

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Nerijus Česnavičius**

**PRESUOTŲ GUMOS GRANULIŲ MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Prof. dr. Romualdas Dundulis

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**PRESUOTŲ GUMOS GRANULIŲ MECHANINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
**Mechanikos inžinerija (kodas 621H30001)**

**Vadovas**

(parašas) Prof. dr. Romualdas Dundulis  
(data)

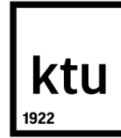
**Recenzentas**

(parašas)  
(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Nerijus Česnavičius  
(data)

**KAUNAS, 2016**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

---

(Fakultetas)

**NERIJUS ČESNAVIČIUS**

---

(Studento vardas, pavardė)

**MECHANIKOS INŽINERIJA 621H30001**

---

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Presuotų gumos granulių mechaninių savybių tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA**

20 16 m. gegužės 19 d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Nerijaus Česnavičiaus**, baigiamasis projektas tema „Presuotų gumos granulių mechaninių savybių tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

---

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

---

(parašas)

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

**Tvirtinu:**

Mechanikos inžinerijos katedros vedėjas  
Vytautas Grigas

\_\_\_\_\_  
(Parašas, data)

Mechanikos inžinerijos krypties studijų  
programų vadovas Kęstutis Pilkauskas

\_\_\_\_\_  
(Parašas, data)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS**  
**Studijų programa: MECHANIKOS INŽINERIJA – 621H30001**

Patvirtinta 2016 m. Gegužės mėn. 3 d. dekanų įsakymu Nr. V 25-11-7

Išduota MD M-4/5gr. studentui Nerijui Česnavičiui

1. Darbo tema: *Presuotų gumos granuliu mechaninių savybių tyrimas*  
*Analysis of mechanical characteristics of compressed crumb rubber*

2. Darbo tikslas: *Ištirti pagrindines presuotų gumos granuliu medžiagos mechanines savybes.*

3. Darbo uždaviniai:

- sukurti įrangą presuotų gumos granuliu bandiniams pagaminti;
- pagaminti gumos granuliu bandinius;
- patikrinti sukurtų bandinių stiprumines savybes;
- sukurti skaičiuojamąjį medžiagos modelį kompiuterinės programos aplinkoje;
- pritaikyti skaičiuojamąjį medžiagos modelį panaudojant baigtinių elementų metodą.

4. Specialūs reikalavimai ir sąlygos:

- presuoti gumą esant 1-6 MPa slėgiui;
- presuoti gumą esant keičiama 150 – 180°C temperatūrai;
- išlaikyti gumą suspaustą nuo 5 iki 10 minučių.

5. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis

6. Darbo pateikimo (gynimui) terminas

*iki*

\_\_\_\_\_  
( data)

Užduotį gavau:

\_\_\_\_\_  
(studento vardas, pavardė, parašas)

\_\_\_\_\_  
( data)

Vadovas:

\_\_\_\_\_  
(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

\_\_\_\_\_  
(data)

Česnavičius, Nerijus. *Presuotų gumos granulių mechaninių savybių tyrimas*. Magistro baigiamasis projektas. Vadovas prof. dr. Romualdas Dundulis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Mechanikos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *gumos granulės, gniuždymas, tempimas, elastingumo modelis*

Kaunas, 2016. 50 p.

## **SANTRAUKA**

Darbe atliekamas presuotų gumos granulių, kurių frakcija 0-2mm, bandinių formavimas ir stipruminiai tempimo bei gniuždymo bandymai. Šių bandymų metu nustatomos pagrindinės medžiagos mechaninės savybės, puasono koeficientas tempiant, stiprumo riba. Sudaromas skaičiuojamasis medžiagos modelis „Ansys Workbench 16.2“ programos aplinkoje. Modelis patikrinamas modeliuojant guminę tarpinę ir atliekant vamzdžių su šia tarpine sujungimo simuliaciją.

Česnavičius, Nerijus. *Analysis Of Mechanical Characteristics Of Compressed Crumb Rubber*  
Master's thesis in mechanical engineering / supervisor prof. dr. Romualdas Dudnulis. The Faculty  
of mechanical engineering and design; Kaunas University of Technology.

Mechanical engineering

Key words: *crumb rubber, compression, tension, hyperelasticity model*

Kaunas, 2016. 50 p.

## **SUMMARY**

This research paper is about forming test specimens of compressed crumb rubber of size 0-2mm and testing those specimens in tension and compression tests. Main mechanical properties of crumb rubber are analyzed, poisson's ratio in tension and yield strength are determined. Hyperelasticity model characteristics of rubber are defined. Joining of pipes with rubber made of defined material is simulated in program "Ansys Workbench 16.2".

## TURINYS

ĮVADAS .....	8
1. GUMOS GRANULĖS .....	9
1.1 Gumos granulių surišimo būdai.....	9
1.2 Gumos granulių panaudojimas .....	10
1.3 Vulkanizacijos ryšiai .....	13
2. EKSPERIMENTINĖ DALIS .....	15
2.1 Gniuždymo bandinių gamybos įranga.....	15
2.2 Gniuždymo bandinių presavimo eiga .....	18
2.3 Bandinių gniuždymas .....	21
2.4 Tempimo bandinių presavimo įranga ir presavimo eiga .....	30
2.5 Bandinių tempimas .....	31
3. SKAIČIUOJAMASIS MEDŽIAGOS MODELIS .....	37
3.1 Modelios sudarymas .....	37
3.2 Modelio pritaikymas.....	44
IŠVADOS.....	47
LITERATŪRA .....	48

## Ivadas

Nėra daug efektyvių ir praktiškų būdų perdirbti panaudotas padangas ar jų gumą grąžinti į prieš vulkanizaciją buvusią būseną. Vienas iš efektyvių būdų yra padangas sumalti į granules, pašalinti nailono, stireno, plieno bei kitų padangose esančių medžiagų likučius ir gumos granules presuoti formose. Tokiu būdu dalinai atkuriami vulkanizacijos ryšiai ir iš gumos granulių gaunamas naujas produktas, turintis kitokias savybes, nei vientisas (nesumaltas) gumos gaminys. Presavimo parametrai, į gumą kaitinant dedami priedai bei gautos gumos mechaninės savybės literatūroje nėra plačiai aprašytos.

Šiame darbe bus atliekami tyrimai su gumos granulėmis, kurių frakcija yra 1–2 mm. Šio darbo tikslas yra ištirti pagrindines presuotų gumos granulių medžiagos mechanines savybes. Darbo uždaviniai:

- sukurti įrangą presuotų gumos granulių bandiniams pagaminti;
- pagaminti gumos granulių bandinius;
- patikrinti sukurtų bandinių stiprumines savybes;
- sukurti skaičiuojamąjį medžiagos modelį kompiuterinės programos aplinkoje;
- pritaikyti skaičiuojamąjį medžiagos modelį panaudojant baigtinių elementų metodą.



# 1. Gumos granulės

## 1.1 Gumos granulių surišimo būdai

Paprasčiausias literatūroje aprašomas gumos granulių surišimo ir apdorojimo būdas yra jų maišymas su tam tikrais polimerais [1]. Tokiu atveju gaunama apie 5 MPa stiprumo ribos guma, kuri gali pailgėti iki 200%. Tokią sistemą naudoja keletas gumos gamintojų. Naudojant šį būdą gumos granulės yra maišomos su 1 – 4% (pagal gumos granulių svorį) latekso ir 0,5 – 3% sieros. [2]. Gumos granulės sumaišomos su vulkanizatoriumi (siera) ir mišinys kaitinamas. Polimeras (lateksas) pridedamas esant 70 – 90°C temperatūrai. Gautas mišinys formuojamas slegiant formose.

Naudojant poliuretano klįjus nereikalingi jokie papildomi priedai [1]. Guma presuojama esant mažam slėgiui ir žemai temperatūrai, todėl tokiu būdu yra gaminami dideli gaminiai, vėliau supjaustomi ar štampuojami į mažesnius gaminius. Tokiu klįjavimo būdu gautoje gumoje yra mažų skylių, per kurias gali prabėgti vanduo.

Maišant gumos granules su nitrilo guma (apdorojama esant 130 - 180°C temperatūrai) gaunama guma, kurios stiprumo riba, priklausomai nuo mišinio gaminimo sąlygų, gali siekti 11,71 MPa (1.1 pav.), tačiau čia naudojamų gumos granulių kiekis siekia 40% [3]. 1.1 paveiksle esančioje L eilutėje pateikta stiprumo riba tempiant yra didesnė, tačiau čia nenaudotos gumos granulės.

Mix	Tensile (MPa)	E @ B (%)	M300 (MPa)	Tear (N/mm)
A	8.10	395.00	5.75	7.10
B	9.66	455.00	5.50	7.10
C	8.88	485.00	4.44	6.20
D	9.00	595.00	3.28	10.50
E	9.57	352.00	7.80	5.58
E (Repeat)	9.98	365.00	7.69	5.78
F	10.13	491.00	7.91	7.80
G	10.98	412.00	7.22	6.76
H	5.75	380.00	4.30	10.65
I	6.70	510.00	3.54	9.90
J	11.13	515.00	6.10	11.45
K	8.11	542.00	3.52	9.55
L	13.63	662.00	5.10	8.82
M	11.71	495.00	6.34	9.71

1.1pav. Nitrilo gumos ir gumos granulių mišinio eksperimentiniai rezultatai [3]

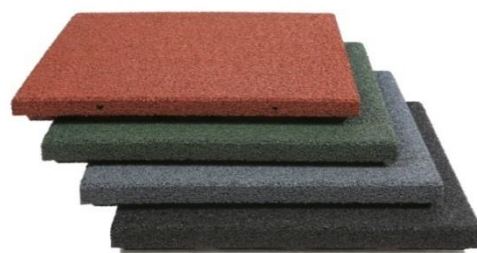
## 1.2 Gumos granulių panaudojimas

Lietuvoje, kaip ir visame pasaulyje, panaudotų padangų perdirbimas yra gana didelė problema. Kitaip nei termoplastikus, be papildomo cheminio ir mechaninio apdirbimo perdirbti vulkanizuotos gumos padangas į naujus gaminius yra sunku ir neekonomiška. Norint jau vulkanizuotą gumą gražinti į pradinę padėtį, reikalinga įranga gebanti gumą pakartotinai kaitinti ir spausti. Taip pat devulkanizacijos procesui reikalingi chemikalai, padedantys atskirti sierą nuo gumos ir net devulkanizavus gumą nauji gumos produktai yra gaminami maišant naują gumą ir devulkanizuotą gumą dalimis.

Lietuvoje įsikūrusios kelios padangas perdirbančios įmonės: „AB Akmenės cementas“, „UAB Metaloidas“, „UAB Torgita“ ir kitos. Įmonėje „AB Akmenės cementas“ panaudotas padangas degina, vėliau jų pelenus panaudoja cemento gamybai, o „UAB Metaloidas“ panaudotas padangas paverčia gumos granulėmis, kurių frakcija nuo 0 iki 6 mm (1.2 pav.). „2011 metais įmonė perdirbo daugiau kaip 30.000 tonų naudotų padangų.“ [4]. Pagamintos granulės parduodamos Lietuvoje ar eksportuojamos į užsienį, dalis jų paverčiama į naujus produktus pačioje gamykloje. Perdirbimo proceso metu padangos malamos vis mažinant jų frakciją, padangose esantis pluoštas nusiurbiamas, o metalinės vielos pašalinamos panaudojus magnetus. Įmonėje taip pat gaminamas mulčias, apsauginiai kilimai iš sunkvežimių padangų, guminės plytelės (1.3 pav.), guminės grindų dangos ir guminiai borteliai. Kai kuriems gaminiams naudojami poliuretaliniai klijai. Gumos granulės klijuojamos formose, sumaišius granules su tam tikru kiekiu klijų ir panaudojant jėgą formos suslėgimui.



1.2 pav. Gumos granulės [4]



1.3 pav. Guminės plytelės [4]

Perdirbtos gumos granulės taip pat panaudojamos sporto aikščių, žaidimų aikštelių dangų klojimui. Gumos granulės nudažomos, vėliau sumaišomos su klijais ir liejamos ant žemės bei lyginamos.

Viena pagrindinių gumos granulių panaudojimo sričių yra įvairių guminių čiužinių, kilimėlių gamyba. Jie gaminami presuojant gumos granules specialiuose presuose, kur gumos granulės, dažniausiai prieš tai paruoštos su įvairiais priedais, išpilamos kaitinamose formose. Guminių čiužinių gamyba prasideda gumos granules įkaitinant iki 50°C ir sumaišant ją su chemikalais, padedančiais susiformuoti stipresnei gumai. Formos padengiamos silikono purškalu, kuris neleidžia gumai prilipti (1.4 pav.) [5].



**1.4 pav.** Formos padengimas silikono purškalu [5]

Ant formos vienodu aukščiu paskirstomas gumos granulių sluoksnis ir forma patalpinama į kasetinį presą, kur yra spaudžiama su kitomis formomis ir kaitinama iki 150°C (1.5 pav.). Vienam čiužiniui sunaudojama 50 kg. gumos granulių, o suspaudimo jėga nėra nurodyta.



**1.5 pav.** Gumos granulės kasetiniame prese [5]

Supresuotas čiužinys išimamas iš formos, jam apipjaunami kraštai. Gautas guminis čiužinys pavaizduotas 1.6 paveiksle. Tokio tipo čiužinys naudojamas karvidžių bei arklidžių grindų paminkštinimams. Panašaus tipo čiužiniai taip pat naudojami sporto salėse krentančių svorių smūgiams nuslopinti.



**1.6 pav.** Guminis čiužinys [6]

Panašiu principu formose gaminami ir guminiai žiedai (1.7 pav.), taip pat automobilių kilimėliai (1.8 pav.). Gumos granulės taip pat naudojamos guminių purvasargių, greičio ribojimo kalnelių gamybai.



**1.7 pav.** Guminiai žiedai [7] **1.8 pav.** Guminis kilimėlis [8]

Vienas inovatyviausių gumos granuliu panaudojimo būdų yra guminių stogo dangų (čerpių) gamyba. Iš maltų padangų gumos pagamintos čerpės yra lengvesnės už betonines, patvaresnės už bitumines ar skardines stogo dangas. Šioms čerpės atlaiko 75 ir daugiau metų. Dėl priedų, naudojamų padangų gamybai, guminės čerpės yra atsparios ultravioletiniams saulės spinduliams, taip pat turi mažesnę šilumos laidumo koeficientą nei dauguma kitų stogo dangų [9]. Vienas pagrindinių šios stogo dangos minusas yra degumas. Gumą gana sunku uždegti, jai reikia kaitraus liepsnos šaltinio, tačiau užsiliepsnojusi guma taip pat sunkiai užgesinama.



**1.9 pav.** „Euro Slate” guminė čerpė [10]

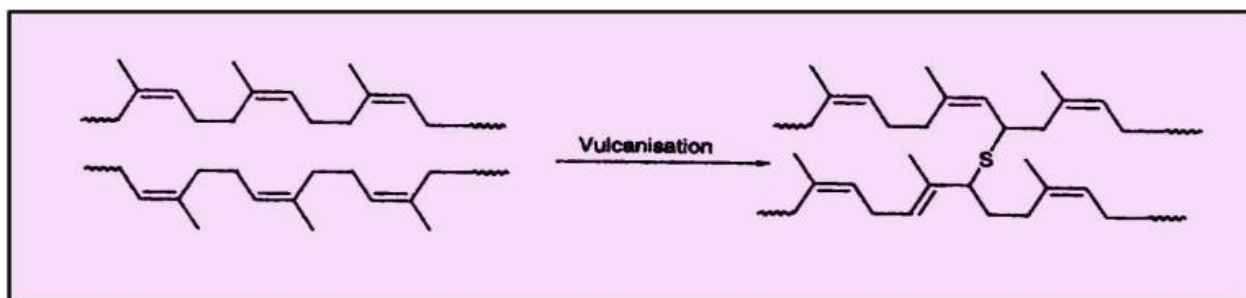
1.9 paveiksle parodyta vienos didžiausių pasaulio guminių čerpių gamintojos „EuroShield” produktas „Euro Slate”. Šios čerpės turi žymas, padedančias sujungti stogo dangą tarpusavyje. Šio tipo čerpės imituoja akmeninę stogo dangą.

### 1.3 Vulkanizacijos ryšiai

Kadangi darbo tikslas yra iširti presuotos gumos stiprumines ir kitas savybes, reikia panagrinėti, kokie ryšiai vyrauja gume ir kaip galima juos suardyti ir vėl atkurti. Pačioms padangoms pagaminti naudojama ypač daug medžiagų. „Įprastinio dydžio visų sezonų nauja keleivinė „Goodyear“ padanga, sverianti apie 10 kg (22 svarus) susideda iš [11]:

- 30 rūšių sintetinės gumos;
- 8 rūšių natūralios gumos;
- 8 rūšių anglies;
- Plieninių žiedų;
- Polistireno ir nailono pluošto;
- Plieninės vielos;
- 40 skirtingų chemikalų, vašku, aliejų, pigmentų, silikonų ir molių”.

Nevulkanizuota guma yra termoplastiška, lipni ir minkšta. Vulkanizacija yra termocheminis procesas, kurio metu pakinta cheminė gumos sudėtis. Vulkanizacijos procesui (1.10 pav.) yra naudojama siera, peroksidai, uretano jungtys, metalų oksidai ir acetoksilanai.



**1.10 pav.** Gumos vulkanizacija. Kairėje pusėje – nevulkanizuota guma, dešinėje – susidaręs ryšys tarp gumos-sieros-gumos molekulių [12]

Įprastai vulkanizuojant guma presuojama esant 140 – 180°C temperatūrai su 2-3% sieros (lyginant su vulkanizuojamos gumos kiekiu) [1]. Vulkanizacijos reakcijai pagreitinti naudojami vulkanizacijos akseleratoriai. Vulkanizuota guma, dėl skirtingos cheminės sudėties, turi skirtingus stipruminius ir kitus parametrus. Pavyzdžiui, etilopropileno gumos stiprumas tempiant yra daugiau nei 10 MPa, bandinys pailgėja daugiau nei 3 kartus, o darbo temperatūra šiai gumai yra nuo –35°C iki +100°C. Nitrilo gumos parametrai yra panašūs, tačiau jos darbo temperatūra yra nuo –30°C iki +80°C. Fluoro gumos stiprumas yra daugiau nei 8 MPa, pailgėti gali 2,6 karto, o darbinė temperatūra yra –25°C iki +200°C [13].

Norint iš gumos pagaminti naujus produktus, reikia suardyti tarp gumos granuliu vyraujančius anglies-sieros ar sieros-sieros ryšius. Šis procesas vadinamas devulkanizacija. Pagrindiniai naudojami devulkanizacijos metodai yra [14]:

- Cheminis;
- Ultragaršinis;
- Mikrobangų;
- Biologinis;
- Mechaninis.

Cheminės devulkanizacijos proceso metu ryšiams suardyti naudojamos įvairios cheminės medžiagos, tokios kaip peroksidas ar disulfidas, įvairūs aliejai. Neretai cheminės devulkanizacijos metu chemikalai yra kaitinami net iki 300°C temperatūros, taip sunaudojant didelius kiekius energijos.

Ultragarso metodas taikomas nedidelius vulkanizuotuos gumos kiekius 20 minučių veikiant 50kHz ultragarso bangomis. Tokia devulkanizacija suardo anglies-sieros ryšius, tačiau negali suardyti sieros–sieros ryšių.

Mikrobangomis suardomi anglies–anglies, anglies–sieros ir sieros–sieros ryšiai, tačiau procesas turi būti pakankamai poliškas, kad guma galėtų pakankamai įkaisti ir įvyktų vulkanizacija, o tam reikalinga brangi įranga.

Biologinės devulkanizacijos metu naudojami skirtingų tipų mikroorganizmai, skystoje terpėje suardantys sieros jungtis.

Mechaninės devulkanizacijos metu ryšiai suardomi pakartotinai deformuojant gumos daleles esant tam tikrai temperatūrai ir slėgiui. Šiam procesui yra naudojami ekstruderiai, taip pat sraigto tipo devulkanizacijos mašinos. Šis gumos devulkanizacijos būdas yra vienas labiausiai paplitusių, reikalaujantis mažiausiai išlaidų.

Kadangi bandymams naudojamos gumos granulės yra sumaltos ir mechaniškai iš dalies panaikinti jų anglies–anglies, anglies–sieros ir sieros–sieros ryšiai granulių paviršiuje, gumos granulės gali būti supresuotos į naują gumos gaminį [15]. Slegiant guma revulkanizuojama esant 150 – 300°C temperatūrai suslegiant 3,4 MPa slėgiu, naudojant papildomus chemikalus ryšių suardymui [16].

Šio projekto metu presuojant gumą nebus naudojami jokie papildomi vulkanizatoriai, akseleratoriai ar cheminės medžiagos vyraujantiems vulkanizacijos ryšiams panaikinti ir vėl atkurti. Presavimo parametrai (laikas, presavimo jėga ir temperatūra) bus keičiami nustatytose ribose ieškant geriausių stipruminių savybių bandinio.

Temperatūra keičiama 150 – 180°C ribose.

Suspaudimo jėga keičiama 1-6 MPa ribose.

Presavimo laikas keičiamas 5-10 min. ribose.

## 2. Eksperimentinė dalis

### 2.1 Gniuždymo bandinių gamybos įranga

Siekiant pagaminti gumos bandinius, gumą išlaikyti reikia tam tikrą laiką spaudžiant ją atitinkamu slėgiu ir kaitinant nustatyta temperatūra, todėl presavimui yra reikalingas presas, galintis pasiekti reikiamą slėgį presavimo formoje. Kadangi slėgis priklauso nuo presavimo formos matmenų (slėgimo ploto), todėl kuo mažesnės galios yra presas, tuo mažesnio ploto bus parinktoji forma. Kaitinimui bus naudojama elektros srovė. Forma bus kaitinama iš išorės naudojant nichromo kaitinimo elementą su variniu apvalkalu ir kreida, atskiriančia nichromo vielą nuo varinio vamzdelio. Dėl metalų šiluminio laidumo šiluma perduodama į formos vidų.

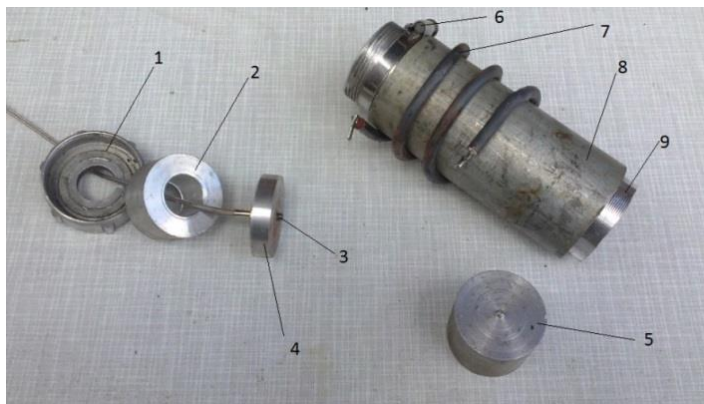
Gumos bandinių gamybai bus naudojamas hidraulinis presas (2.1 pav.). Išbandyta, kad presas yra pajėgus išvystyti didesnę nei 20 kN jėgą, kurios užteks bandymams. Presas turi rankeną, kuria didinamas slėgis, o slėgiui sumažinti naudojamas vožtuvas su sriegiu. Visiškai atsukus slėgio mažinimo vožtuvą, prie preso judančių dalių pritvirtintos spyruoklės grąžina preso stūmoklį į pradinę padėtį. Preso apačioje dedama plokštelė, skirta atremti spaudimo formai ir kitiems elementams. Pagal preso matmenis yra parenkami kitų dalių matmenys.



2.1 pav. Hidraulinis presas

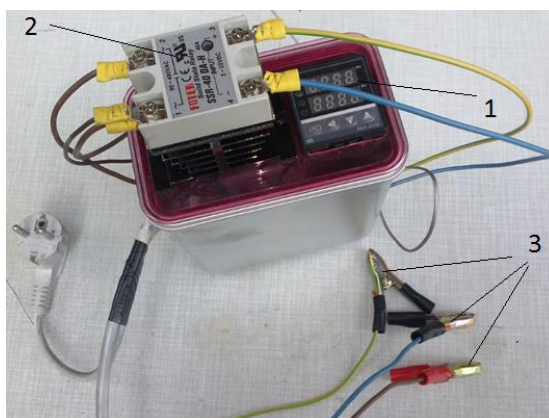
Gumai spausti yra pagaminta cilindrinė forma iš aliuminio, su sriegiu viename gale, kurios vidinis skersmuo yra 45 mm (2.2 pav. pažymėta numeriu 1). Ant šio aliuminio vamzdžio standžiai užmaunamas storesnis plieninis vamzdis, kurio sienelės storis 5 mm. Šis vamzdis ne tik sustiprina aliuminį cilindą, bet ir padeda tolygiau pasiskirstyti šilumai. Ant šio vamzdžio užvyniotas 750 W galios kaitinimo elementas, sudarytas iš dviejų nuosekliai sujungtų 375 W tenų. Tenu apsukama tik apatinė cilindro dalis, tačiau suspaustas bandinys kaitinamas vienodai, nes spaudžiant guma neužima daugiau vietos nei apima išorėje apvyniotas kaitinimo elementas. Siekiant išvengti plieninio cilindro nusislinkimo nuo aliuminio cilindro įkaitus metalams, naudojamas laikiklis. Iš formos apačios į vidų dedamas apvalus aliuminis padas su skylė ir sriegiu, skirtu įsukti termoporai.

Kad nebūtų prispaudžiamas termoporos laidas, naudojamas iš aliuminio ištekintas paaukštėjimas su skylė (žiedas), į kurį atsiremia termoporos padas, o iš galo užsukamas dangtelis su skylė, kuris laiko prieš tai minėtas dalis vietoje. Dangtelyje yra įpjovimas, skirtas išvesti termoporos laidą į išorinę kaitinimo formos pusę. Iš cilindro viršaus spaudimui naudojamas apvalus cilindras.



**2.2 pav.** Spaudimo ir kaitinimo forma. Čia 1 – dangtelis, 2 – žiedas, 3 – termopora, 4 – padas su skylė ir sriegiu, 5 – spaudimo cilindras, 6 – laikiklis, 7 – kaitinimo elementas, 8 – plieninis vamzdis, 9 – aliuminis vamzdis su sriegiu

Pastoviam teno kaitinimui naudojamas termoreguliatorius C100 (2.3 pav.) Jis susideda iš valdymo bloko su ekranėliu ir rėlės. Maitinimo įtampa – 220 V. Termoreguliatorius valdomas keturiais mygtukais, turi funkcijas šaldyti (palaikyti mažesnę temperatūrą nei nustatytoji), kaitinti (palaikyti didesnę temperatūrą nei nustatytoji), ar palaikyti pastovią temperatūrą (palaikyti nustatytąją temperatūrą).



**2.3 pav.** Termoreguliatorius. Čia 1 – valdiklis su ekranėliu, 2 – rėlė, 3 – išėjimo gnybtai

Prie vienos pusės rėlės kontaktų pritvirtinti laidai “input” kontaktui, išeinantys iš valdiklio (teigiamas ir neigiamas kontaktai), kitoje pusėje į kontaktus įtvirtinamas padalintas teigiamas maitinimo šaltinio laidas .

Termoreguliatorius, pasiekęs nustatytą temperatūrą, atjungia rėlę ir nepradeda vėl kaitinti, kol temperatūra nenukrenta žemiau nustatytosios. Priklausomai nuo aplinkos sąlygų, kaitinimo paklaida



gali siekti apie 2 – 5°C. Termoregulatorius turi 3 išėjimus: teigiamo ženklo srovės, neigiamo ženklo srovės ir nulinį, prie kurių pritvirtinti gnybtai, bandymų metu prisegami prie atitinkamų kaitinimo teno kontaktų ir formos korpuso.

Presavimo jėgai išmatuoti darbe bus naudojamas kalibruotas slėgimo dinamometras ДDCM35. Dinamometro maksimali matuojama jėga – 50 kN. Jis sudarytas iš deformuojamo kūno ir indikatoriaus (2.4 pav.). Deformuojamo kūno poslinkis nuo veikiančios presavimo jėgos yra priklausomas tiesiškai. Dinamometro kalibravimo duomenys nurodyti 2.5 pav. Vienas dinamometro galas bus įremiamas į presavimo formą, kitas – į preso apatinę plokštumą.

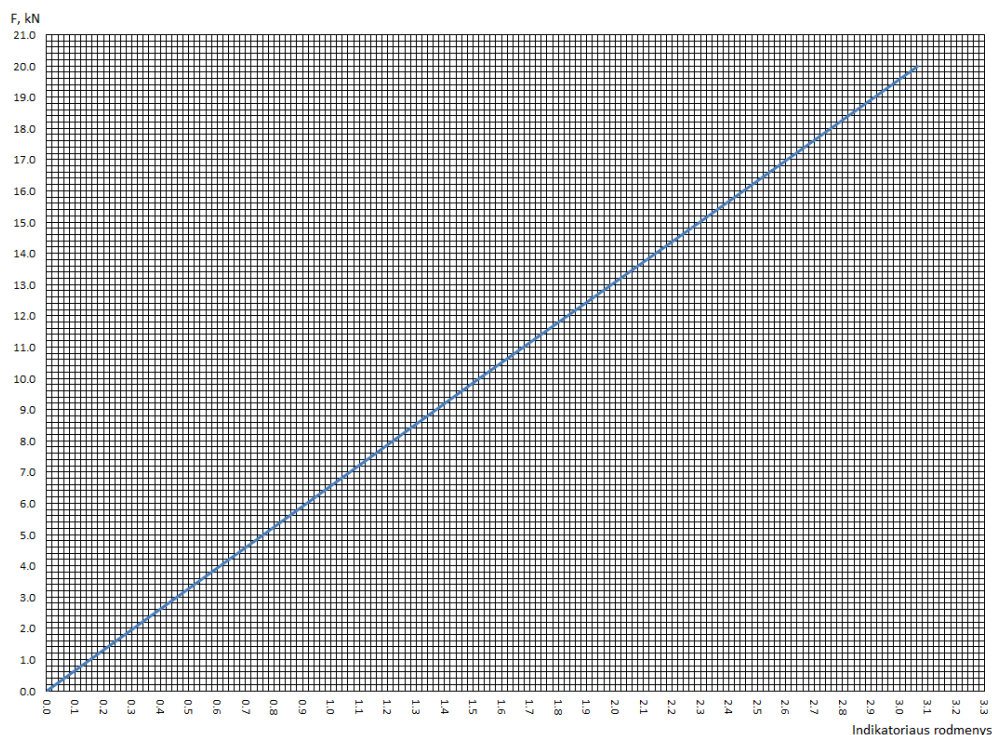


2.4 pav. Dinamometras ДDCM35

Нагрузка, kN	Средние значения трех измерений, мм	
	при нагружении	при разгрузении
0,0	1,000	1,000
5	1,760	1,784
10	2,520	2,530
15	3,280	3,304
20	4,040	4,017
25	4,800	4,842
30	5,560	5,600
35	6,320	6,340
40	7,080	7,195
45	7,840	7,915
50	8,600	-

2.5 pav. Dinamometro kalibravimo duomenys

Kadangi vertinamas pradinis dinamometro įveržimas, kai jėga yra 0 kN, tai pradėjus bandymą ir nustačius indikatoriaus rodyklę ties nuliu, 5 kN jėga bus pasiekta kai rodyklė pasisuks iki 0,76 pagal indikatoriaus skalę. Tokiu pat principu visus kalibravimo žurnale nurodytus indikatoriaus rodmenis galima sumažinti vienetu. Kadangi indikatoriaus rodmenys ir deformavimo jėga yra tiesiškai priklausomi dydžiai, nežinomiems tarpiniams jėgų dydžiams rasti nubraižytas grafikas (2.6 pav.)



**2.6 pav.** Indikatoriaus rodmenų priklausomybės nuo jėgos grafikas. Y ašyje – jėga, X ašyje – indikatoriaus rodmuo

Bandinio suspaudimas bus nurodomas ne niutonais, o megapaskaliais, todėl žinant bandinio skersmenį (43,5 mm – pagamintas bandinys susitraukia) ir reikalingą suspaudimo jėgą, pavyzdžiui 3 MPa, išvedamas reikalingas dinamometro indikatoriaus rodmuo.

Bandinio plotas:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = 1485,42 \text{ mm}^2$$

čia  $d$  - bandinio skersmuo, lygus 43,5 mm

Reikalinga jėga  $F$ :

$$F = P \cdot A = 3 \cdot 1485,42 = 4456,25 \text{ N}$$

čia  $P$  – bandinio formavimo slėgis, MPa.

Iš 2.6 paveiksle nupieštos kreivės surandamas indikatoriaus rodmuo, atitinkantis apytikriai 4,5 kN jėgą. Todėl norint pasiekti 3 MPa bandinio formavimo slėgį, indikatoriaus rodyklė turi rodyti 0,72.

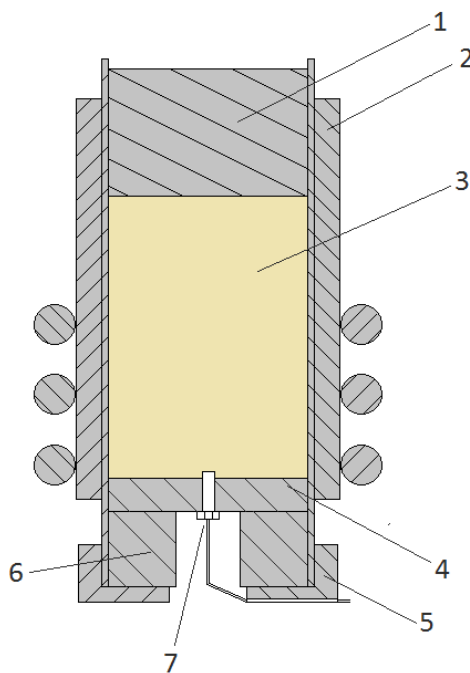
## 2.2 Gniuždymo bandinių presavimo eiga

Visa anskčiau aprašyta bandymo įranga surenkama į vieną įrenginį (2.7 pav.). Ant apatinės preso plokštumos plokščiu paviršiumi dedamas dinamometras, ant kurio, siekiant išvengti dinamometro paviršiaus pažeidimų, dedamas plieninis žiedas, ant kurio statoma presavimo forma.

Presavimo forma sudaryta iš plieninio vamzdžio, aliuminio vamzdžio su sriegiu, kaitinimo teno, pado su sriegiu, termoporos, žiedo, galinio dangtelio, spaudimo cilindro, laikiklio (2.8 pav.). Prijungiami teigiamo ženklo (rudas laidas), neigiamo ženklo (mėlynas laidas) ir nulinis (geltonas laidas su mėlyna juostele) srovės kontaktai (2.7 pav.)



2.7 pav. Surinktas bandymų stendas



2.8 pav. Kaitinimo formos pjūvis. Čia 1- spaudimo cilindras, 2- išorinis vamzdis, 3- gumos granulės, 4- termoporos padas, 5- galinis dangtelis, 6- žiedas, 7- termopora

Surinkus standą, bandymas pradedamas užpildant presavimo formą gumos granulėmis. Bandymams naudojamos gumos granulės, kurių frakcija yra 1–2mm. Prieš suslėgimą iš gumos išrenkami didesni polistireno ir nailono pluoštų likučiai. Presavimo formos ertmė yra 128 mm gylio ir 45 mm skersmens, jos tūris – 203,58 cm<sup>3</sup>. Forma pripildoma iki pat viršaus (2.9 pav.).



**2.9 pav.** Spaudimo forma pripildyta gumos granulėmis

Pripildžius formą įstatomas viršutinis spaudimo cilindras kaip parodyta 2.7 paveiksle. Šiuo metu dinamometro indikatoriaus rodyklė turi stovėti nulinėje padėtyje. Jei taip nėra, skalė pasukama iki nulinės rodyklės padėties. Slėgis šiuo metu yra lygus nuliui (2.10 pav. a)



a.

b.

**2.10 pav.** Dinamometro rodmenys: pav a - presavimo pradžioje, pav. b – suslėgus gumą

Guma spaudžiama iki tol, kol dinamometro indikatoriaus rodmenys atitinka tam tikrą reikiamą jėgos dydį. Pavyzdžiui, 2.10 paveiksle b indikatoriaus rodyklė stovi ties 76, šis rodmuo atitinka 5 kN jėgą.

Įjungiamas termoregulatorius ir pradedamas teno, o kartu ir visos formos su gumos granulėmis viduje kaitinimas. Termoregulatoriaus valdiklio ekrane nustatoma reikiama kaitinimo temperatūra. Kai formoje temperatūra yra mažesnė už nurodytąją, termoregulatoriaus rėlė praleidžia elektros srovę į kaitinimo elementą ir dega raudona indikatoriaus lemputė (2.11 pav.).



**2.11 pav.** Termoregulatorius darbo režime. Apatinis skaičius valdiklio ekrane – užduotoji temperatūra, viršutinis – esama temperatūra, matuojama formoje esančia termopora. Deganti raudonos spalvos lemputė ant rėlės reiškia, kad vyksta kaitinimas (per rėlę praleidžiama elektros srovė į kaitinimo elementą)

Bandinys slegiamas ir kaitinamas nustatyta laiką. Praėjus šiam laikui atsukamas preso slėgio mažinimo vožtuvas ir dinamometro indikatoriaus rodmuo grįžta į nulį. Forma išardoma ir ištraukiamas presuotų gumos granulių bandinys (2.12 pav.)



**2.12 pav.** Presuotų gumos granulių ruošinys.

Šiems gumos ruošiniams klijuojamos etiketės su jų presavimo laiku, presavimo jėga, temperatūra ir unikaliu bandinio kodu.

### 2.3 Bandinių gniuždymas

Bandiniams gniuždyti naudojama 25 tonų galios bandymų mašina, esanti KTU laboratorijoje (2.13 pav.). Duomenims realiu laiku užrašyti naudojama „PicoLog Recorder” programa, vėliau duomenys apdorojami „Excel” programos aplinkoje.



**2.13 pav.** 25 tonų galios bandymų mašina

Pirminiams bandymams buvo pagaminta 18 gumos granulių bandinių, kurių presavimo temperatūra 150°C, išlaikymo esant šiai temperatūrai laikas 5 min. Presavimo slėgis buvo keičiamas 1–6 MPa ribose. Esant kiekvienam slėgiui buvo pagaminta po 3 gumos bandinius. Šie gumos bandiniai mašinoje buvo gniuždomi iki suirimo. Kadangi esant 1 MPa slėgiui presuotų bandinių vidinė dalis nebuvo gerai sukepusi, gniuždant šiuos bandinius buvo daug vidinių plyšimų, todėl esant 1 MPa slėgiui presuotų bandinių gniuždymo rezultatai nepateikiami.



**2.14 pav.** Bandinio, formuoto esant 2 MPa slėgiui, gniuždymo bandymo eiga

2.14–2.18 paveiksluose parodyti skirtingų presavimo slėgių gumos granulių bandiniai juos gniuždant. Paveiksluose pateikta po vieną pavyzdį iš to presavimo slėgio (2–6 MPa) bandinių serijos. Kiekviename paveiksle pateiktas bandinio vaizdas gniuždymo pradžioje, gniuždymo proceso metu bei suiręs bandinys.



**2.15 pav.** Bandinio, formuoto esant 3 MPa slėgiui, gniuždymo bandymo eiga



**2.16 pav.** Bandinio, formuoto esant 4 MPa slėgiui, gniuždymo bandymo eiga

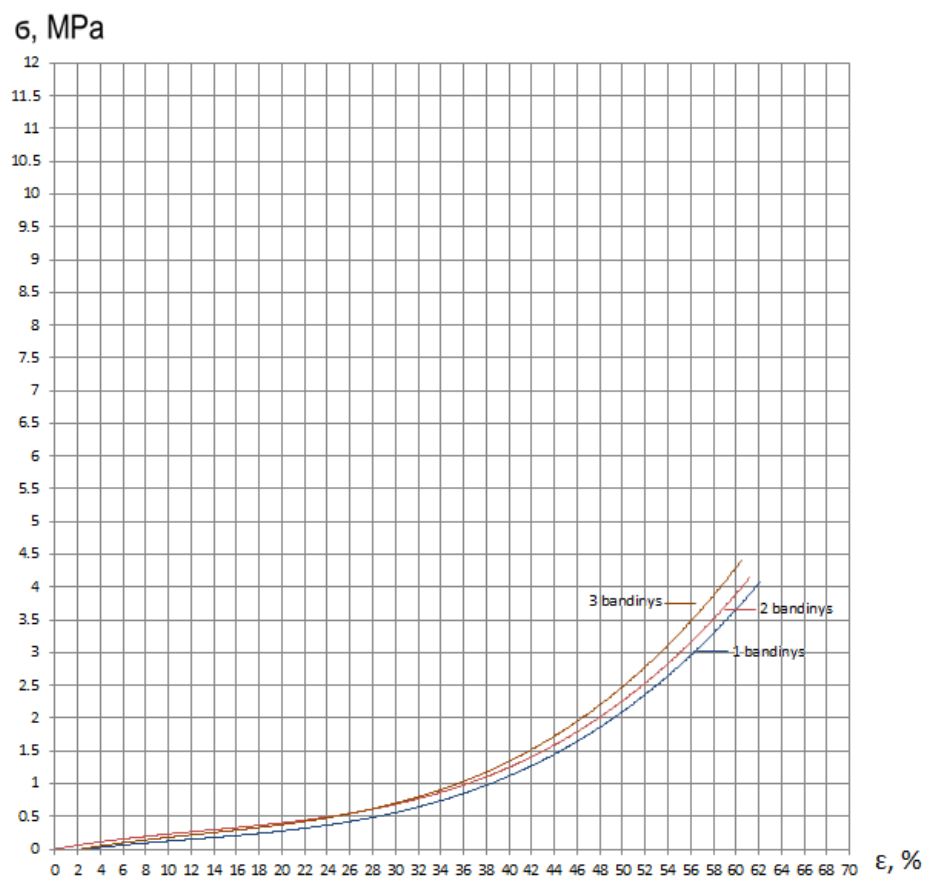


**2.17 pav.** Bandinio, formuoto esant 5 MPa slėgiui, gniuždymo bandymo eiga

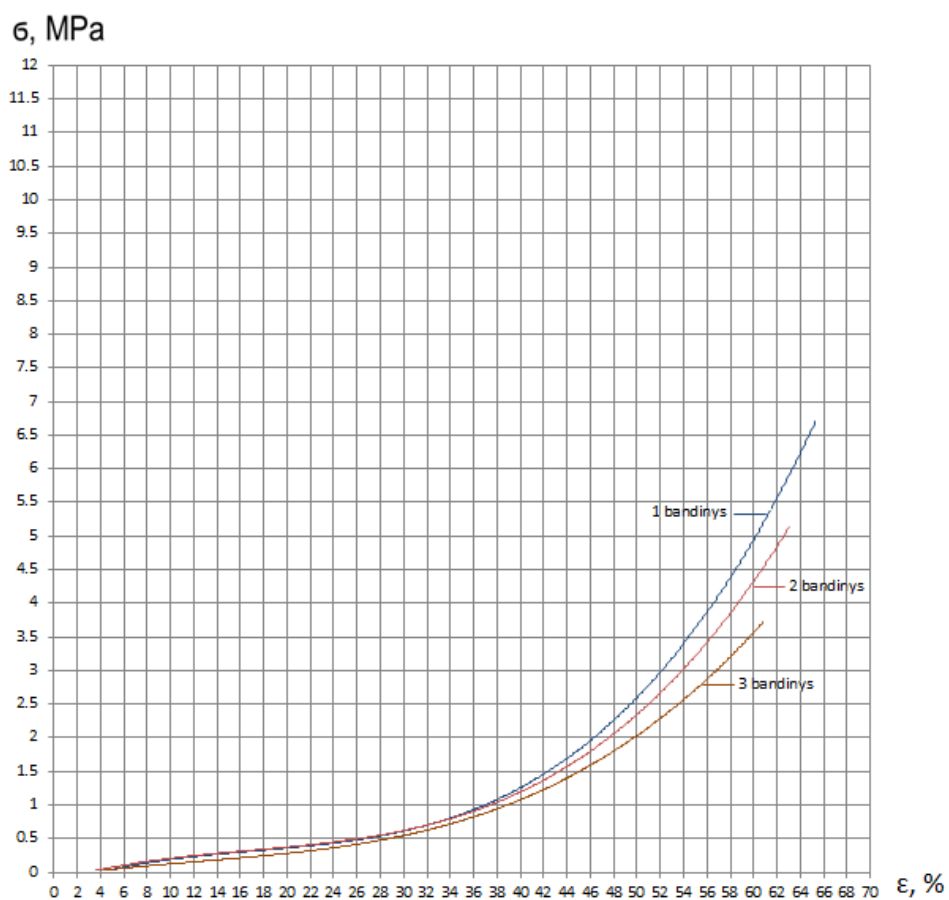


**2.18 pav.** Bandinio, formuoto esant 6 MPa slėgiui, gniuždymo bandymo eiga

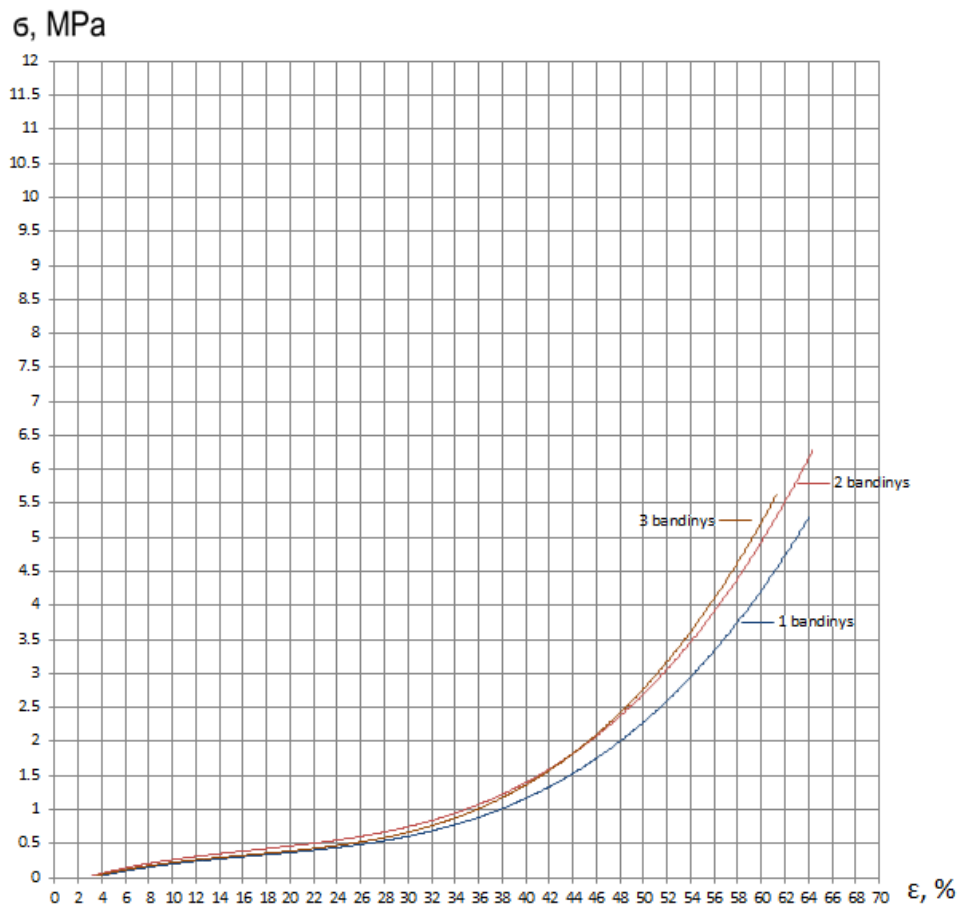
Toliau (2.19–2.23 pav.) pateikiamos kiekvieno bandinio įtempių–deformacijų priklausomybės. Ašyje x pateikiamos procentinės deformacijos, gaunamos deformacijos dydį dalinant iš pradinio bandinio aukščio, o y ašyje pateiktos įtempių reikšmės.



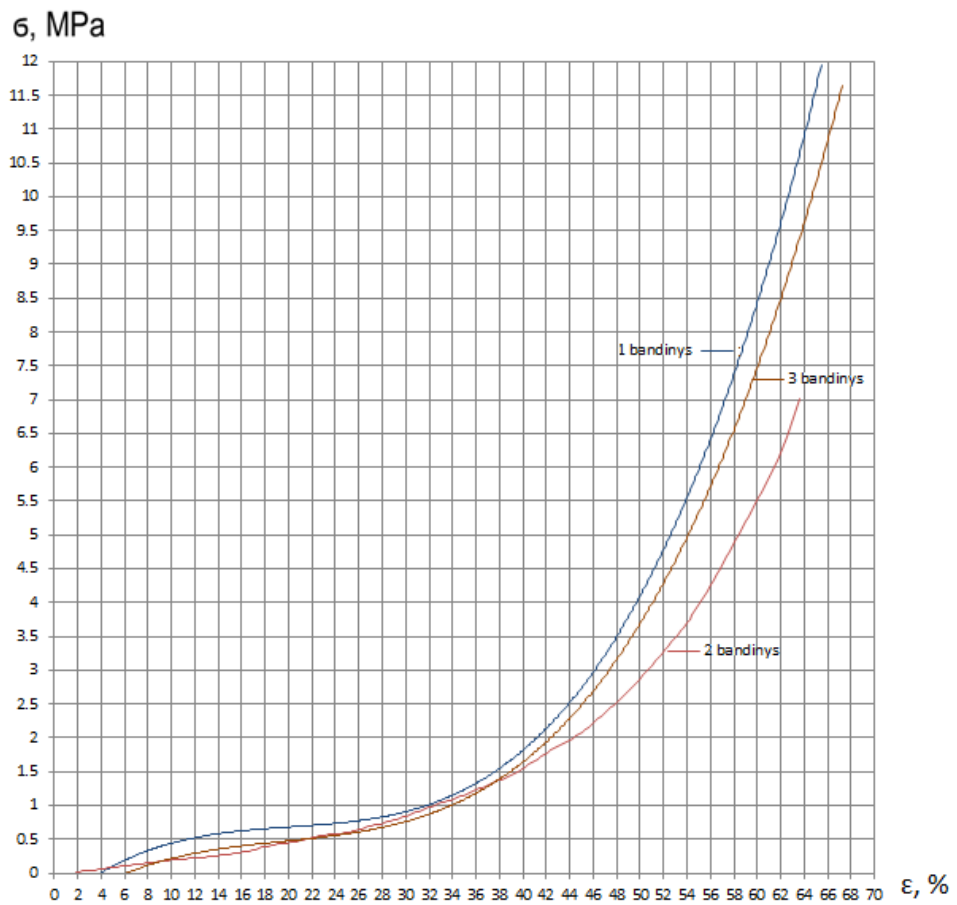
2.19 pav. Bandinių, formuotų 2 MPa slėgyje, įtempių–deformacijų kreivės



2.20 pav. Bandinių, formuotų 3 MPa slėgyje, įtempių–deformacijų kreivės

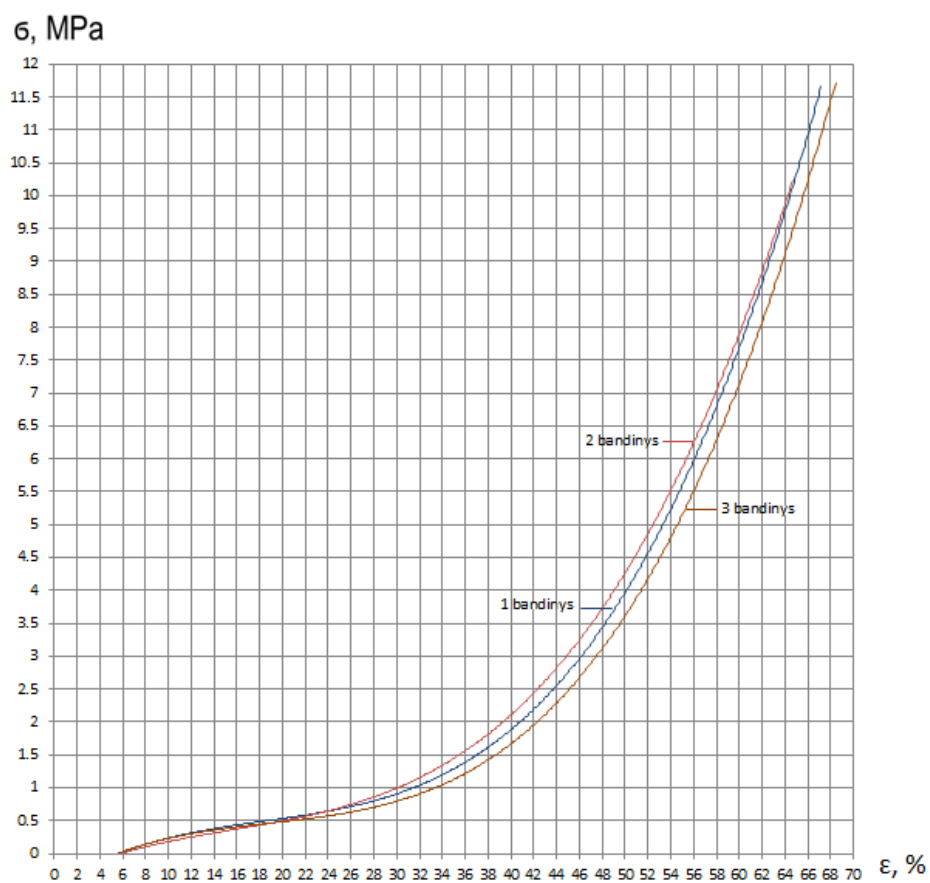


2.21 pav. Bandinių, formuotų 4 MPa slėgyje, įtempių–deformacijų kreivės



2.22 pav. Bandinių, formuotų 5 MPa slėgyje, įtempių–deformacijų kreivės





2.23 pav. Bandinių, formuotų 6 MPa slėgyje, įtempimų–deformacijų kreivės

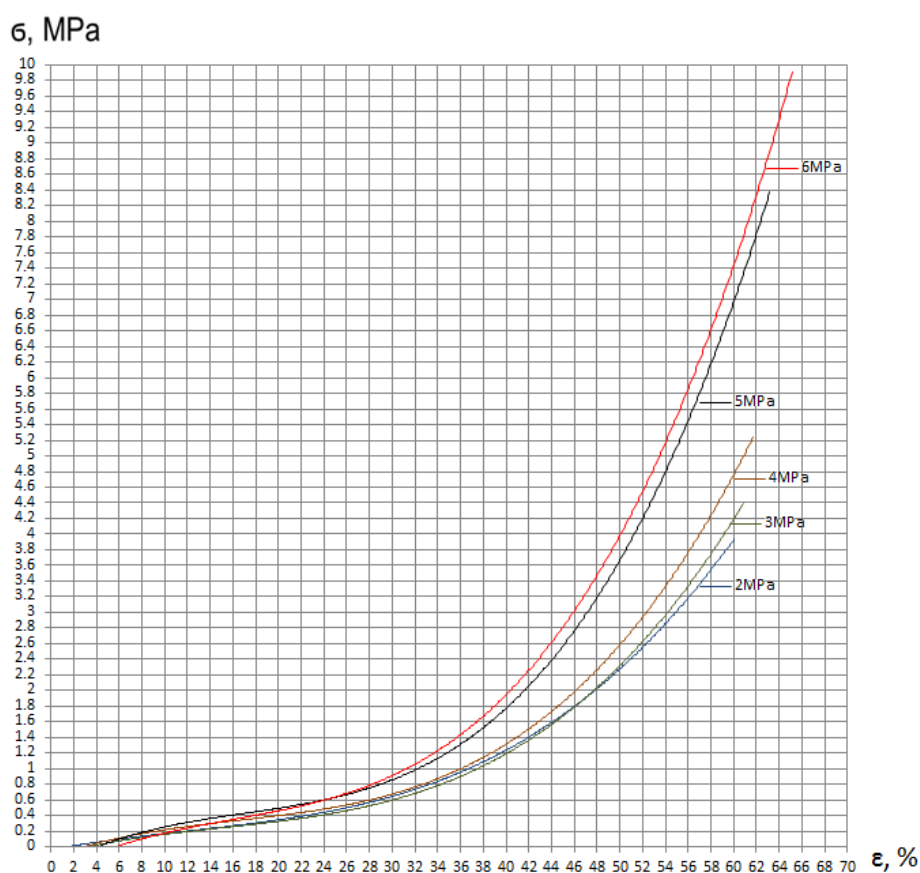
1 lentelė. Bandinių parametrai

Band. kodas	Presavimo parametrai			Bandinio matmenys			Deformacija $\epsilon$ , mm	Vid. $\epsilon$ , mm	Vid $\sigma$ , MPa
	Slėgis, MPa	Laikas, min	Temp., °C	Aukštis H, mm	Vid. H, mm	Skersmuo, mm			
215051	2	5	150	53	53,3	43,5	30	31,0	2,24
215052				54			33		
215053				53			30		
315051	3	5	150	51	51,3	43,5	33	32,3	2,25
315052				51			32		
315053				52			32		
415051	4	5	150	50	49,7	43,5	32	31,3	2,47
415052				49			31		
415053				50			31		
515052	5	5	150	47	47,3	43,5	31	32,3	3,54
515053				47			32		
515054				48			34		
615051	6	5	150	46	46,7	43,5	32	31,7	3,86
615052				47			31		
615053				47			32		

Visi pagrindiniai bandinių matmenų bei formavimo sąlygų parametrai pateikti 1 lentelėje. Paskutiniame stulpelyje nurodyti įtempiai, kai deformacijos yra 50%. Pagal šiuos įtempius bus

parenkamas geriausių savybių bandinys, nes toliau deformuojant bandinį jo skerpjūvis didėja (2.14–2.18 pav.) ir inžinerinė įtėpių – deformacijų priklausomybės kyla į viršų.

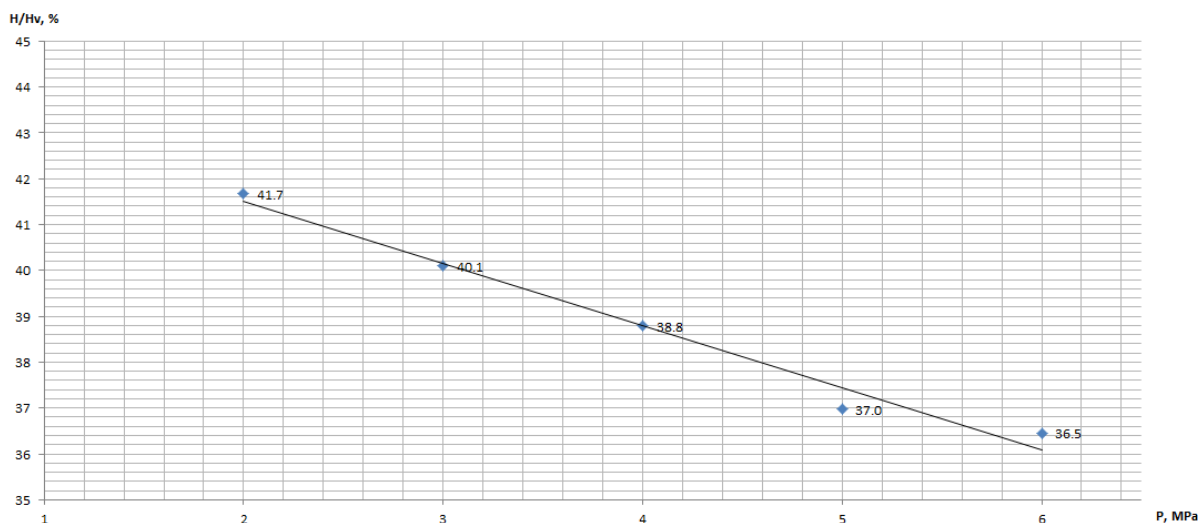
Gniuždymo bandymai buvo sustabdyti pastebėjus irimo pradžios požymius guminių bandinių paviršiuje, todėl nėra įtėpių kritimo gniuždymo kreivėse. Procentinės deformacijos reikšmės, kai įtėpiai  $\sigma$  lygūs 0, nėra lygios 0 dėl per mažo bandymų mašinos jautrumo ir mažos reikalingos jėgos guminiams bandiniams deformuoti bandymo pradžioje. Iš įtėpių – deformacijų kreivių matyti, kad gniuždymo bandymų rezultatai skirtingų presavimo slėgių bandiniams yra gana panašūs, kreivės neturi didelės sklaidos, todėl trims kiekvieno presavimo slėgio bandiniams bus nubraižyta po atstojamąją bendroje koordinacių sistemoje (2.24 pav.). Kadangi suvidurkinamos trys kreivės, atstojamoji brėžiama iki taško, kur nuktrūksta silpniausioji iš trijų kreivių.



**2.24 pav.** Visų presavimo slėgių, kai laikas  $t=5$  min, o temperatūra  $T=150^{\circ}\text{C}$  įtėpių–deformacijų priklausomybių kreivių palyginimas

Iš 2.24 pav. priklausomybių matyti, kad didėjant presavimo slėgiui didėja ir guminių bandinių stiprumas. Esant 2, 3 ir 4 MPa slėgiams formuoti bandiniai turi prastesnes stiprumines savybes gniuždant nei esant aukštesniems slėgiams (5 ir 6 MPa) presuoti gumos granulių bandiniai. Geriausias gautas bandinys buvo presuotas esant 6 MPa slėgiui, todėl kiti bandiniai bus presuojami esant tokiam slėgiui, keičiant tik presavimo laiką ir temperatūrą. Gauti rezultatai bus palyginti su 6 MPa bandinių gniuždymo įtėpių – deformacijų kreivėmis.

Pagal supresuotų gumos granulių bandinių aukščių ir pradinės formos gylio (128 mm) santykius, išreikštus procentais, brėžiama 2.25 pav. pavaizduota priklausomybė nuo presavimo slėgio. 2–6 MPa presavimo slėgio ribose bandinio aukščio priklausomybė yra tiesiška.



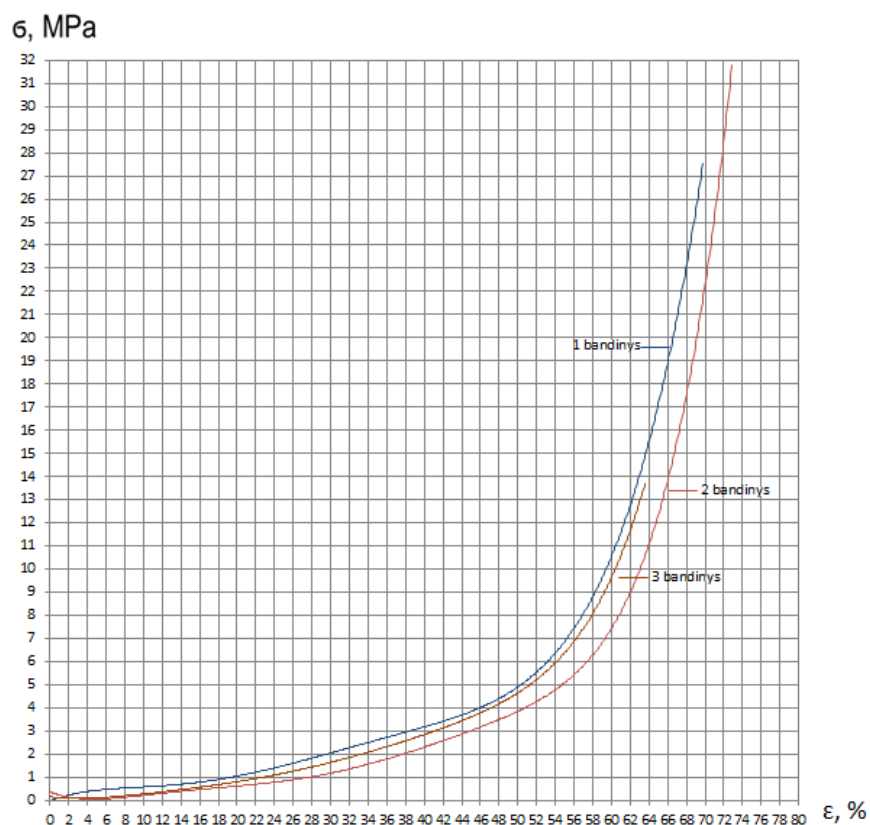
**2.25 pav.** Bandinių aukščio ir formos gylio santykio priklausomybė nuo presavimo slėgio

2.25 pav. priklausomybė ypač svarbi projektuojant formas, skirtas gaminiams iš presuotų gumos granulių, nes žinant reikiamus galutinio produkto matmenis ir presavimo slėgį galima nesunkiai parinkti formos išmatavimus.

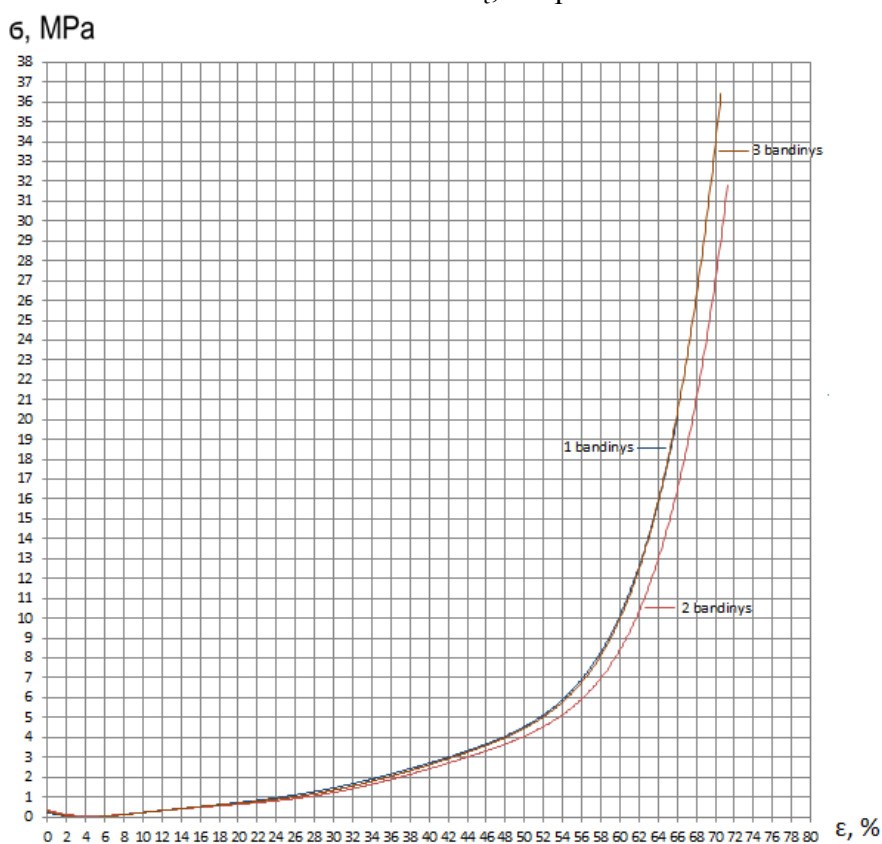
2.26 ir 2.27 pav. parodytuose grafikuose yra prailginto kaitinimo laiko bei padidintos presavimo temperatūros bandinių įtempių – deformacijų kreivės juos gniuždant. Bandinių, spausių esant 6 MPa slėgiui, įtempių – deformacijų priklausomybės turi mažesnę atotrūkį viena nuo kitos, nepriklausomai nuo skirtingo slėgio ir skirtingo kaitinimo laiko.

Iš 2.28 grafiko matyti, kad pakėlus temperatūrą ar pailginus presavimo laiką pagerėja ir mechaninės presuotų gumos granulių bandinių savybės. Pailginto presavimo laiko ir padidintos temperatūros gniuždymo rezultatai yra labai panašūs iki 64% deformacijų ribos, tuomet 10 minučių presuoti bandiniai suyra, o esant 180°C temperatūrai presuoti bandiniai pasiekia 66% deformavimo ribą ir 17,5 MPa įtempius. Didelis įtempių šuolis grafikuose priklauso ir nuo didėjančio bandinių ploto juos gniuždant, todėl būtų tikslinga vertinti įtempius tik iki maždaug 50% deformacijų ribos, kol bandinys dar nebūna atsirėmęs į presavimo plokštumas šoniniais paviršiais.

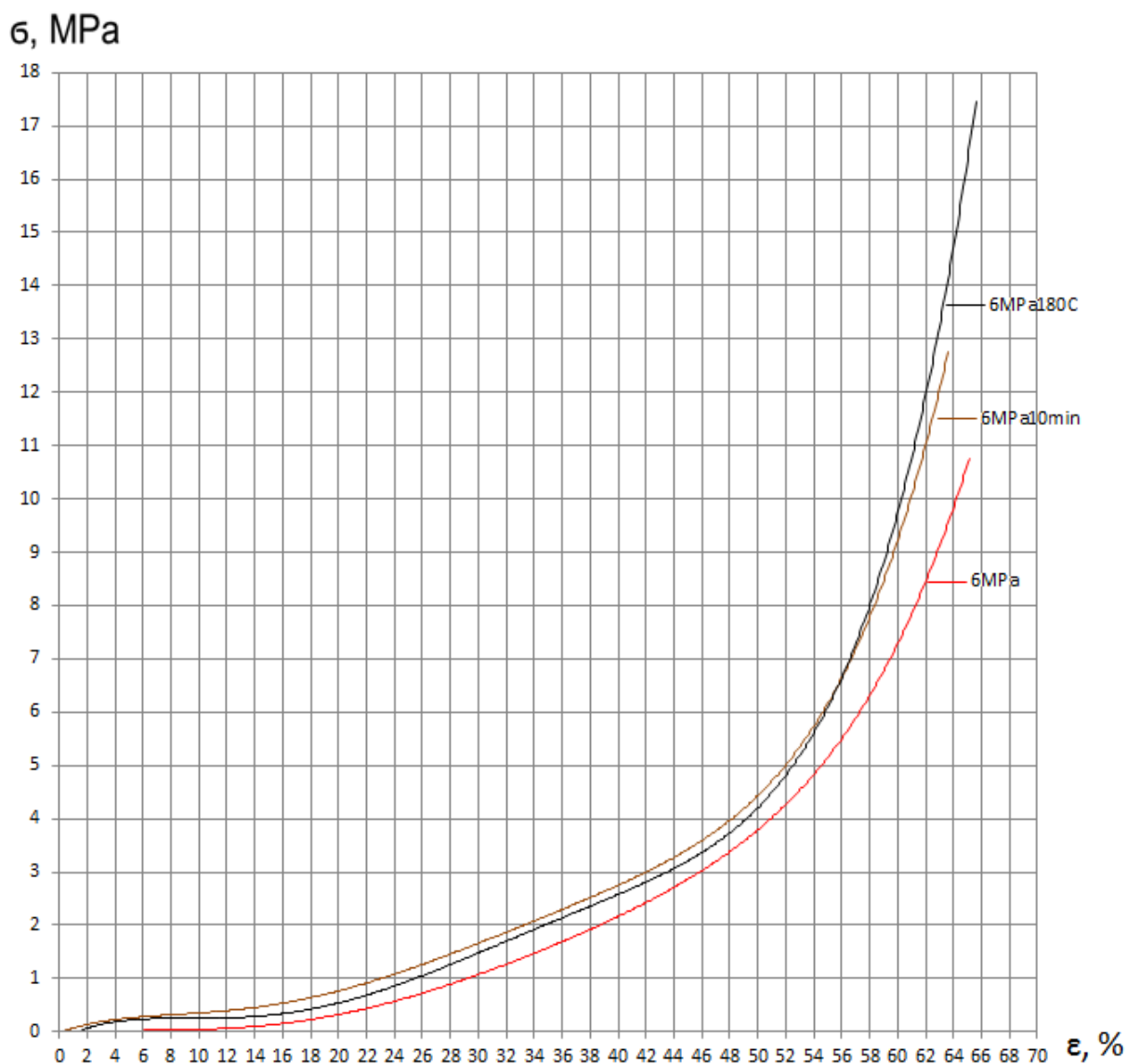
Bandiniai, formuoti išlaikant formoje 10 minučių, ties 50% deformacijų pasiekė 4,55 MPa įtempius, o bandiniai, formuoti esant 180°C temperatūrai pasiekė 4,42 MPa įtempius. Šis skirtumas labai nedidelis, todėl tolimesni (tempimo bandymų bandiniai) bus gaminami slegiant 6 MPa slėgiu, išlaikant 5 minutes ir presuojami esant 180°C temperatūrai. Pailginto kaitinimo laiko bandinys atmetamas, nes bet kokio produkto gamybai laikas yra svarbus faktorius, t.y. pakelti temperatūrą 30°C yra geresnis sprendimas, nei kaitinti bandinį 5-iomis minutėmis ilgiau.



**2.26 pav.** Bandinių, presuotų esant 6 MPa slėgiui, įtempių–deformacijų priklausomybių kreivės, kai kaitinimo laikas  $t=10$  minučių, temperatūra  $T=150^{\circ}\text{C}$



**2.27 pav.** Bandinių, presuotų esant 6 MPa slėgiui, įtempių–deformacijų priklausomybių kreivės, kai kaitinimo laikas  $t=5$  minutės, temperatūra  $T=180^{\circ}\text{C}$



2.28 pav. Skirtingų presavimo laikų ir temperatūrų, kai presavimo slėgis 6MPa, įtempimų – deformacijų kreivės

2 lentelė. Kitų bandinių parametrai

Band. kodas	Presavimo parametrai			Bandinio matmenys			Deformacija $\epsilon$ , mm	Vid. $\epsilon$ , mm	Vid $\sigma$ , MPa
	Slėgis, MPa	Laikas, min	Temp., °C	Aukštis H, mm	Vid. H, mm	Skersmuo, mm			
6150101	6	10	150	45	45,0	43,5	31	32,7	4,55
6150102				45			32		
6150103				45			35		
618051	6	5	180	46	46,3		32	34,0	4,42
618052				46			35		
618053				47			35		

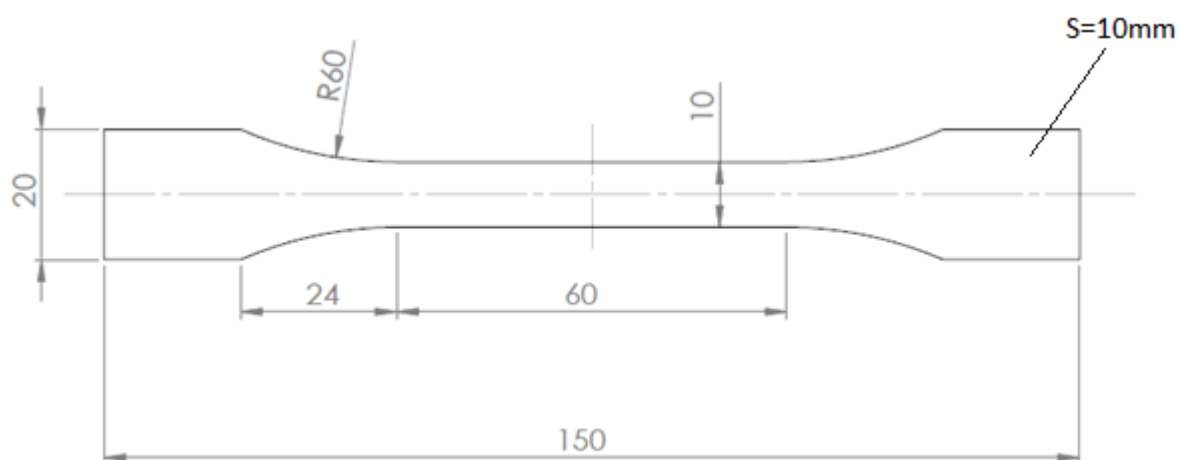
2 lentelėje nurodyti visi pagrindiniai bandinių matmenų bei formavimo sąlygų parametrai 6 MPa formavimo slėgio bandiniams su 180°C kaitinimo temperatūra ir 10 min. išlaikymo laiku.

## 2.4 Tempimo bandinių presavimo įranga ir presavimo eiga

Gumos granulių bandiniai tempimui gaminami analogiškai gniuždymo bandiniams, tik čia naudojama plieninė forma, parodyta 2.29 paveiksle. Šios formos matmenys parinkti pagal ISO527-2-1B standartą. Gaunamas matmenų, parodytų 2.30 paveiksle, bandinys.



2.29 pav. Forma su katinimo elementu



2.30 pav. Bandinio matmenys

Forma iki viršaus pripildoma gumos granulėmis, granulių perteklius nubraukiamas lygai su viršutine formos plokštuma, kelis milimetrus įspaudžiama viršutinė formos dalis. Tuomet tokia surinkta forma dedama į presą, kur prie kaitinimo elemento yra prijungiami gnybtai. Forma suspaudžiama atitinkama jėga ir tuomet įjungiamas kaitinimas. Formai pasiekus nustatytą temperatūrą yra pradedamas matuoti kaitinimo laikas. Praėjus šiam laikui atjungiamas kaitinimas, forma išimama iš preso ir jai dar nespėjus atvėsti forma išardoma ir išimamas gumos bandinys.



**2.31 pav.** Presuotų gumos granulių bandinys tempimo bandymams

Bandiniai gaminami pagal geriausias savybes gniuždant turėjusių bandinių formavimo parametrus, todėl presavimo slėgis bus lygus  $P=6$  MPa (12,462 kN), temperatūra  $T=180^{\circ}\text{C}$ , o presavimo laikas  $t=5$  min. Pagamintas presuotų gumos granulių bandinys tempimui parodytas 2.31 paveiksle. Visų bandinių bandomosios dalies ilgis yra 60 mm, plotis – 10mm, storis – 10mm.

## 2.5 Bandinių tempimas

Tempimo bandymams bus naudojama universali 10 kN „Testometric M350-10CT” medžiagų bandymo mašina (2.32 pav.). Ši mašina turi du stiebus, kuriais juda vienas iš griebtuvų. Judesys užduodamas servo varikliu. Bandymų mašina yra sujungta su kompiuteriu, kuriuo valdomi visi judesiai. Matavimams naudojama „winTest Analysis” programinę įrangą.



**2.32 pav.** Universali „Testometric” bandymų mašina ir kita darbo įranga

Bandymo mašinos parametrai [17]:

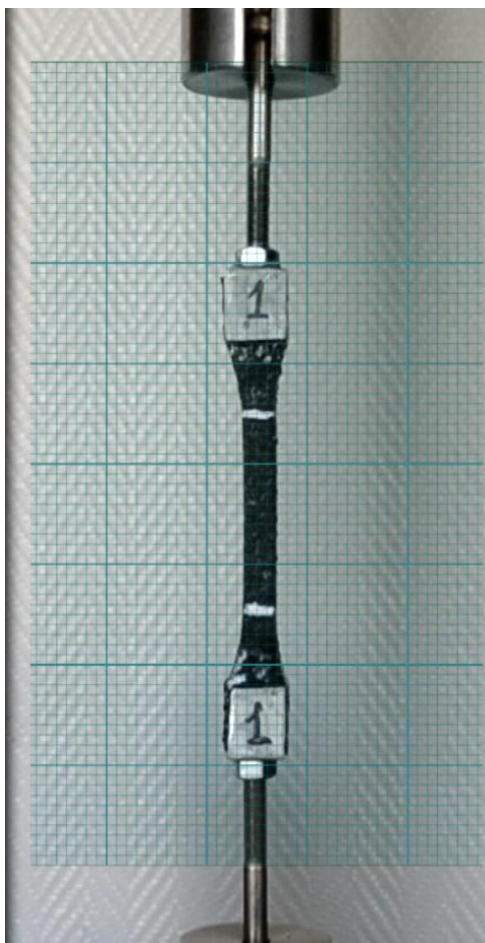
- mašinos galingumas – 10kN;
- judėjimo greičio ribos – nuo 0,001 iki 1000 mm/min;

- judėjimo greičio žingsnis – 0,001 mm/min;
- mašinos pastūmos ilgis vertikalia kryptimi – 1100 mm;
- mašinos ertmės tarp stiebų plotis – 295 mm.

Mašina kalibruota iki 0,4 kN jėgos.

Mašina gali atlikti tempimo, gniuždymo, šlyties bei kitus bandymus, priklausomai nuo naudojamų griebtuvų.

Tempimo bandymai yra filmuojami. Išmatuojamos skersinės deformacijos atitinkamais laiko momentais. Matavimams palengvinti yra panaudojamas tinkelis (2.33 pav.).



**2.33 pav.** Įtvirtinto bandinio vaizdas su tinkleliu

3 lentelė. 1-ojo tempimo bandymo parametrai

Laikas, s	Bandinio plotas, mm <sup>2</sup>	Jėga, N	Pailgėjimas, mm	Įtempis, MPa	Deformacija, proc.
0	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	93,44	35,80	5,00	0,38	8,33
20	89,20	53,70	10,00	0,60	16,67
30	85,05	67,80	15,00	0,80	25,00
40	79,01	79,90	21,00	1,01	35,00
50	73,20	90,50	26,00	1,24	43,33
60	65,79	99,10	31,00	1,51	51,67
70	64,00	104,80	36,00	1,64	60,00
71	Bandinys nutrūksta				

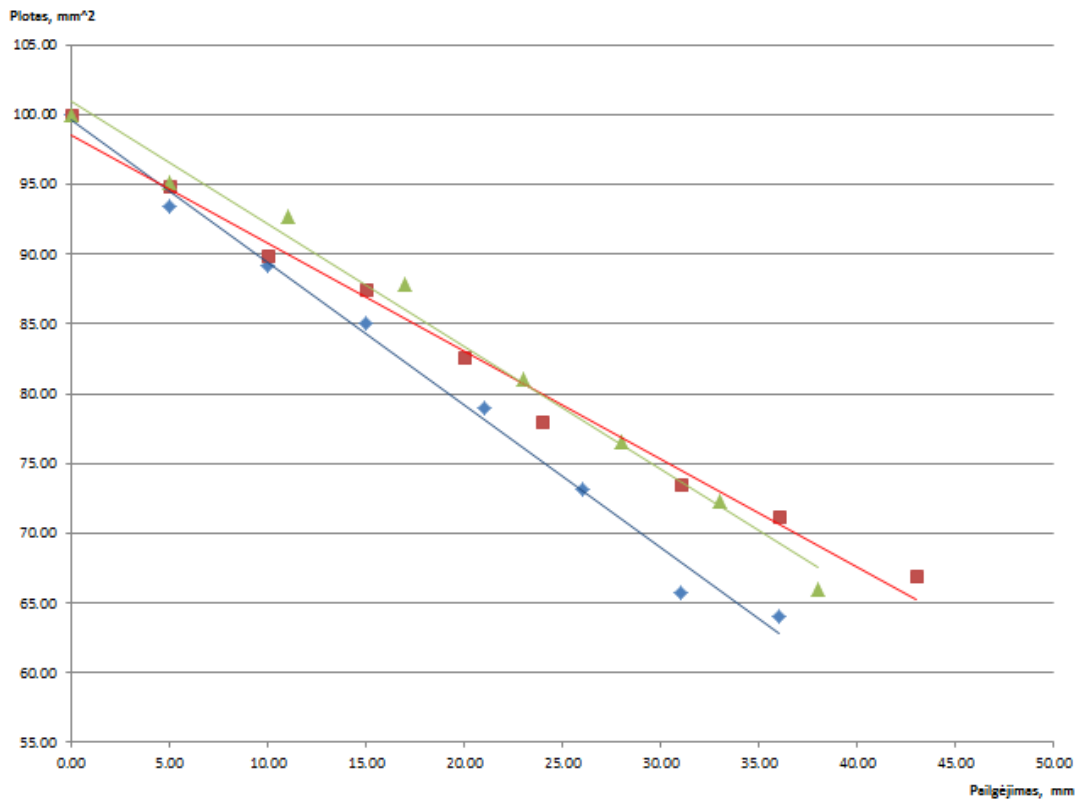


4 lentelė. 2-ojo tempimo bandymo parametrai

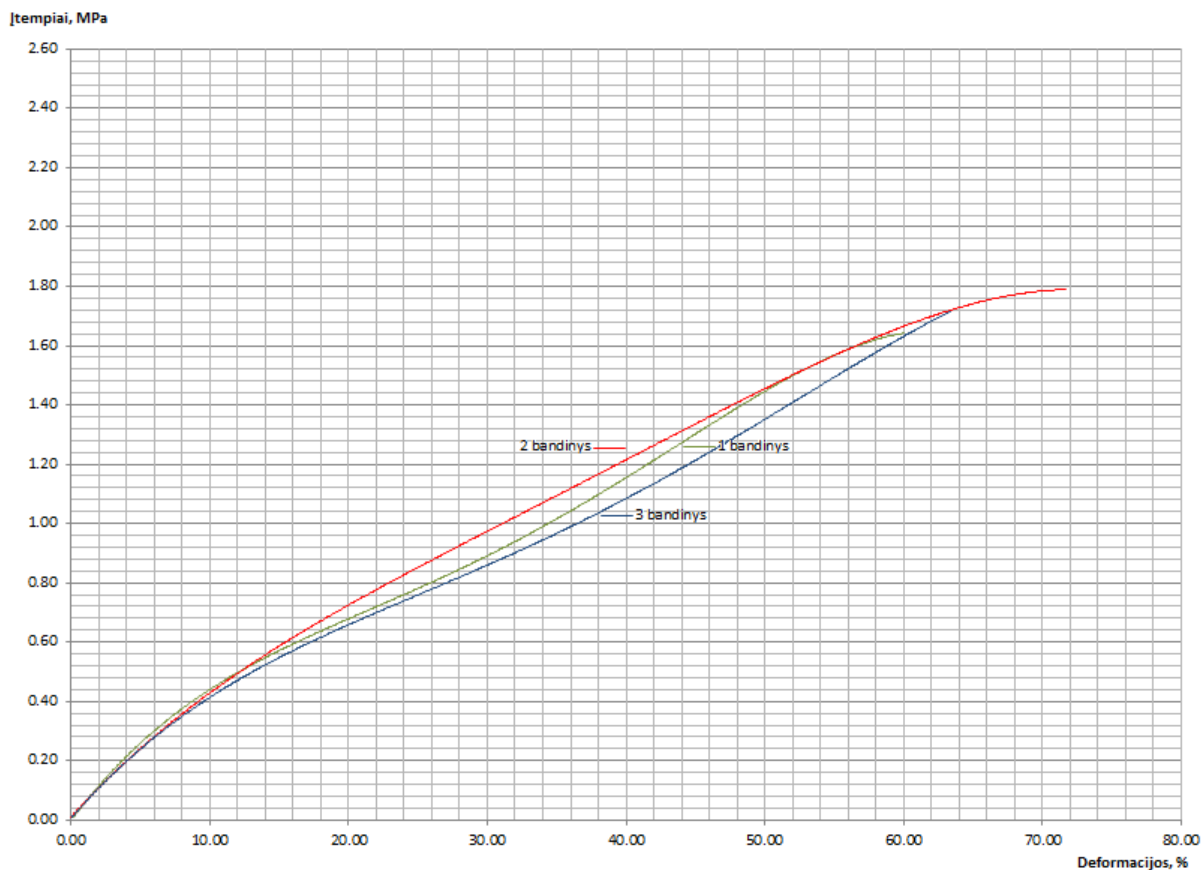
Laikas, s	Bandinio plotas, mm <sup>2</sup>	Jėga, N	Pailgėjimas, mm	Įtempis, MPa	Deformacija, proc.
0	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	94,87	37,50	5,00	0,40	8,33
20	89,88	56,60	10,00	0,63	16,67
30	87,43	72,20	15,00	0,83	25,00
40	82,64	85,90	20,00	1,04	33,33
50	77,99	98,10	24,00	1,26	40,00
60	73,47	109,00	31,00	1,48	51,67
70	71,26	118,00	36,00	1,66	60,00
80	66,94	120,00	43,00	1,79	71,67
84	Bandinys nutrūksta				

5 lentelė. 3-iojo tempimo bandymo parametrai

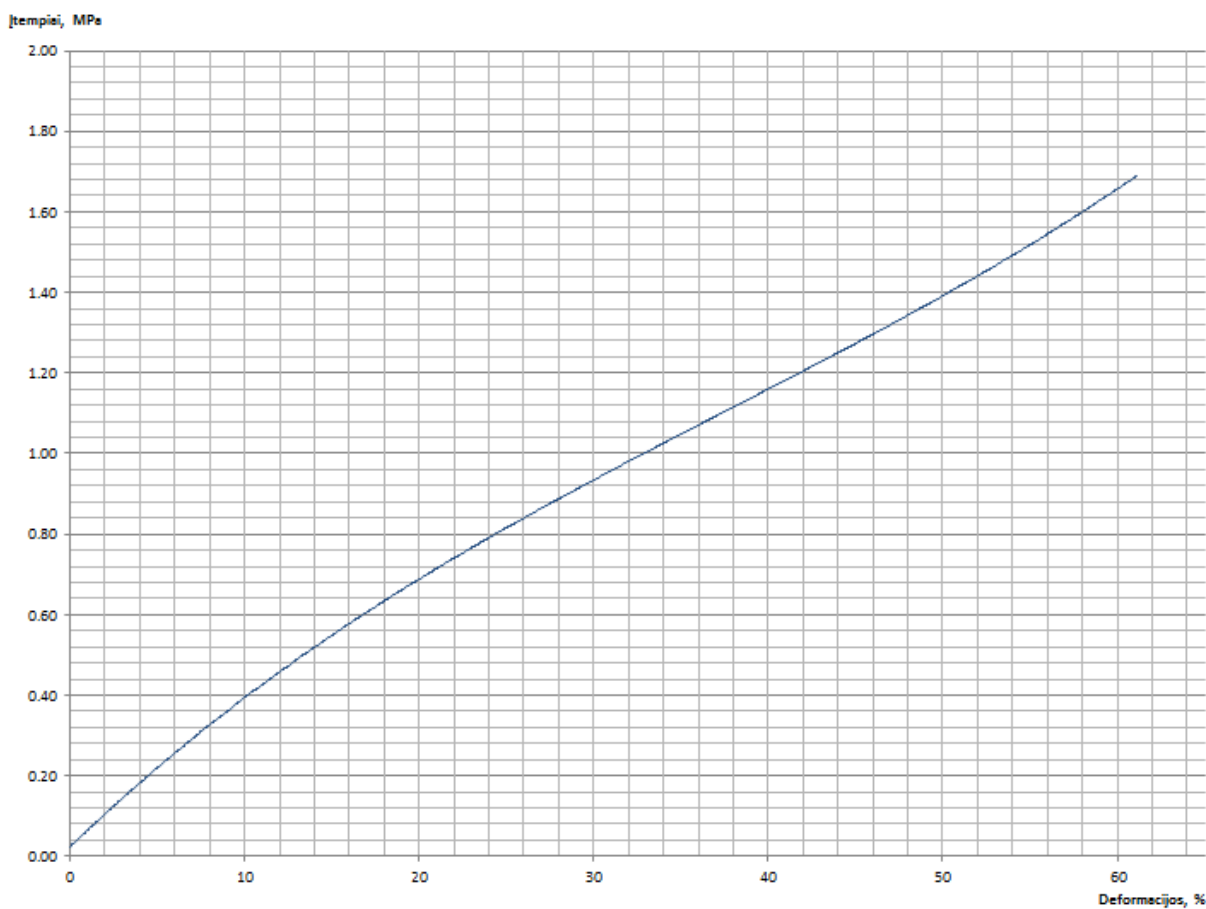
Laikas, s	Bandinio plotas, mm <sup>2</sup>	Jėga, N	Pailgėjimas, mm	Įtempis, MPa	Deformacija, proc.
0	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	95,06	35,60	5,00	0,37	8,33
20	92,64	56,60	11,00	0,61	18,33
30	87,89	72,00	17,00	0,82	28,33
40	81,00	85,30	23,00	1,05	38,33
50	76,56	97,00	28,00	1,27	46,67
60	72,25	106,80	33,00	1,48	55,00
70	66,02	113,50	38,00	1,72	63,33
71	Bandinys nutrūksta				



2.34 pav. Bandinio ploto sumažėjimo ir pailgėjimo priklausomybė



2.35 pav. Tempimo bandymų įtempių – deformacijų kreivės



2.36 pav. Tempimo bandymų įtempių – deformacijų kreivių atstojamoji

2.34 paveiksle pateikia bandinių ploto mažėjimo priklausomybę nuo bandinio pailgėjimo jį tempiant. Iš grafiko matyti, kad ši priklausomybė yra tiesiška. Turėdami išilgines ir skersines deformacijas, pagal lygtį galime apskaičiuoti išilgines ir skersines deformacijas [18]:

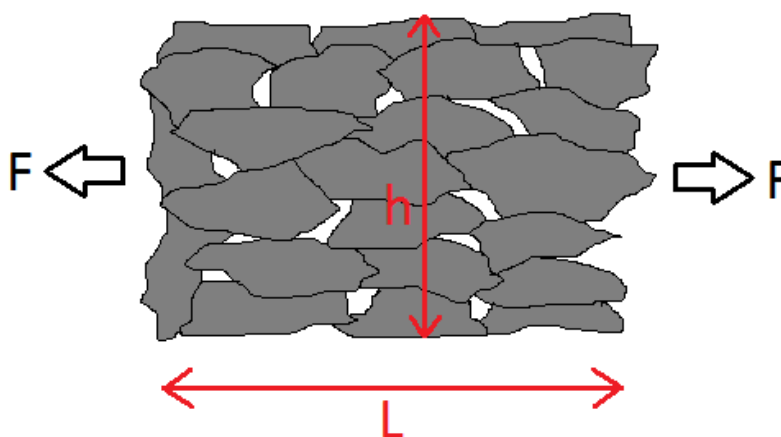
$$v = \frac{\varepsilon_q}{\varepsilon} \quad (1)$$

čia  $\varepsilon_q$  – skersinė deformacija,  $\varepsilon$  – išilginė deformacija.

6 lentelė. Puasono koeficientas

$\varepsilon_q$			$\varepsilon$			$v$		
1 band.	2 band.	3 band.	1 band.	2 band.	3 band.	1 band.	2 band.	3 band.
0,033	0,025	0,025	0,083	0,083	0,083	0,400	0,311	0,300
0,055	0,051	0,037	0,166	0,166	0,183	0,333	0,311	0,204
0,077	0,064	0,062	0,250	0,250	0,283	0,311	0,259	0,220
0,111	0,090	0,100	0,350	0,333	0,383	0,317	0,272	0,260
0,144	0,116	0,125	0,433	0,400	0,466	0,333	0,292	0,267
0,188	0,142	0,150	0,516	0,516	0,550	0,365	0,276	0,272
0,200	0,155	0,187	0,600	0,600	0,633	0,333	0,259	0,296
-	0,181	-	-	0,716	-	-	0,253	-
Vidurkis						0,342	0,280	0,260
Puasono koef.						0,294		

Atlikus trijų bandinių skersinių ir išilginių deformacijų matavimus gautas puasono koeficientas yra 0,294. Daugumos gumų puasono koeficientas siekia 0,48–0,5 [19]. Gautasis puasono koeficientas galimai yra mažas dėl to, kad supresuotos granulės atplyšinėja kryptimi, kuria bandinį veikia jėga, todėl bandinio ilgis didėja greičiau, nei mažėja bandinio skerspjūvio plotas. 5.8 paveiksle pavaizduota, kaip gali pasiskirstyti gumos granulės bandinyje jį tempiant. Veikiant jėgai F gumos granulės tysta išilgine kryptimi, ilgis L didėja, o bandinio plotis h mažėja, tačiau jėga, kurios reikia granulėms atplyšti viena nuo kitos yra mažesnė nei jėga, kurios reiktų perplėsti gumos granulę, todėl atsiranda tarpai tarp gumos granulių išilgine kryptimi ir išilginės deformacijos didėja greičiau nei skersinės.



5.8 pav. Tempiamo gumos bandinio granulių atplyšimas

Jeigu puasono koeficientas tempiant yra mažas (palyginti su kitomis gumomis) dėl atplyštančių granulių, galima teigti, kad gniuždant gumą šie tarpai neatsiranda, o gumos puasono koeficientas bus artimas 0,5. Tai nebūtų unikalus atvejis, kadangi kai kurios viskoelastinės medžiagos taip pat turi skirtingus puasono koeficientus jas tempiant ir gniuždant [20].

Tempimo bandymų rezultatai parodė, kad tempiant šią gumą galima pasiekti 1,79 MPa įtempis ir 71,67% deformacijos. Guma ima plyšti granulėms atitrūkstant vienai nuo kitos, ryškus kakliukas nesusidaro. 3-5 lentelėse pateikti kiekvieno iš bandinių parametrai, o 2.35 paveiksle pavaizduotos tikrosios įtempių – deformacijų kreivės.

Trijų tempimo bandymų tikroji įtempių – deformacijų kreivių atstojamoji pavaizduota 2.36 paveiksle. Suvidurkinus gautus duomenis, šios gumos, kuri formuota esant 180°C temperatūrai, 6 MPa slėgiui ir išlaikyta 5 minutes, stiprumo riba (pagal pradinį bandinio plotą) tempiant yra:

$$\sigma_u = \frac{F}{A} \quad (1)$$

čia  $F$  – bandinį veikianti jėga, N,  $A$  – bandinio plotas, mm<sup>2</sup>.

Įstačius į formulę jėgas ir plotą:

$$\sigma_u = \frac{(104,8 + 120 + 113,5)/3}{100} = \frac{112,77}{100} = 1,128 \text{ MPa}$$

Šis  $\sigma_u = 1,128$ MPa dydis yra mažesnis už eksperimentiškai gautąją reikšmę, prie kurios bandinys nutrūksta, nes formulėje naudojamas pradinis skerspjūvio plotas.

### 3. Skaičiuojamasis medžiagos modelis

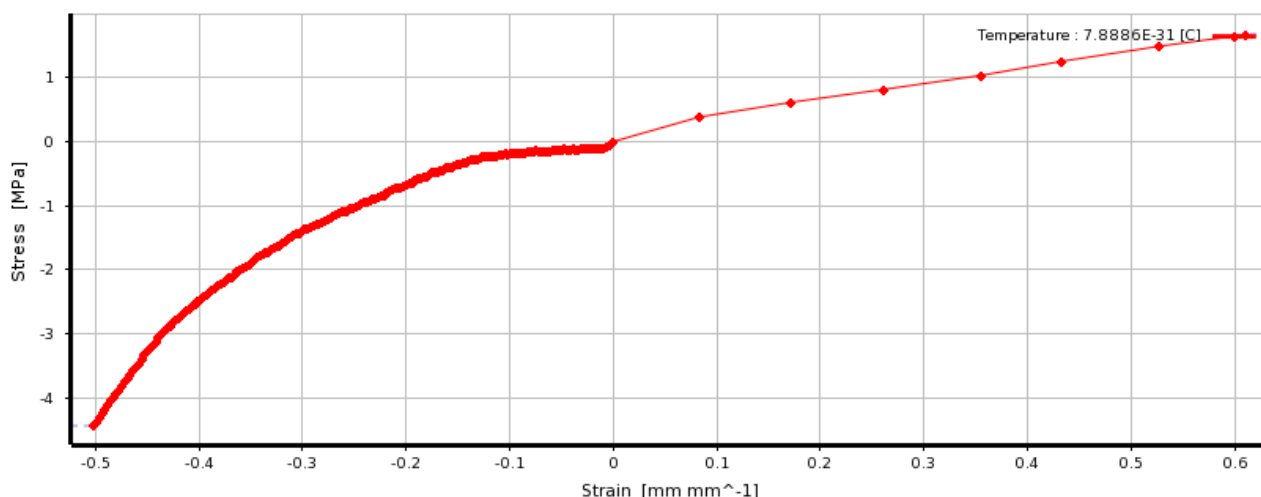
#### 3.1 Modelio sudarymas

Norint panaudoti gautuosius rezultatus pasitelkiant kompiuterines programas ir panaudoti baigtinių elementų metodą sukurtiems modeliams reikia sudaryti gautos medžiagos skaičiuojamąjį modelį kompiuterinėje programoje. Šiuo atveju bus naudojama „ANSYS Workbench 16.2“ programa ir panaudoti tempimo ir gniuždymo bandymų rezultatai. Sprenžiamas netiesinis uždavinys.

	B	C
1	Strain (mm mm <sup>-1</sup> )	Stress (MPa)
2	-0.50093	-4.4253
3	-0.4982	-4.3688
4	0.40549	4.7884

3.1 pav. Vienašio tempimo rezultatų lentelė

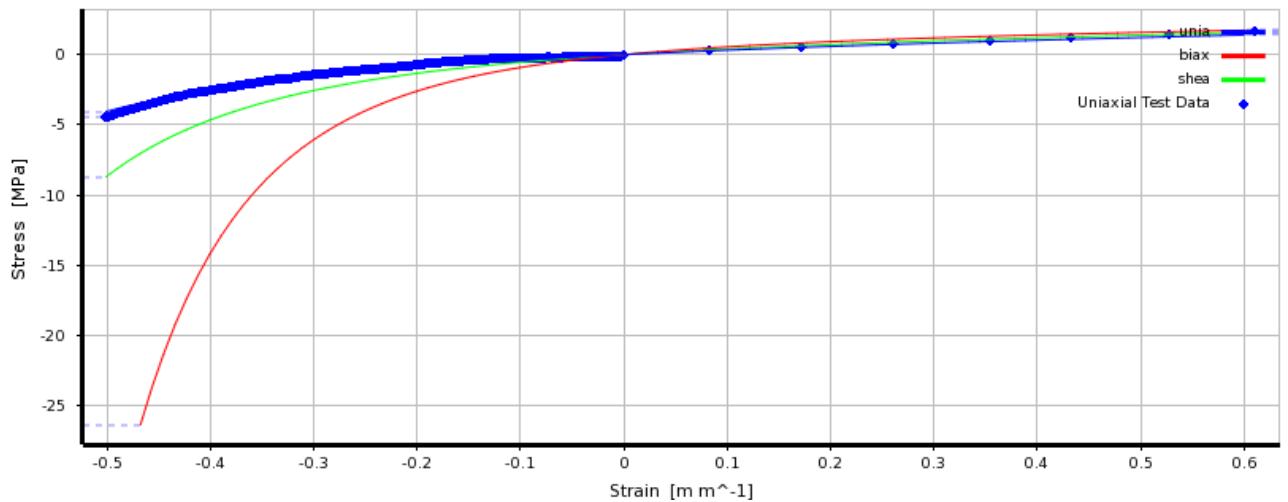
Kuriant naują medžiagą „ANSYS Workbench“ programoje į „*Uniaxial Test Data*“ (vienašio tempimo duomenys) įvedami gauti gniuždymo ir tempimo bandymų rezultatai (3.1 pav.). Gniuždymo bandymo rezultatai turi neigiamas įtempių ir deformacijų reikšmes, tempimo bandymo – teigiamas. Gniuždymo bandymo rezultatai vedami tik iki 50% deformacijų ribos, nes esant didesnėms deformacijoms, dėl didėjančio skerspjūvio ploto įtempiai ima ženkliai augti. Gauta kreivė parodyta 3.2 paveiksle.



3.2 pav. Įtempių – deformacijų kreivė “ANSYS Worbkench” programos aplinkoje

Sudarant modelį bus naudojamas vienas iš „*Hyperelasticity*“ (elastingumo) matematinių modelių. Skaičiavimuose bus naudojamas „*Neo-Hookean*“ elastingumo matematinis modelis, nes pritaikius „*Curve fitting*“ (kreivės pritaikymo) įrankį modelis geriausiai atitiko pagal taškus nubrėžtą kreivę (3.3 pav.). Pagal modelį prie jau turimų „*Uniaxial Test Data*“ (vienašio bandymo

rezultatai) pridedami ir teoriniai „*Shear*“ (atplyšimo) ir „*Biaxial*“ (dviašio) rezultatai. Šis modelis naudojamas dėl savo galimybės skaičiuoti šiek tiek suspaudžiamus modelius (dauguma matematinių elastingumo modelių skaičiuoja tik nesuspaudžiamus modelius). „*Neo-Hookean*“ modelis naudojamas nedidelių deformacijų simuliacijoms, todėl tinka kaip bandomosios gumos modelis [21].



3.3 pav. Sukurto gumos erelastingumo modelio kreivės

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Uniaxial Test Data	Tabular		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	Scale	1		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	Offset	0	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	Neo-Hookean			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	Initial Shear Modulus Mu	1.1543	MPa	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	Incompressibility Parameter D1	0	MPa^-1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	Curve Fitting	Fit Type: Neo-Hookean			
9	Error Norm for Fit	Absolute Error			
10	Uniaxial Test Data	Tabular		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	Biaxial Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.			
12	Shear Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.			
13	Volumetric Test Data	Add this experimental data, to include it in the curve fitting.			

3.4 pav. „*Neo-Hookean*“ erelastingumo matematinio modelio parametrai

Matematinio modelio parametrai (3.4 pav.) yra automatiškai išskaičiuojami iš kreivių ir pritaikomi modeliui. „*Material Constant C10*“ yra programos išskaičiuota medžiagos konstanta, „*Incompressibility Parameter D1*“ – nesuspaudžiamumo parametras. Medžiagoms, kurių puasono koeficientas yra artimas ar lygus 0,5 nesuspaudžiamumo koeficientas yra 0 [22]. Kadangi tempiant gumą dėl tarp granulių atsirandančių plyšių jos puasono koeficientas yra 0,294 (žr. 6 lentelę), o gniuždant gumą tokie plyšiai neatsiranda, laikysime, kad gniuždomos gumos puasono koeficientas yra artimas ar lygus 0,5. Nesuspaudžiamumo koeficientas [23]:

$$d = \frac{2}{K} \quad (3)$$

čia K – tūrio modulis.

$$\frac{G}{K} = \frac{3(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

čia  $G$  – šlyties modulis,  $\nu$  – puasono koeficientas.

Priimta, kad puasono koeficientas lygus 0,5, tuomet įstačius į formulę 4:

$$\frac{G}{K} = \frac{3(1 - 1)}{2(1 + 0,5)} = \frac{0}{3} = 0$$

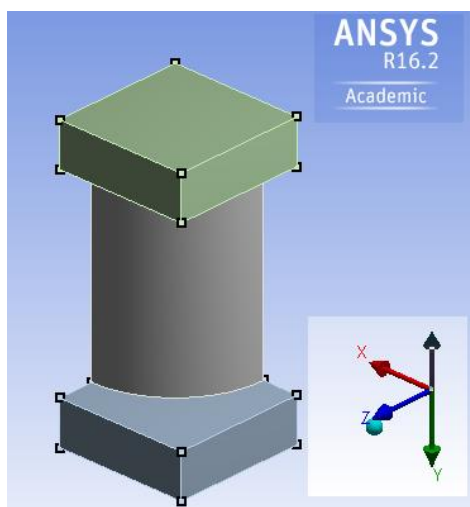
$$\frac{G}{K} = 0$$

Iš išraiškos matyti, kad šlyties modulio ir tūrio modulio santykis yra lygus nuliui. Tai reiškia, kad šlyties modulis yra lygus nuliui arba tūrio modulis yra lygus begalybei, tačiau gumos (polimero) šlyties modulis visuomet yra didesnis už 0 [24]. Tuomet tūrio modulis  $K = \infty$ . Įstačius į formulę 3:

$$d = \frac{2}{\infty} = 0$$

Siekiant patikrinti ar matematinis medžiagos modelis yra artimas eksperimentų rezultatams bus sumodeliuotas gniuždymo eksperimento bandinys. Šis bandinys bus apkraunamas jėgomis, kurių dydžiai sutampa su eksperimentuose naudotų jėgų dydžiais ir bus palygintos kompiuterinio modelio ir realaus bandinio deformacijų dydžiai.

Programos „ANSYS Workbench 16.2“ aplinkoje modeliuojamas gniuždomo bandinio ketvirtis (3.5 pav.), todėl simuliacijoje modelis bus apkraunamas keturis kartus mažesne jėga nei tikruosiuose bandymuose. Toks modelis naudojamas skaičiavimams pagreitinti. Viršutinei ir apatinei plokštėms parenkama medžiaga yra plienas. Apatinė plokštė suvaržoma „Fixed support“ įrankiu. Taip pat suvaržomas viršutiniosios plokštės judėjimas, paliekant galimybę tik slinkti Y ašies atžvilgiu.

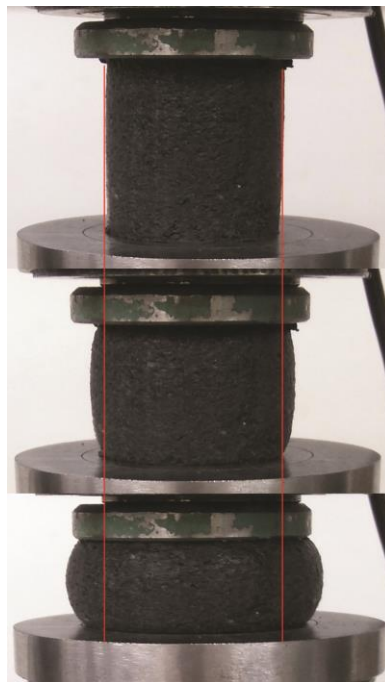


3.5 pav. Skaičiuojamasis modelis



**3.6 pav.** Trinties įtaka bandinio formai [25]

Kaip parodyta 2.14–2.18 paveiksluose, spaudžiamas bandinys įgauna statinaitės formą (3.6 pav.). Tai įvyksta dėl trinties jėgų tarp guminio bandinio ir metalinių paviršių [25]. Gniuždymo bandymų metu pastebėta, kad gniuždomo bandinio kontakto plotas su plokšte kinta labai nežymiai, todėl galima teigti, kad trinties koeficientas tarp guminio bandinio ir plokštelių yra didelis ir artimas 1 ir paviršiai vienas kitu slysta labai nežymiai. Tai matyti 3.7 paveiksle. Raudonomis linijomis pažymėtas bandinio skersmuo kinta nežymiai, tačiau minimaliai didėja, todėl statinės trinties koeficientą laikysime  $k=0,9$  [26].

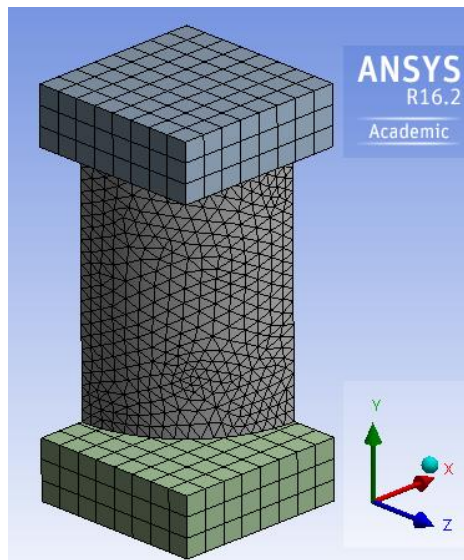


**3.7 pav.** Gumos bandinio plėtimasis gniuždant

Modelis padalinamas baigtinių elementų tinkleliu (3.8 pav.). Spaudžiančioms plokštėms parenkama medžiaga „*Structural steel*“ (struktūrinis plienas), o viduryje esančiai daliai parenkama sukurtoji medžiaga. Apatinė plokštė suvaržoma „*Fixed support*“ (įtvirtinta atrama) įrankiu. Taip pat suvaržomas viršutiniosios plokštės judėjimas, paliekant galimybę tik slinkti Y ašies atžvilgiu. Suvaržomas bandinio galinių paviršių judėjimas X bei Z ašimis, sukimasis aplink X, Y ir Z ašis.



Modelio viršutinioji plokštė –Y ašies kryptimi apkraunama keturis kartus mažesnėmis jėgomis nei buvo apkraunamas bandinys eksperimentų metu, o deformacijų rezultatai ir palyginimas su eksperimentiniais duomenimis pateikiami 7-oje lentelėje.

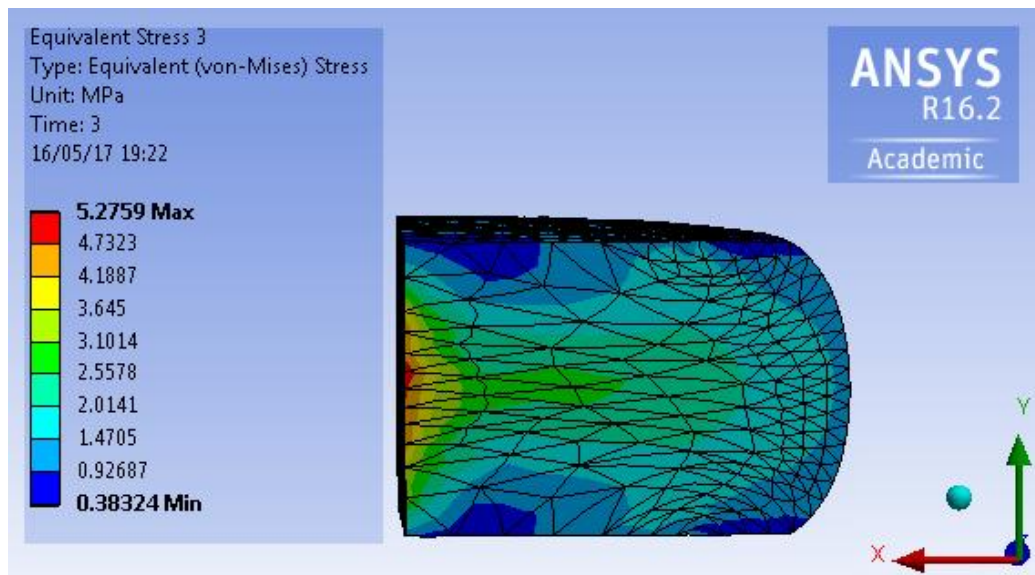


3.8 pav. Modelis padalintas baigtinių elementų tinkleliu

7 lentelė. Eksperimentinės ir apskaičiuotosios deformacijų reikšmės

	Bandinio nr./ Elastingumo modelis	Bandinio aukštis, h	Deformacija, %				Deformacija, mm			
			500N	1000N	3000N	5000N	500N	1000N	3000N	5000 N
Eksp.	618051	46	14,0	19,2	35,1	44,5	6,4	8,8	16,1	20,5
	618052	46	15,5	21,1	37,3	46,6	7,1	9,7	17,2	21,4
	618053	47	14,6	20,1	35,9	45,0	6,7	9,4	16,9	20,7
Modelis	<i>Neo-Hookean (absolute error)</i>	46	7,8	14,3	33,9	46,3	3,6	6,6	15,6	21,3
	<i>Neo-Hookean (normalized error)</i>	46	14,3	18,7	41,5	53,0	6,6	8,6	19,1	24,4

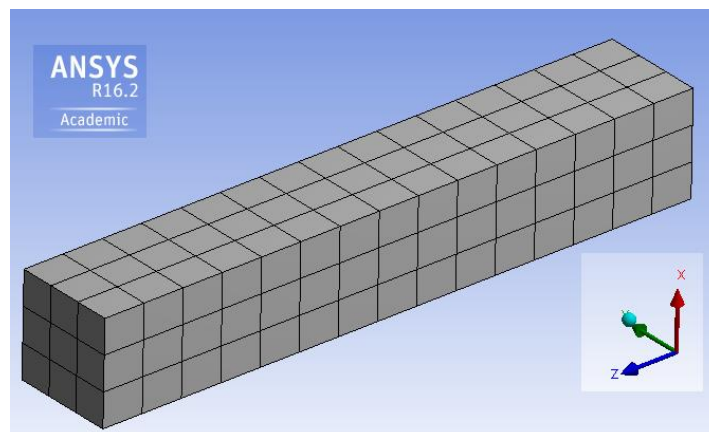
Panaudojant kreivės pritaikymo įrankį (3.4 pav.) buvo panaudoti „normalized error“ ir „absolute error“ kreivių pritaikymo metodai, dėl to lentelėje 7 pateikti saičiavimų rezultatai panaudojus abu modelius. Iš rezultatų matyti, kad naudojant „absolute error“ metodą skaičiavimo rezultatai yra artimesni tikriesiems rezultatams veikiant didesnėms jėgoms, o naudojant „normalized error“ metodą rezultatai artimesni veikiant mažoms jėgoms. Didelių deformacijų zonose didelę įtaką pradeda daryti trinties jėgos tarp bandinio ir metalinių plokštelių, todėl galima sakyti, kad tikslesnis yra „normalized error“ metodas, nes apskaičiuotosios deformacijos veikiant 500-1000N jėgoms yra artimesnės nei naudojant „absolute error“ metodą. Modelis parodė gerus rezultatus prie jėgų, mažesnių nei 1000N gniuždymo simuliacijoje (deformacijos nuo tikrųjų skyrėsi iki 2,4%).



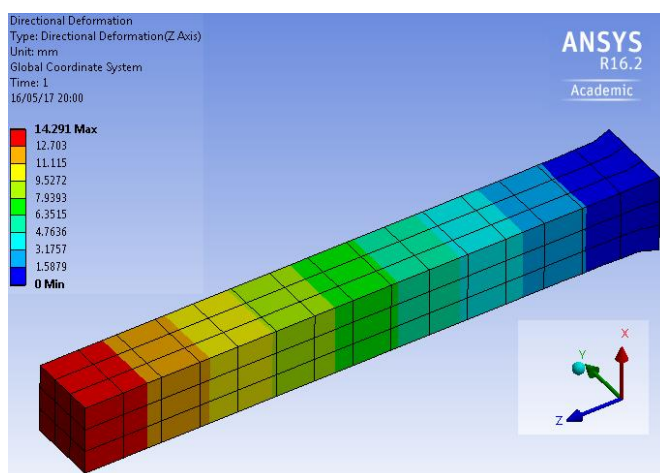
**6.9 pav.** Įtempių pasiskirstymo laukai modelyje

Kadangi skaičiuojamasis modelis yra gana artimas eksperimentiniams duomenims, galima teigti, kad ir įtempių bandinio viduje pasiskirstymas atitinka eksperimentiškai išmatuotų bandinių įtempių pasiskirstymą. 6.9 paveiksle pateiktas modelio ketvirčio, apkrauto 5000N jėga įtempių pasiskirstymas. Iš paveikslo matyti, kad viduryje bandinio susidaro padidėjusių įtempių zona. Taip nutinka dėl to, kad ši zona yra ne tik gniuždoma Y ašimi, bet ir tempiama X ašimi tystančių gumos sluoksnių, todėl gumos bandinys pradeda irti iš vidaus. Tai pastebima ir eksperimentiškai, nes suirusių bandinių išorinis paviršius būna mažiau pažeistas nei bandinio vidus.

Tempimo rezultatams patikrinti „ANSYS Workbench 16.2“ programos aplinkoje sumodeluojamas 60 mm ilgio, 10 mm pločio ir 10 mm aukščio strypelis. Parenkama sukurtoji medžiaga, strypelis padalinamas baigtinių elementų metodu (3.10 pav.). Tempiamo strypelio deformavimasis parodytas 3.11 paveiksle, o kai kurių skaičiuojamojo modelio išilginių, skersinių deformacijų ir įtempių reikšmių palyginimas su eksperimentiniais duomenimis pateiktas 8–10 lentelėse.



**3.10 pav.** Strypelis tempimo bandymų rezultatams patikrinti



**3.11 pav.** Tempiamo strypelio deformacijos

8 lentelė. Pirmojo tempimo bandinio rezultatų palyginimas

Jėga	Išilginės deformacijos, mm		Skersinės deformacijos, mm		Įtempiai, MPa	
	Eksp.	Modelio	Eksp.	Modelio	Eksp.	Modelio
35,8	5,0	9,7	0,33	0,75	0,38	0,42
79,9	21,0	25,7	1,11	1,68	1,01	1,16
99,1	31,0	34,1	1,89	2,08	1,51	1,59

9 lentelė. Antrojo tempimo bandinio rezultatų palyginimas

Jėga	Išilginės deformacijos, mm		Skersinės deformacijos, mm		Įtempiai, MPa	
	Eksp.	Modelio	Eksp.	Modelio	Eksp.	Modelio
37,5	5,0	10,2	0,26	0,78	0,40	0,45
56,6	10,0	16,6	0,52	1,19	0,63	0,74
109,0	31,0	38,9	1,43	2,28	1,48	1,84

10 lentelė. Trečiojo tempimo bandinio rezultatų palyginimas

Jėga	Išilginės deformacijos, mm		Skersinės deformacijos, mm		Įtempiai, MPa	
	Eksp.	Modelio	Eksp.	Modelio	Eksp.	Modelio
35,6	5,0	9,6	0,25	0,74	0,37	0,42
85,3	23,0	28,0	1,00	1,80	1,05	1,28
113,5	38,0	41,0	1,88	2,37	1,72	1,96

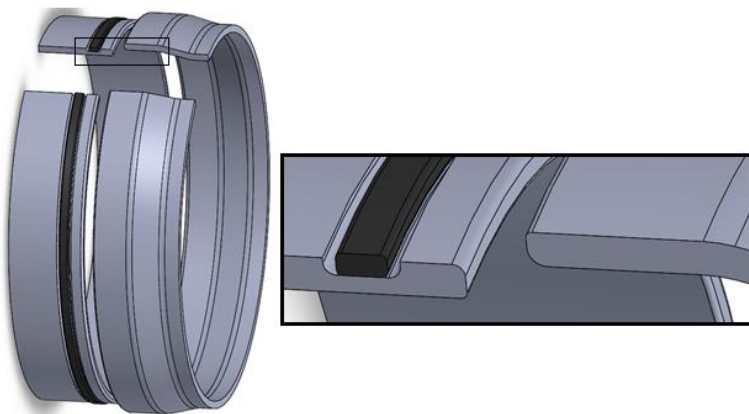
Iš palyginimo rezultatų (8–10 lentelės) matyti, kad modelis, apkrautas vienodo dydžio jėgomis kaip ir eksperimentuose naudoti bandiniai, pailgėja daugiau. Modelio skersinės deformacijos yra didesnės nei eksperimentų metu gautos deformacijos, o dėl mažesnio bandinio

ploto atsiranda didesni įtempiai. Tempimo bandymo simuliacija turėjo iki 19% paklaidą lyginant simuliacijos įtempius su eksperimentiniais duomenimis.

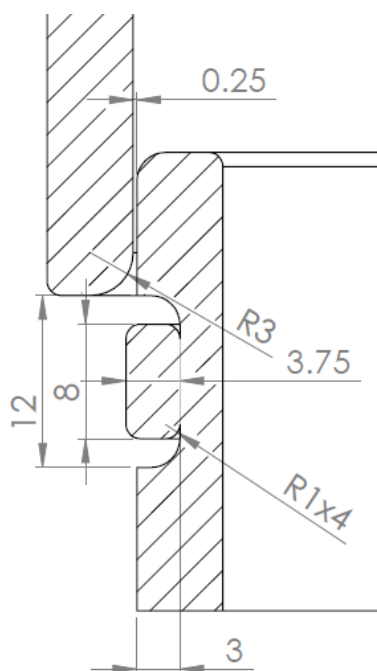
Sudarytas skaičiuojamasis modelis geriausiai tinka gniuždomoms ir tempiamoms detalėms modeliuoti, nes medžiagos modelis sudarytas pagal šių eksperimentų bandymų rezultatus. Gniuždant modelį „ANSYS Workbench 16.2“ programos aplinkoje, esant mažiems įtempiams gauti rezultatai panašūs į eksperimentinius rezultatus.

### 3.2 Modelio pritaikymas

Kaip skaičiuojamojo medžiagos modelio patikrinimo pavyzdys bus panaudotas 300 mm vidinio skersmens vamzdžio sujungimas su gumine tarpine (3.12 pav). Gumos medžiaga bus parinkta medžiaga aprašyta darbe. Pagrindiniai vamzdžio jungiamosios dalies ir tarpinės matmenys parodyti 3.13 paveiksle.

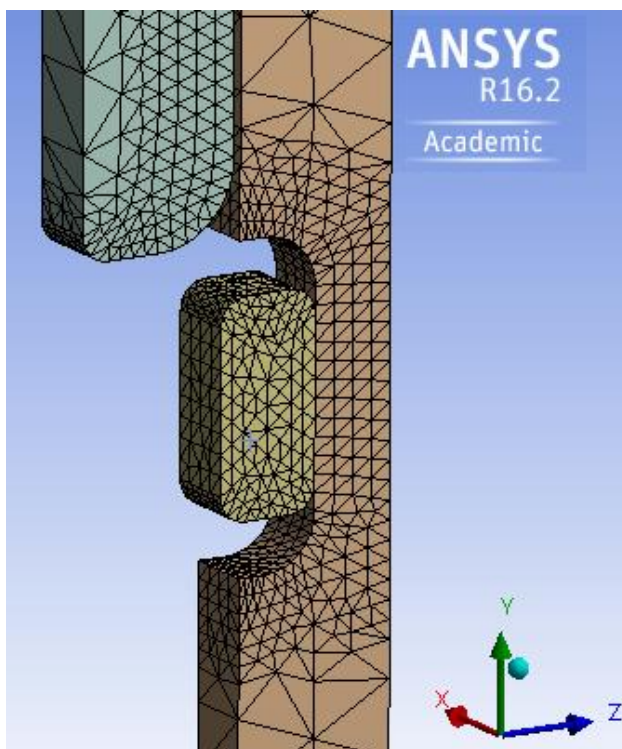


3.12 pav. Vamzdžio dalis su tarpine

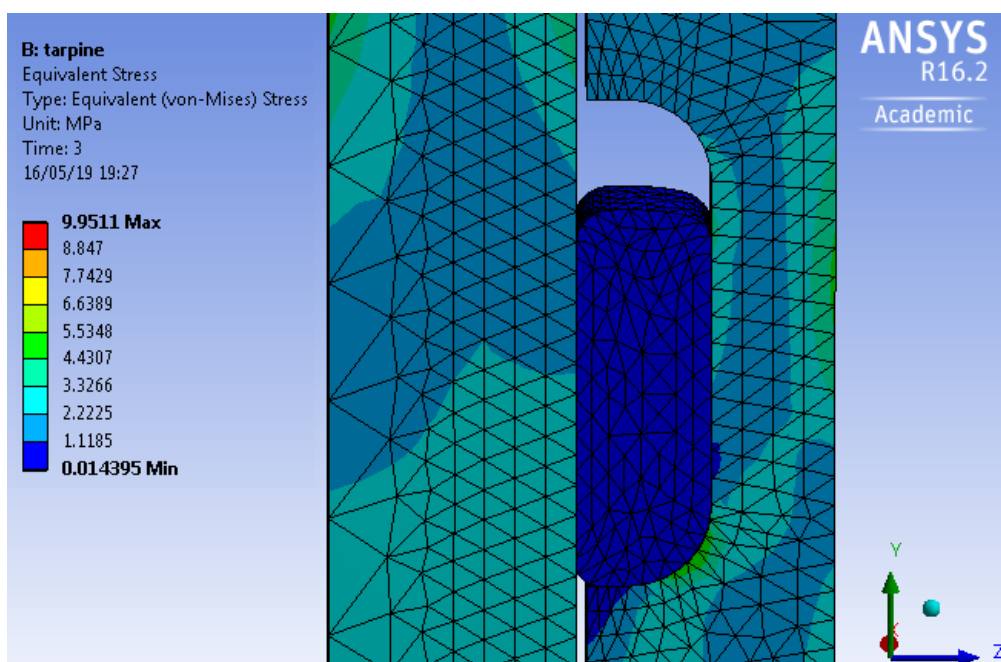


3.13 pav. Pagrindiniai jungties matmenys

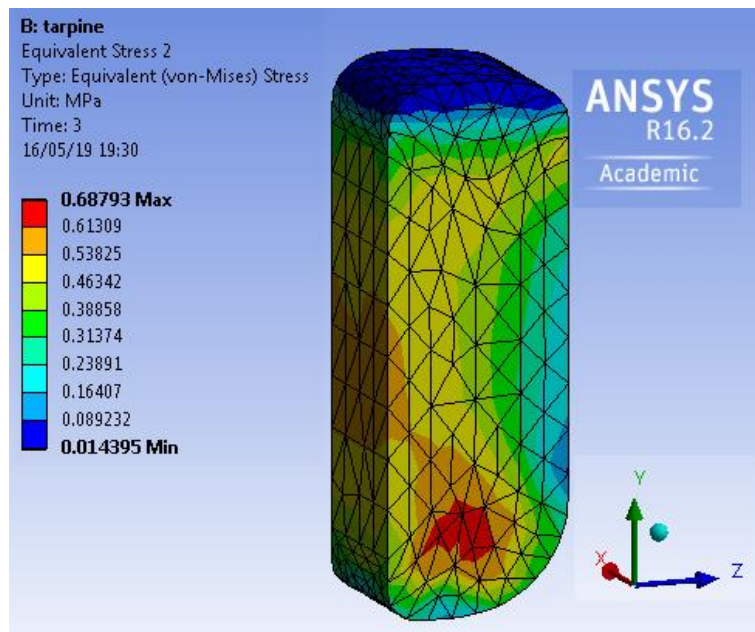
Sujungimas modeliuojamas „ANSYS Workbench 16.2“ programos aplinkoje. Apatinė vamzdžio dalis įtvirtinama „Fixed support“ įrankiu, viršutinei daliai užduodamas judesys –Y kryptimi naudojant „Displacement“ įrankį. Iš šonų detalė suvaržoma „Frictionless support“ įrankiu. Tarp apatinės detalės ir tarpinės parenkamas „Frictional“ kontaktas, kurio trinties koeficientas 0,8, o tarp tarpinės ir viršutinės vamzdžio dalies parenkamas kontaktas su 0,1 trinties koeficientu. Laikysime, kad tarpinė patepta hermetiku, kuris sumažina trintį. Modelis padalinamas baigtinių elementų tinkleliu (3.14 pav.).



3.14 pav. Modelis padalintas baigtinių elementų tinkleliu



3.15 pav. Įtempių laukai ties tarpine



**3.16 pav.** Įtempių laukai tarpinėje

Didžiausių įtempių zonos formuojasi vamzdyje (3.15 pav). Vamzdžio stiprumas – 250 MPa (medžiaga „*Structural steel*“ parinkta iš „ANSYS Workbench 16.2“ medžiagų katalogo). 7.16 paveiksle parodyti tarpinės įtempių laukai. Didžiausi įtempiai tarpinėje yra 0,688 MPa. Šie įtempiai neviršija 5-ame skyriuje nustatytos stiprumo ribos  $\sigma_u = 1,128$  MPa, todėl stiprumas pakankamas.

## Išvados

Darbo metu buvo pagamintos formos kaitinti ir presuoti cilindriniais bei varpelio formos gumos granulių bandiniams. Buvo panaudotas presas, kaitino elementai, termoreguliatorius ir kita įranga.

Pagaminti 25 granulių bandiniai gniuždymo bandymams (dėl kelių prastos kokybės bandinių ar netinkamai atliktų bandymų į ataskaitą įtraukta 21 bandinio eksperimentiniai rezultatai) ir 5 tempimo bandiniai (į ataskaitą įtraukti 3 bandinių eksperimentiniai rezultatai).

Gumos granulių bandiniai buvo gniuždomi ir tempiami. Pastebėta, kad presuojant didesne jėga gaunami geresnių stipruminių savybių bandiniai. Taip pat įtakos turi ir temperatūra, ir išlaikymo esant tai temperatūrai laikas. Geriausiais suformuotais bandiniais laikyti 6 MPa slėgiu spausti bandiniai, suformuoti išlaikant 5 minutes esant 180°C temperatūrai. Šie bandiniai slegiant pasiekė 66% deformacijų ir 17,5 MPa įtempius, tačiau didelis įtempių kreivių šuolis buvo įtakotas didėjančio bandinio ploto, todėl kurdami modelį laikėme, kad maksimalios deformacijos gniuždant yra 50%. Gumos granulių bandiniai tempiant pasiekė 71,7% deformacijų ir 1,79 MPa tikruosius įtempius. Tempiant bandinius buvo įvertintas skerpjūvio sumažėjimas. Iš tempimo bandymų apskaičiuota gumos stiprumo riba  $\sigma_u = 1,128$  MPa. Apskaičiuotas puasono koeficientas tempiant  $\nu=0,294$ . Šis koeficientas nėra tikslus gniuždomos gumos atveju, nes bandinio pailgėjimas vyksta dėl viena nuo kitos atplyštančių granulių.

Skaičiuojamajam medžiagos modeliui kompiuterinėje programoje „ANSYS Workbench 16.2“ buvo panaudotas elastingumo modelis „Neo-Hookean“. Modelyje panaudoti tempimo ir gniuždymo bandymų rezultatai. Skaičiuojamasis modelis patikrintas tempimo ir gniuždymo bandymų simuliacijomis programos aplinkoje. Modelis parodė gerus rezultatus prie jėgų, mažesnių nei 1000N gniuždymo simuliacijoje (deformacijos nuo tikrųjų skyrėsi iki 2,4%). Tempimo bandymo simuliacija turėjo iki 19% paklaidą matuojant įtempius. Iš gniuždomo bandinio simuliacijos pastebėta, kad bandinio viduje atsiranda didelės įtempių zonos, kuriose yra ir gniuždomų ir tempiamų paviršių, todėl net ir gniuždomų modelių skaičiavimuose modelio stiprumo riba laikėme tempimo bandymų metu gautą reikšmę.

Medžiagos modeliui pritaikyti buvo sumodeliuotas vamzdžio sujungimo ir tarpinės modelis. Jis padalintas baigtinių elementų tinkleliu. Simuliacijos metu didžiausi gauti įtempiai buvo 0,688 MPa, tačiau jie neviršijo stiprumo ribos  $\sigma_u = 1,128$  MPa, todėl tarpinės stiprumas pakankamas.

## LITERATŪRA

1. H.J. Manuel, W.Dierkes, Recycling of rubber, volume 9 number 3, 1997 [žiūrėta 2015 04 25]. Prieiga per internetą:  
<https://books.google.lt/books?id=XCuBK4c9ZeYC&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>
2. Richard Andreas Jacobus Smits. A process for activating vulcanized waste rubber particles and a process for producing a rubber-like article using said activated waste rubber particles [žiūrėta 2015 04 22]. Prieiga per internetą:  
<http://www.google.com/patents/CA2097432C?cl=en>
3. Ian Walters, Philip Hough. Rubber compositions, methods of making rubber compositions, rubber and rubber-containing articles [žiūrėta 2015 04 22]. Prieiga per internetą:  
<https://www.google.com/patents/WO2005028552A1?cl=en>
4. UAB "Metaloidas" įmonės gaminiai [žiūrėta 2015 04 25]. Prieiga per internetą:  
<http://www.metaloidas.lt/gumos-gaminiai/>
5. How it works. Episode 26. Tyre recycling [žiūrėta 2015 06 02]. Prieiga per internetą:  
<https://www.youtube.com/watch?v=ovvF-6q5kCU>
6. Internetinis katalogas. Guminis čiuzinys [žiūrėta 2015 06 02]. Prieiga per internetą:  
<http://www.bm-agrotech.ch/online-shop-landwirtschaft/5.->
7. How it's made – Rubber mats [žiūrėta 2015 06 05]. Prieiga per internetą:  
<https://www.youtube.com/watch?v=rPVdBvRNfRg>
8. Internetinė parduotuvė. Guminiai kilimėliai [žiūrėta 2015 06 05]. Prieiga per internetą:  
<http://www.oltrade.lt/lt/automobiliu-aksesuarai-priedai-ir-reikmenys/automobiliu-salono-ir-bagazines-kilimeliai/universalus-automobilio-salono-kilimeliai/guminiai-universalus-kilimeliai-negro-mat-iii-4vnt.html>
9. Rubber Roofing Shingles: What Is It & How It Works? [žiūrėta 2015 04 22]. Prieiga per internetą:  
<http://rubberroofingshingles.net>
10. „Euroshield“ stogo danga [žiūrėta 2015 06 05]. Prieiga per internetą:  
<http://www.euroshieldroofing.com/technical/>
11. The composition of tyre: typical components [žiūrėta 2015 05 02]. Prieiga per internetą:  
<http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/2%20-%20Composition%20of%20a%20Tyre%20-%20May%202006.pdf>
12. Ch S S R Kumar and Avishan M Nijasure. Vulcanization of rubber [žiūrėta 2015 05 12]. Prieiga per internetą:  
<http://111.93.135.171/Volumes/02/04/0055-0059.pdf>



13. Material properties of rubber seals [žiūrėta 2015 05 02]. Prieiga per internetą:  
[http://www.blucherdrains.com/Resources/Technical/Rubber\\_Seal\\_Properties](http://www.blucherdrains.com/Resources/Technical/Rubber_Seal_Properties)
14. State of California. Evaluation of Waste Tire Devulcanization Technologies [žiūrėta 2015 04 15]. Prieiga per internetą:  
<http://www.calrecycle.ca.gov/Publications/Documents/Tires%5C62204008.doc>
15. H.J. Manuel, W.Dierkes, Recycling of rubber, volume 9 number 3, 1997 [žiūrėta 2015 04 25]. Prieiga per internetą:  
<https://books.google.lt/books?id=XCuBK4c9ZeYC&printsec=frontcover&hl=lt#v=onepage&q&f=false>
16. James E.Mark, Burak Erman, C.Michael Roland, The science and technology of rubber, fourth edition, 2013 [žiūrėta 2015 05 06]. Prieiga per internetą:  
[https://books.google.lt/books?id=otzx0FCPyPcC&pg=PA703&dq=crumb+rubber+vulcanization+3.4+Mpa&hl=lt&sa=X&ei=ulFFVfagBtLnaMDIgdAB&redir\\_esc=y#v=onepage&q=crumb%20rubber%20vulcanization%203.4%20Mpa&f=false](https://books.google.lt/books?id=otzx0FCPyPcC&pg=PA703&dq=crumb+rubber+vulcanization+3.4+Mpa&hl=lt&sa=X&ei=ulFFVfagBtLnaMDIgdAB&redir_esc=y#v=onepage&q=crumb%20rubber%20vulcanization%203.4%20Mpa&f=false)
17. Universalios „Testometric” bandymų mašinos parametrai [žiūrėta 2016 01 12]. Prieiga per internetą:  
<http://www.testometric.co.uk/10kn/>
18. Antanas Žiliukas. Medžiagų mechanika. Vadovėlis aukštųjų mokyklų studentams. Technologija. 2004. Kaunas. 36p.
19. Įvairių medžiagų puasono koeficientų reikšmės [žiūrėta 2016 03 22]. Prieiga per internetą:  
[http://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d\\_1224.html](http://www.engineeringtoolbox.com/poissons-ratio-d_1224.html)
20. Dominick V Rosato & Donald V Rosato. Plastics engineered product design, 2007. 239p. [žiūrėta 2016 05 05]. Prieiga per internetą:  
[https://books.google.lt/books?id=O4uNJjUT3ngC&pg=PA239&lpg=PA239&dq=poisson+ratio+of+foam+tension+compression&source=bl&ots=fVmV68J738&sig=tESv7cCz\\_BsHAcH\\_bIMnaaEfLLM&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiejYn\\_kd7MAhWjJ5oKHTdiAFOO6AEIbjAN#v=onepage&q=poisson%20ratio%20of%20foam%20tension%20compression&f=false](https://books.google.lt/books?id=O4uNJjUT3ngC&pg=PA239&lpg=PA239&dq=poisson+ratio+of+foam+tension+compression&source=bl&ots=fVmV68J738&sig=tESv7cCz_BsHAcH_bIMnaaEfLLM&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwiejYn_kd7MAhWjJ5oKHTdiAFOO6AEIbjAN#v=onepage&q=poisson%20ratio%20of%20foam%20tension%20compression&f=false)
21. Richard J. Deigan. Modeling and experimental investigations of the shock response of viscoelastic foams., 2007. 18p. [žiūrėta 2016 05 05]. Prieiga per internetą:  
[https://books.google.lt/books?id=UXPz2FZEHjIC&pg=PA18&lpg=PA18&dq=using+ogden+1st+order+compressible&source=bl&ots=wYEMX4i7fp&sig=FGLdsVTbNFn\\_WnkH4XeujXDQKyk&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwi\\_gffamtzMAhWJZpoKHdguAyMO6AEIGjAA#v=onepage&q=using%20ogden%201st%20order%20compressible&f=false](https://books.google.lt/books?id=UXPz2FZEHjIC&pg=PA18&lpg=PA18&dq=using+ogden+1st+order+compressible&source=bl&ots=wYEMX4i7fp&sig=FGLdsVTbNFn_WnkH4XeujXDQKyk&hl=lt&sa=X&ved=0ahUKEwi_gffamtzMAhWJZpoKHdguAyMO6AEIGjAA#v=onepage&q=using%20ogden%201st%20order%20compressible&f=false)
22. Mustafa Akay. Introduction to polymer science and technology, 2012. 186p. [žiūrėta 2016 05 06]. Prieiga per internetą:  
<http://197.14.51.10:81/pmb/CHIMIE/introduction-to-polymer-science-and-technology.pdf>

23. Eric Stamper. Determining compressibility properties of hyperelastic FEA models, 2014. [žiūrėta 2016 05 10]. Prieiga per internetą:  
<https://caei.com/blog/determining-compressibility-properties-hyperelastic-fea-models>
24. P.H Mott, J.R Dorgan, C.M. Ronald. The bulk modulus and Poisson's ratio of "incompressible" materials, 573p. [žiūrėta 2016 05 10]. Prieiga per internetą:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.653.8987&rep=rep1&type=pdf>
25. Medžiagų mechaninės savybės. VGTU konspektai. [žiūrėta 2016 05 10]. Prieiga per internetą:  
[http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/Skaic\\_mech/Inziner\\_met/Teorija/AGG\\_P5.pdf](http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/Skaic_mech/Inziner_met/Teorija/AGG_P5.pdf)
26. Įvairių medžiagų trinties koeficientai. [žiūrėta 2016 05 10]. Prieiga per internetą:  
<http://www.diracdelta.co.uk/science/source/f/r/friction/source.html#.VzsbKTeKSUl>