3,314	1116,543	0,979
100	875,269	0,4122	2,944	921,252	0,981
SAN					
40	1401,215	0,2494	4,517	1738,380	0,979
60	1309,907	0,3910	3,482	1515,481	0,996
95	917,882	0,5391	2,203	1144,720	0,986

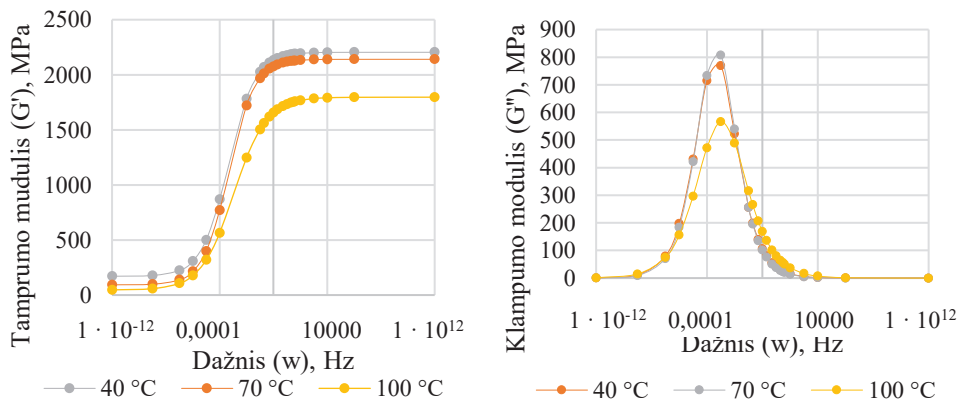
Gavus koeficientus, reikšmės įrašytos į lygtį ir apibrėžta pagrindinė tamprumo ir klampumo kreivė iki 1000 GHz vibracijų. Gautos kreivės pateiktos 2.10–2.13 pav.



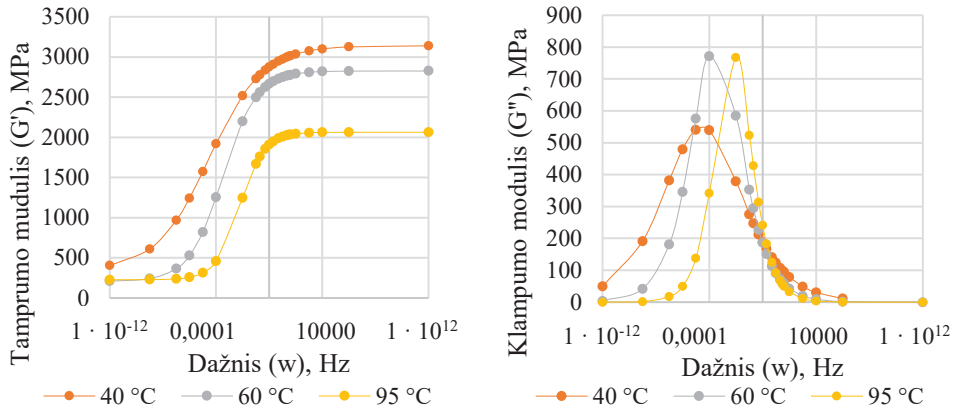
2.10 pav. PVC plastiko pagrindinės teorinės kreivės



2.11 pav. PETG plastiko pagrindinės teorinės kreivės



2.12 pav. PP plastiko pagrindinės teorinės kreivės



2.13 pav. SAN plastiko pagrindinės teorinės kreivės

Šiame tyrime atliktas polimerų viskoelastinių savybių nustatymo tyrimas esant skirtingoms temperatūroms ir dinaminėms apkrovoms suteikia svarbią informaciją apie šių medžiagų elgseną ir leidžia suprasti jų veikimą konkrečiomis sąlygomis. Naudotas eksperimentinis DMA metodas leidžia nustatyti tamprumo ir klampumo modulius bei kitas savybes, kurios yra būtinos atliekant tolimesnius modeliavimus. Gauti tyrimo rezultatai ir aproksimavimo funkcijų koeficientai leidžia suprasti polimerų elgseną skirtingomis sąlygomis. Visa tai suteikia vertingos informacijos inžinieriams ir mokslininkams, norintiems geriau suprasti ir naudoti šias plastikų medžiagas įvairiose pramonės srityse.

2.4. Karštojo štapavimo proceso, naudojant vibracijas, modeliavimas baigtinių elementų metodu

Ultragarsinio karšto štapavimo proceso metu, be įspaudimo apkrovos, yra naudojamos aukšto dažnio išilginės bangos. Sklisdama per medžiagą ultragarsinė vibracinė energija sugerama ir paverčiama kitos rūšies energija. Kadangi plastikas yra amorfinė medžiaga, didžioji dalis ultragarsinės vibracijų energijos paverčiama į šiluminę. Išsiskyręs šilumos kiekis padidina formos ir plastiko temperatūrą, o tai pagerina mikrostruktūros tekėjimą į formą ir leidžia sumažinti formavimo jėgą. Norint modeliuoti ir analizuoti plastiko formavimą naudojant ultragarsines vibracijas karšto štapavimo metu, reikia nustatyti šilumos kiekį, kuris sugeriamas, kai ultragarsinė energija konvertuojama į šiluminę.

Ankstesniame skyriuje buvo apskaičiuotas G'' klampumo (nuostolių) modulis, kuris parodė medžiagos išsklaidytą energiją. Jei išsklaidyta energija paverčiama šilumine, tada šilumos susidarymo greitis yra lygus [87]:

$$\dot{q} = w \cdot \pi \cdot G'' \cdot \epsilon_0^2 ; \quad (2.5)$$

čia w – dažnis, Hz;

G'' – klampumo (nuostolių) modulis, Pa;

ϵ_0 – virpesių amplitudė, mm.

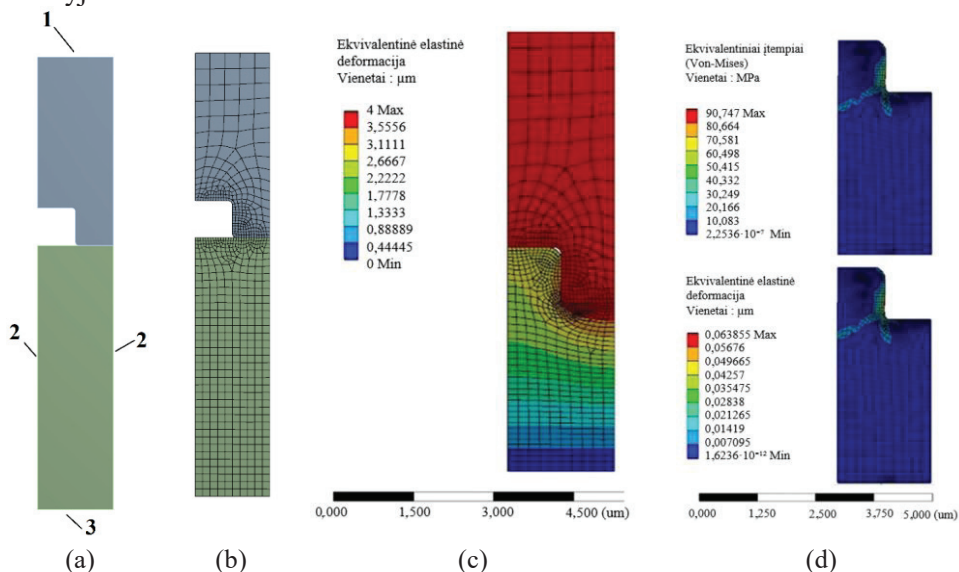
Norint įvertinti skirtumą tarp tradicinio karšto štapavimo metodo ir metodo su vibracija, reikia papildyti formavimo metodą įtraukiant ultragarso vibracijas. Tam tikslui yra papildomas Maksvelo modelis, įtraukiant daugiau Maksvelo elementų.

Mikrostruktūrų formavimo naudojant ultragarsinį karštą štapavimą technologijos analizei naudojami baigtiniai elementai. Pagrindinės plastikų mechaninės savybės naudojamos kaip ir pirmojo modeliavimo atveju ir yra pateiktos 2.1 lent. Gautus tamprumo ir klampumo koeficientus reikia perskaičiuoti į Prony koeficientus [93].

$$G'(w) = E_0 [I - \sum_{i=1}^N g_i] + E_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot T_i^2 \cdot w^2}{1 + T_i^2 \cdot w^2}; \quad (2.6)$$

$$G''(w) = E_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \cdot T_i^2 \cdot w^2}{1 + T_i^2 \cdot w^2}. \quad (2.7)$$

Prony serijos koeficientai apskaičiuoti naudojant turimus tamprumo ir klampumo modulius. Norint apskaičiuoti vertes pasirinktos N reikšmės ir priartėjimo būdu bandoma nustatyti E_0 , g_i , T_i . Apskaičiavus G' ir G'' vertes jos palyginamos su eksperimentinėmis ir apskaičiuojama R^2 vertės. Ciklas kartojamas, kol pasiekiamas artimiausia vienetui reikšmė. Tada, naudojant 8 skaičių Prony serijos skaičių, gaunama artimiausia kreivė eksperimentinei. Prony reikšmės gautos panaudojus „MCalibration“ programą. Gautos Prony reikšmės naudojamos baigtinių elementų modelyje.



2.14 pav. Baigtinių elementų analizė: (a) modelis su ribinėmis sąlygomis: 1 – poslinkis, 2 – atrama be trinties, 3 – fiksuota atrama; (b) modelis su tinkleliu; (c) deformacijos vaizdas; (d) ekvivalentinių įtempių ir elastinės deformacijos vaizdai

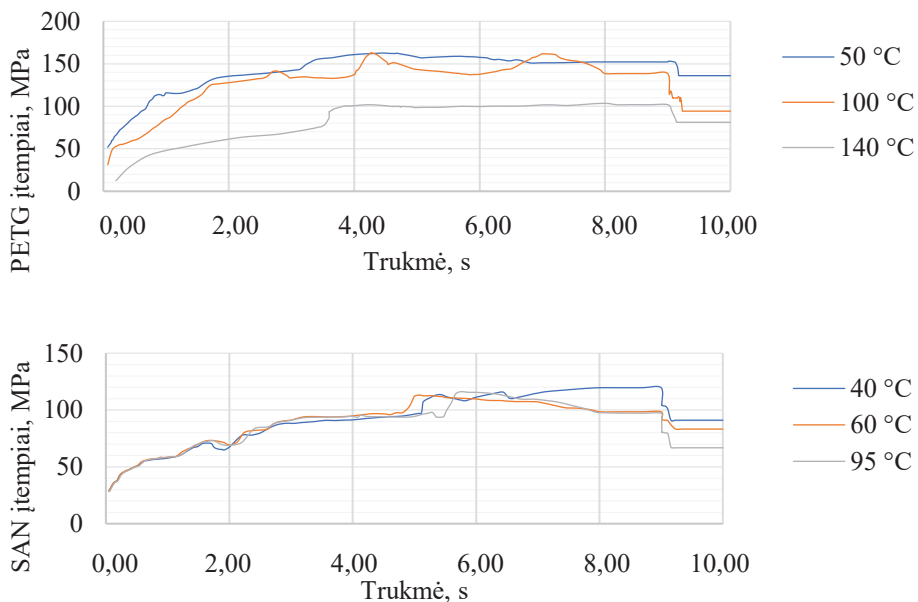
Pagal gautus rezultatus sukurtas baigtinių elementų modelis naudojant „Ansys“ programinę įrangą. Kaip ir pirmojo modeliavimo atveju, naudojama 2D tipo analizė

ir modelio geometrija, kuri pateikta 2.3 pav. Pasirinktas viskoelastinis medžiagos modelis. Medžiagos modelis suskaidytas į 1704 baigtinius elementus. Šioje analizėje šampas juda 4 μm į plastiką per 8 sekundes, tada laikomas išpaustas 1 sekundę ir per 1 sekundę atitraukiamas. Modeliavimo rezultatai pateikti 2.14 pav. Siekiant patikrinti tinklelio tinkamumą atliktas tinklelio tinkamumo tyrimas. Įtempių ir deformacijų rezultatai nebesikeitė esant vidutinio tankumo tinkleliui. Tolesnis tinklelių tankinimas reikšmingo poveikio rezultatams neturėjo, todėl vidutinio tankumo tinklelis buvo tinkamas naudoti tolimesniuose tyrimuose. Tinklelio patikimumo tyrimo rezultatai pateikti 2.5 lentelėje.

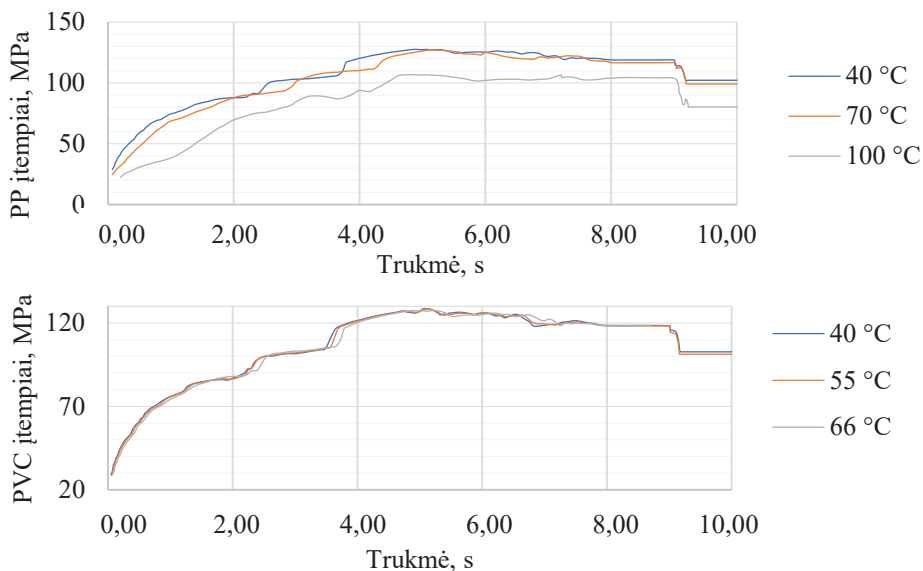
2.5 lentelė. Tinklelio patikimumo tyrimo rezultatai

Tinklelio tankumas	Elementų kiekis	Deformacija, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Įtempiai, MPa
Retas	791	0,12095	701,15
Vidutinis	1704	0,12412	421,78
Tankus	6066	0,12129	431,74

Atlikus modeliavimą suformuotos skirtingų plastikų įtempių diagramos, parodančios vidutinius plastiko modelio įtempius. Šios diagramos gautos suskaidžius išspaudimo procesą į laiko intervalus ir fiksuojant įtempių pokytį kiekviename intervale. Santykiniai įtempiai pradėjo mažėti temperatūrai didėjant. Pastebėta, kad 8-ą sekundę įtempiai pradėjo mažėti, nors deformacija nekito. Taip pat iš grafikų matyti, kad medžiaga elgiasi daug plastiškiau esant aukštesnei temperatūrai, nes įtempių grafikas tolygesnis. Rezultatai pateikti 2.15 ir 2.16 pav.



2.15 pav. PETG ir SAN plastikų modeliavimo rezultatai



2.16 pav. PP ir PVC plastikų modeliavimo rezultatai

Apibendrinus galima daryti išvadą, kad ultragarsinis karštas šampavimo procesas yra perspektyvi technologija plastikų formavimo procese. Šis procesas leidžia efektyviai konvertuoti ultragarsinę vibracinę energiją į šiluminę, pagerinant plastiko tekėjimą į formą.

Baigtinių elementų modeliai ir eksperimentiniai tyrimai padėjo suprasti ultragarsinio karšto šampavimo proceso elgseną ir nustatyti svarbius parametrus šiai elgsenai aprašyti. Tokie modeliai gali būti vertingi ateities projektams, siekiant optimizuoti ultragarsinio karšto šampavimo procesą ir padidinti plastiko formavimo efektyvumą. Tačiau reikia atkreipti dėmesį į procesams įtaką turinčius veiksniai, įskaitant medžiagą, ultragarso vibracijų sąlygas ir geometriją, kurie gali turėti įtakos rezultatams.

3. MAGNETOSTRIKCINIO KEITIKLIO, SKIRTO MIKROSTRUKTŪROMS FORMUOTI, KŪRIMAS

Mikrostruktūrų formavimo įrankiai turi skirtingų dizaino ir funkcionalumo sprendimų. Dizaino ir funkcionalumo įvairūs sprendimai leidžia pasiekti naujų galimybių formuojant mikrostruktūras. Šiame skyriuje aprašomas naujo įrankio, skirto mikrostruktūroms formuoti, kūrimas. Naujo tipo įrankis jungia karšto šlampavimo technologiją ir magnetostrikcinį procesą.

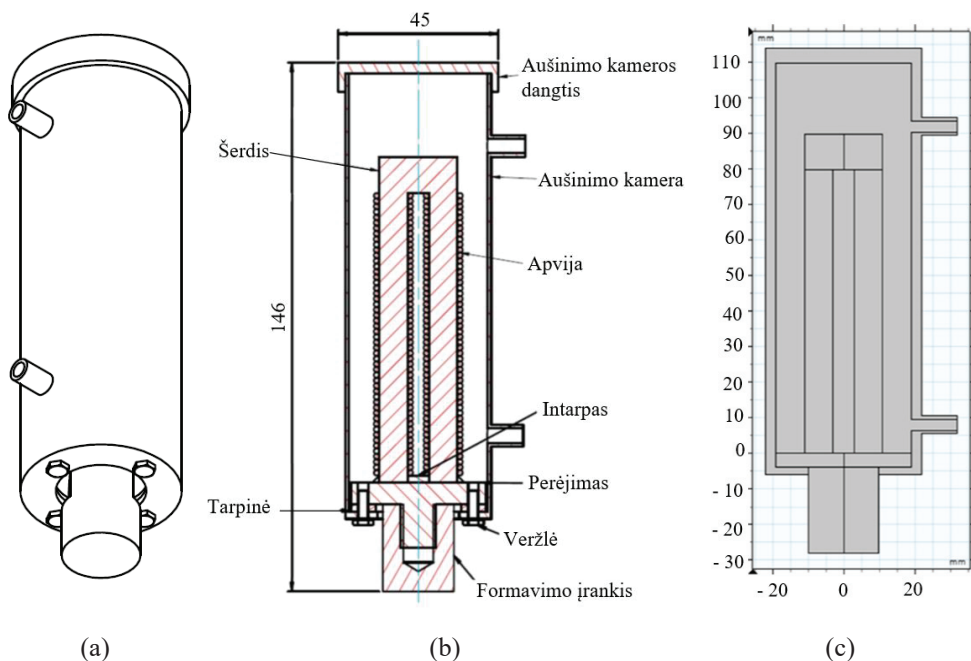
Mikrostruktūrų formavimo įrankį sudaro du pagrindiniai komponentai: šerdis ir formavimo įrankis. Prietaiso šerdis pagaminta iš magnetostrikcinės medžiagos permendur 49 (Co₄₉Fe₄₉V₂) tipo lydinio. Šerdį sudaro ploni lakšto lapai, sujungti kniedėmis. Lakštinis metalas pasirinktas, kad būtų pagerintas magnetostrikcinis procesas [84]. Šerdis taip pat apvyniota dviem skirtingomis vielomis, kurios skirtos kintamai ir nuolatinei elektros srovei. Nuolatinė srovė sukuria pamagnetinimą, o kintama – indukcinį lauką. Tarp šerdies ir formavimo įrankio yra perėjimas, kuris pagamintas iš feromagnetinės medžiagos. Perėjimas leidžia lengviau susikurti sūkurinėms srovėms ir pradeda kaisti intensyviau nei šerdis. Formavimo įrankis pagamintas iš aliuminio, tačiau konstrukcinio atžvilgiu padaryta taip, kad formavimo įrankį būtų galima keisti pagal formuojamą struktūrą. Esant magnetostrikciniam procesui, formavimo įrankis neturi būti pagamintas iš medžiagos, kuri turėtų akustinį slopinimą, kad persiduotų vibracijos. Naujo tipo formavimo įrankis pateiktas 3.1 pav.

3.1. Teorinė formavimo įrankio analizė

Magnetostrikcijos procesas yra fizinis reiškinys, kai feromagnetinė medžiaga, veikiant išoriniam magnetiniam laukui, deformuojasi [89]. Dėl galimybės valdyti magnetinį lauką galima išgauti vibracijų procesą plačiame dažnio diapazone. Įprastai magnetostrikcinis keitiklis vibruojant išskiria didelį šilumos kiekį, kuris dažnai yra nepageidaujamas ir pašalinamas naudojant konstrukcinius sprendimus bei aušinimo agentus. Kuriamos technologijos atveju išsiskyrusi šiluma naudojama karšto šlampavimo procese.

Panašūs tyrimai atlikti naudojant pjezoelektrinius ultragarsinius prietaisus. Tyrėjai nustatė, kad ultragarso virpesiai gerina formavimo procesą. Nustatyta, kad formavimo metu sumažėja kontaktinė formavimo trukmė ir reikalinga formavimo jėga [93]. Šiame tyrime kuriamas formavimo įrankis skirsis, nes neturės papildomo kaitinimo elemento, o keitiklis naudojamas ne pjezoelektrinis, bet magnetostrikcinis. Toliau pateikiami šilumos mainų ir magnetostriktorius deformacijų matematiniai modeliai ir lygtys. Analizei atlikti naudojama „Comsol Multiphysics 5.4“ programinė įranga. Magnetostrikcinio įrenginio matematinis modelis pateiktas 3.1 pav.

Indukcinis kaitinimas yra procesas, kurio metu nereikalingas kontaktas, kad būtų perduota energija ir kūnas pradėtų kaisti. Šio proceso metu naudojama aukšto dažnio elektros energija, o indukcinis procesas gali šildyti tik elektrai laidžią medžiagą. Toks šildymo procesas labai efektyvus, nes šildo medžiagą iš vidaus [90].



3.1 pav. Magnetostruktinis karšto štapavimo įrankis: (a) izometrinis konstrukcijos vaizdas; (b) konstrukcijos pjūvio vaizdas; (c) matematinis supaprastintas įrenginio vaizdas dvimatėje erdvėje

Kadangi sistemoje vyksta šilumos mainai, sistemai apibrėžti naudojama šilumos mainų formulė, kuri lygiavertė indukciniam šildymui. Šilumos perdavimo formulė parabolinė dalinė diferencialinė lygtis, kuri apibūdina tam tikros srities temperatūros pasiskirstymą tam tikru laiko momentu. Šilumos mainų formulė pateikta žemiau:

$$\rho C_p (\partial T / \partial t) - \nabla \cdot k \nabla T = Q(T); \quad (3.1)$$

čia ρ – tankis, kg/m^3 ;

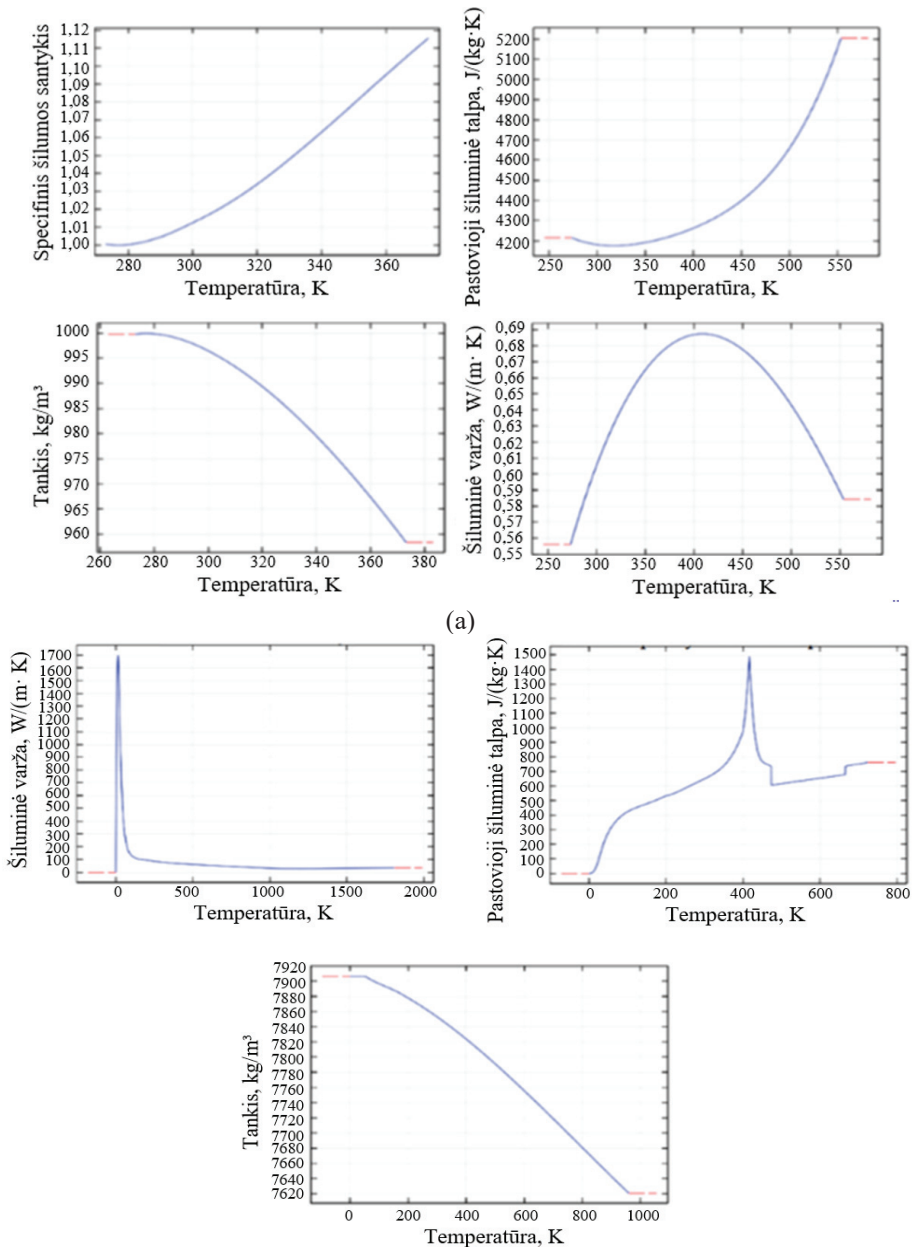
C_p – savitoji šiluminė talpa, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

k – šiluminis laidumas, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

Q – šilumos šaltinio tankio funkcija.

Medžiagų parametrai nėra tiesinės lygtys kintant temperatūrai, todėl kintamieji apibrėžiami temperatūrų diapazone. Parametrų priklausomybės nubraižomos naudojant netiesines lygtis. Medžiagų parametrai pateikti 3.2 pav.

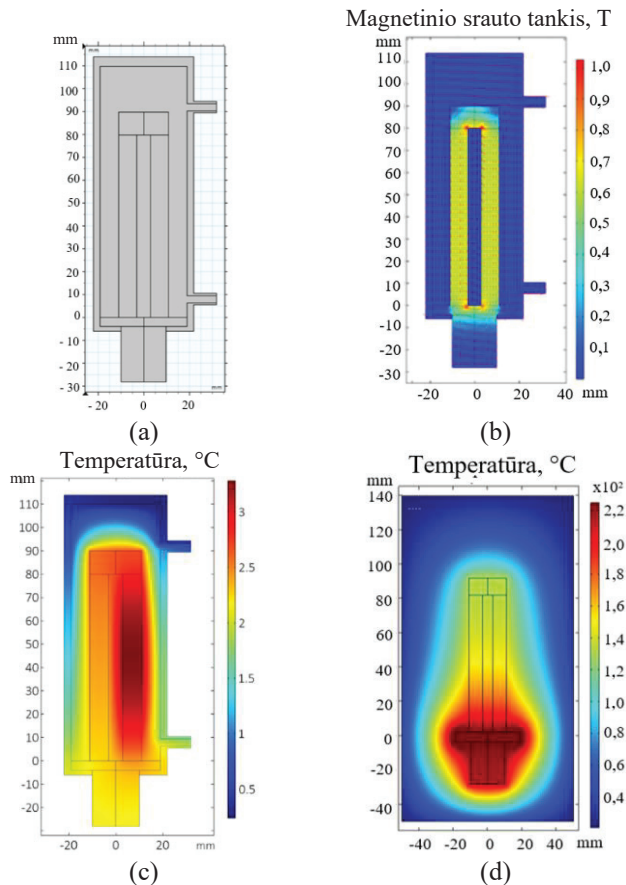
Naudojant 3.1, 3.2 lygtis ir 3.2 paveiksle pateiktas parametrų reikšmes, galima nustatyti modelio temperatūros kitimą priklausomai nuo vykstančio proceso. Modeliuoti procesą pasirinkta „Comsol Multiphysics 5.4“ dvimatė erdvė.



3.2 pav. Savybių priklausomybės nuo temperatūros: (a) vandens; (b) plieno [96]

Konstrukcija, pateikta 3.1 paveiksle, suskaidyta į baigtinius trikampus elementus. Nustatytas maksimalus 2,84 mm ir minimalus 0,0107 mm elemento dydis. Kambario temperatūra (293,15 K) pasirenkama kaip pradinė analizės temperatūra. Šilumos šaltinių pasirenkama šerdis, o šilumos mainai vyksta su oru esant šilumos perdavimo koeficientui 25,32 W/(m²K) [82]. Plieno specifinis šilumos santykinis 1.

Visų pirma, formavimo įrankis projektuotas su aušinimo kamera. Atlikus šilumos mainų analizę, nustatyta, kad reikalingas 1 T magnetinio srauto tankis, kad būtų pasiekta 210 °C temperatūra. Tokiam magnetiniam srautui reikalingas galingas maitinimo šaltinis, todėl nuspręsta, kad aušinimo kamera nebus naudojama. Atlikus patobulintą šilumos mainų analizę, rezultatai parodė, kad, esant 0,6 T magnetinio srauto tankiui, gali susidaryti 225 °C temperatūra. Esant intensyvesniam magnetiniam laukui galima pasiekti dar aukštesnę temperatūrą, tačiau formavimo procese naudojami plastikai, o jų lydymosi temperatūra dažnai neviršija 200 °C temperatūros, tai 225 °C formavimo temperatūra yra pakankama šiame tyrime. Taip pat galima matyti, kad šilumos mainai tarp metalų vyksta daug intensyviau nei tarp oro. Skirtingos medžiagų charakteristikos suteikia galimybę pasiekti būseną, kad tarpinė tarp magnetostriktoriaus ir formavimo įrankio kaista intensyviausiai. Iš aliuminio pagamintas formavimo įrankis užtikrina temperatūros tolygumą tarp formavimo įrankio ir tarpinio elemento. Rezultatai pateikti 3.3 pav.



3.3 pav. Šilumos mainų analizė: (a) matematinis modelis; (b) magnetinio srauto tankis; (c) temperatūros pasiskirstymas esant aušinimo sistemai; (d) temperatūros pasiskirstymas be aušinimo

Viena ritė magnetostriktoriuje skirta magnetiniam laukui sukurti, o kita magnetostriktiniam procesui generuoti. Magnetostriktinio proceso modeliavimo tikslas – išsiaiškinti, kokias deformacijas galima gauti naudojant šį procesą. Norint rasti deformacijas, pirmiausia reikia rasti įtempius, kuriuos sukuria magnetostriktinis procesas. Šio proceso įtempiai apskaičiuojami pagal formulę:

$$S = C_H [\varepsilon_{el} - \varepsilon_{me} (M)]; \quad (3.2)$$

čia C_H – standumo matrica;

ε – deformacija, mm/mm;

ε_{me} – magnetostriktinė deformacija, mm/mm.

Magnetostriktinė deformacija apskaičiuojama naudojant kvadratinę izotropinę magnetinio lauko funkciją:

$$\varepsilon_{me} = (3\lambda_s / 2M_s^2) \text{dev}(M_i M_j); \quad (3.3)$$

čia λ_s – magnetostriktoriaus prisotinimo vertė, (m/m)/(A/m);

M_s – prisotinimo įmagnetinimas, A/m.

Procese naudotas magnetostriktinis permendur 49 (Co49Fe49V2) medžiagos lydinys. Šios magnetostriktinės medžiagos savybės pateiktos 3.1 lent.

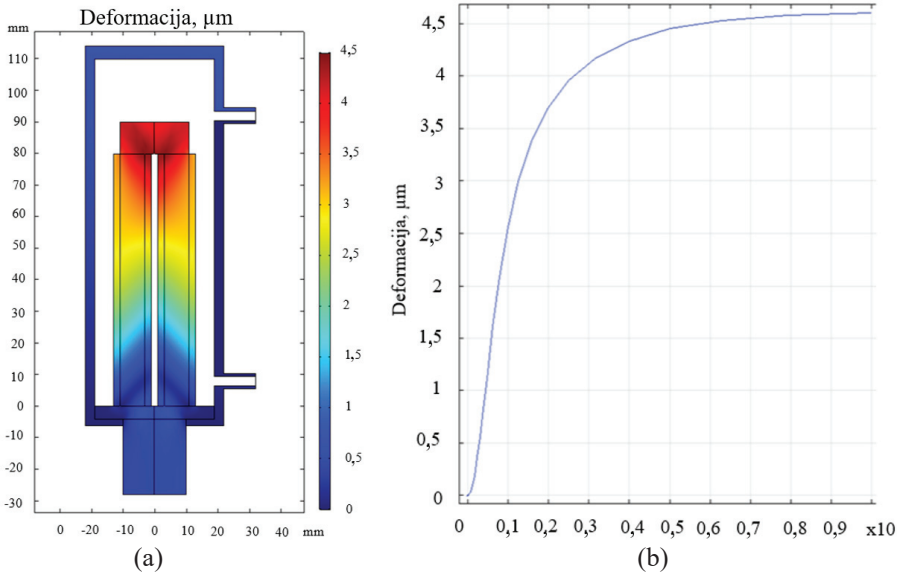
3.1 lentelė. Magnetostriktinės medžiagos savybės

Savybės	Vertė	Vienetai
Jungo modulis	$60 \cdot 10^9$	Pa
Puasono santykis	0,45	–
Tankis	7870	kg/m ³
Elektrinis laidumas	$5,96 \cdot 10^6$	s/m
Šiluminė varža	45	W/(m·K)
Šiluminė talpa	510	J/(kg·K)
Magnetinis prisotinimas	$1,5 \cdot 10^6$	A/m
Pradinis magnetinis jautrumas	200	–
Magnetostriktinis prisotinimas	200	ppm

Naudojant pateiktas formules ir parametų reikšmes atliktas modeliavimas. Matematinis modelis sudarytas iš baigtinių elementų išliko toks pat, kaip ir temperatūrinėje analizėje. Srovės tankis pasirinktas nuo nulio iki $1 \cdot 10^8$ A/m². Magnetostriktinis procesas vyksta šerdyje, todėl analizės domenai pasirinkti šerdis, perėjimas ir formavimo įrankis. Toks analizės tipas vadinamas daugiafizinis uždaviniu, nes apima mechaninę deformaciją ir magnetinio lauko analizę. Atlikus modeliavimą gautas deformacijos vaizdas ir netiesinė kreivė, kuri pateikta 3.4 pav.

Išanalizavus rezultatus nustatyta, kad nors magnetostriktijos apvijos yra tik vienoje pusėje, dėl tolygaus magnetinio lauko pasiskirstymo deformacijos visoje konstrukcijoje yra tolygios ir simetriškos. Iš magnetostriktinės deformacijos priklausomybės nuo srovės tankio grafiko matyti, kad magnetostriktoriui būdingos netiesinės savybės. Iš grafiko galima matyti, kad su šia konstrukcija galima pasiekti

maksimalią 4,5 μm deformaciją. Toks santykinis pailgėjimas yra 0,0056 % magnetostriktoriaus ilgio.



3.4 pav. Magnetostriktoriaus deformacijų simuliacijos rezultatai: (a) magnetostrikcinės deformacijos vaizdas; (b) magnetostrikcinės deformacijos priklausomybė nuo srovės tankio

Apibendrinus teorinius rezultatus galima teigti, kad naujas mikrostruktūrų formavimo įrankis gali pasiekti deformacijas iki 4,5 μm , o formavimo temperatūra gali būti pasiekta iki 200 $^{\circ}\text{C}$. Deformacijos dažnį galima valdyti keičiant generuojamos srovės dažnį, o deformacijų amplitudę valdyti keičiant pamagnetinimą arba kintamos srovės intensyvumą.

3.2. Magnetostriktoriaus gamyba ir analizė

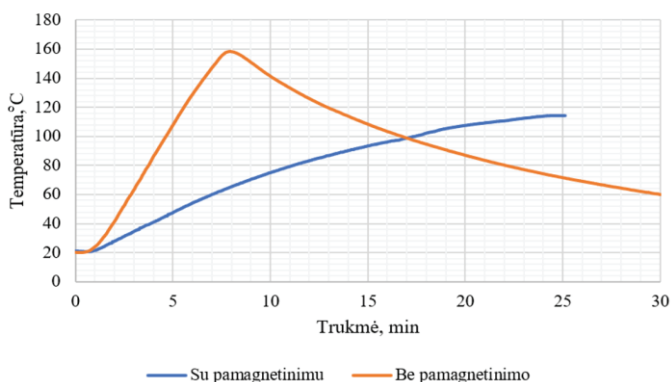
Mikrostruktūrų formavimo įrankio skirtingos dalys pagamintos naudojant skirtingas technologijas. Įrankio šerdis pagaminta iš permendur 49 tipo lydinio skardos. Forma išpjauta naudojant kompiuterizuotas lazerines stakles, o tada sukniedyta. Gautas magnetolaidis privirintas prie ištekinto perėjimo, kuris pagamintas iš feromagnetinės medžiagos. Šerdis apvyniota dviem skirtingais laidais, kurie atsparūs temperatūrai iki 180 $^{\circ}\text{C}$, o laido skerspjūvio plotas 0,75 mm^2 . Vienas laidas skirtas indukciniam procesui, o kitas pamagnetinimui. Formavimo įrankis pagamintas iš aliuminio. Dėl mazginio taško ir konstrukcijos pasirinkta perėjimą naudoti kaip išorinės jėgos spaudimo vietą. Dėl šios priežasties magnetostriktoriaus šerdis įmontuota į vamzdį, kuris pritvirtintas prie perėjimo. Vamzdžio šone išgręžta skylė, skirta per šoną išvesti maitinimo laidams. Naujo tipo magnetostriktoriaus vaizdas pateiktas 3.5 pav.



3.5 pav. Sukurtas magnostriktoriaus įrenginys

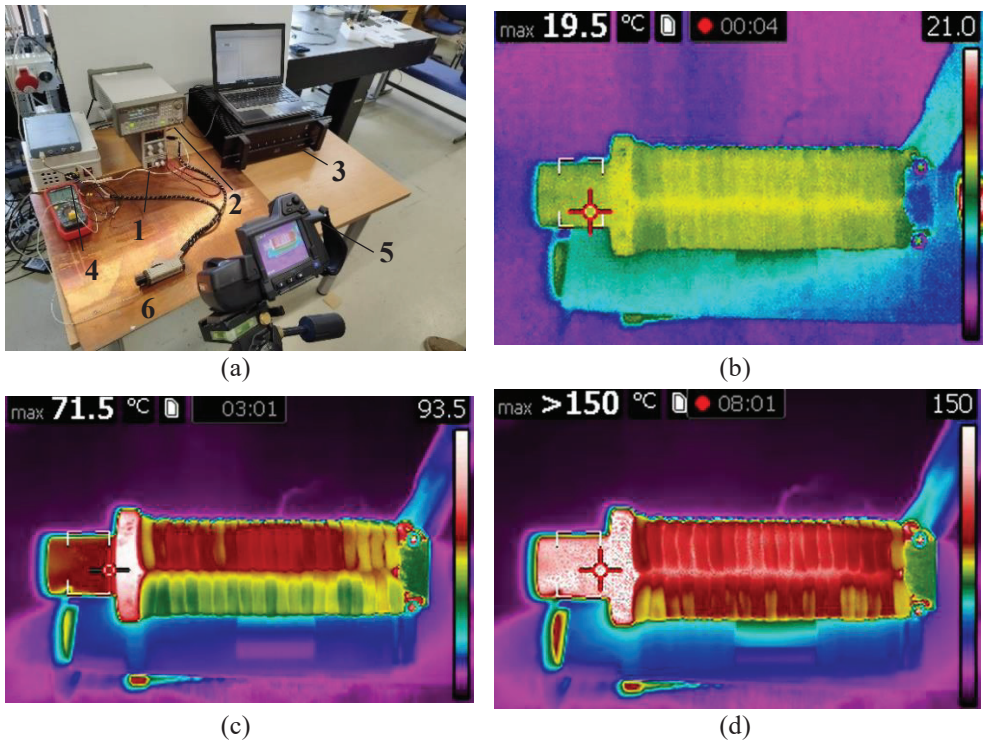
Magnostriktoriui valdyti ir užtikrinti reikiamus parametrus naudojama papildoma įranga. Pamagnetinimui sukurti naudojamas nuolatinės 10A srovės šaltinis. Induciniam procesui sukurti naudojamas signalo generatorius, stiprintuvas ir varža. Kaip signalo generatorius naudojamas „UNI-T UTG2025A“. Šis generatorius sukuria sinusinį iki 2,5 V signalą, kurį perduoda į stiprintuvą. Signalui sustiprinti naudojamas „Wilcoxon PA8HF“ stiprintuvas. Šis stiprintuvas gali maksimaliai generuoti 600 W energiją, tačiau, norint tokią galią pasiekti, reikia į elektros grandinę įterpti 4 Ω varžą. Magnostriktoriaus apvijos, skirtos induciviam procesui, varžą galima prilyginti nuliui, todėl papildomai sukurta didelės galios 4 Ω varža. Siekiant užtikrinti gerą varžų aušinimą, naudoti skysčiu aušinami radiatoriai ir ventiliatorius.

Sumontavus visą testavimo įrangos stendą pradėtas testuoti sukurtas įrenginys. Visų pirma, analizė pradėta nuo formavimo įrankio testavimo analizuojant temperatūros kitimą, kai skiriasi formavimo parametrai. Siekiama išsiaiškinti, kokią įtaką formavimo temperatūrai turi pamagnetinimas. Rezultatai pateikti 3.6 pav. Iš rezultatų matoma, kad atsirandantis pamagnetinimas sumažina temperatūros kitimo intensyvumą. Atliekant eksperimentą be pamagnetinimo buvo analizuojamas temperatūros kitimas, tačiau dėl intensyvaus temperatūros kilimo eksperimentą teko nutraukti aštuntą minutę, kad nebūtų pažeista apvijų termoizoliacija.



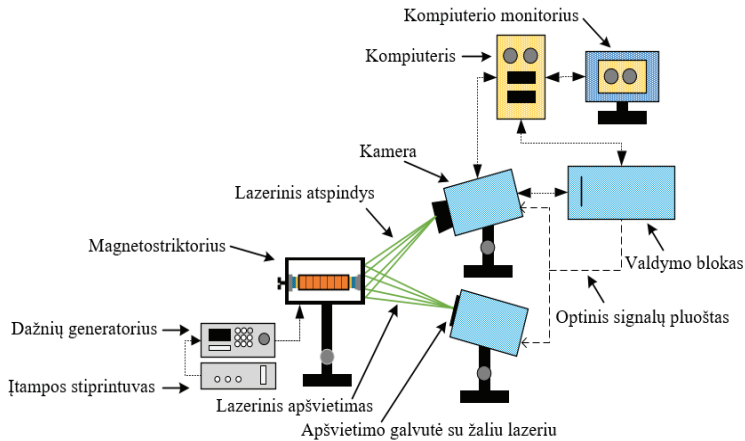
3.6 pav. Temperatūros kitimo grafikai

Atliekant temperatūros analizę naudota šiluminė kamera, siekiant užfiksuoti temperatūros pokyčius visame įrenginyje. Šiam tikslui naudota šiluminė kamera „FLIR T420“. Eksperimento vaizdai pateikti 3.7 pav. Fiksuojant ir analizuojant duomenis pastebėta, kad perėjimas, pagamintas iš feromagnetinės medžiagos, turėjo įtakos skirtingiems temperatūrų pasiskirstymams. Iš aliuminio pagaminto formavimo įrankio temperatūra buvo artima perėjimo dėl geresnių šiluminių mainų charakteristikų, palyginti su magnetostrikcine medžiaga. Taip pat nustatyta, kad indukcinė ritė kaito labiau nei pamagnetinimo. Tam galėjo turėti įtakos didesnis tekantis energijos kiekis indukciniame procese, palyginti su pamagnetinimo procesu.

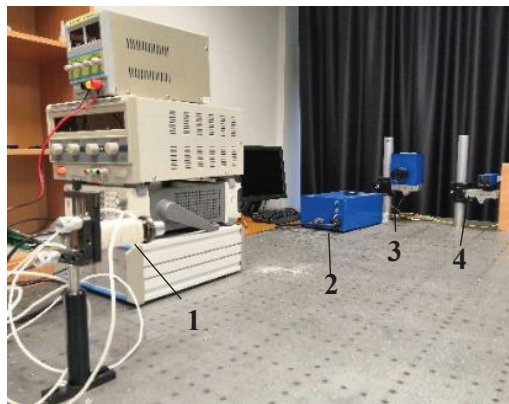


3.7 pav. Temperatūros pasiskirstymas magnetostriktoriuje: (a) temperatūros eksperimento įranga: 1 – nuolatinės srovės maitinimo šaltinis, 2 – signalo generatorius, 3 – stiprintuvas, 4 – varža, 5 – termokamera, 6 – magnetostriktorius; (b) temperatūros pasiskirstymas pradiniu laiko momentu; (c) temperatūros pasiskirstymas po 3 minučių; (d) temperatūros pasiskirstymas 8-ą proceso minutę

Darbiniams virpesių režimams ir formoms analizuoti pasirinkta „PRISM“ holografinė sistema. „PRISM“ sistemos veikimo principas su testuojama įranga ir rezultatai pateikti atitinkamai 3.8 ir 3.9 pav. „PRISM“ sistemos veikimo principas pagrįstas dviejų lazerinių šaltinių spindulių interferometrijos principu. Vienas lazerio šaltinis objektinis ir nukreiptas į magnetostriktorių, o kitas spindulys atraminis ir sklinda tiesiai iš vaizdo kameros. Šių dviejų lazerio šviesų interferencija fiksuojama kameros ir atvaizduojama kompiuterio ekrane. Gauti rezultatai suteikia informacijos apie magnetostriktoriaus virpesių formas.



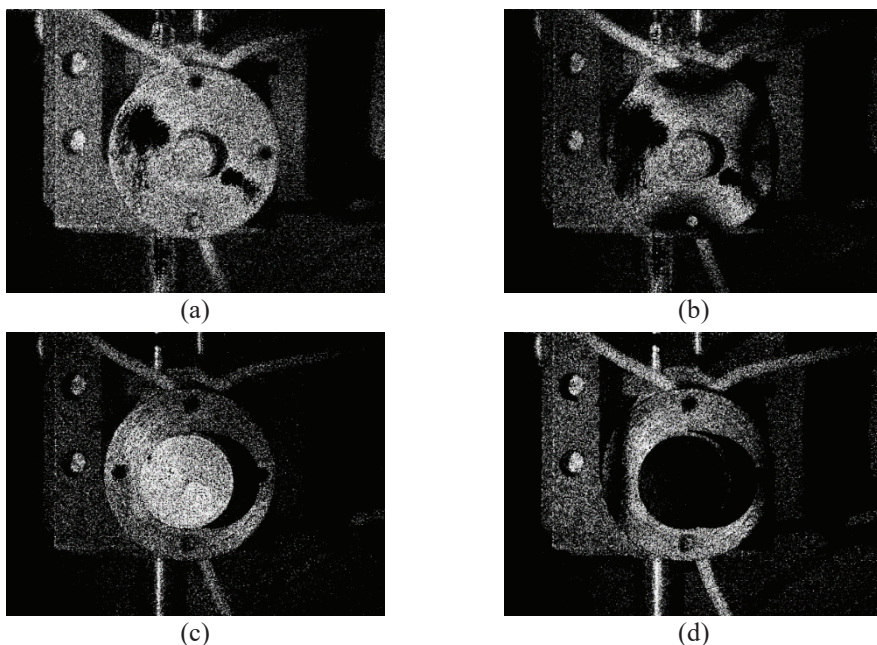
(a)



(b)

3.8 pav. Virpesių analizė naudojant PRISM sistemą: (a) „PRISM“ sistemos principinė veikimo schema; (b) eksperimento nuotrauka: 1 – magnetrostriktorius, 2 – valdymo blokas, 3 – kamera, 4 – apšvietimo galvutė

Magnetrostriktoriaus vienas galas standžiai pritvirtintas su stovu prie pagrindo, kas leido laisvai virpėti formavimo įrankiui. Toks įtvirtinimas leido realiu laiku keisti žadinimo dažnį ir stebėti, kaip magnetrostriktorius reaguoja į pokyčius. Pirmiausia magnetrostriktorius testuotas be formavimo įrankio, siekiant nustatyti papildomus konstrukcinius virpesius. Remiantis 3.9 paveiksle pateiktomis nuotraukomis matyti, kad be formavimo įrankio geometrija virpa netiksliai. Prie konstrukcijos pridėjus formavimo įrankį ir pakeitus žadinimo dažnį nuo 12,05 kHz iki 10,1 kHz, formavimo įrankis pradėjo virpėti normaline kryptimi, kaip buvo numatyta. Pagrindinis šio eksperimento trūkumas, kad „PRISM“ sistema negali fiksuoti virpesių tangentine kryptimi, todėl šiam tikslui papildomai naudota „Polytech“ įranga.



3.9 pav. Virpesių analizės rezultatai: (a) virpesių forma be formavimo įrankio ir be žadinimo; (b) virpesių forma be formavimo įrankio esant 12,05 kHz žadinimo dažniui; (c) virpesių forma su formavimo įrankiu ir be žadinimo; (d) virpesių forma su formavimo įrankiu esant 10,1 kHz žadinimo dažniui

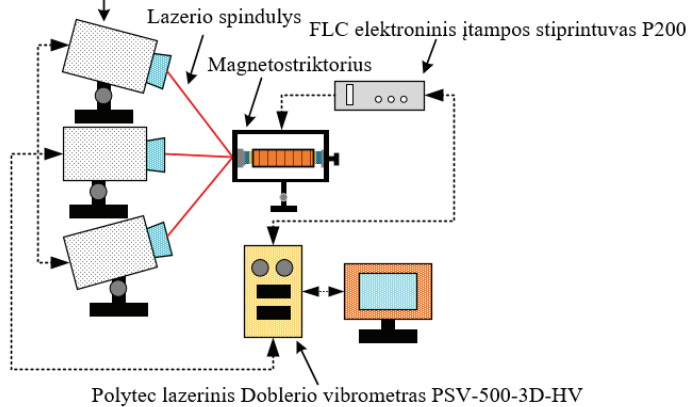
Toliau magnetostriktorius ir virpesių režimai analizuoti naudojant „Polytech PSV–500–3D–HV“ vibrometrą. Ši skenuojamoji lazerinė sistema suteikia galimybę vizualizuoti virpesių formas nedarant šiluminės įtakos ir virpesių formą stebėti trimatėje erdvėje, t. y. stebėti tangentinius ir normalinius virpesius. Ši įranga, kaip ir kompiuteriniuose modeliavimuose, naudoja baigtinius elementus, kurie leidžia matyti virpesių formas erdvėje, nepriklausomai nuo jos dydžio, o virpesius galima analizuoti iki 1 GHz dažnio. Naudojant šią sistemą gautos virpesių greičio amplitudės esant skirtingiems dažniams. Iš kreivės nustatyta, kad darbinis magnetostriktoriaus rezonansinis dažnis 10,0625 kHz. Eksperimento nuotraukos ir rezultatai pateikti 3.9 pav.

Lazerinio duplerio „Polytech“ analizės rezultatai parodė, kad, esant 10,0625 kHz rezonansiniam dažniui, sistemos virpesių amplitudė yra intensyviausia. Iš 3.9 paveikslą matyti, kad, esant žemesniam dažniui, virpesiai vyksta įvairiomis tangentėmis kryptimis. Esant rezonansiniam dažniui, virpesių amplitudė normaline paviršiaus kryptimi yra didžiausia, o tangentėmis kryptimis yra minimali.

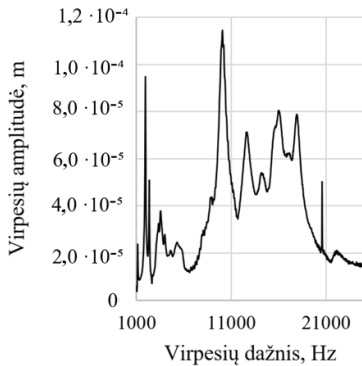


(a)

Polytec PSV-500 skanavimo galvos



(b)



(c)

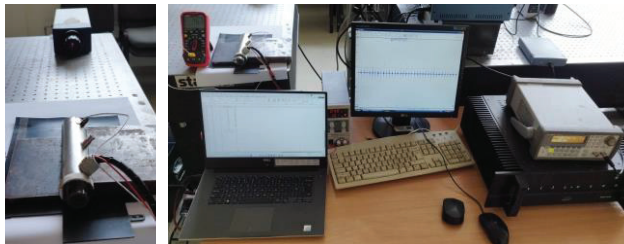
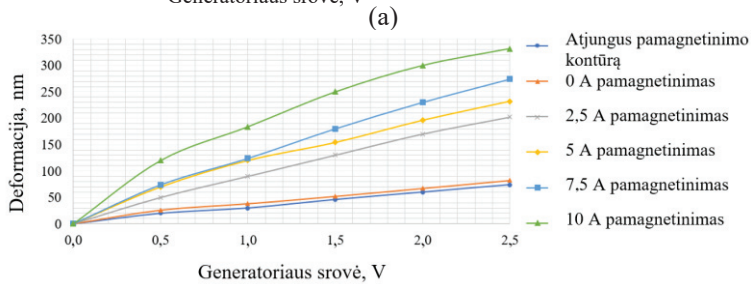
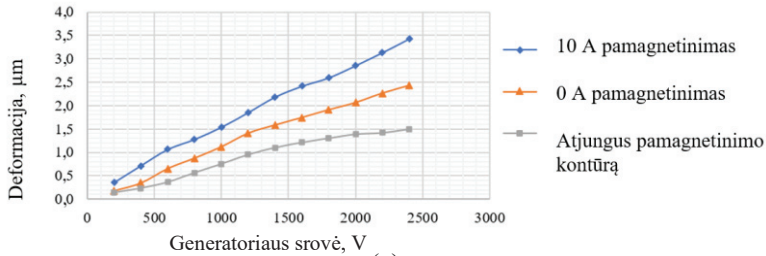


(d)

3.10 pav. Virpesių analizė naudojant „Polytech PSV–500–3D–HV“ sistemą: (a) magnetostruktoriaus tyrimo eksperimentas naudojant „Polytech“ lazerinį doplerio vibrometrą: 1 – lazerinis dupleris, 2 – magnetostruktoriaus, 3 – kompiuterio ekranas;

(b) „Polytech“ sistemos veikimo principas; (c) virpesių amplitudės ir dažnių grafikas; (d) baigtiniais elementais suskaidytas formavimo įrankis, vaizduojantis virpesių amplitudę esant 10,0625 kHz dažniui

Naudojant trimatį lazerinį duplerį nustatomas tik virpesių greitis, tačiau nėra nurodoma virpesių amplitudė. Amplitudei nustatyti naudojama „Polytech“ įranga, kuri naudoja tik viena lazerio spindulį. Ši sistema leidžia konvertuoti šviesos kitimo grafiką į mikrometro eilės deformacijas. Eksperimento vaizdai ir rezultatai pateikti 3.11 pav.



3.11 pav. Virpesių analizė naudojant „Polytech“ vieno lazerio sistemą: (a) magnetolaidžio virpesių amplitudės; (b) formavimo įrankio virpesių amplitudės; (c) naudotos įrangos nuotrauka

Atliktas virpesių eksperimentas, kurio metu keičiamos pamagnetinimo sąlygos. Pirmiausia matuojamos deformacijos esant atvirai pamagnetinimo grandžiai, vėliau matuojamas pokytis uždarius grandį ir keičiant pamagnetinimo įtampą. Atliekant eksperimentą, žadinimo dažnis nuolatos koreguojamas norint išlaikyti procesą rezonansiniame režime, nes magnetrostrikatoriaus temperatūra ir savitasis rezonansinis dažnis nuolatos kinta. Gauti rezultatai parodė, kad intensyvinant pamagnetinimą virpesių amplitudė didėja.

4. FUNKCINIO PROTOTIPO EKSPERIMENTINIS TESTAVIMAS

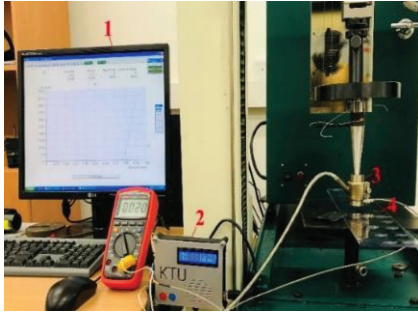
Sukūrus mikrostruktūrų formavimo įrankį, pradedamas eksperimentinis prototipo testavimas. Magnetostriktoriaus testavimą sudaro kelios stadijos. Pirmoji – atliekamas pilotinis tyrimas, siekiant nustatyti mikrostruktūrų formavimo parametrus naudojant tradicines formavimo technologijas. Antroji – atliekamas eksperimentinis struktūrų formavimo bandymas, siekiant nustatyti, kokią įtaką kokybei turi nauja struktūrų formavimo technologija.

4.1. Karšto šampavimo pilotinis tyrimas

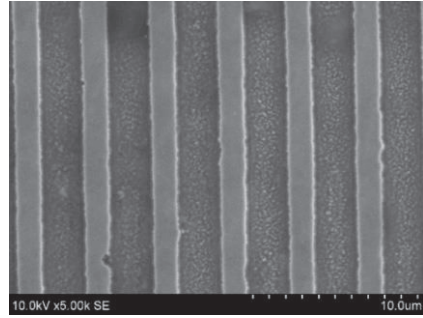
Kuriant naują arba patobulintą mikrostruktūrų formavimo technologiją reikia lyginti formavimo procesus su jau žinomais, norint matyti įtaką ir pokytį, kuris įvyksta naudojant naujesnį procesą. Šiam tikslui sukurtas magnetostrikcinis keitiklis karštam šampavimo procesui ir pagamintos PP, PETG, PVC ir SAN mikrostruktūros.

Formavimo įrangą sudaro „Tinius Olsen“ bandymo mašina, pagrindas, plastiko lakštas, kaitinimo elementas ir valdiklis. Formavimo įrangą pateikta 4.1 pav., a. Kaip pagrindinė mikrostruktūra naudota nikelio matrica, kuri pateikta 2.3 pav. Matrica įkaitinta iki numatytos temperatūros ir tam tikrą laiką išlaikyta, kad temperatūra pasiskirstytų tolygiai per visą matricos tūrį. Jėga, temperatūra ir formavimo trukmė keičiamos atsižvelgiant į gautą konstrukcijos vaizdą.

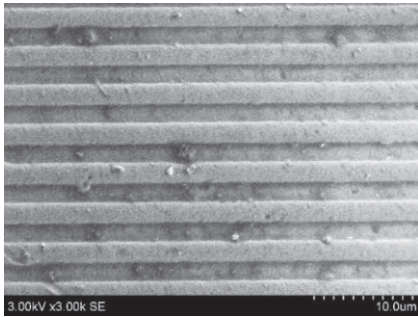
Mikrostruktūros išpaustos visuose keturiuose skirtinguose termoplastikuose – PP, PETG, PVC ir SAN, o jų vaizdai padaryti naudojant skenuojamąjį elektroninį mikroskopą (SEM). Struktūrų vaizdai pateikti 4.1 pav. SEM vaizdai parodė, kad aukštesnė paviršiaus kokybė gauta su PETG ir PP plastikais, palyginti su PVC ir SAN termoplastikais. Siekiant geriau išanalizuoti mikrostruktūrų kokybę, tyrimas atliktas su atominės jėgos mikroskopu (AFM) gaunant topografinių profilių paviršiaus vaizdus. Bandiniai matuoti dinaminio kontakto režimu. Rezultatai pateikti 4.2 pav. Kokybiškiausiai suformuota mikrostruktūra PETG plastike: vidutinis paviršiaus šiurkštumas $R_a = 174,0$ nm, o vidutinis mikrostruktūros gylis 1000 ± 20 nm. Mikrostruktūra iš PP termoplastiko turi lygų paviršiaus reljefą, kurio vidutinis paviršiaus šiurkštumas $R_a = 340,2$ nm, o mikrostruktūros gylis panašus į PETG plastike suformuotą struktūrą 950 ± 25 nm. PVC ir SAN termoplastikuose suformuota mikrostruktūra turi daug paviršiaus defektų, kurių vidutinis šiurkštumas atitinkamai $R_a = 437,6$ nm ir $R_a = 298,7$ nm. Iš profilio vaizdo matyti, kad paviršiaus forma nėra tolygi ir neatitinka pagrindinės mikrostruktūros.



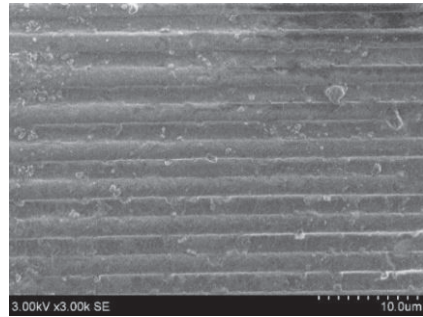
(a)



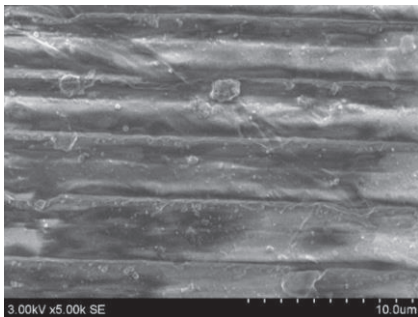
(b)



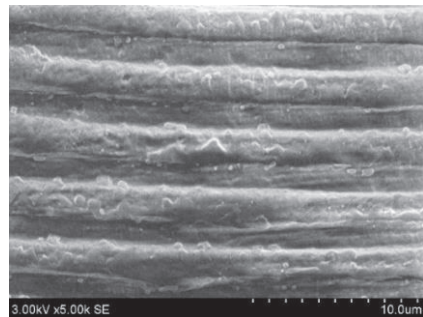
(c)



(d)



(e)

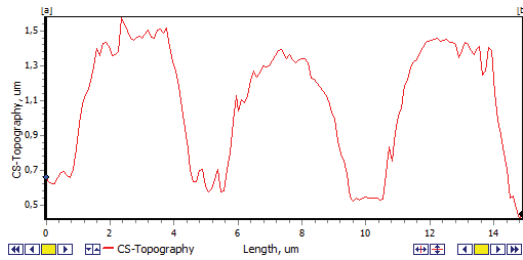


(f)

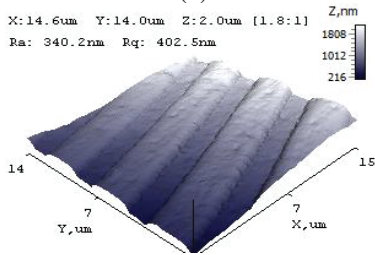
4.1 pav. Mikrostruktūrų formavimas: (a) eksperimentinė įranga: 1 – kompiuteris, 2 – temperatūros valdiklis, 3 – kaitinimo elementas, 4 – plastiko lakštas; (b) pagrindinės nikelio mikrostruktūros SEM vaizdas; (c) PETG; (d) PP; (e) PVC; (f) SAN



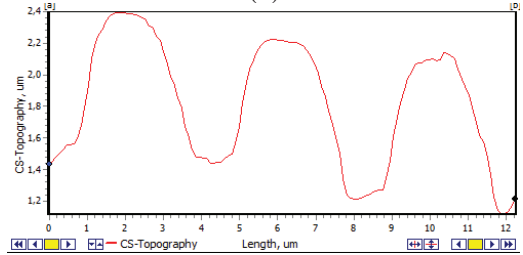
(a)



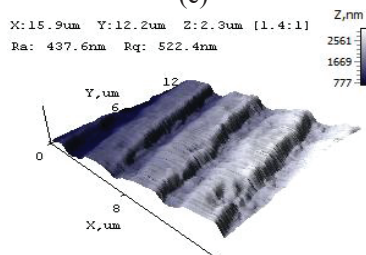
(b)



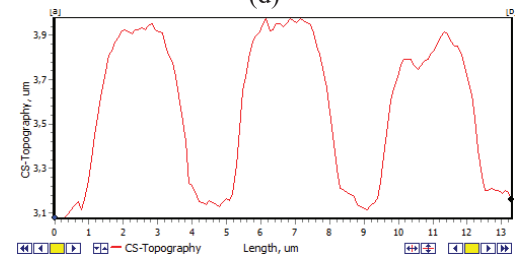
(c)



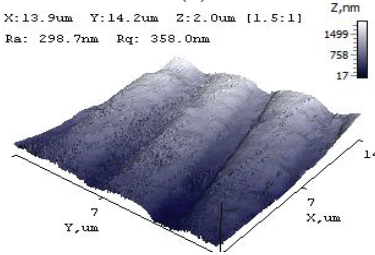
(d)



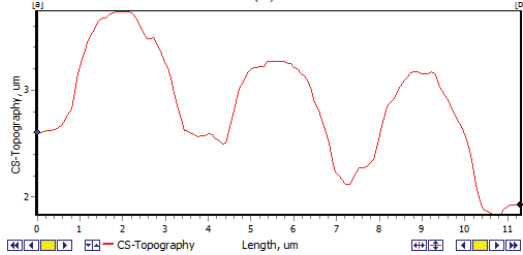
(e)



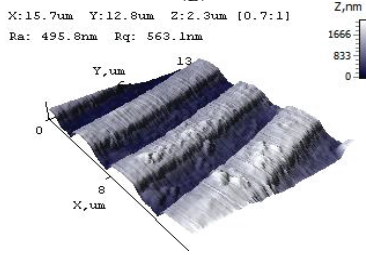
(f)



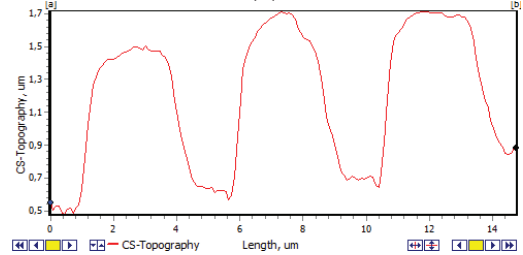
(g)



(h)



(i)

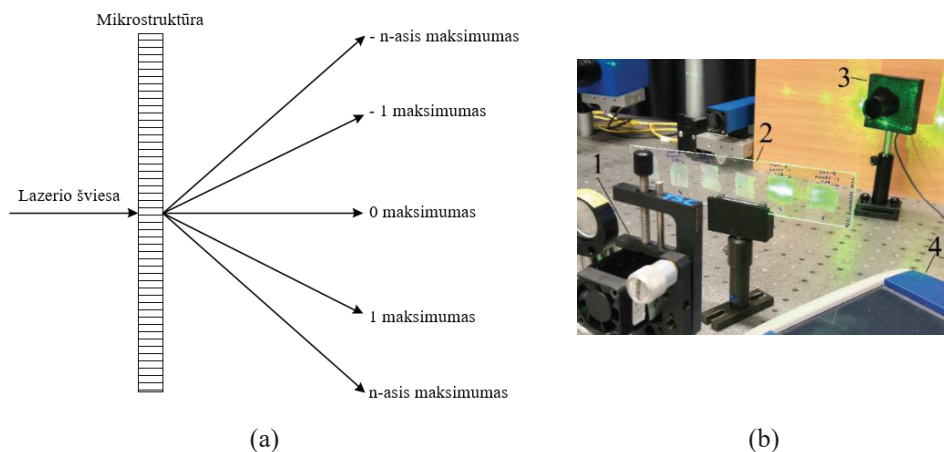


(j)

4.2 pav. AFM topografijos ir paviršiaus profilio vaizdai: (a) ir (b) PETG; (c) ir (d) PP; (e) ir (f) PVC; (g) ir (h) SAN; (i) ir (j) pagrindinė nikelio mikrostruktūra

SEM ir AFM matavimai parodė, kad kokybiškiausios mikrostruktūros gautos iš PP ir PETG termoplastikų. PVC ir SAN plastikai pasižymi didesniu trapumu nei PP ir PETG plastikai, ir šiluminės plastikų savybės nulėmė blogesnę struktūrų atkartojamumą.

Mikrostruktūros kokybė ir geometriniai parametrai gali nulemti struktūros optines savybes. Šviečiant lazeriu per mikrostruktūrą gaunami difrakciniai maksimumai. Esant netaisyklingai mikrostruktūrai arba dideliame paviršiaus šiurkštumui, difrakcinis maksimumas pasikeičia. Tyrimo metu difrakcijos efektyvumo matavimai atlikti esant skirtingiems maksimumams. Kadangi PP plastikas nėra skaidrus, ši medžiaga tyrime nebuvo tiriama. PETG, PVC ir SAN mikrostruktūros apšviestos žalios šviesos lazeriu, kurio bangos ilgis 532 nm. Šviesos maksimumai išmatuoti fotodiodu ir užfiksuoti kompiuteryje. Eksperimentinė įranga pateikta 4.3 pav.



4.3 pav. Difrakcijos efektyvumo matavimas: (a) difrakcijos maksimumų susidarymas; (b) matavimo įranga: 1 – lazeris, 2 – matrica, 3 – fotodiodas, 4 – rezultatų atvaizdavimo ekranas

Vienas iš pagrindinių parametru, įvertinančių optines mikrostruktūros savybes, yra santykinis difrakcijos efektyvumas (RDE), kurį galima apskaičiuoti pagal pateiktą lygtį:

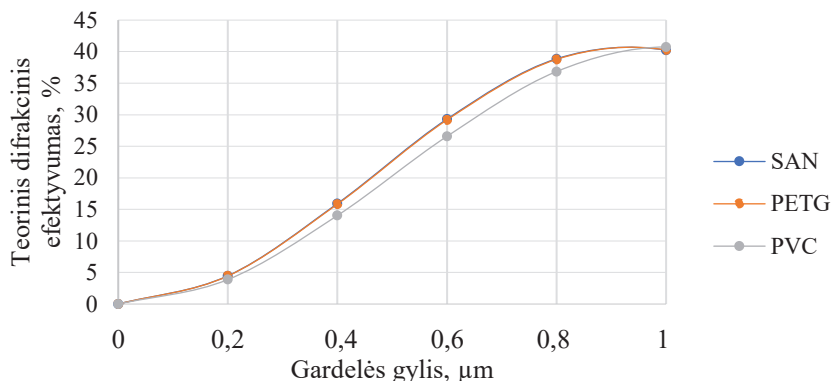
$$RDE_{i,j} = \frac{P_{i,j}}{\sum_i P_{i,j}}; \quad (4.1)$$

čia $RDE_{i,j}$ – santykinis difrakcijos efektyvumas;

$P_{i,j}$ – didžiausia šviesos intensyvumo galia.

Teoriškai apskaičiuotas trijų skirtingų plastikų difrakcijos efektyvumas. Skaičiavimams naudotos šios plastikų lūžio rodiklių vertės: SAN – 1,572 [94], PETG – 1,57 [95], PVC – 1,531 [96]. Naudojant lūžio rodiklius apskaičiuota teorinė mikrostruktūros gylio įtaka difrakcijos efektyvumui. Nevertinant pakitusios paviršiaus kokybės, remiantis teoriniais skaičiavimais ir difrakcijos maksimumų

matavimais galima nustatyti suformuotos mikrostruktūros gylį. Teorinis difrakcijos efektyvumo maksimumo grafikas pateiktas 4.4 pav.



4.4 pav. Plastikų teorinė difrakcinio efektyvumo priklausomybė nuo mikrostruktūros gylio

Su kiekvienu termoplastiku atlikta po 12 difrakcijos efektyvumo matavimų esant skirtingoms matavimo sąlygoms (apkrovai, išspaudimo trukmei ir temperatūrai). Geriausias santykinis difrakcinis efektyvumas RDE=22,62 % nustatytas PETG mikrostruktūros, kai ji gaminta esant 2000 N apkrovai, 10 sekundžių formavimo trukmei ir 125 °C temperatūrai. SAN plastike suformuotos struktūros RDE=19,04 %, kai išspaudimo parametrai buvo 5000 N apkrova, 10 sekundžių formavimo trukmė ir 130 °C temperatūra. Mikrostruktūros suformuotos PVC plastike RDE=22,44 %, kai naudojama 5000 N jėga, 10 sekundžių esant 80 °C temperatūrai. SAN, PETG ir PVC difrakcinio efektyvumo duomenys pateikti atitinkamai 4.1, 4.2 ir 4.3 lent.

4.1 lentelė. SAN difrakcinio efektyvumo matavimo rezultatai

Apkrova, N	Trukmė, s	Temperatūra, °C	RDE, %
5000	10	100	17,07
5000	10	120	16,49
5000	15	120	14,94
5000	10	140	12,52
4000	10	140	13,28
4000	5	140	7,85
3000	10	140	18,12
3000	5	140	16,85
3000	10	130	18,23
5000	2	130	17,76
5000	10	130	19,04
4000	10	130	15,25

4.2 lentelė. PETG difrakcinio efektyvumo matavimo rezultatai

Apkrova, N	Trukmė, s	Temperatūra, °C	RDE, %
4000	10	100	14,31
5000	5	100	21,43
5000	10	100	20,50
4000	5	100	13,49
2000	10	125	22,62
2000	10	100	18,81
2000	5	100	22,31
3000	10	100	10,67
2000	10	90	14,85
2000	5	90	19,86
2000	10	80	13,54

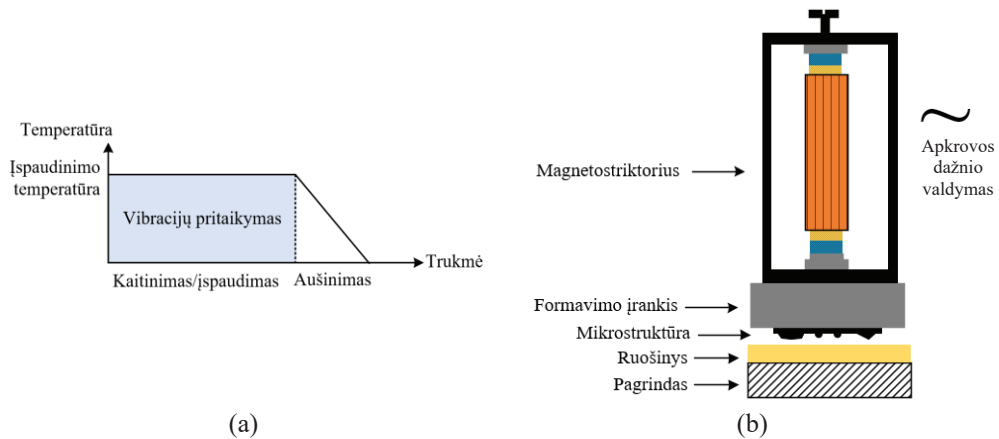
4.3 lentelė. PVC difrakcinio efektyvumo matavimo rezultatai

Apkrova, N	Trukmė, s	Temperatūra, °C	RDE, %
5000	10	100	5,39
5000	5	100	12,63
4000	10	100	7,28
4000	5	100	11,59
3000	10	100	5,43
3000	5	100	11,66
4000	10	125	10,44
4000	5	125	7,38
5000	5	90	6,03
5000	10	80	22,44
2000	10	125	6,74
2000	5	125	6,65

Visų formuotų plastikų difrakcijos efektyvumas didesnis, kai formavimo temperatūra viršijo plastiko stiklėjimo temperatūrą. Kai temperatūra artima stiklėjimo temperatūrai, plastikas gali lėtai tekėti į formą ir nebūti papildomai deformuojamas vietose, kuriose deformacija nereikalinga. Iš rezultatų matyti, kad formavimo trukmė taip pat turi įtakos rezultatams.

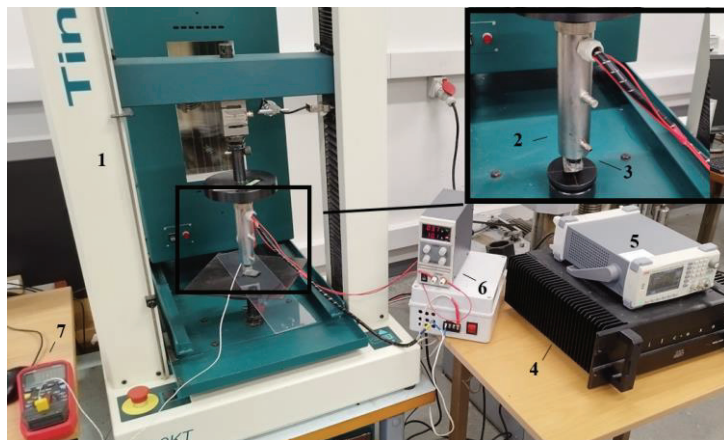
4.2. Karšto štampos tyrimas su magnetostriktiniu keitikliu

Karšto išspaudimo procesą sudaro trys pagrindiniai etapai: kaitinimas, išspaudimas ir aušinimas. Įprastai plastikas kaitinamas iki stiklėjimo temperatūros, atliekamas išspaudimo procesas, po tam tikro laiko pašalinama apkrova ir paliekama aušti suformuota struktūra. Naudojant naują keitiklį, plastiko kaitinimo etapas sujungiamas su išspaudimo etapu. Formavimo metu forma būna įkaitinta iki nustatytos temperatūros ir papildomai naudojamos vibracijos. Formavimo stadijų grafikas ir formavimo proceso vizualizacija pateikta 4.5 pav.



4.5 pav. Karštas štapavimas su magnetostrickiniu keitikliu: (a) temperatūros kitimo kreivė esant karšto įspaudimo procedūrai naudojant magnetostrickinį keitiklį; (b) magnetostricktoriaus veikimo principas

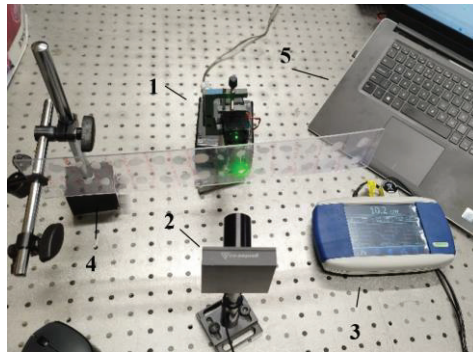
Formavimo įrangą sudaro magnetostricktorius, formavimo mikrostruktūra, polimerinė plokštė ir pagrindas. Tyrimas atliktas naudojant tempimo bandymo mašiną (H10KT, *Tinius Olsen*, JAV). Papildomai sistemoje naudoti komponentai: signalo generatorius (UTG2025A, UNI-T, Kinija), stiprintuvas (PA8HF, *Wilcoxon*, Anglija) ir maitinimo šaltinis (KPS3010D, *Wanptek*, Kinija). Su šia įranga galima pasiekti maksimalią 4 μm deformaciją. Formavimo įrankio temperatūra fiksuojama skaitmeniniu termometru (UT161D, UNI-T, Kinija). Eksperimentinė įranga pateikta 4.6 pav.



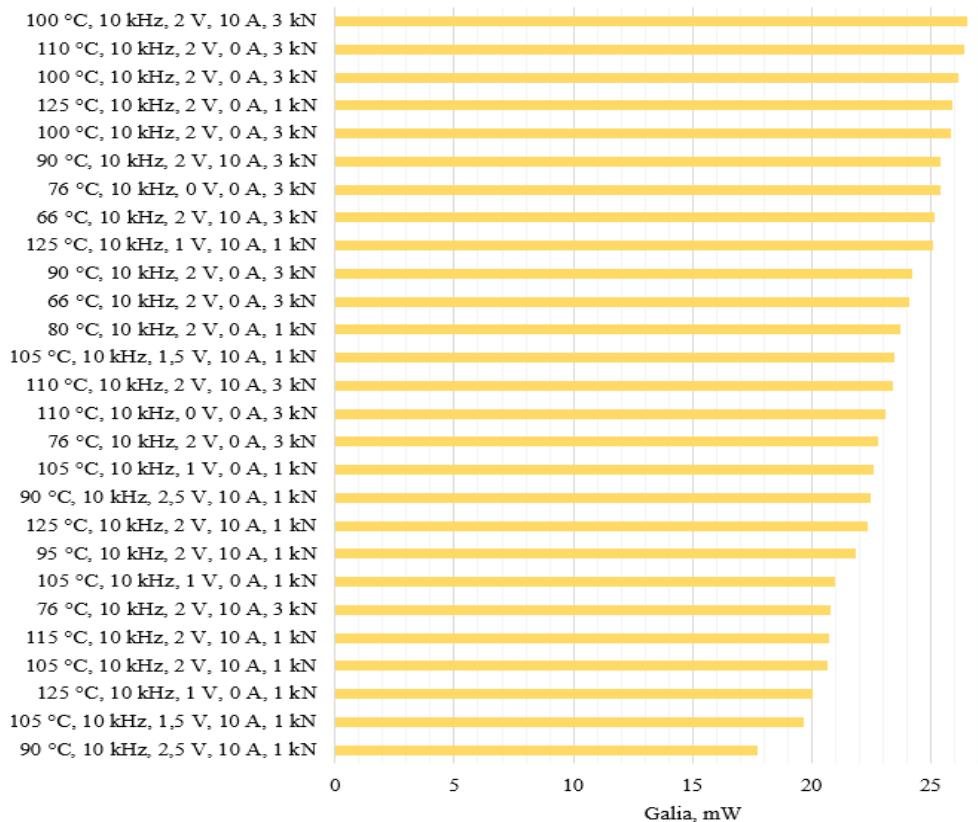
4.6 pav. Mikrostruktūrų formavimo įranga: 1 – tempimo bandymo mašina, 2 – magnetostricktorius, 3 – formavimo mikrostruktūra, 4 – stiprintuvas, 5 – signalo generatorius, 6 – maitinimo šaltinis, 7 – termometras

Formavimo įranga parinkta taip, kad būtų galima keisti formavimo jėgą, temperatūrą, vibracijų amplitudę ir dažnį. Įspaudimai kartojami po tris kartus, norint užtikrinti duomenų patikimumą ir tikslumą. Struktūros kokybės kitimas įvertintas

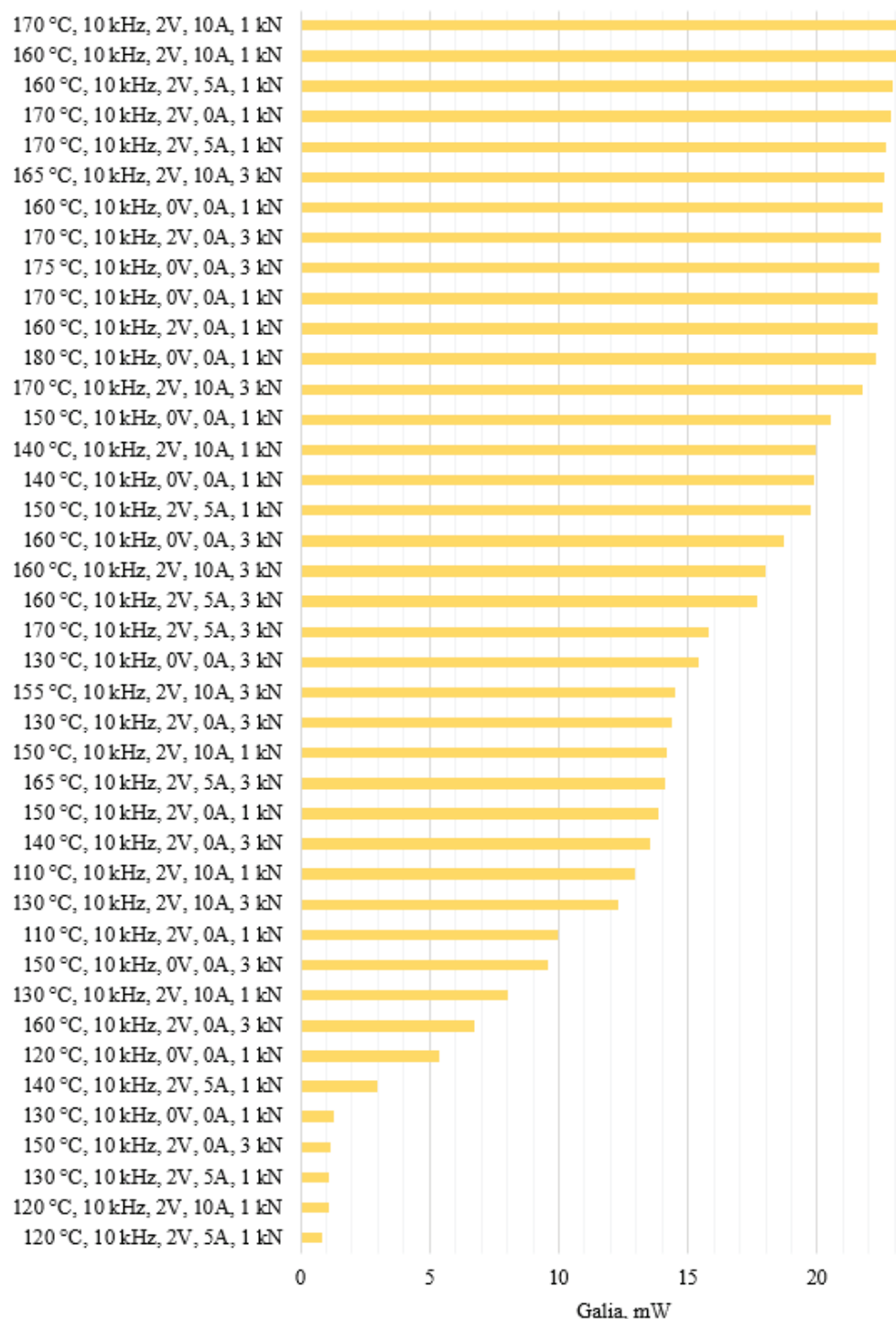
matuojant pasikeitusį difrakcijos efektyvumą. Matavimams naudotas žalias (525 nm) šviesos lazeris (OX-MZ5201, *OXLasers*, Kinija) ir didelės galios lazerio šviesos detektorius su monitoriumi (11UP12, *Gentec*, Kanada). Papildomai duomenims įrašyti naudotas kompiuteris (Inspiron 7560, *Dell*, JAV), o suformuotai mikrostruktūrai ir lazeriui laikyti naudoti stovai. Matavimo įranga pateikta 4.7 pav. Difrakcijos matavimo rezultatai pateikti 4.8–4.10 pav.



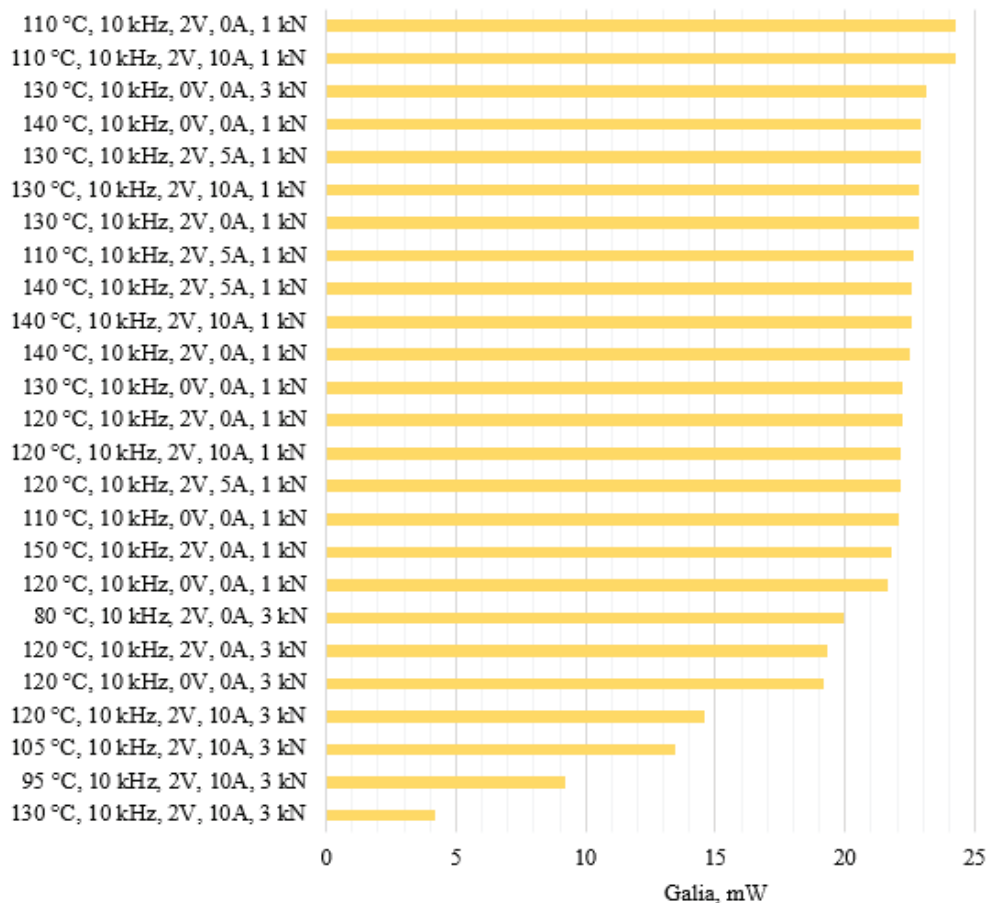
4.7 pav. Difrakcijos matavimo įranga: 1 – lazeris, 2 – lazerio šviesos detektorius, 3 – monitorius, 4 – suformuota mikrostruktūra, 5 – kompiuteris



4.8 pav. Difrakcijos efektyvumo PVC plastike matavimo rezultatai



4.9 pav. Difrakcijos efektyvumo PETG plastike matavimo rezultatai



4.10 pav. Difrakcijos efektyvumo SAN plastike matavimo rezultatai

Difrakcijos tyrimo metu išmatuoti trijų skirtingų termoplastikų bandiniai, kuriuose suformuotos difrakcinės mikrostruktūros. Difrakcijos efektyvumas apskaičiuotas naudojant trijų identiškų mikrostruktūrų vidurkių reikšmes. PVC plastike geriausias santykinis difrakcijos efektyvumas (RDE) nustatytas esant 100 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 10 A pamagnetinimo srovei ir 3 kN apkrovai. Blogiausias RDE gautas esant 90 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2,5 V žadinimo įtampai, 10 A pamagnetinimo srovei ir 1 kN apkrovai. PETG plastike geriausias RDE gautas esant 170 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 10 A pamagnetinimo srovei ir 1 kN apkrovai. Blogiausias RDE gautas esant 120 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 5 A pamagnetinimo srovei ir 1 kN apkrovai. SAN plastike geriausias RDE gautas esant 110 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 0 A pamagnetinimo srovei ir 1 kN apkrovai. Blogiausias RDE gautas, kai buvo naudota 130 °C temperatūra, 10 kHz žadinimo dažnis, 2 V žadinimo įtampa, 10 A pamagnetinimo srovė ir 3 kN apkrova.

5. IŠVADOS

1. Įvertinus mikrostruktūrų formavimo technologijas ir pateikus funkcinių medžiagų taikymo sritis, tyrimams pasirinkti PP, PETG, PVC ir SAN plastikai. PP, PETG ir PVC yra biologiškai suderinami, o SAN plastikas pasižymi cheminiu atsparumu ir tvirtumu. PP plastiko aukšta eksploatacinė temperatūra, o PETG plastikas išsiskiria geromis optinėmis savybėmis. PVC plastikas naudojamas lustų gamyboje. Dėl plastikų savybės deformuotis aukštesnėje temperatūroje pasirinktas karšto štapavimo metodas kaip pagrindinis formavimo metodas. Nustatytas šios technologijos pagrindinis trūkumas – liekamieji įtempiai po formavimo. Siekiant išvengti liekamųjų įtempių, nuspręsta sukurti magnetrostrikinį keitiklį, galintį veikti iki 150 °C temperatūroje ir neprarasti mechaninių savybių.
2. Taikant DMA medžiagos analizės metodą, viskoelastinės medžiagos, tokios kaip termoplastiniai polimerai, gali būti analizuojamos naudojant baigtinių elementų modelį. Atlikus DMA medžiagų analizę nustatyta, kad visais atvejais tamprumo modulis netiesiškai didėjo didėjant formavimo dažniui, o klampumo modulis mažėjo. Didinant formavimo temperatūrą, tamprumo ir klampumo moduliai mažėjo. Šie DMA duomenys buvo ekstrapoliuojami naudojant superpozicijos principą ir gautos sigmoidinės funkcijos iki 1000 GHz dažnio. Naudojant Prony serijos koeficientus gautas baigtinių elementų modelis, kurį taikant galima nustatyti magnetrostrikiniam procesui reikalingus formavimo parametrus. Mikrostruktūrų formavimo modeliavimas parodė, kad, esant aukštesnei formavimo temperatūrai ir ultragarsiniai vibracijai, buvo sumažinti liekamieji įtempiai.
3. Sukurtas magnetrostrikinis keitiklis, kurį sudaro pagrindinės dalys: magnetrostrikinė šerdis, apvyniota dviem skirtingomis apvijomis, feromagnetinis perėjimas ir formavimo įrankis. Atlikus šio mikrostruktūrų formavimo įrankio teorinius skaičiavimus gauta, kad šerdies deformacijos siekia iki 4,5 μm, o formavimo temperatūra pasiekama iki 200 °C. Naudojant kintamos ir nuolatinės srovės generatorius galima valdyti formavimo įrankio temperatūrą, deformacijų dažnį ir amplitudę. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad formavimo įrankio rezonansinis dažnis 10,0625 kHz, o maksimali magnetrostriktoriaus deformacijų amplitudė esant tokiam dažniui 3,5 μm.
4. Atliktas eksperimentinis magnetrostrikinio keitiklio testavimas siekiant nustatyti mikrostruktūrų darbinis PVC, PETG ir PP plastikų formavimo režimus. Atlikus difrakcinio efektyvumo matavimą nustatyta, kad PVC plastike difrakcinė mikrostruktūra formuojasi geriausiai esant 100 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 10 A pamagnetinimo srovei ir esant 3 kN apkrovai. PETG plastike geriausias RDE gautas esant 170 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 10 A pamagnetinimo srovei ir 1 kN apkrovai. SAN plastike geriausias RDE gautas esant 110 °C temperatūrai, 10 kHz žadinimo dažniui, 2 V žadinimo įtampai, 0 A pamagnetinimo srovei ir 1 kN apkrovai. Palyginus rezultatus su formavimo procesu, kai virpesiai nebuvo naudoti, gauta, kad difrakcinis efektyvumas padidėjo PVC plastike 18,09 %, PETG plastike 2,92 %, o SAN plastike 21,32 %. Dėl padidėjusio difrakcinio efektyvumo ir sumažėjusių liekamųjų įtempių, remiantis teoriniais skaičiavimais, šis formavimo įrankis tampa pranašesnis, palyginti su kitais analogiškais įrankiais.

6. SUMMARY

INTRODUCTION

In recent years, various technologies dedicated to the formation of micro- and nanostructures have been intensively developed. Microstructures and nanostructures are manufactured from various materials with different parameters in a wide range of industrial sectors. These structures are used in devices such as biosensors, optical devices, microfluidic devices, electronic components, fluid mixing devices, particle separation or mixing devices, and single-molecule analysis devices.

Microstructure, which is a structure that requires highly precise manufacturing solutions, poses challenges in its development due to the current shortcomings of microstructure production technologies. The traditional production processes, such as photolithography, laser processing, and etching, are commonly used, but they are time-consuming and require specific technological solutions. The hot embossing technology is one of the methods which allows for the rapid formation of structures at relatively low costs. The key advantages of the hot embossing technology are a low number of defects and the ability to choose among different materials. However, it suffers from a disadvantage, specifically, residual stresses. When the hot embossing technology is employed, the following thermoplastics are most commonly used to form the microstructure: polypropylene (PP), polyethylene terephthalate glycol (PETG), polyvinyl chloride (PVC), and styrene-acrylonitrile (SAN).

To improve the hot embossing technology by reducing the forming force, time, and temperature, many researchers have attempted to create a piezoelectric transducer which would generate ultrasonic vibrations. It has been found that the vibrations produced by ultrasonics can reduce the contact pressure time and force while maintaining the same forming temperature. However, the main disadvantage of this technology is that the piezoelectric transducer loses its vibrational properties at temperatures higher than 150 °C. In this study, it was decided to replace the piezoelectric transducer with a magnetostrictive transducer. The improved transducer would not only allow for the formation of structures at higher temperatures but would also eliminate the need for an additional heating element which generates a significant amount of heat during the process, thus optimising the device.

The important aspects of this system include determining the working parameters of the structure formation which affect the quality and reproducibility of the structures. Analyzing the microstructure formation process is also crucial to developing the understanding of the effects of vibrations on material behaviour and its parameters. Additionally, it is essential to analyze the parameters of the formed structures while using the new hot embossing technology with a magnetostrictive transducer.

Research object: magnetostrictive transducer for thermal microstructuring.

The aim of the doctoral dissertation: to develop a magnetostrictive transducer for forming microstructures in functional materials with high-frequency excitation and a forming temperature of up to 150 °C.

The objectives of the doctoral dissertation:

1. To evaluate microstructure formation technologies and present the application of functional materials.
2. To create a controlled parameter finite element model of the microstructure formation process with vibrations.
3. To create a functional prototype of a microstructure forming device, the main forming tool of which is a magnetostrictive transducer with a forming matrix attached to the free end.
4. To perform experimental testing of the functional prototype of the magnetostrictive transducer, and thus to determine the operational modes suitable for secondary microstructure formation in functional materials.

Research Methodology and Methods

In order to develop a microstructure formation technology in functional materials, magnetostrictive materials generating high-frequency vibrations were used. The *Tinius Olsen HI0KT (Tailored Test Solutions Ltd., Pennsylvania, USA)* press machine provided the required pressure conditions. The nickel forming tool matrix was fabricated by using lithography and etching processes. The tool geometry and the resulting microstructures were investigated by using a scanning electron microscope *Hitachi S-3400N (Hitachi Ltd., Tokyo, Japan)* and an atomic force microscope *NT-206 (Microtestmachines Co., Minsk, Belarus)*. The optical properties of the resulting microstructures were measured by using a laser and a high-power laser light detector with a monitor *11UP12 Gentec (Gentec, Quebec, Canada)*. Theoretical diffraction efficiency calculations were performed by using the *GSolver (Grating Solver Development Company, Saratoga Springs, New York State, USA)* programme.

The mechanical properties of plastics were determined by using the *Instron E10000 (Instron, Boston, Massachusetts, USA)* tensile machine. The tensile results were analyzed with the *MCalibration* and *Microsoft Excel* programmes. Theoretical hot embossing simulations were performed by using the *Ansys 17 (Ansys®, Pennsylvania, USA)* software. Theoretical simulations of the magnetostrictor were performed by using the *Comsol Multiphysics 5.4 (COMSOL®, Burlington, Massachusetts, USA)* programme. Geometric models of finite elements were created by using the *Inventor (Autodesk, San Francisco, California, USA)* programme. Experimental thermophysical properties of the magnetostrictor were examined by using a thermal camera *FLIR T420 (Flir, Oregon, USA)* and operational vibration modes and shapes were analyzed by using the *PRISM (Hytec, Los Alamos, New Mexico, USA)* holographic system, while vibration amplitudes and resonance frequencies were analyzed by using a *Polytech PSV-500-3D-HV* vibrometer (*Polytech, Dieburg, Germany*).

Scientific novelty of the doctoral dissertation

1. A microstructure forming tool has been developed to form microstructures in thermoplastics by using a magnetostrictive transducer.

2. The mechanical and dynamic properties of PP, PETG, PVC, and SAN thermoplastics have been determined, including the modulus of elasticity and viscosity, up to the viscoelastic state.

Statements presented for the defence

1. By using a magnetostrictive forming tool, microstructures with lower residual stresses are formed in thermoplastics.
2. The finite model of microstructures with controlled parameters allows for a quantitative and qualitative evaluation of the process of forming microstructures in thermoplastics.
3. Vibrations used in the process of forming microstructures improve the flow of thermoplastics into microstructures, thus improving the repeatability of geometric parameters.

Practical value

1. A new type of a microstructure forming tool has been developed using a magnetostrictive transducer for vibration and temperature generation.
2. Experimental studies of the dynamic properties of thermoplastics allow for dynamic theoretical calculations up to the viscoelastic temperature.
3. Finite element models of the formation of microstructures in thermoplastics have been developed, allowing to evaluate plastic flow, residual stresses in microstructures and operating parameters of microforming.

Research approbation

The scientific results of the dissertation have been published in 2 scientific articles registered in the *ISI Web of Science* database with the citation index; they are Q2 quartile journals. A European patent called *System for the formation of microstructures in polymeric materials* (EP4166245) have been registered and a patent application called *System for formation of microstructures in polymeric materials with 2D piezoelectric drive* (K158-98EP) have been submitted. The results have also been presented in 7 international conferences and 2 international seminars.

Structure of the dissertation

This dissertation consists of an introduction, literature review, the main part, which is split into four chapters, conclusions, summary, references, curriculum vitae, and acknowledgements. The volume of the dissertation contains 102 pages, including 48 figures, 10 tables, and 102 bibliographic references.

6.1. ANALYSIS OF THE MICROSTRUCTURE FORMATION PROCESS USING A FINITE ELEMENT MODEL IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

Since the aim of this dissertation is to develop a magnetostrictive transducer for forming microstructures in functional materials, one of the tasks of the dissertation is to create a controlled parameter finite element model of the microstructure formation process with vibrations.

6.1.1. Determination of Mechanical Properties of Plastics up to the Viscoelastic Temperature

To determine the mechanical properties of plastics, four thermoplastics described in the literature were chosen: polypropylene (PP), polyethylene terephthalate glycol (PETG), polyvinyl chloride (PVC), and styrene acrylonitrile (SAN). The theoretical mechanical properties of PP, PETG, PVC, and SAN plastics, including Young's modulus, Poisson's ratio, and elastic modulus, are presented in Table 6.1.

This study uses the Mooney–Rivlin model, which applies when the glass transition temperature (T_g) is reached or exceeded. Four thermoplastics were subjected to tensile tests at room temperature. Later, to determine the multilinear isotropic hardening, other temperatures were also chosen.

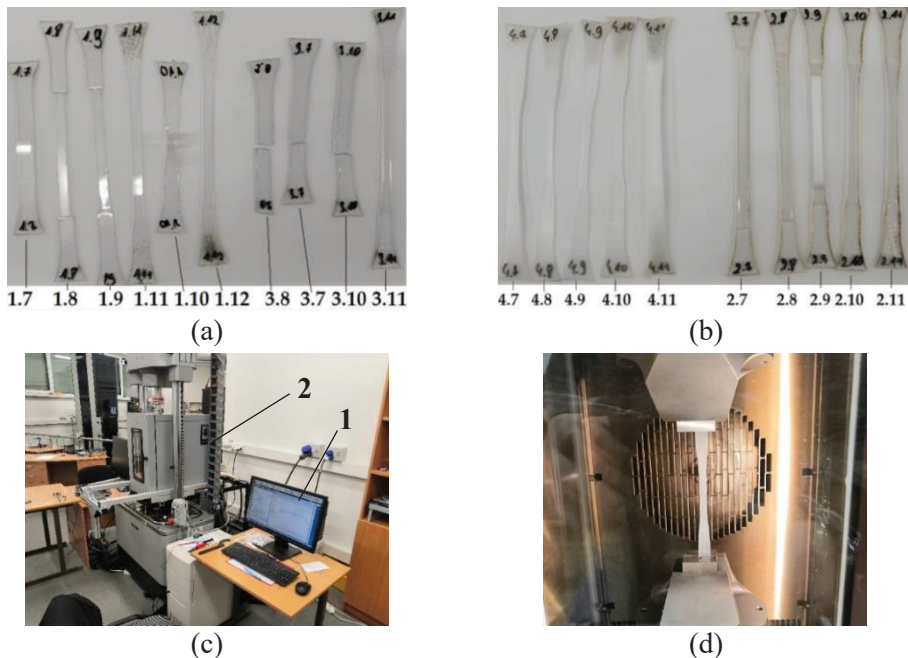


Fig. 6.1. Tensile experiment: (a) PVC (1.7–1.12) and SAN (3.7–3.11) blanks after the experiment; (b) PP (4.7–4.11) and PETG (2.7–2.11) blanks after the experiment; (c) tensile testing machine *Instron E10000*: 1 – control computer, 2 – heating chamber and testing machine; (d) the sample placed in grippers in a heating chamber

The tensile experiment was carried out by using an *Instron E10000* test instrument. The test machine is made up of standard tensile components as well as an additional thermal chamber that was utilized to generate the temperature medium. Laser cut sheet plastic PP, PETG, PVC and SAN was used to create ISO 527–2 dog bone specimens. Each thermoplastic was made in five blanks that were stretched at different temperatures. The photos of the specimens and the experiment are presented in Fig. 6.1.

Table 6.1. Properties of PP, PETG, PVC, SAN plastics [77–79]

	PP	PETG	PVC	SAN
Young's Modulus, MPa	1325	2950	3275	3650
Poisson's Ratio	0.43	0.40	0.40	0.35
Bulk Modulus, MPa	3889	4868	5458	4056
Shear Modulus, MPa	1296	1054	1170	1352
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion, 1/°C	$6.8 \cdot 10^{-5}$	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$3.0 \cdot 10^{-5}$	$6.8 \cdot 10^{-5}$
Tensile Ultimate Strength, MPa	32.9	67.4	52.0	85.0
Tensile Yield Strength, MPa	26.1	58.7	54.8	83.4

Table 6.2. Young's modulus of thermoplastics at different temperatures

PP	Temperature, °C	80	90	100	110	120
	Young's modulus, MPa		420	320	240	152
PETG	Temperature, °C	120	130	142	150	160
	Young's modulus, MPa	3125	3000	2667	333	250
PVC	Temperature, °C	48	60	68	80	90
	Young's modulus, MPa	3750	2917	2333	188	–
SAN	Temperature, °C	65	75	85	95	105
	Young's modulus, MPa	3000	2846	2571	2111	923

By using the obtained stress-strain curves, Young's modulus was calculated for each thermoplastic. The obtained results showed that Young's modulus decreases with an increasing ambient temperature. The results are presented in Table 6.2.

6.1.2. Finite Element Modeling of Hot Stamping

To theoretically evaluate the behavior of PP, PETG, PVC, and SAN plastics during the hot stamping process, a finite element model has been developed. The model analyzes the hot stamping technology at the microlevel by using the parameters determined during the experiment. The model consisted of two parts: a plastic model and a matrix. The simulation was described as a two-dimensional space.

A nickel matrix was selected for the hot stamping process, which was produced by using lithography and etching processes. Nickel material was chosen for the matrix because of its durability and the ability to acquire a precise structure while using an easily controlled electroplating process. The matrix consisted of two-dimensional grooves with a width of 2 μm , a periodicity of 4 μm , and a depth of 1 μm . For finite element modelling, a simplified unit model of up to half of one groove and a plastic

model of the correct size were created to allow the plastic to flow freely into the mold. The nickel matrix and the finite element model are presented in Fig. 6.2.

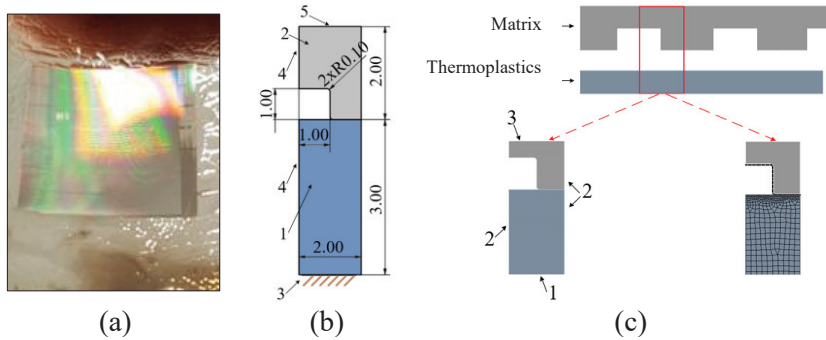


Fig. 6.2. Microstructure: (a) experimental nickel matrix; (b) single element model of the main matrix side with boundary conditions: 1 – thermoplastic model, 2 – matrix element, 3 – fixed support, 4 – line of symmetry, 5 – external force; (c) cross-sectional model of the matrix decomposed into finite elements and constraints of the analyzed model: 1 – fixed support, 2 – frictionless support, 3 – load

After the simulation, the maximum results of stress, deformation, and the reaction force were obtained. The results are presented in Table 6.3. The reaction force was calculated for an area of $2000 \mu\text{m}^2$. With matrices of different dimensions, and in order to ensure the forming force required for the microstructure formation process, the forming force must be increased accordingly.

Table 6.3. Results of hot stamping simulations

PP	Temperature, °C	80	90	100	110	120
	Stress, MPa	5.041	3.793	2.668	1.537	0.865
	Strain, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0.012	0.011	0.011	0.010	0.008
	Reaction force, μN	16655	12458	8736	5025	2805
PETG	Temperature, °C	120	130	142	150	160
	Stress, MPa	26.923	22.966	10.703	2.927	1.059
	Strain, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0.009	0.008	0.004	0.009	0.004
	Reaction force, μN	87723	74711	35215	9585	3455
PVC	Temperature, °C	48	60	68	80	90
	Stress, MPa	42.387	30.351	12.750	5.793	–
	Strain, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0.011	0.010	0.005	0.031	–
	Reaction force, μN	138500	99140	41886	18974	–
SAN	Temperature, °C	65	75	85	95	105
	Stress, MPa	37.457	38.379	36.660	26.987	8.050
	Strain, $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	0.006	0.007	0.007	0.006	0.004
	Reaction force, μN	125080	126100	119700	88337	26436

The simulation results provide an opportunity to properly select the forming parameters to optimize the forming process. The obtained results showed that the reaction force decreases with an increasing forming temperature. Knowledge of the properties of the materials helps determine what reaction force is required to perform hot stamping. The optimized model makes it possible to easily determine the forming

parameters by changing the geometry or the material, thus expanding the possibilities of microstructure-forming technologies, and contributing to the creation of higher-quality microstructures.

6.1.3. Determination of Mechanical Properties of Plastics with Viscoelastic Properties

In this chapter, a study of the viscoelastic properties of polymers under different temperatures and dynamic loads is presented. Various methods can be used to describe the viscoelastic properties. In this study, viscoelastic properties were determined from experimentally determined data of elastic (storage) modulus (G'), viscous (loss) modulus (G''), and damping factor ($\tan\delta$).

During the experiment, a constant tension force of 70 N and a maximum dynamic amplitude of 80 N were determined for the PVC plastic specimen. For the PP plastic, a constant tension force of 35 N and a maximum dynamic amplitude of 25 N were determined. For PETG and SAN plastics, the constant tension force of 150 N and a maximum dynamic amplitude of 100 N were determined. Experiments were carried out at frequencies of 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30, and 40 Hz. PVC plastic was analyzed from 30 °C to 66 °C, PP plastic from 40 °C to 100 °C, PETG plastic from 50 °C to 140 °C, and SAN plastic from 20 °C to 95 °C. When the maximum limit of the glass transition temperature was exceeded, the specimens broke or stretched to the maximum limits of the testing machine.

The *Instron E10000* test machine has a factory limitation to generate the excitation frequency, so the experiment was carried out in the low frequency range (up to 40 Hz). During the hot stamping forming process, it was planned to use high-frequency excitation, so it was necessary to extend the material behavior values obtained in the experiment to the intended frequency. The principle of the temperature-frequency superposition (TTS) was used for this purpose. This analysis made it possible to determine the rheological dependence of the polymer on the behavior of the material and expand the limits of unknown temperature frequencies [80].

After obtaining the coefficients, the values were inserted into the equation, and the basic elasticity-viscosity curve was defined over a wide range of vibrations. The resulting curves are presented in Figs. 6.3–6.6.

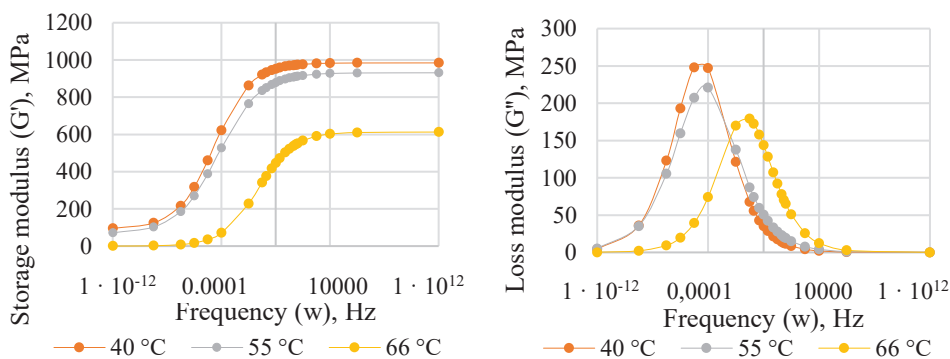


Fig. 6.3. Theoretical curves of PVC plastic

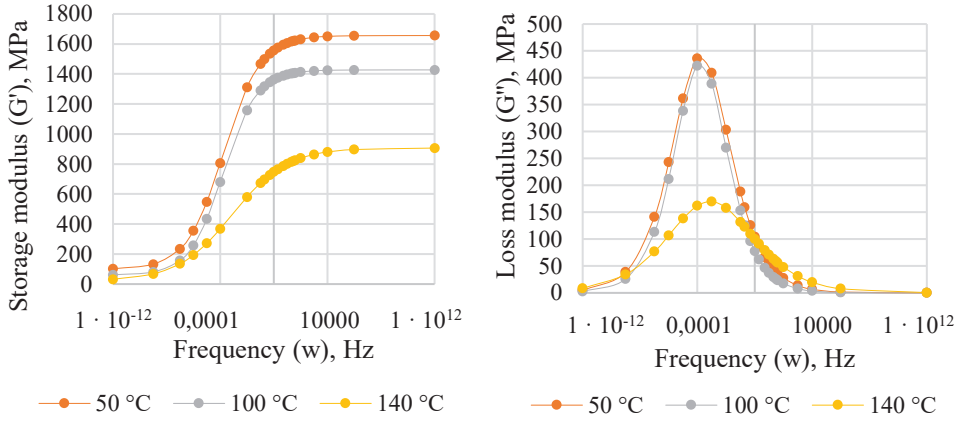


Fig. 6.4. Theoretical curves of PETG plastic

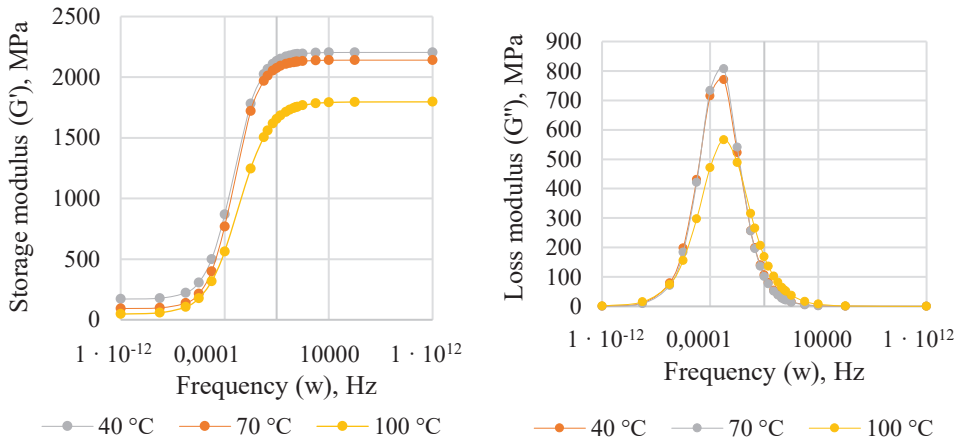


Fig. 6.5. Theoretical curves of PP plastic

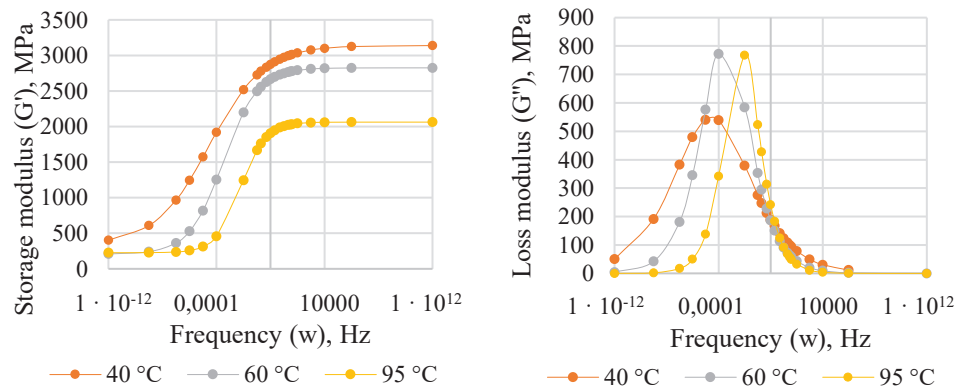


Fig. 6.6. Theoretical curves of SAN plastic

The investigation of the viscoelastic properties of polymers at different temperatures and dynamic loads carried out in this study provided important information about the behavior of these materials and allowed us to understand their performance under specific conditions. The experimental DMA method was used, which allowed to determine the modulus of elasticity and viscosity and other properties which are necessary in further simulations.

6.1.4. Finite Element Modeling of Hot Stamping Using Vibrations

Based on the obtained results, a finite element model was developed by using the *Ansys* software. The model was decomposed into 1704 finite elements. In this analysis, the matrix moved 4 μm into the plastic, then was supported for 1 second, and retracted in 1 second. The simulation results are presented in Fig. 6.7.

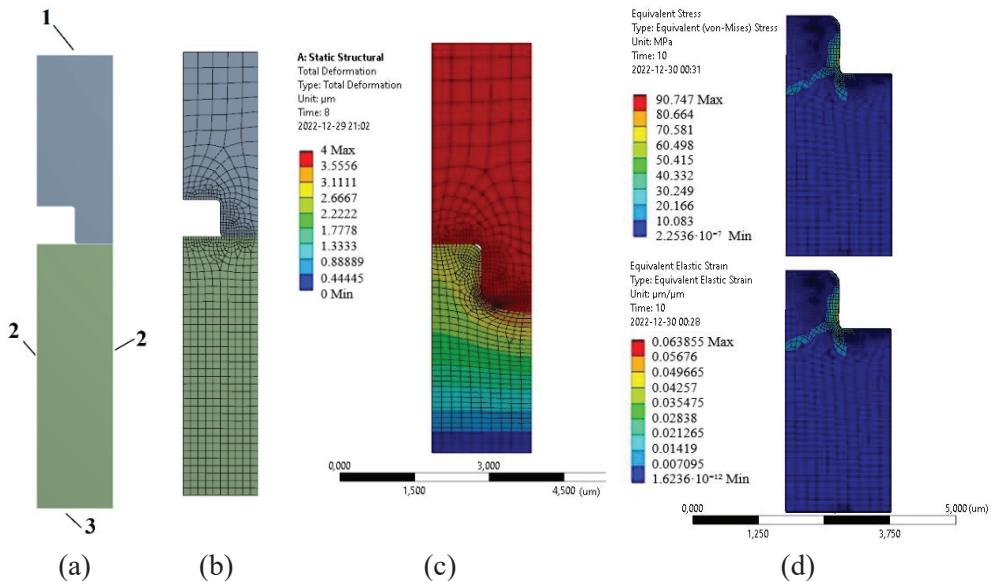


Fig. 6.7. Finite element analysis: (a) model with boundary conditions: 1 – displacement, 2 – frictionless support, 3 – fixed support; (b) meshed model; (c) deformation image; (d) equivalent stress and elastic strain images

After the simulation, the stress diagrams of different plastics were formed, showing the average stresses of the plastic model. Relative stresses began to decrease with an increasing temperature. It was detected that, in the eighth second, the stresses started to decrease although the deformation did not change. The graphs also showed that the material behaves much more plastically at higher temperatures because the stress graph was more uniform. The results are presented in Fig. 6.8.

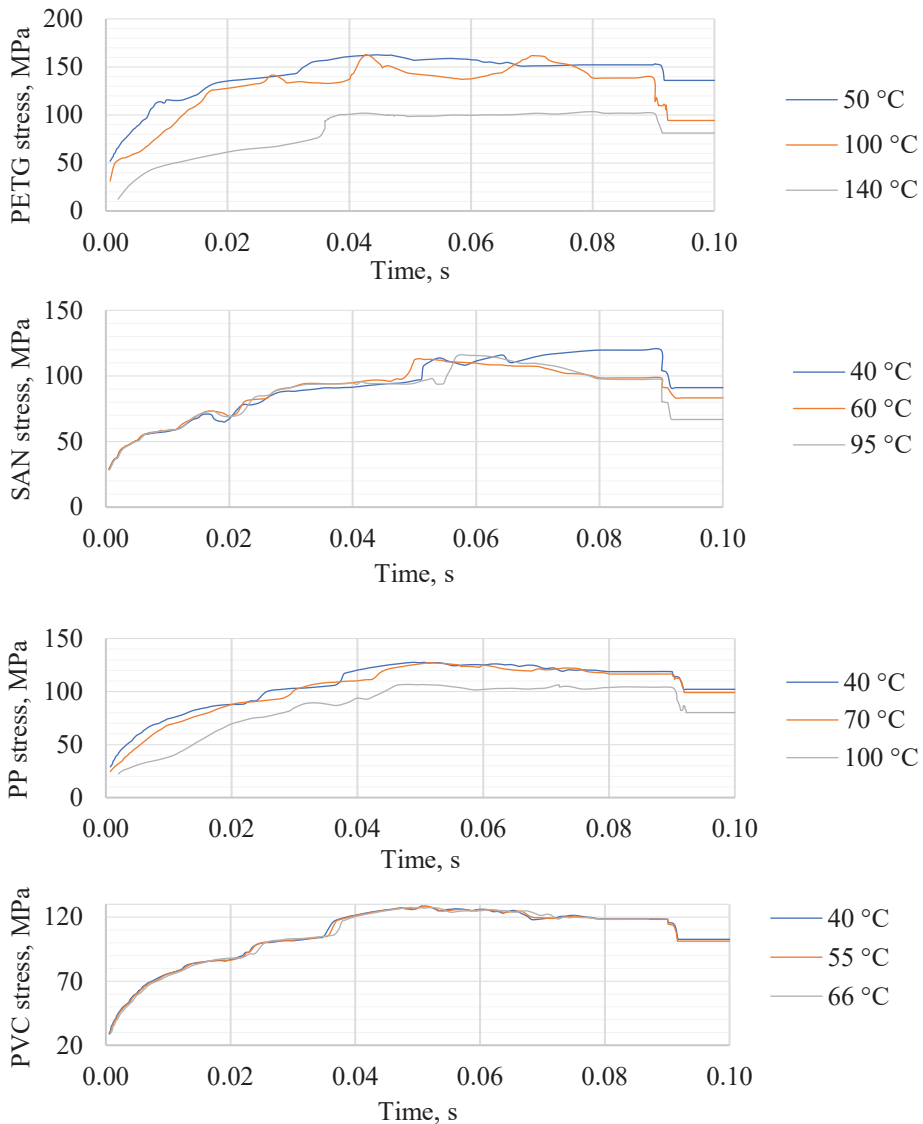


Fig. 6.8. Results of thermoplastics modeling

In summary, it can be concluded that the ultrasonic hot stamping process is a promising technology in the plastic molding process. This process allows efficient conversion of ultrasonic vibrational energy into thermal energy, thereby improving the flow of plastic into the mold. Finite element models and experimental studies have helped to understand the behavior of this process and to identify important parameters to describe this behavior. Such models may be valuable for future projects to optimize the ultrasonic hot stamping process and increase the efficiency of plastic molding. However, attention must be paid to the many factors that affect the process, including the material, the conditions of the ultrasonic vibrations, and the geometry, which can affect the results.

6.2. DEVELOPMENT OF A MAGNETOSTRICTIVE TRANSDUCER FOR THE FORMATION OF MICROSTRUCTURES

Microstructure forming tools feature different design and functionality solutions. Various design and functionality solutions allow new possibilities in the formation of microstructures. This chapter describes the development of a new tool for microstructuring. The new type of a tool combines the hot stamping technology and the magnetostrictive process.

The microstructure forming tool consisted of two main components: the core, and the forming tool. The core of the device was made of the magnetostrictive material *permendur 49* (Co49Fe49V2) type alloy. The core consisted of thin sheets of sheet metal connected with rivets. The sheet metal was chosen to improve the magnetostrictive process [88]. The core was also wrapped with two different wires that were designed for AC and DC electrical current. The direct current creates magnetization, whereas the alternating current creates an induction field. There was a transition between the core and the forming tool, which was made of a ferromagnetic material. The transition made it easier for eddy currents to form and start to heat up more intensely than the core. The forming tool was made of aluminum, but structurally it was made so that the forming tool could be changed according to the structure that was being formed. In the case of a magnetostrictive process, the forming tool must not be made of a material denoted by acoustic damping to transmit vibrations. A new type of a forming tool is presented in Fig. 6.9.

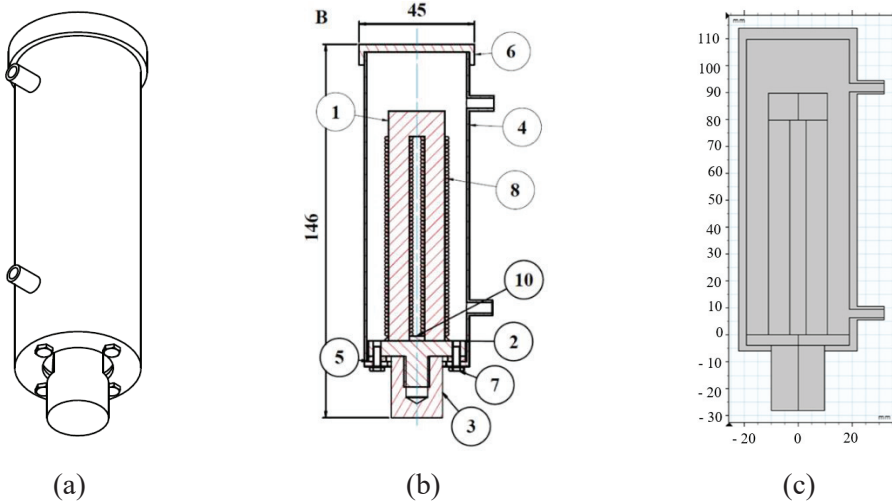


Fig. 6.9. Magnetostriuctive hot stamping tool: (a) isometric view of the structure; (b) cross-sectional view of the structure: 1 – core, 2 – transition, 3 – forming tool, 4 – cooling chamber, 5 – intermediate, 6 – cooling chamber cover, 7 – nut, 8 – wire coils, 10 – insert; (c) mathematical simplified device 2D model

In summary of the results, it can be concluded that the new microstructure forming tool can achieve deformations up to $4.5 \mu\text{m}$, and the forming temperature of up to $200 \text{ }^\circ\text{C}$ can be reached. The frequency of the strain can be controlled by changing

the frequency of the generated current, and the amplitude of the strains can be controlled by changing the magnetization or intensity of the alternating current.

Different parts of the microstructuring tool were made by using a variety of technologies. The core of the tool was made of a steel sheet of *permendur type 49* alloy. The shape was cut out by using a computerized laser machine, and then riveted. The resulting magnet wire was welded to the welded transition, which was made of a ferromagnetic material. The core was wrapped with two different wires that were resistant to temperatures up to 180 °C, and the cross section of the wire was 0.75 mm². One wire served for the inductive process, whereas the other wire was used for magnetization. The forming tool was made of aluminum. Due to the nodal point and the design, choice was made to use the transition as the pressure point of the external force. For this reason, the core of the magnetostrictor was built into the tube, which was attached to the transition. A hole was drilled in the side of the tube to pass the magnetization and induction process wires through the side. The image of a new type of magnetostrictor was presented in Fig. 6.10.



Fig. 6.10. Magnetostrictor device

Additional equipment was used to control the magnetostrictor and ensure the required parameters. A constant current source of 10A was used to create magnetization. A signal generator, an amplifier, and a resistor were used to create an inductive process. A *UNI-T UTG2025A* apparatus was used as the signal generator. This generator created a sinusoidal signal of up to 2.5 V, which it transmitted to the amplifier. A *Wilcoxon PA8HF* amplifier was used to amplify the signal. This amplifier could generate a maximum power of 600 W, but, in order to achieve this power, a resistance of 4 Ω must be inserted into the circuit. The resistance of the magnetostrictor winding for the inductive process could be as low as zero; therefore, a high-power resistance of 4 Ω was additionally introduced. To ensure adequate cooling of the resistors, liquid-cooled radiators and fans were used.

After the entire test equipment stand had been installed, the developed device was started to be tested. First, the analysis started with testing the forming tool by analyzing the temperature variation when the forming parameters were different. The aim was to find out what effect magnetization has on the forming temperature. The results showed that the resulting magnetization reduces the intensity of the temperature variation. During the experiment without magnetization, the temperature

variation was analyzed, but, due to the intense temperature rise, the experiment had to be stopped at the eighth minute so that not to damage the thermal protection of the windings.

The temperature analysis used a thermal camera to record temperature changes throughout the device. For this purpose, the *FLIR T420* thermal camera was used. The images of the experiment are presented in Fig. 6.11. When recording and analyzing the data, it was noticed that the transition produced by the ferromagnetic material had an impact on different temperature distributions. The temperature of the aluminum forming tool was close to the transition because of better thermal exchange characteristics compared to those of the magnetostrictive material. It was also found that the induction coil changes more than the magnetization. This could have been influenced by the higher amount of energy flowing in the induction process compared to that in the magnetization process.

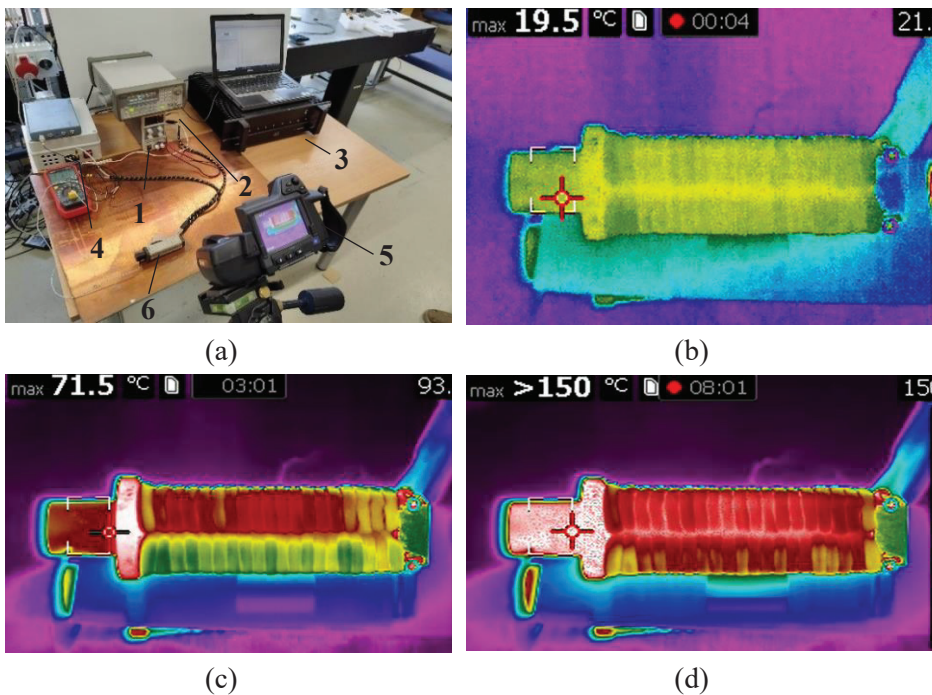


Fig. 6.11. Temperature distribution in the magnetostrictor: (a) temperature experiment equipment: 1 – DC power supply, 2 – signal generator, 3 – amplifier, 4 – resistance, 5 – thermal camera, 6 – magnetostrictor transducer; (b) temperature distribution at the initial time instant; (c) temperature distribution after 3 minutes; (d) temperature distribution at minute 8 of the process

The results of the analysis of the *Polytech* laser duplexer showed that, at the resonant frequency of 10.0625 kHz, the oscillation amplitude of the system was the most intense. During the experiment, the excitation frequency was continuously adjusted to keep the process in the resonant regime as the magnetostrictor temperature and the natural resonant frequency continuously changed. The obtained results

showed that the amplitude of the oscillations increases with the intensification of magnetization.

6.3. EXPERIMENTAL TESTING OF THE FUNCTIONAL PROTOTYPE

After the microstructuring tool had been developed, the experimental testing of the prototype was initiated. Magnetostrictor testing consisted of several stages. The first stage was a pilot study to determine the parameters of microstructure formation by using the traditional forming technologies. The second stage was an experimental test of the formation of structures so that to determine the influence of the new magnetostrictive transducer on the obtained quality of the output.

6.3.1. Pilot Test of Hot Stamping

For each thermoplastic, 12 diffraction efficiency measurements were performed under different measurement conditions (load, indentation time, and temperature). The best relative diffraction efficiency RDE=34.62% was determined for the PETG microstructure when it was produced under a load of 2000 N, a molding time of 10 seconds, and a temperature of 125 °C. The RDE of the structures formed in SAN plastic was 29.04% when the indentation parameters were 5000N load, 10 seconds forming time, and 130 °C temperature. Microstructures formed in PVC plastic had RDE=22.44% when applying a force of 5000 N for 10 seconds at a temperature of 80 °C. The diffraction efficiency data for SAN, PETG, and PVC samples are presented in Tables 6.4–6.6.

Table 6.4. Results of diffraction efficiency measurement of SAN

Load, N	Time, s	Temperature, °C	RDE, %
5000	10	100	17.07
5000	10	120	16.49
5000	15	120	14.94
5000	10	140	12.52
4000	10	140	13.28
4000	5	140	7.85
3000	10	140	18.12
3000	5	140	16.85
3000	10	130	18.23
5000	2	130	17.76
5000	10	130	19.04
4000	10	130	15.25

Table 6.5. Results of diffraction efficiency measurement of PETG

Load, N	Time, s	Temperature, °C	RDE, %
4000	10	100	14.31
5000	5	100	21.43
5000	10	100	20.50
4000	5	100	13.49
2000	10	125	22.62
2000	10	100	18.81
2000	5	100	22.31
3000	10	100	10.67
2000	10	90	14.85
2000	5	90	19.86
2000	10	80	13.54

Table 6.6. Results of diffraction efficiency measurement of PVC

Load, N	Time, s	Temperature, °C	RDE, %
5000	10	100	5.39
5000	5	100	12.63
4000	10	100	7.28
4000	5	100	11.59
3000	10	100	5.43
3000	5	100	11.66
4000	10	125	10.44
4000	5	125	7.38
5000	5	90	6.03
5000	10	80	22.44
2000	10	125	6.74
2000	5	125	6.65

The diffraction efficiency of all molded plastics was higher when the molding temperature exceeded the glass transition temperature of the plastic. When the temperature was close to the glass transition temperature, the plastic was able to flow slowly into the mold and not be deformed further in places where deformation was not required. The results show that the time of formation also affected the results.

6.3.2. Study of Hot Stamping with a Magnetostrictive Transducer

The hot embossing process consisted of three main steps: heating, embossing, and cooling. Usually, plastic is heated to the glass transition temperature, an embossing process is carried out, and, after a certain time, the load is removed, and the formed structure is left to cool down. With the new molding gear, the plastic heating step was combined with the embossing step. During molding, the mold was heated to a set temperature, and vibration was additionally used.

During the diffraction study, samples of three different thermoplastics were measured, in which diffraction gratings were formed. The diffraction efficiency was calculated by using the average values of three identical gratings. In PVC plastic, the

best relative diffraction efficiency (RDE) was found at a temperature of 100 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 10 A, and a load of 3 kN. The worst RDE was obtained at a temperature of 90 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2.5 V, a magnetization current of 10 A, and a load of 1 kN. In PETG plastic, the best RDE was obtained at a temperature of 170 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 10 A, and a load of 1 kN. The worst RDE was obtained at a temperature of 120 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 5 A, and a load of 1 kN. In SAN plastic, the best RDE was obtained at a temperature of 110 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 0 A, and a load of 1 kN. The worst RDE was obtained when a temperature of 130 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 10 A, and a load of 3 kN were selected.

CONCLUSIONS

1. After evaluating microstructure forming technologies and functional materials used in industry, PP, PETG, PVC and SAN thermoplastics were selected for the present research. PP, PETG, and PVC are biocompatible, while SAN thermoplastics are denoted by chemical resistance and high strength. In addition, PP thermoplastic has a high operating temperature, whereas PETG plastic features good optical properties. PVC plastic is used in the production of microchips. Due to the ability of plastics to deform at higher temperatures, the hot stamping method was chosen as the main forming method. The main disadvantage of this technology was identified as residual stresses after forming. To avoid residual stresses, it was decided to create a magnetostrictive transducer which can operate at temperatures of up to 150 °C without losing the mechanical properties.
2. In the DMA material analysis method, viscoelastic materials, such as thermoplastic polymers, can be analyzed by using a finite element model. Analysis of DMA materials revealed that, in all cases, the elastic modulus increased with an increasing molding frequency, whereas the viscosity modulus decreased. The modulus of elasticity and viscosity decreased as the forming temperature increased. This DMA data was extrapolated by using the principle of superposition, and sigmoidal functions were obtained up to 1000 GHz. By using the coefficients of the Prony series, a finite element model was obtained, which could be used to find the forming parameters for the magnetostrictive technology method. Modelling of the microstructure formation showed that residual stresses were reduced at higher forming temperatures and ultrasonic vibration.
3. A magnetostrictive transducer has been developed, which consisted of the main parts: a magnetostrictive core wrapped in two different windings, a ferromagnetic transition, and a forming tool. After performing theoretical calculations of the microstructure forming tool, core deformations were obtained that reach up to 4.5 μm , whereas the formation temperatures reached up to 200 °C. AC and DC generators could be used to control the temperature, the strain rate, and the

amplitude of the forming tool. After conducting experimental studies, it was determined that the resonant frequency of the forming tool was 10.0625 kHz, and the maximum amplitude of magnetostrictor deformations at this frequency was 3.5 μm .

4. Experimental testing of the magnetostrictive transducer was performed to determine the working modes of microstructures for the molding of PVC, PETG, and PP plastics. After measuring the diffraction efficiency, it was established that diffraction grating was best formed in PVC plastic at a temperature of 100 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 10 A, and a load of 3 kN. In PETG plastic, the best RDE was obtained at a temperature of 170 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 10 A, and a load of 1 kN. What concerns SAN plastic, the best RDE was obtained at a temperature of 110 °C, an excitation frequency of 10 kHz, an excitation voltage of 2 V, a magnetization current of 0 A, and a load of 1 kN. Comparing the results with the molding process in which no vibrations were used, it was found that the diffraction efficiency increased by 18.09% for PVC plastic, 2.92% for PETG plastic, and 21.32% for SAN plastic. Because of the increased diffraction efficiency and reduced residual stresses based on theoretical calculations, this magnetostrictive transducer has been proven to be superior compared to other currently available analogous devices.

LITERATŪROS SARAŠAS

1. NAWROT, Witold ir MALECHA, Karol. Additive manufacturing revolution in ceramic microsystems. *Microelectronics International* [interaktyvus]. Emerald Publishing, 2020, 37(2), 79–85. Prieiga per: <https://doi.org/10.1108/MI-11-2019-0073>
2. NICULESCU, Adelina–Gabriela, CHIRCOV, Cristina, BÎRCĂ, Alexandra Cătălina ir GRUMEZESCU, Alexandru Mihai. Fabrication and Applications of Microfluidic Devices: A Review. *International Journal of Molecular Sciences* [interaktyvus]. MDPI, 2021, 22, 2011. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/ijms22042011>
3. CALERO, María, FERNÁNDEZ, Román, GARCÍA, Pablo, GARCÍA, José Vicente, GARCÍA, María, GAMERO–SANDEMETRIO, Esther, REVIKINE, Ilya, ARNAU, Antonio ir JIMÉNEZ, Yolanda. A Multichannel Microfluidic Sensing Cartridge for Bioanalytical Applications of Monolithic Quartz Crystal Microbalance. *Biosensors* [interaktyvus]. MDPI, 2020, 10, 189. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/bios10120189>
4. DASTIDER, Shibajyoti Ghosh, ABDULLAH, Amjed, JASIM, Ibrahim, YUKSEK, Nuh S., DWEIK, Majed ir ALMASRI, Mahmoud. Low concentration E. coli O157:H7 bacteria sensing using microfluidic MEMS biosensor. *Review of Scientific Instruments* [interaktyvus]. AIP Publishing, 2018, 89, 125009. Prieiga per: <https://doi.org/10.1063/1.5043424>
5. CAIRONE, Fabiana, DAVI, Santi, STELLA, Giovanna, GUARINO, Francesca, RECCA, Giuseppe, CICALA, Gianluca ir BUCOLO, Maide. 3D–Printed micro–optofluidic device for chemical fluids and cells detection. *Biomedical Microdevices* [interaktyvus]. Springer, 2020, 22, 37. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10544-020-00487-3>
6. GUO, Haichang, ZHAO, Haoyuan, NIU, Hongyu, REN, Yanjuan, FANG, Haoming, FANG, Xingxing, LV, Ruicong, MAQBOOL, Muhammad ir BAI, Shulin. Highly Thermally Conductive 3D Printed Graphene Filled Polymer Composites for Scalable Thermal Management Applications. *ACS Nano* [interaktyvus]. ACS Publications, 2021, 15, 6917–6928. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c10768>
7. VARGAS, Matheus J. T., NIEUWOUDT, Michel, YONG, Rui Ming, VANHOLSBECK, Frederique, WILLIAMS, David E. ir SIMPSON, M. Cather. Excellent quality microchannels for rapid microdevice prototyping: direct CO₂ laser writing with efficient chemical postprocessing. *Microfluidics and Nanofluidics* [interaktyvus]. Springer, 2019, 23, 124. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10404-019-2291-1>
8. ZHANG, Ru, HUANG, Chuanzhen, WANG, Jun, FENG, Shaochuan ir ZHU, Hongtao. Evolution of micro/nano–structural arrays on crystalline silicon carbide by femtosecond laser ablation. *Materials Science in Semiconductor Processing* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, 121, 105299. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2020.105299>
9. QIAN, Jin–yuan, LI, Xiao–juan, GAO, Zhi–xin ir JIN, Zhi–jiang. Mixing efficiency and pressure drop analysis of liquid–liquid two phases flow in serpentine microchannel. *Journal of Flow Chemistry* [interaktyvus]. Springer, 2019, 9, 187–197. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s41981-019-00040-1>
10. HUANG, Yi–Fang, TSOU, Chen–Han, HSU, Chia–Jui, LIN, Yu–Ching, ONO, Takahito ir TSAI, Yao–Chuan. Metallic glass thin film integrated with flexible membrane for electromagnetic micropump application. *Japanese Journal of Applied Physics*

- [interaktyvus]. IOP Science, 2020, 59, SIIK03. Prieiga per: <https://doi.org/10.35848/1347-4065/ab82a7>
11. LI, Hengyu, LIU, Junkao, LI, Kai ir LIU, Yingxiang. A review of recent studies on piezoelectric pumps and their applications. *Mechanical Systems and Signal Processing* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, 151, 107393. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107393>
 12. MOHITH, S., KARANTH, P. Navin ir KULKARNI, S.M. Recent trends in mechanical micropumps and their applications: A review. *Mechatronics* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 60, 34–55. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2019.04.009>
 13. YUNAS, Jumril, MULYANTI, Budi, HAMIDAH, Ida, MOHD SAID, Muzalifah, PAWINANTO, Roer Eka, WAN ALI, Wan Amar Fikri, SUBANDI, Ayub, HAMZAH, Azrul Azlan, LATIF, Rhonira ir YEOP MAJLIS, Burhanuddin. Polymer–Based MEMS Electromagnetic Actuator for Biomedical Application: A Review. *Polymers* [interaktyvus]. MDPI, 2020, 12, 1184. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/polym12051184>
 14. PHAN, Hoang Van, COŞKUN, M. Bulut, ŞEŞEN, Muhsincan, PANDRAUD, Gregory, NEILDA, Adrian ir ALAN, Tuncay. Vibrating membrane with discontinuities for rapid and efficient microfluidic mixing. *Lab on a Chip* [interaktyvus]. Royal Society of Chemistry, 2015, 15, 4206–4216. Prieiga per: <https://doi.org/10.1039/c5lc00836k>
 15. PICCOLO, Leonardo, PULEO, Kyle, SORGATO, Marco, LUCCHETTA, Giovanni ir MASATO, Davide. Modeling the replication of submicron–structured surfaces by micro injection molding. *Materials & Design* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, 198, 109272. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109272>
 16. HUANG, Zhiyuan, SHAO, Guangbin, ZHOU, Dekai, DENG, Xinghong, QIAO, Jing ir LI, Longqiu. 3D printing of high–precision and ferromagnetic functional devices. *International Journal of Extreme Manufacturing* [interaktyvus]. IOP Science, 2023, 5, 035501. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/2631-7990/acceb>
 17. IZADGOSHASB, Iman, LIM, Yee, VASQUEZ PADILLA, Ricardo, SEDIGHI, Mohammadreza ir NOVAK, Jeremy. Performance Enhancement of a Multiresonant Piezoelectric Energy Harvester for Low Frequency Vibrations. *Energies* [interaktyvus]. MDPI, 2019, 12, 2770. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/en12142770>
 18. ZHOU, Guangcan, LIM, Zi Heng, QI, Yi, CHAU, Fook Siong ir ZHOU, Guangya. MEMS gratings and their applications. *International Journal of Optomechanics* [interaktyvus]. Taylor & Francis, 2021, 15, 61–86. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/15599612.2021.1892248>
 19. KHALID, Muhammad Asad Ullah, ALI, Muhsin, SOOMRO, Afaque Manzoor, KIM, Soo Wan, KIM, Hyun Bum, LEE, Byung–Gul ir CHOI, Kyung Hyun. A highly sensitive biodegradable pressure sensor based on nanofibrous dielectric. *Sensors and Actuators A: Physical* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 294, 140–147. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.05.021>
 20. AGRAWAL, Amit, KUSHWAHA, Hari Mohan ir JADHAV, Ravi Sudam. Microscale Flow and Heat Transfer: Mathematical Modelling and Flow Physics. Springer Cham, 2020. ISBN 978–3–030–10661–4. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10662-1>
 21. IKUMAPAYI, O. M., AKINLABI, E. T., ADEOYE, A. O. M. ir FATOBA, S. O. Microfabrication and nanotechnology in manufacturing system – An overview. *Materials*

- Today: Proceedings* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, 44, 1154–1162. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.233>
22. SHIMIZU, Hiroki ir UETSUJI, Yasutomo. Fluid–structure and electric coupled analysis of a valveless microfluidic system using metal–capped piezoelectric actuator. *Sensors and Actuators A: Physical* [interaktyvus]. Elsevier, 2022, 333, 113232. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2021.113232>
 23. ZHOU, Ke, LI, Yutong, ZHANG, Lei, JIN, Liang, YUAN, Feng, TAN, Jinyun, YUAN, Guangyin ir PEI, Jia. Nano–micrometer surface roughness gradients reveal topographical influences on differentiating responses of vascular cells on biodegradable magnesium. *Bioactive Materials* [interaktyvus]. 2021, 6, 262–272. Prieiga per: <https://dx.doi.org/10.1016%2Fj.bioactmat.2020.08.004>
 24. SUNDARAM, Subramanian ir CHEN, Christopher S. Next–generation engineered microsystems for cell biology: a systems–level roadmap. *Trends in Cell Biology* [interaktyvus]. CelPress, 2022, 32, 490–500. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.tcb.2022.01.003>
 25. CECIL, J., ALBUHAMOOD, Sadiq, RAMANATHAN, Parmesh ir GUPTA, Avinash. An Internet–of–Things (IoT) based cyber manufacturing framework for the assembly of microdevices. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* [interaktyvus]. Taylor & Francis, 2019, 32, 430–440. Prieiga per: <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1599435>
 26. ADAM, Georges, CHOWDHURY, Sagar, GUIX, Maria, JOHNSON, Benjamin V., BI, Chenghao ir CAPPELLERI, David. Towards Functional Mobile Microrobotic Systems. *Robotics* [interaktyvus]. MDPI, 2019, 8, 69. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/robotics8030069>
 27. MEHRABI, Hossein, HAMED, Mohsen ir AMINZAHED, Iman. A novel design and fabrication of a micro–gripper for manipulation of micro–scale parts actuated by a bending piezoelectric. *Microsystem Technologies* [interaktyvus]. Springer, 2020, 26, 1563–1571. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00542-019-04696-6>
 28. LIU, Yu, YIN, Qiu, LUO, Yucheng, HUANG, Ziyu, CHENG, Quansheng, ZHANG, Wenming, ZHOU, Bingpu, ZHOU, Yinning ir MA, Zhichao. Manipulation with sound and vibration: A review on the micromanipulation system based on sub–MHz acoustic waves. *Ultrasonics Sonochemistry* [interaktyvus]. Elsevier, 2023, 96, 106441. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106441>
 29. CHENG, Xu ir ZHANG, Yihui. Micro/Nanoscale 3D Assembly by Rolling, Folding, Curving, and Buckling Approaches. *Advanced Materials* [interaktyvus]. Wiley Online Library, 2019, 31, 1901895. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/adma.201901895>
 30. JUANG, Yi–Je ir CHIU, Yu–Jui. Fabrication of Polymer Microfluidics: An Overview. *Polymers* [interaktyvus]. MDPI, 2022, 14, 2028. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/polym14102028>
 31. TANG, Tao, YUAN, Yapeng, YALIKUN, Yaxiaer, HOSOKAWA, Yoichiroh, LI, Ming ir TANAKA, Yo. Glass based micro total analysis systems: Materials, fabrication methods, and applications. *Sensors and Actuators B: Chemical* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, 339, 129859. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2021.129859>
 32. DONG, Zihao, HE, Qipei, SHEN, Dawei, GONG, Zheng, ZHANG, Deyuan, ZHANG, Wenqiang, ONO, Takahito ir JIANG, Yonggang. Microfabrication of functional polyimide films and microstructures for flexible MEMS applications. *Microsystems &*

- Nanoengineering* [interaktyvus]. Springer, 2023, 9, 31. Prieiga per: <https://doi.org/10.1038/s41378-023-00503-5>
33. LIN, Qinghuang. Polymeric electronic materials for microelectronics manufacturing: A review. *Polymers* [interaktyvus]. Elsevier, 2023, 286, 126395. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2023.126395>
 34. DU, Liqun, ZHAI, Ke, LI, Xiaojun, LIU, Shuangjie ir TAO, Yousheng. Ultrasonic vibration used for improving interfacial adhesion strength between metal substrate and high-aspect-ratio thick SU-8 photoresist mould. *Ultrasonics* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 103, 106100. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2020.106100>
 35. LIU, Xin, LI, Min, BIAN, Jiang, DU, Junfeng, LI, Bincheng ir FAN, Bin. A Novel Fabricating Method of Micro Lens-on-Lens Arrays with Two Focal Lengths. *Micromachines* [interaktyvus]. MDPI, 2021, 12, 1372. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/mi12111372>
 36. JIMÉNEZ-DÍAZ, Edgar, CANO-JORGE, Mariel, ZAMARRÓN-HERNÁNDEZ, Diego, CABRIALES, Lucia, PÁEZ-LARIOS, Francisco, CRUZ-RAMÍREZ, Aarón, VÁZQUEZ-VICTORIO, Genaro, FIORDELISIO, Tatiana ir HAUTEFEUILLE, Mathieu. Micro-Macro: Selective Integration of Microfeatures Inside Low-Cost Macromolds for PDMS Microfluidics Fabrication. *Micromachines* [online]. MDPI, 2019, 10, 576. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/mi10090576>
 37. SHEN, Hao, NAKAGAWA, Yuki ir YOSHINO, Masahiko. Subtractive transfer printing process for rapid fabrication of Au nano/micro structures on a polymer substrate. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [interaktyvus]. IOP Science, 2020, 30, 115006. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/aba5dc>
 38. MELENTIEV, Ruslan ir FANG, Fengzhou. Fabrication of micro-channels on Co-Cr-Mo joints by micro-abrasive jet direct writing. *Journal of Manufacturing Processes* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 56, 667-677. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.05.022>
 39. SARMA, Upasana ir JOSHI, Shrikrishna N. Machining of micro-channels on polycarbonate by using Laser-Induced Plasma Assisted Ablation (LIPAA). *Optics & Laser Technology* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 128, 106257. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106257>
 40. KARNAUSHENKO, Daniil, KANG, Tong, BANDARI, Vineeth K., ZHU, Feng ir SCHMIDT, Oliver G. 3D Self-Assembled Microelectronic Devices: Concepts, Materials, Applications. *Advanced Materials* [interaktyvus]. Wiley Online Library, 2019, 32, 1902994. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/adma.201902994>
 41. ZANDER, Daniela ir PÜTZ, René Daniel. Investigation of the microstructure related high temperature oxidation behaviour of Fe-25Al-5Cr-0.5Zr and Fe-25Al-5Cr-0.5Zr+TiC at 700 °C in air. *Intermetallics* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 126, 106924. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2020.106924>
 42. MELENTIEV, Ruslan ir LUBINEAU, Gilles. Large-scale hot embossing of 1 µm high-aspect-ratio textures on ABS polymer. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [interaktyvus]. Elsevier, 2022, 38, 340-349. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.05.011>
 43. SCOTT, Simon ir ALI, Zulfiquir. Fabrication Methods for Microfluidic Devices: An Overview. *Micromachines* [interaktyvus]. MDPI, 2021, 12, 319. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/mi12030319>

44. DESHMUKH, Swarup S. ir GOSWAMI, Arjyajyoti. Hot Embossing of polymers – A review. *Materials today: Proceedings* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 26, 405–414. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.067>
45. XIA, Dao-Peng ir LAI, Lei-Jie. Fabrication of a Microstructure Array Using Electrochemical Wet Stamping Technique with a Polyacrylamide Gel. *International Journal of Electrochemical Science* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 14, 3434–3442. Prieiga per: <https://doi.org/10.20964/2019.04.20>
46. LIU, Huagang, LI, Yang, LIN, Wenxiong ir HONG, Minghui. High–aspect–ratio crack–free microstructures fabrication on sapphire by femtosecond laser ablation. *Optics & Laser Technology* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 132, 106472. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106472>
47. CAMARENA–CHÁVEZ, Victor A, CASTRO–BELTRÁN, R, MEDINA–CÁZARES, Orlando M, ÁLVAREZ–MARTÍNEZ, Jonathan U, RAMOS–ORTÍZ, G ir GUTIÉRREZ–JUÁREZ, G. Implementation and assessment of a low–cost 3D laser platform controlled by open software for printing polymeric micro–structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering* [interaktyvus]. IOP Science, 2020, 30, 035010. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ab6c75>
48. WU, Chenchen, XU, Fan, WANG, Huixiong, LIU, Hong, YAN, Feng ir MA, Chao. Manufacturing Technologies of Polymer Composites—A Review. *Polymers* [interaktyvus]. MDPI, 2023, 15, 712. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/polym15030712>
49. ZHANG, Weiguang, LI, Jijun, XING, Yongming, NIE, Xiaomeng, LANG, Fengchao, YANG, Shiting, HOU, Xiaohu ir ZHAO, Chunwang. Experimental Study on the Thickness–Dependent Hardness of SiO₂ Thin Films Using Nanoindentation. *Coatings* [interaktyvus]. MDPI, 2020, 11, 23. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/coatings11010023>
50. XU, Jian, SIMA, Felix ir SUGIOKA, Koji. Femtosecond Laser Direct Writing for 3D Microfluidic Biochip Fabrication. *Laser Micro–Nano–Manufacturing and 3D Microprinting* [interaktyvus]. Springer, 2020, 309, 247–272. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59313-1_8
51. AURICH, Jan C., KIRSCH, Benjamin, SETTI, Dinesh, AXINTE, Dragos, BEAUCAMP, Anthony, BUTLER–SMITH, Paul ir YAMAGUCHI, Hitomi. Abrasive processes for micro parts and structures. *CIRP Annals* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 68, 653–676. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.006>
52. SARMA, Upasana ir JOSHI, Shrikrishna N. Numerical modelling and simulation of microchannel fabrication on polycarbonate using Laser–Induced Plasma Assisted Ablation (LIPAA). *Optik* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 223, 165379. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.165379>
53. GONG, Jiahao, LIU, Bingxin, ZHANG, Pan, ZHANG, Huimin ir GUI, Lin. Copper–Electroplating–Modified Liquid Metal Microfluidic Electrodes. *Sensors* [interaktyvus]. MDPI, 2022, 22, 1820. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/s22051820>
54. YEOM, Hwasung, MAIER, Benjamin, JOHNSON, Greg, DABNEY, Tyler, LENLING, Mia ir SRIDHARAN, Kumar. High temperature oxidation and microstructural evolution of cold spray chromium coatings on Zircaloy–4 in steam environments. *Journal of Nuclear Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2019, 526, 151737. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2019.151737>

55. ZHANG, Bing, HE, Jiankang, LI, Xiao, XU, Fangyuan ir LI, Dichen. Micro/nanoscale electrohydrodynamic printing: from 2D to 3D. *Nanoscale* [interaktyvus]. Royal Society of Chemistry, 2016, 8, 15376–15388. Prieiga per: <https://doi.org/10.1039/C6NR04106J>
56. WU, Kaimin, HE, Xuliang, WANG, Jinglei, PAN, Ting, HE, Ran, KONG, Feizhi, CAO, Zhenmin, JU, Feiye, HUANG, Zhao ir NIE, Libo. Recent progress of microfluidic chips in immunoassay. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* [interaktyvus]. Frontiers, 2022, 10. Prieiga per: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1112327>
57. JUNG, Jung Gyu, LEE, Kisang, LEE, Boyoung ir LEE, Ho Seong. Effect of rapid thermal annealing on bulk micro-defects and plastic deformation in silicon during high temperature processing. *Materials Science in Semiconductor Processing* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, 85, 83–89. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2018.06.003>
58. ZHAO, Baishun, QIANG, Yuanbao, WU, Wangqing ir JIANG, Bingyan. Tuning Power Ultrasound for Enhanced Performance of Thermoplastic Micro-Injection Molding: Principles, Methods, and Performances. *Polymers* [interaktyvus]. MDPI, 2021, 13, 2877. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/polym13172877>
59. LIANG, Fupeng, QIAO, Yi, DUAN, Mengqin, JU, An, LU, Na, LI, Junji, TU, Jing ir LU, Zuhong. Fabrication of a microfluidic chip based on the pure polypropylene material. *RSC Advances* [interaktyvus]. Royal Society of Chemistry, 2018, 8, 8732–8738. <https://doi.org/10.1039/C7RA13334K>
60. SUN, Han, CHAN, Chiu-Wing, WANG, Yisu, YAO, Xiao, MU, Xuan, LU, Xuedong, ZHOU, Jianhua, CAI, Zongwei ir REN, Kangning. Reliable and reusable whole polypropylene plastic microfluidic devices for a rapid, low-cost antimicrobial susceptibility test. *Lab on a Chip* [interaktyvus]. Royal Society of Chemistry, 2019, 19, 2915–2924. Prieiga per: <https://doi.org/10.1039/C9LC00502A>
61. ALGAMILI, Abdullah Saleh, KHIR, Mohd Haris Md., DENNIS, John Ojur, AHMED, Abdelaziz Yousif, ALABSI, Sami Sultan, HASHWAN, Saeed Salem Ba ir JUNAID, Mohammed M. A Review of Actuation and Sensing Mechanisms in MEMS-Based Sensor Devices. *Nanoscale Research Letters* [interaktyvus]. Springer, 2021, 16, 16. Prieiga per: <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>
62. MEHTA, Viraj, SUDHAKARAN, Sukanya Vilikkathala ir RATH, Subha Narayan. Facile Route for 3D Printing of Transparent PETg-Based Hybrid Biomicrofluidic Devices Promoting Cell Adhesion. *ACS Biomaterials: Science & Engineering* [interaktyvus]. ACS Publications, 2021, 7, 3947–3963. Prieiga per: <https://doi.org/10.1021/acsbomaterials.1c00633>
63. LI, Yanlong, LI, Kangsen ir GONG, Feng. Fabrication and Optical Characterization of Polymeric Aspherical Microlens Array Using Hot Embossing Technology. *Applied Sciences* [interaktyvus]. MDPI, 2021, 11, 882. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/app11020882>
64. CUI, Feiyun, JAFARISHAD, Hamed, ZHOU, Zhiru, CHEN, Jiazhang, SHAO, Jiahui, WEN, Qi, LIU, Yuxiang ir ZHOU, H. Susan. Batch fabrication of electrochemical sensors on a glycol-modified polyethylene terephthalate-based microfluidic device. *Biosensors and Bioelectronics* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 167, 112521. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2020.112521>
65. KOJIC, Sanja P., STOJANOVIC, Goran M. ir RADONIC, Vasa. Novel Cost-Effective Microfluidic Chip Based on Hybrid Fabrication and Its Comprehensive Characterization. *Sensors* [interaktyvus]. MDPI, 2019, 19, 1719. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/s19071719>

66. VOICU, Dan, LESTARI, Gabriella, WANG, Yihe, DEBONO, Michael, SEO, Minseok, CHO, Sangho ir KUMACHEVAAC, Eugenia. Thermoplastic microfluidic devices for targeted chemical and biological applications. *RSC Advances* [interaktyvus]. Royal Society of Chemistry, 2017, 7, 2884–2889. Prieiga per: <https://doi.org/10.1039/C6RA27592C>
67. ROSLIZAR, Aiman, DOTTERMUSCH, Stephan, SCHMAGER, Raphael, GUTTMANN, Markus, GOMARD, Guillaume, HÖLSCHER, Hendrik, RICHARDS, Bryce S. ir PAETZOLD, Ulrich W. Hot-embossed microcone-textured fluoropolymer as self-cleaning and anti-reflective photovoltaic module covers. *Solar Energy Materials and Solar Cells* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 214, 110582. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110582>
68. ASHOK, Mahalingam, DEEPIKA, Shanmuga, SOWNDHARYA, Pitchai ir MUTHUKUMAR, Krishnan. Cotton candy driven chitosan and gelatin coated poly(styrene-co-acrylonitrile) microfibers for anti-microbial wound dressing applications. *Materials Research Express* [interaktyvus]. IOP Science, 2019, 6, 125339. Prieiga per: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab5b2e>
69. ZHANG, Yuanying, ZHANG, Xuechun, CAO, Yongbin, FENG, Jiachun ir YANG, Wuli. Acrylonitrile-Styrene-Acrylate Particles with Different Microstructure for Improving the Toughness of Poly(styrene-co-acrylonitrile) Resin. *Advances in Polymer Technology* [interaktyvus]. Hindawi, 2021, 2021, 3004824. Prieiga per: <https://doi.org/10.1155/2021/3004824>
70. SHIRAZI, Mohammad Mahdi A., BAZGIR, Saeed ir MESHKANI, Fereshteh. A dual-layer, nanofibrous styrene-acrylonitrile membrane with hydrophobic/hydrophilic composite structure for treating the hot dyeing effluent by direct contact membrane distillation. *Chemical Engineering Research and Design* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 164, 125–146. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.09.030>
71. KHOUBI-ARANI, Zahra. Improvement of compressible regular solution model using Sanchez-Lacombe equation of state for phase behavior prediction of polymer blends. *Polymer Bulletin* [interaktyvus]. Springer, 2023, 81, 1179–1191. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00289-023-04762-0>
72. KARGAR-PISHBIJARI, Hassan, HOSSEINIPOUR, Seyed Jamal ir AVAL, Hamed Jamshidi. A novel method for manufacturing microchannels of metallic bipolar plate fuel cell by the hot metal gas forming process. *Journal of Manufacturing Processes* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 55, 268–275. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.04.040>
73. VAN TOAN, Nguyen, TODA, Masaya ir ONO, Takahito. An Investigation of Processes for Glass Micromachining. *Micromachines* [interaktyvus]. MDPI, 2016, 7, 51. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/mi7030051>
74. ZEB, Gul, DUONG, Thi Luong, BALAZINSKI, Marek ir LE, Xuan Tuan. Direct Electroless Deposition of Nickel onto Silicon Nitride Ceramic: A Novel Approach for Copper Metallization of Micro-/Nano-fabricated Devices. *Advanced Engineering Materials* [interaktyvus]. Wiley Online Library, 2020, 23, 2000598. Prieiga per: <https://doi.org/10.1002/adem.202000598>
75. ZHANG, Ru, WANG, Quanjing, CHEN, Qingkui, TANG, Aijun ir ZHAO, Wenbo. Experimental Study on Femtosecond Laser Processing Performance of Single-Crystal Silicon Carbide. *Applied Sciences* [interaktyvus]. MDPI, 2023, 13, 7533. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/app13137533>

76. LIU, Yifeng, LUO, Chuan, CAO, G.Z. ir SHEN, I.Y. Feasibility study of a partially released lead–zirconate–titanate (PZT) Diaphragm micro–actuator. *Sensors and Actuators A: Physical* [interaktyvus]. Elsevier, 2017, 259, 1–13. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.03.014>
77. NARITA, Fumio ir FOX, Marina. A Review on Piezoelectric, Magnetostrictive, and Magnetoelectric Materials and Device Technologies for Energy Harvesting Applications. *Advanced Engineering Materials* [interaktyvus]. Wiley Online Library, 2017, 20, 1700743. Prieiga per: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adem.201700743>
78. APICELLA, Valerio, CLEMENTE, Carmine Stefano, DAVINO, Daniele, LEONE, Damiano ir VISIONE, Ciro. Review of Modeling and Control of Magnetostrictive Actuators. *Actuators* [interaktyvus]. MDPI, 2019, 8, 45. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/act8020045>
79. LIU, Guoping, HE, Zhongbo, BAI, Guo, ZHENG, Jiawei, ZHOU, Jingtao ir DAI, Bowen. Modeling and Experimental Study of Oil–Cooled Stacked Giant Magnetostrictive Actuator for Servo Valve. *Actuators* [interaktyvus]. MDPI, 2020, 9, 37. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/act9020037>
80. ZHOU, Miaolei, WANG, Yifan, ZHANG, Yannan ir GAO, Wei. Hysteresis inverse compensation–based model reference adaptive control for a piezoelectric micro–positioning platform. *Smart Materials and Structures* [interaktyvus]. IOP Science, 2020, 30, 015019. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1088/1361-665X/abcc08>
81. BEHERA, Ajit. Magnetostrictive Materials. In: *Advanced Materials*. Springer, Cham, 2021, 127–156. Prieiga per: https://doi.org/10.1007/978-3-030-80359-9_4
82. NARIJAUSKAITĖ, Birutė. Creation and investigation of method for microrelief formation. *Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas: Technologija*, 2013, 107 p.
83. ŠAKALYS, Rokas. A study of the influence of high–frequency excitation on the quality of microstructures replicated by thermal imprint technologies. *Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas: Technologija*, 2017, 95 p.
84. BRUNIUS, Alfredas. Research and development of piezoelectric composite material for biomedical application. *Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas: Technologija*, 2019, 89 p.
85. SODAH, Amer. Development and analysis of microelectromechanical sensors for human health care monitoring. *Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas: Technologija*, 2020, 106 p.
86. JANUŠAS, Tomas. Funkcinių mikroskystinių elementų, valdomų tūrinių akustinių bangų, kūrimas ir tyrimas. *Daktaro disertacija. Kauno technologijos universitetas: Technologija*, 2022, 121 p.
87. WANG, Weiyu ir ZENG, Yiming. Polypropylene – Polymerization and Characterization of Mechanical and Thermal Properties. *IntechOpen*, 2020. ISBN 978–1–83880–416–9. Prieiga per: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73995>
88. SEPAHI, Mohammad Taregh, ABUSALMA, Hisham, JOVANOVIĆ, Vukica ir EISAZADEH, Hamid. Mechanical Properties of 3D–Printed Parts Made of Polyethylene Terephthalate Glycol. *Journal of Materials Engineering and Performance* [interaktyvus]. Springer, 2021, 30, 6851–6861. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06032-4>

89. WU, Gaojian, XIE, Pengcheng, YANG, Huaguang, DANG, Kaifang, XU, Yuxuan, SAIN, Mohini, TURNG, Lih–Sheng ir YANG, Weimin. A review of thermoplastic polymer foams for functional applications. *Journal of Materials Science* [interaktyvus]. Springer, 2021, 56, 11579–11604. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06034-6>
90. GENOVESE, Andrea, FARRONI, Flavio ir SAKHNEVYCH, Aleksandr. Fractional Calculus Approach to Reproduce Material Viscoelastic Behavior, including the Time–Temperature Superposition Phenomenon. *Polymers* [interaktyvus]. MDPI, 2022, 14, 4412. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/polym14204412>
91. ZELTMANN, Steven Eric, PRAKASH, Keerthana A., DODDAMANI, Mrityunjay ir GUPTA, Nikhil. Prediction of modulus at various strain rates from dynamic mechanical analysis data for polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering* [interaktyvus]. Elsevier, 2017, 120, 27–34. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.03.062>
92. YANG, Zhichao, ZHU, Lida, ZHANG, Guixiang, NI, Chenbing ir LIN, Bin. Review of ultrasonic vibration–assisted machining in advanced materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 156, 103594. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2020.103594>
93. LI, Linglin, LI, Wenlong, WANG, Hao, ZHAO, Jingnan, WANG, Zhongyuan, DONG, Mansheng ir HAN, Ding. Investigation of Prony series model related asphalt mixture properties under different confining pressures. *Construction and Building Materials* [interaktyvus]. Elsevier, 2018, 166, 147–157. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.120>
94. MARTINS, P., FERNANDEZ, C. S. Lehmann, SILVA, D. ir LANCEROS–MÉNDEZ, S. Theoretical optimization of magnetoelectric multilayer laminates. *Composites Science and Technology* [interaktyvus]. Elsevier, 2021, 204, 108642. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108642>
95. FOHTUNG, Edwin. Magnetostriction Fundamentals. In: *Encyclopedia of Smart Materials*. Elsevier, 2022, 4, 130–133. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815732-9.00081-4>
96. MARIANI, Alberto ir MALUCELLI, Giulio. Insights into Induction Heating Processes for Polymeric Materials: An Overview of the Mechanisms and Current Applications. *Energies* [interaktyvus]. MDPI, 2023, 16, 4535. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/en16114535>
97. MAYBOUDI, Layla, S. COMSOL Heat Transfer Models. Bloomfield: Mercury Learning & Information, 2020. ISBN–13 978–1683922117.
98. YENER, Tuba, YENER, S. C. ir MUTLU, Resat. Convection coefficient estimation of still air using an infrared thermometer and curvefitting. *Journal of Engineering Technology and Applied Sciences* [interaktyvus]. DergiPark Akademik, 2019, 4, 95–103. Prieiga per: <https://doi.org/10.30931/jetas.598862>
99. DESHMUKH, Swarup S. ir GOSWAMI, Arjyajyoti. Hot Embossing of polymers – A review. *Materials Today: Proceedings* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 26, 405–414. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.12.067>
100. CHU, Youlu, SUN, Yan, WU, Weibing ir XIAO, Huining. Dispersion Properties of Nanocellulose: A Review. *Carbohydrate Polymers* [interaktyvus]. Elsevier, 2020, 250, 116892. Prieiga per: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116892>

101. SOVA, Nadiya, SAVCHENKO, Bohdan, BELOSHENKO, Victor, SLIEPTSOV, Aleksander ir VOZNIAK, Iurii. Sorption Properties of PET Copolyesters and New Approach for Foaming with Filament Extrusion Additive Manufacturing. *Polymers* [interaktyvus]. MDPI, 2023, 15, 1138. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.3390/polym15051138>
102. GUEDRI, Aimane, ZAABAT, Mourad, BOUDINE, Boubekeur ir HAFDALLAH, Abdelkader. Synthesis, Characterization, Structural, and Optical Properties of Polyvinyl Chloride/Zinc Oxide Nanocomposite Films for Photocatalysis Application. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* [interaktyvus]. Springer, 2020, 30, 4884–4894. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s10904-020-01604-8>

CURRICULUM VITAE

Justas Ciganas

justas.ciganas@ktu.lt

Išsilavinimas:

- 2014–2018 Inžinerijos mokslų bakalauras / Mechanikos inžinerija / Kauno technologijos universitetas
- 2018–2020 Inžinerijos mokslų magistras / Mechanikos inžinerija / Kauno technologijos universitetas
- 2020–2024 Doktorantūros studijos / Mechanikos inžinerija / Kauno technologijos universitetas

Profesinė patirtis:

- 2019 „Solidworks“ programinės įrangos, 3D spausdinimo, robotikos pagrindų mokymo programų kūrimas profesinių mokyklų mokytojams ir 84 valandų Kauno, Klaipėdos ir Alytaus profesinių mokyklų mokytojų kvalifikacijos tobulinimas.
- 2017–2019 Inovatyvių procesų inžinierius tyrėjas UAB „Baltec CNC Technologies“.
- 2019–2022 Projektas „Struktūrizuotų nanokompozitų formavimas, tyrimas ir taikymai nano- / mikrobiodalelių analizei ir valdymui (BioSensor)“ KTU Mechanikos inžinerijos katedra (Pareigos: laborantas)
- 2020–2023 Projektas „Naujos technologijos, skirtos mikrostruktūrų formavimui funkcinėse medžiagose, kūrimas“ KTU Mechanikos inžinerijos katedra (Pareigos: laborantas)

STRAIPSNIAI RECENZUOJAMUOSE MOKSLO LEIDINIUOSE

Web of Science duomenų bazėje indeksuotuose Q1–Q3 kvartilių žurnaluose

Užsienio šalių leidyklose

- [A1] **Ciganas, Justas**; Bubulis, Algimantas; Jurenas, Vytautas; Griskevicius, Paulius; Palevicius, Arvydas; Urbaite, Sigita; Janusas, Giedrius. Dynamic mechanical properties of PVC plastics in the formation of microstructures with novel magnetostrictor // *Micromachines*. Basel: MDPI. ISSN 2072–666X. 2023, vol. 14, iss. 4, art. no. 820, p. 1–10. DOI: 10.3390/mi14040820. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; MEDLINE] [IF: 3.400; AIF: 5.700; IF/AIF: 0.596; Q2 (2022, InCites JCR SCIE)]
- [A2] **Ciganas, Justas**; Griskevicius, Paulius; Palevicius, Arvydas; Urbaite, Sigita; Janusas, Giedrius. Development of finite element models of PP, PETG, PVC and SAN polymers for thermal imprint prediction of high–aspect–ratio microfluidics // *Micromachines*. Basel: MDPI. ISSN 2072–666X. 2022, vol. 13, iss. 10, art. no. 1655, p. 1–14. DOI: 10.3390/mi13101655. [Science Citation Index Expanded (Web of Science); Scopus; MEDLINE] [IF: 3.400; AIF: 5.700; IF/AIF: 0.596; Q2 (2022, InCites JCR SCIE)]

Kitose tarptautinėse duomenų bazėse referuojamuose recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Užsienio šalių leidyklose

- [B1] **Ciganas, Justas**; Janusas, Giedrius. Theoretical investigation of the magnetostriction process in a newly developed microstructure thermal formation device // 2022 IEEE 18th international conference on the perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH), Polyana, Ukraine, September 7–11, 2022: proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2022. ISBN 9798350396812. eISBN 9798350396805. ISSN 2573–5357. eISSN 2573–5373. p. 105–108. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002924. [Scopus]
- [B2] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius; Vyas, Kesha Vishweshkumar. Numerical and experimental investigation of micro matrix hot embossing process // 2021 IEEE XVIIth international conference on the perspective technologies and methods in MEMS design (MEMSTECH), Polyana, May 12–16, 2021: proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2021. ISBN 9781665424110. eISBN 9781665424103. ISSN 2573–5357. p. 120–123. DOI: 10.1109/MEMSTECH53091.2021.9467931. [Scopus; INSPEC]

Kituose recenzuojamuose mokslo leidiniuose

Lietuvos leidyklose

- [C1] **Ciganas, Justas**; Janusas, Giedrius. Investigation of dynamic mechanical properties of PETG thermoplastic // *Mechanika 2023*: proceedings of the 27th international scientific conference, 26 May 2023, Kaunas University of Technology, Lithuania: proceedings. Kaunas: Kaunas University of Technology. ISSN 2783-5677. 2023, p. 88-91.

PATENTAI IR PATENTINĖS PARAIŠKOS

EPO, USPTO, JPO, KIPO, CNIPA patentų tarnybose įregistruoti patentai

- [D1] Janušas, Giedrius (autorius, išradimo); Bubulis, Algimantas (autorius, išradimo); Palevičius, Arvydas (autorius, išradimo); Ostasevičius, Vytautas (autorius, išradimo); Jurenas, Vytautas (autorius, išradimo); **Ciganas, Justas** (autorius, išradimo). System for the formation of microstructures in polymeric materials / inventors: G. Janušas, A. Bubulis, A. Palevičius, V. Ostasevičius, V. Jurenas, J. Ciganas; proprietor: Kaunas university of technology. EP 4166245 B1. 2024–02–28. [Espacenet].

Lietuvos Respublikos valstybiniame patentų biure įregistruoti patentai

- [D2] Janušas, Giedrius (autorius, išradimo); Bubulis, Algimantas (autorius, išradimo); Palevičius, Arvydas (autorius, išradimo); Ostaševičius, Vytautas (autorius, išradimo); Jūrėnas, Vytautas (autorius, išradimo); **Ciganas, Justas** (autorius, išradimo). Mikrostruktūrų formavimo polimerinėse medžiagose sistema / išradėjai: G. Janušas, A. Bubulis, A. Palevičius, V. Ostaševičius, V. Jūrėnas, J. Ciganas; savininkas: Kauno technologijos universitetas. LT 7015 B. 2023–08–10. [Lietuvos Respublikos patentų duomenų bazė].

MOKSLINIŲ TYRIMŲ REZULTATŲ SKELBIMAS KONFERENCIJOSE

Kitos konferencijų pranešimų tezės ir straipsniai nerecenzuojamoje konferencijų pranešimų medžiagoje

- [E1] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius. Dynamic Hot Embossing Process of Microstructures Formation // Open Readings 2023: 66th international conference for students of physics and natural sciences, April 18–21, 2023, Vilnius, Lithuania: annual abstract book / editors: M. Keršys, Š. Mickus. Vilnius: Vilnius University Press, 2023. ISBN 9786090708835. p. 189.
- [E2] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius. Hot Embossing Process for Microstructures Formation in PETG Plastic // Advanced Composites and Applications: 81st international scientific conference of the University of Latvia, February 16, 2023: book of abstracts. Riga: University of Latvia. 2023, p. 18.
- [E3] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius. Experimental Study of the Influence of Temperature on the Mechanical Properties of Thermoplastics // IRWBM 2022: 3rd international research workshop in biomechanical microsystems 2022: October 21, 2022, Kaunas University of Technology, Lithuania: program and abstracts. Kaunas: Kaunas University of Technology. 2022, p. 12.
- [E4] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius. Hot Stamping and Vibration Based Innovative Microstructure Formation Technology // Open Readings 2022: 65th international conference for students of physics and natural sciences, March 15–18, 2022: abstract book / editors: Š. Mickus, S. Pūkienė, L. Naimovičius. Vilnius: Vilnius University Press. 2022, P3–11, p. 221.

- [E5] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius. Mathematical Model of Microstructure Formation Using Magnetostriction Process // IRWBM 2021: 2nd international research workshop in biomechanical microsystems 2021: October 22, 2021, Kaunas University of Technology, Lithuania: program and abstracts. Kaunas: Kaunas University of Technology. 2021, p. 17.
- [E6] **Ciganas, Justas**; Janušas, Giedrius. Innovative Technologies for the Formation of Microstructures in Functional Materials // Open Readings 2021: 64th international conference for students of physics and natural sciences, March 16–19, Vilnius, Lithuania: abstract book / editors: Š. Mickus, R. Platakytė, S. Pūkienė. Vilnius: Vilnius University Press, 2021, P3–5. ISBN 9786090705902. p. 224.

PADĖKA

Didžiausia padėka vadovui prof. dr. Giedriui Janušui už konsultacijas, palaikymą, entuziastingus padaršinimus, pasitikėjimą. Jūsų idėjos, motyvacija ir palaikymas buvo labai vertingi ir įkvepiantys. Džiaugiuosi turėjęs galimybę su Jumis bendradarbiauti. Tikiuosi ir toliau tęsime pradėtus darbus.

Norėčiau padėkoti doc. dr. Pauliui Palevičiui už profesionalias ir vertingas pastabas.

Ypatinga padėka prof. dr. Pauliui Griškevičiui už pagalbą atliekant eksperimentinius tyrimus, prof. dr. Vytautui Jūrėnui už konsultacijas ir ilgas diskusijas bei pagalbą eksperimentiniuose tyrimuose, dr. Tomui Simonaičiui už pagalbą dirbant su universiteto įranga, dr. Sigitai Urbaitei už bendradarbiavimą rašant mokslinius straipsnius, prof. dr. Arvydui Palevičiui už patarimus tyrimų srityje. Taip pat esu dėkingas dr. Simonai Tučkutei už SEM ir AFM matavimus.

Dėkoju Lietuvos mokslo tarybai ir Kauno technologijos universitetui už finansavimą ir galimybę dalyvauti įvairiose konferencijose, kurios suteikė galimybę plėsti žinias savo tyrimų srityje.

Dėkoju visiems Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakulteto bei Doktorantūros mokyklos darbuotojams už pagalbą studijų metu.

Taip pat norėčiau padėkoti savo šeimai, kuri visada buvo šalia, skatino neprarasti vilties sunkesniais momentais ir nuolatos palaikė.

UDK 681.586+678.073+620.1-181.48](043.3)

SL344. 2024-03-25, 12,75 leidyb. apsk. I. Tiražas 14 egz. Užsakymas 42.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas

