



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Medienos inžinerija (621J53001)

Elvyra Revuckaitė
Projekto autorė

Doc. dr. Darius Albrektas
Vadovas

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Medienos inžinerija (621J53001)

Elvyra Revuckaitė
Projekto autorė

Doc. dr. Darius Albrektas
Vadovas

Doc. dr. Inga Juodeikienė
Recenzentė

Kaunas, 2018



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Elvyra Revuckaitė

Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Elvyros Revuckaitės, baigiamasis projektas tema „Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir 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
Medienos inžinerija (621J53001)

MAGISTRANTŪROS STUDIJŲ BAIGIAMOJO PROJEKTO
UŽDUOTIS

Studentui(-ei) Elvyrai Revuckaitei

1. Baigiamojo projekto tema: „Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas“. „Modelling and Studying of Elastic Properties of Wooden Elements”.

2. Projekto tikslas ir uždaviniai

Darbo tikslas – Skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatyti, kaip apdailos ir minkštinančios medžiagos įtakoja medinių elementų tampriai plastiškąsias ir akustines savybes.

Darbo uždaviniai: Nustatyti ąžuolo ir pušies medienos bandinių mechanines ir įvertinti tampriai plastiškąsias savybes; Nustatyti kaip apdailos ir minkštinančios medžiagos pakeitė medienos bandinių tampriai plastiškąsias savybes.

3. Pradiniai Projekto duomenys – Apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis apdailintų medinių ąžuolo ir pušies elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos – Darbas turi būti originalus ir atitikti magistro darbams keliamus reikalavimus.

5. Projekto aprašomosios dalies struktūra: Santrauka; Įvadas (problemos pristatymas, darbo tikslas ir uždaviniai); Literatūros apžvalga; Darbo metodika; Rezultatų aptarimas; Išvados; Literatūros sąrašas.

6. Grafinės Projekto dalies sudėtis – nėra.

7. Projekto konsultantai – nėra.

Magistrantas:
(vardas, pavardė, parašas, data)

Projekto vadovas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programos vadovas.....
(vardas, pavardė, parašas, data)

Turinys

Įvadas.....	11
1. Literatūros apžvalga.....	13
1.1. Mediena ir jos savybės.....	13
1.2. Medienos mechaninių savybių nustatymo metodai.....	15
1.3. Apdailos ir minkštinančių medžiagų tampriai plastiškosios savybės.....	25
2. Darbo metodika.....	30
2.1. Medienos tampriai plastiškųjų savybių tyrimas rezonansinių virpesių metodu.....	30
2.1.1. Strypo formos bandinių tyrimo metodika.....	31
2.2. Tiriamųjų bandinių modeliai ir teorinis pagrindimas.....	32
2.3. Dinaminio tampros modulio ir slopinimo koeficiento tyrimo metodika ir įranga.....	33
3. Rezultatų aptarimas.....	37
3.1. Ažuolo medienos bandinių tampriai plastiškųjų savybių tyrimas.....	37
3.2. Pušies medienos bandinių tampriai plastiškųjų savybių tyrimas.....	47
3.3. Ažuolo ir pušies medienos bandinių tyrimo duomenų palyginimas.....	58
Išvados.....	62
Literatūros sąrašas.....	63

Paveikslų sąrašas

1 pav. Ažuolo medienos mikrostruktūros schema.....	13
2 pav. Pušies medienos mikrostruktūros schema.....	14
3 pav. Statinio lenkimo tyrimo standas.....	18
4 pav. Specialus standas, kuriuo medienos bandinys tempiamas išilgai pluošto.....	19
5 pav. Rezonansinių virpesių matavimo įranga	20
6 pav. Specialus standas, kuriuo fiksuojami rezonansiniai virpesiai.....	20
7 pav. Specialus standas su keturiomis atramomis.....	21
8 pav. Specialus standas, kuriame bandinys tvirtinamas vertikaliai.....	22
9 pav. Portugališkos gitaros geometrinių formų ir rezonansinio dažnio pokytis.....	23
10 pav. Natūralios odos mikrostruktūra.....	27
11 pav. Sistemos, kurioje yra slopinimas, virpesių gesimo kreivė.....	30
12 pav. Priverstinių svyravimų rezonansinė kreivė.....	31
13 pav. Strypo formos tvirtinimo būdai ir jų išlinkimo formos (modos).....	32
14 pav. Tampiškai plastiškos medžiagos mechaninis modelis.....	33
15 pav. Tyrimui naudojamo stendo schema.....	33
16 pav. Tiriamas sortimentas padengtas 60 mm storio porolono sluoksniu.....	35
17 pav. Neapdailinto ąžuolo bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	37
18 pav. Amplitudės pasiskirstymas visame medinio elemento ilgyje.....	37
19 pav. Aliejine apdailos medžiaga dengto ąžuolo bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	39
20 pav. Ažuolo medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga.....	40
21 pav. Ažuolo medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga.....	41
22 pav. Laku dengto ąžuolo medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	41
23 pav. Ažuolo medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku.....	42
24 pav. Ažuolo medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku.....	43
25 pav. Porolonu dengto ąžuolo medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	44
26 pav. Ažuolo medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu.....	45
27 pav. Ažuolo medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu.....	45
28 pav. Dirbtine oda dengto ąžuolo medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	46
29 pav. Neapdailinto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	48

30 pav. Amplitudės pasiskirstymas visame medinio elemento ilgyje.....	48
31 pav. Aliejine apdailos medžiaga dengto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	50
32 pav. Pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga.....	51
33 pav. Pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga.....	52
34 pav. Apdailinto laku pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	52
35 pav. Pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku.....	53
36 pav. Pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku.....	54
37 pav. Porolonu dengto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	55
38 pav. Pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu.....	56
39 pav. Pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu.....	56
40 pav. Dirbtine oda dengto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika.....	57
41 pav. Ažuolo ir pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis.....	60
42 pav. Ažuolo ir pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis procentais po padengimo apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis.....	60

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Medienos bandinių parametrai.....	33
2 lentelė. Apdailos ir minkštinančių medžiagų charakteristikos.....	35
3 lentelė. Neapdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	38
4 lentelė. Aliejine apdailos medžiaga apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	39
5 lentelė. Pentaftaliniu laku apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	42
6 lentelė. 30 mm ir 60 mm storio porolonu apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	44
7 lentelė. 1 mm storio dirbtine oda apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	46
8 lentelė. Neapdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	49
9 lentelė. Aliejine apdailos medžiaga apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	50
10 lentelė. Pentaftaliniu laku apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	53
11 lentelė. 30 mm ir 60 mm storio porolonu apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	55
12 lentelė. 1 mm storio dirbtine oda apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ.....	57
13 lentelė. Statistinės ąžuolo ir pušies medienos bandinių tampros modulio E ir slopinimo koeficiento tgδ vidutinės vertės.....	58

Autoriaus Revuckaitės, Elvyros. Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Darius Albrektas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Technologijų mokslai (08T), Medienos dirbinių technologijos.

Reikšminiai žodžiai: ąžuolo mediena, pušies mediena, rezonansinis dažnis, dinaminis tampros modulis, virpesių slopinimo koeficientas.

Kaunas, 2018. 65 p.

Santrauka

Baigiamajame darbe aprašoma kaip apdailos (lakas, aliejinė danga) ir minkštinančios medžiagos (porolonas, oda) įtakoja ąžuolo ir pušies medienos elementų tampriai plastiškąsias ir akustines savybes. Naudojant dinaminį skersinių rezonansinių virpesių metodą, pagal bandinių amplitudines – dažnines charakteristikas 20 - 2000 Hz dažnių diapazone nustatyti jų tampros moduliai ir slopinimo koeficientai prieš apdailą ar padengimą minkštinančiomis medžiagomis ir po.

Gauta, kad ąžuolo ir pušies medienos tampros modulio ir slopinimo koeficiento pokytis apdailinant skirtingomis apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis yra skirtingas. Labiausiai bandinių tampriai plastiškąsias savybes įtakojo porolonas. Porolonas yra plastiškas, dėl to žymiai padidėja viso bandinio slopinimo koeficientas ir sumažėja tampros modulis. Apdailinti laku ar aliejine danga bandiniai taip pat tapo plastiškesni. Be to, šių savybių pokytis priklausė ne tik nuo medžiagos savybių, bet ir panaudoto kiekio. Parodyta, kad panaudojus apdailos ir kitas medžiagas, galima keisti ir valdyti medinių elementų tampriai plastiškąsias ir akustines savybes. Žinant atskirų medžiagų tampriai plastiškąsias savybes, galima prognozuoti ar projektuoti pagal poreikį gaminius, skirtus sustiprinti arba priešingai, slopinti, sugerti virpesius ir triukšmą.

Author's Revuckaitė, Elvyra. Modelling and Studying of Elastic Properties of Wooden Elements. Master's Final Degree Project/ supervisor abbreviation of the position, doc. dr. Darius Albrektas of the supervisor; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology. Study field and area (study field group): Technological Sciences (08T), Wood Products of Technology.

Keywords: oak wood, pine wood, resonance frequency, MOE, coefficient of damping.

Kaunas, 2018. 65 pages.

Summary

In the Final Degree Project it is written about how decoration (lacquer, oil coating) and softening materials (foam rubber, leather) influence the elasticity and acoustic properties of the elements of oak and pine wooden. Using dynamic transverse resonance method, in accordance with amplitude – frequency characteristics of a sample in 20 – 2000 Hz range, determined their elastic modulus and sound damping coefficient before and after the decoration or coating with softening materials.

The result was that the change in elastic modulus and damping coefficient of oak and pine wooden was distinct using different decoration and softening materials. Foam rubber was the material that impacted elasticity properties of the sample the most. Foam rubber is elastic, therefore the absorption coefficient of the sample increases sharply and elastic modulus decreases. Samples coated in lacquer or in oil coating become more viscous as well. In addition to that, the change of these properties depended from not only properties of the material but the quantity of it used. It was proved that it is possible to change and manage elasticity and acoustic properties of the wooden elements using decoration and other materials. Knowing elasticity properties of a different materials it is possible to forecast or design products that are meant to fortify or the opposite, to suppress, absorb noise and vibrations.

Išvadas

Mediena – tampriai plastiška medžiaga, gana lengvai apdorojama, todėl plačiai naudojama statybose, baldų, muzikos instrumentų gamyboje bei kt. [1].

Medienos gaminiai turi atitikti jiems keliamus reikalavimus – pasižymėti tam tikromis savybėmis. Dažnai mediniai elementai yra naudojami garso izoliavimui (medinių pertvarų, akustinių, grindų, langų, durų ar lubų konstrukcijoms) arba priešingai – garso sustiprinimui (muzikos instrumentų konstrukcijoms). Dėl to, pirmuoju atveju, mediena turi pasižymėti geromis tampriosiomis savybėmis, o antruoju atveju geromis klampiosiomis savybėmis.

Mediniai gaminiai yra aliejuojami ir lakuojami siekiant juos pagražinti, apsaugoti arba keisti medienos mechanines, akustines savybes. Garso absorbcija ir atspindys yra stipriai surišti su vidine medžiagos struktūra ir paviršiaus apdaila. Teisingas medienos ir apdailos medžiagos parinkimas keičia muzikos instrumentų konstrukcinių elementų virpėjimo savybes. Šiuo atveju ypač išryškina medienos ir apdailos medžiagos tampriaiplastiškosios savybės [43, 46 -50].

Grindų, sienų bei pertvarų konstrukcijose naudojamos įvairios garsą absorbuojančios medžiagos, kurios padeda spręsti patalpų triukšmo problemas. Daugeliu atveju garso sugėrimui naudojamos poringos medžiagos (porolonas, mineralinė vata ir kt.), pro kurias gali praeiti oras. Šie stori poringi absorbentų sluoksniai yra puikūs žemų ir aukštų dažnių sugėrėjai. Tamprios medžiagos, turinčios uždaras poras, garsą absorbuoja praščiau, tačiau didina gaminio lankstumą [33 - 37].

Medienos mechaninių savybių tyrimams naudojami įvairūs statiniai ir dinaminiai metodai [5, 7]. Atliekant statinius bandymus, bandiniai dažniausiai sulaužomi ar kitaip mechaniškai pažeidžiami. Be to, jie daugeliu atvejų turi būti tam tikrų matmenų ir formos. Populiariesni yra dinaminiai metodai [4, 10, 59, 60]. Tiriant šiais metodais, bandinių savybės įvertinamos pagal jų virpesius arba garso ar kitokios bangos sklidimo greitį juose. Šiems bandymams nereikia gaminti specialų matmenų ir formos bandinių. Be to, galima tiksliau įvertinti sortimentų mechanines savybes. Naudojant dinaminį skersinių rezonansinių virpesių metodą, bandiniai yra virpinami, o virpesiai yra užfiksuojami ir analizuojami. Atlikus virpesių analizę, nustatomos medienos sortimento mechaninės, įvertinamos akustinės savybės [10].

Daugelio dinaminio tyrimo metodų esmė – priversti tiriamąjį bandinį virpėti, todėl tokiems tyrimams gali būti panaudojami laisvieji ir priverstiniai sortimentų virpesiai.

Darbo tikslas

Skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatyti, kaip apdailos (lakas, aliejinė danga) ir minkštinančios medžiagos (porolonas, dirbtinė oda) įtakoja medinių elementų tampriai plastiškąsias ir akustines savybes.

Darbo uždaviniai

1. Nustatyti ąžuolo ir pušies medienos sortimentų amplitudines – dažnines charakteristikas ir išlinkimo formas (modas).
2. Remiantis teorinio izotropinio strypo teorija įvertinti ąžuolo ir pušies medienos sortimentų tampriai plastiškas savybes.
3. Nustatyti ir įvertinti ąžuolo ir pušies medienos sortimentų mechaninių savybių pokyčius apdailinus juosapdailos (laku, aliejine danga) ir minkštinančiomis (porolonu, dirbtine oda) medžiagomis.
4. Remiantis gautais rezultatais įvertinti galimybes modeliuoti ir projektuoti medinių konstrukcijų tampriai plastiškąsias bei akustines savybes.

1. Literatūros apžvalga

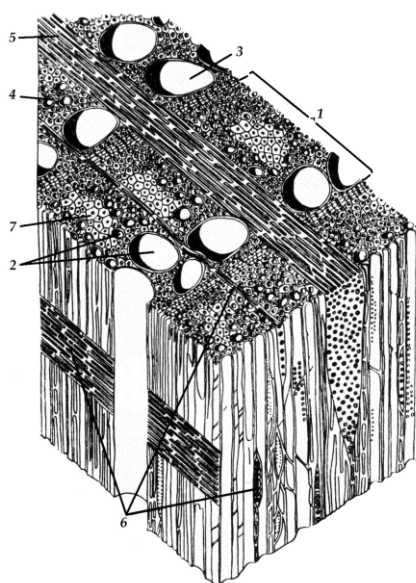
1.1. Mediena ir jos savybės

Ažuolas yra charakteringas lapuotis, turintis dekoratyvinę tekstūrą ir natūralų blizgesį. Spalvą medienoje suteikia joje esančios rauginės ir dažančios medžiagos. Taip pat spalva priklauso nuo botaninės medžio rūšies, amžiaus, augimo ir klimato sąlygų [1].

Ažuolo mediena yra kieta, sunki, ilgaamžė, pasižymi ypač dideliu mechaniniu atsparumu, kietumu, gerai lenkiasi [1]. Mediena yra vertinama pagal rėvių plotį. Visada yra geresnė siauresnės rievės turinti mediena. Rėvių plotis gali būti skirstomas: < 1 mm, mediena labai spilna, 2 - 3 mm pusiau stipri, > 3 mm – stipri [1, 2].

Lapuočių mikrostruktūrą sudaro audiniai: indai, tracheidės, libriforminis plaušas, šerdies spinduliai ir vertikaloji parenchima. Ažuolo medienos mikrostruktūros schema pateikiama 1 pav. Skersiniame pjūvyje, ankstyvosios metinės rievės dalyje ažuolas turi stambius gerai matomus indus, kurie yra susigrupavę spindulinėmis juostelėmis, sudaro žiedą ir yra panašūs į liepsnos liežuvėlius, todėl šis medis priklauso žiedaindžių lapuočių grupei [2]. Indai – ertmės, kurios blogina medienos mechanines savybes. Stambūs ir smulkūs indai sudaro 10 - 55 % įvairių lapuočių kamieno tūrio [2].

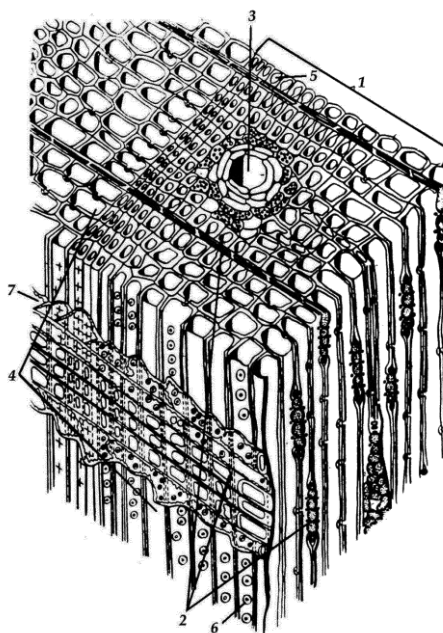
Ažuolo mediena yra sudaryta iš 35 - 75 % audinių, vadinamų libriforminiu plaušu (libriformu). Tai storasienės iki 0,015 mm skersmens ir iki 1 mm ilgio ląstelės, turinčios smailus galus. Šių ląstelių paskirtis - suteikti audiniui atsparumą. Kuo daugiau šio audinio, tuo mediena yra tankesnė ir tvirtesnė [2].



1 pav. Ažuolo medienos mikrostruktūros schema: 1 – metinė rievė, 2 – indai, 3 – stambūs indai, 4 – parenchima, 5 – platūs šerdiniai spinduliai, 6 – siauri šerdiniai spinduliai, 7 – libriformas

Pušis priskiriama spygliuočių medienos grupei. Tai lengva, minkšta, atspari fiziškai, gerai džiūsta ir yra lengvai apdirbama mediena. Pušies vasarinė mediena rusvai raudona, aiškiai skiriasi nuo pavasarinės, kuri yra šviesesnė. Kaip ir kitų medienos rūšių, jų spalvą veikia amžius, klimatinės ir augimo sąlygos [1].

Spygliuočių medienos pagrindiniai struktūros elementai: metinės rievės, šerdies spinduliai, sakatačiai ir tracheidės. Šios medienos mikrostruktūros schema pateikiama 2 pav.



2 pav. Spygliuočių medienos mikrostruktūros schema: 1 – metinė rievė, 2 – šerdies spinduliai, 3 – sakatačiais, 4 – ankstyvosios tracheidės, 5 – vėlyvosios tracheidės, 6 – apvaduotos poros

Tracheidės – būdingas spygliuočių medienos elementas, užimantis 90 - 95 % viso medienos tūrio. Tracheidės yra dviejų tipų – ankstyvosios ir vėlyvosios. Ankstyvosios tracheidės sudaro ankstyvąją medieną ir yra skirtos praleisti vandeniui, todėl turi plačią ertmę ir plonas sienelės su daugybe porų. Vėlyvosios tracheidės, sudaro vėlyvąją medieną. Jų ląstelių sienelės yra sustorėjusios vidaus ertmėse, todėl atlieka mechanines funkcijas [2].

Taip pat, daugumai spygliuočių būdingas sandaros elementas yra sakatačiai. Tai apie 0,1 mm skersmens kanalai, kuriuose gaminasi ir kaupiasi sakai. Pušies medienoje sakatačiai užima tik 0,2 - 0,8 % kamieno tūrio dalį, todėl jie esminės įtakos medienos kokybei neturi [2].

Kaip ir lapuočių, taip ir spygliuočių medžiui augant, kiekvienais metais formuojasi naujas medienos pluošto sluoksnis skersine ir išilgine pluoštų kryptimis. Dėl medienos struktūros, jos mechaninės savybės minėtomis pluošto kryptimis yra skirtingos [2].

Medienos mechaninės savybės nusako jos gebėjimą priešintis išorinių mechaninių veikslių jėgų poveikiui. Įvairių medienos rūšių mechaninės savybės yra skirtingos. Skirtingos gali būti ir tos pačios rūšies mechaninės savybės. Tam įtakos turi medienos rūšis, augimo, klimato sąlygos ir kt. Todėl yra žinoma, kad dėl įvairių faktorių medienos mechaninės savybės yra pasiskirstę netolygiai visame medienos tūryje [2].

Tiek lapuočių, tiek spygliuočių medienos savybės priklauso ir nuo jos pluošto krypties (skersai ir išilgai). Malaizijoje buvo atliktas tyrimas, kurio metu siekta išsiaiškinti, kaip keičiasi medienos tampros modulis spinduline ir tangentine kryptimis [3]. Tyrimo metu bandymai buvo atliekami naudojant skirtingo tankio 12 lapuočių medienos rūšių, augančių Malaizijos miškuose. Tyrimo metu medienos bandiniai buvo mirkyti kambario temperatūros vandenyje. Vėliau tirti dinaminiais tyrimo metodais (ultragarsu). Tyrimas parodė, kad po mirkymo tampros modulis spinduline kryptimi padidėjo iki 8 %, o tangentine kryptimi padidėjo iki 5 %.

Yra teigimų, kad medienos mechanines savybes veikia medienos amžius. Italijoje buvo atlikta mokslinės literatūros analizė [4]. Analizuojami moksliniai straipsniai, kuriuose aprašomi įvairūs mechaniniai metodai, taikyti skirtingo amžiaus pušies medienai. Autorių teigimu, medienos amžius didžiausią įtaką turi statiniam lenkimui. Medžiui senstant, jo sudėtyje esančios ląstelės sumedėja ir apmiršta. Dėl to mediena tampa mažiau elastinga. Tyrimo metu padaryta bendra išvada – kuo senesnė mediena, tuo ji sunkiau lenkiasi ir greičiau lūžta.

1.2. Medienos mechaninių savybių nustatymo metodai

Medienos gaminiai turi atitikti jiems keliamus reikalavimus, todėl medienos mechaninių savybių tyrimams naudojami įvairūs statiniai ir dinaminiai metodai [5, 7].

Atliekant statinius bandymus, bandiniai dažniausiai sulaužomi ar kitaip mechaniškai pažeidžiami. Be to, tiriant šiais metodais, matavimus reikia atlikti daug kartų ir iširti daug bandinių. Nemažai bandymų atlikta, kuomet statiniai ir dinaminiai metodai naudojami vienu metu tos pačios rūšies bandiniams tirti.

Straipsnyje [6] aprašomas statinis ir dinaminis medienos mechaniniai bandymai. Staninis bandymas atliekamas medienos bandinį gniuždant skersai pluošto, dinaminis – fiksuojant rezonansinius dažnius. Vienu ir kitu atveju nustatoma bandinio mechaninės savybės.

Tiriant dinaminiais metodais, bandinių savybės įvertinamos pagal jų virpesius arba garso bangos sklidimo greitį juose [7]. Tiriant šiais metodais, bandiniai nėra laužomi, lenkiami ar kitaip mechaniškai pažeidžiami. Naudojant dinaminis metodus, bandiniai yra virpinami, o virpesiai – fiksuojami ir analizuojami. Atlikus virpesių analizę, nustatoma medienos sortimento mechaninės,

įvertinamos akustinės savybės [10]. Šių tyrimų privalumas yra tai, kad galima tirti augantį ar ką tik nukirstą medį. Be to, tiriant dinaminiais skersinių virpesių metodais, bandiniai gali būti įvairių formų ir dydžių.

Vienas iš svarbiausių medžiagos mechaninių rodiklių – tampros modulis, dar kitaip vadinamas Jungo moduliū. Jis nustatomas panaudojant garsinio dažnio virpesius. Mechaninių virpesių sklidimo greitis medienoje priklauso nuo medžiagos tampros modulio ir tankio. Remiantis tuo, medžiagos tampros modulį galima apskaičiuoti pagal formulę [2]:

$$E = c^2 \rho \quad (1.1)$$

čia: c – virpesių sklidimo greitis medžiagoje;

ρ – medžiagos tankis.

Medienos mechaninės savybės gali būti nustatomos ir ultragarsu, fiksuojant virpesių sklidimo greitį medžiagoje. Ultragarsu taip pat galima nustatyti medienoje esančius defektus. Čekijoje atlikto tyrimo metu [8] naudojant ultragarsą tirti 315 metų senumo kėnio mediena. Kaip bandinys naudojamas medinis polis, kuris buvo pažeistas puvinio. Ultragarsu, mediena tirta trijose zonose, kol buvo nustatyta, kuriose medinio polio vietose yra puvinys. Siekiant nustatyti biologiškai pažeistą medieną, reikia tinkamai įvertinti akustinių bangų sklidimo greitį, atsižvelgti į kitus veiksnius: medienos rūšių, rėvių plotį ir drėgmę.

Darbe [9] aprašytas ultragarsu nustatomas medienos tampros modulis išilgine, spinduline ir tangentine kryptimis. Ultragarso tyrimas parodė, kad garso sklidimo greičiui įtakos turėjo mikroskopiniai įtrūkimai, susidarę išilgine ir radialine kryptimis, kurie slopino garso virpesių sklidimą bandinyje.

Darbe [11] atliktas tyrimas su penkiomis skirtingomis spygliuočių ir lapuočių medienos rūšimis. Pateikta statistinė analizė, kuria remiantis nustatyta rezonansinio dažnio priklausomybė nuo medienos tankio. Matavimai atlikti patalpoje, esant 28 ° C oro temperatūrai ir 65 % santykiniam drėgmeniui. Tyrimų duomenys rodo, kad didėjant medienos tankiui, didėja ir rezonansinis dažnis. Tačiau, esant skirtingoms medienos rūšims, šie duomenys gali šiek tiek skirtis.

Tyrime [12] nagrinėtas akustinių bangų sklidimo greitis ažuolo ir eglės medienoje išilgine, skersine ir tangentine kryptimis. Tyrimas taip pat atliekamas ultragarsu. Gauta, kad bandiniuose garso bangos dažniai skiriasi apie 30 %. Tyrimo autoriai teigia, kad medienos akustinėms savybėms didesnę įtaką turi ne pluošto kryptis, o skirtinga medienos mikrostruktūra.

Kinijoje atlikto tyrimo metu [13], ultragarsiniu tyrimo metodu tirtas medinių sijų konstrukcijos tvirtumas. Bandymui atlikti pasirinkta pušies mediena, kurios bandinių matmenys 172 x 55 x 38 mm. Rezonansinių virpesių sklidimo greitis medinių sijų konstrukcijoje buvo nuolat fiksuojamas bei analizuojamas. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad taikant šį metodą, galima tiksliai įvertinti medinių sijų konstrukcijos tvirtumą.

Tyrimo [14] nagrinėtas medinių grindų vibracijos lygis. Medinės grindys buvo sudėtos ant medinių sijų, kurias skiria vienodo atstumo tarpai. Grindyse, atsitiktiniuose taškuose, smūgiuojančiu mechanizmu buvo sužadunami garso virpesiai. Šie virpesiai fiksuoti ir analizuoti. Taip nustatoma, kuriame taške vibracija yra didžiausia. Tyrimas parodė, kad ties medinės sijos tarpu vibracija yra mažesnė.

Darbe [15] autoriai taip pat aprašo grindų sistemos tyrimus, naudojant skersinių rezonansinių virpesių tyrimo metodą. Bandymo metu tirtos 8 skirtingos grindų konstrukcijos ir kiekvienai iš šių konstrukcijų, pagal smūgio sukeltos virpesių bangos sklidimo greitį bandinyje, apskaičiuotas dinaminis tampros modulis. Virpesiai yra sukeliama mechanizmu su smūgiuojančiu plaktuku. Sužadinti virpesiai fiksuoti ir analizuoti. Apibendrinus duomenis, teigta išvada, kad medinių grindų vibracijos ir triukšmo intensyvumas priklauso nuo grindų konstrukcijos.

Kai kurie autoriai teigia, kad medienos mechaninėms savybėms įtakos turi modifikavimas. Darbe [16] tyrimui naudota modifikuota ir nemonifikuota ažuolo mediena. Medienos drėgnis pradžioje buvo 9 %, o po modifikavimo pasiekė 12 %. Bandinių matmenys – 751 x 75 x 24 mm. Mediena modifikuota autoklave su amoniako tirpalu. Po modifikavimo, bandinyje ultragarsu tirtas garso bangos sklidimo greitis. Pastebėta, kad po modifikavimo pasikeitė medienos plastiškumas ir virpesių dažnis. Prieš modifikavimą rezonansinių virpesių dažnis buvo 75 Hz, po modifikavimo – 103 Hz.

Dažnai mediena naudojama muzikos instrumentams gaminti. Dinaminiu tyrimo metodu galima nustatyti muzikos instrumentų kokybę, t. y., iširti muzikos instrumentų skleidžiamo garso intensyvumą. Panašų tyrimą pateikia Indonezijos mokslininkai [17]. Tirtas garso skambėjimas gitarose, kurios yra pagamintos iš bambuko, eglės ir pušies. Tyrimo metu naudota po penkis visų trijų medienos rūšių bandinius (300 x 20 x 5 mm). Matavimai atlikti nustatant medienos bandinių amplitudinę – dažninę charakteristiką, nustatytą 20 - 2000 Hz dažnių diapozone. Atlikus tyrimą ir išanalizavus gautus duomenis, nustatyta, kad garso sklidimas priklauso nuo medžio rūšies. Šiuo atveju, bambuko medienoje garsas sklinda penkis kartus lėčiau nei eglės medienoje, bet du kartus greičiau nei pušies medienoje.

Švedijoje [18] ištirti smuiko dekų detalių parametrai ir šių parametų įtaka dekų detalių išlinkimui virpant. Tirtos stačiakampės formos smuiko dekų plokštelės. Skaičiavimai atlikti baigtinių elementų metodu. Nustatyta, kad smuiko skambesys priklauso nuo geometrinių parametų ir nuo medžio rūšies. Taip pat autoriai teigia, kad bandinio rezonansinis dažnis priklauso nuo medžiagos tampriųjų parametų.

Darbe [19] autoriai aprašo tirtas medinių muzikos instrumentų mechanines savybes, kurios veikia instrumentų skleidžiamo garso kokybę. Šiame darbe skaičiavimai atlikti taip pat baigtinių elementų metodu. Ypatingas dėmesys skirtas tampros modulio pokyčiui nustatyti. Remiantis ir kitų šaltinių duomenimis, šio tyrimo autoriai teigia, kad medienos tampros modulis priklauso nuo: klimato sąlygų, medienos senėjimo ir tai, kad mediena yra homogeninė medžiaga, kuri pasižymi gebėjimu gerti drėgmę ir džiūti.

Medienos mechaninių savybių nustatymas statiniais metodais yra susijęs su labai mažų deformacijų matavimais. Norint gauti didesnes deformacijas kurias būtų galima išmatuoti tiksliau, medieną reikia apkrauti iki tokių įtempių, kad neliktų linijinės priklausomybės tarp įtempių ir deformacijos.

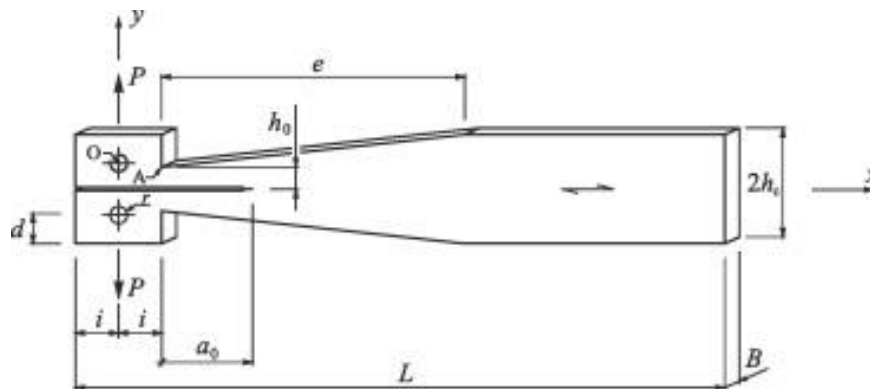
Darbe [20] aprašomas pušies medienos deformatyvumas, ją statiškai lenkiant skersai pluošto. Bandiniai, kurių matmenys 1368 x 3 x 200, padedami ant stendo dviejų atramų esančių bandinio galuose (3 pav.). Bandiniai lenkiami iš viršaus veikiant 16,596 N apkrovai. Bandymas kartojamas kelis kartus, kol bandinys lūžta arba plyšta. Tuomet gauti duomenys analizuojami. Po analizės, nustatomas bandinių tampros modulis.



3 pav. Statinio lenkimo tyrimo stendas

Darbe [21] nustatytas pušies medienos tampros modulis, kai medienos bandinys yra tempiamas išilgai pluošto. Šiam tyrimui, bandinys turi būti tam tikros formos (4 pav., a) ir matmenų (šiuo

atveju 300 mm ilgio ir 15 mm pločio). Bandinio paviršiuje nubrėžiamos trys linijos ir pagal šių vietų matmenis apskaičiuojamas vidutinis skerspjūvis. Bandinio galuose išgręžiamos 14 mm spindulio skylės, o į jas įstatomi ribotuvai (metaliniai kaiščiai). Statinio lenkimo stende, veikiant iki 200 N jėgai, vyksta medienos pluošto tempimas (4 pav., b), kai ribotuvai veikia priešingomis kryptimis (vienas tempa į viršų, o kitas – į apačią). Procesas vyksta 1,5 - 2 min. Kai bandinys yra suardomas, tuomet fiksuojamos medienos tampros ribos. Tokiu būdu nustatyta, kad medienos atsparumo tempimui riba yra apie 130 MPa.



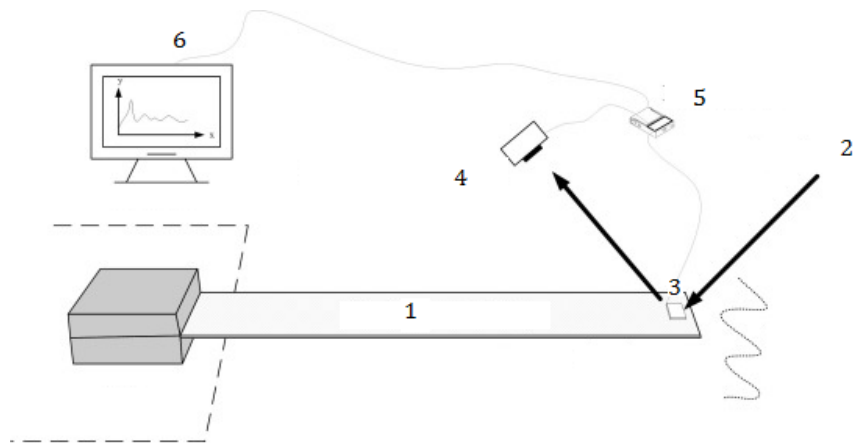
(a)



(b)

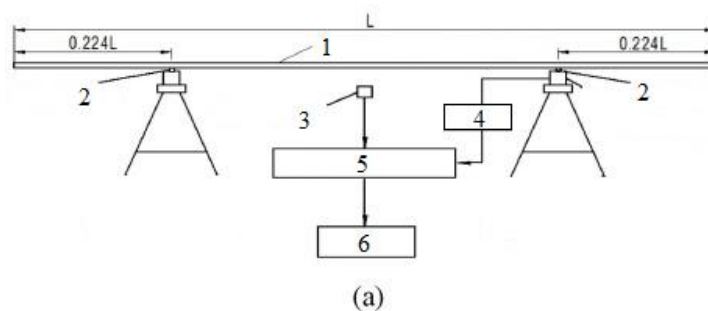
4 pav. Specialus stendas, kuriuo medienos bandinys tempiamas išilgai pluošto: a) bandinio schema (mm): $L = 300$, $B = 15$, $e = 140$, $h_0 = 10$, $h_c = 25$, $i = 20$, $r = 14$, $d = 12,5$, b) stendo bendras vaizdas

Medienos mechaninių savybių statiniai ir dinaminiai tyrimai gali būti atliekami skirtinga įranga. Darbe [22] aprašyta įranga, kuri bandinyje sužadintus garso virpesius, matuoja specialiais jutikliais. Lazero šviesa bandinyje sužadina virpesius, kurie atsimuša į akcelerometrą (prietaisą, kuris perduoda bangos greičio ilgį į kitą prietaisą), o akcelerometras šiuos virpesius perduoda į optinius – elektrinius jutiklius. Vėliau, šie elektros signalai patenka į duomenų surinkimo sistemą (DAQ). Joje duomenys apdorojami ir fiksuojami kompiuterio ekrane. Įrangos schema pateikiama 5 pav.



5 pav. Rezonansinių virpesių matavimo įranga: 1 – bandinys, 2 – lazerio šviesos spinduliai, 3 – akcelerometras, 4 – optinis – elektroninis jutiklis, 5 – duomenų surinkimo sistema, 6 – kompiuteris

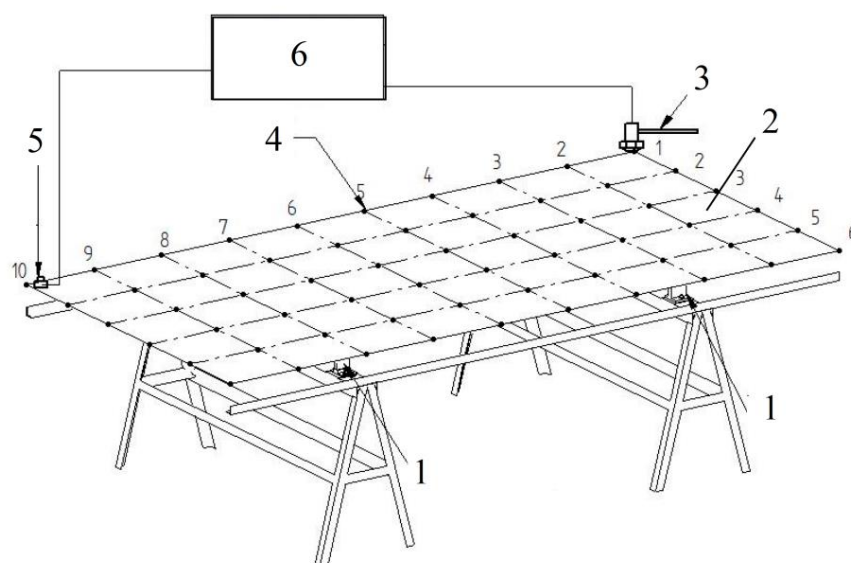
Straipsnyje [23] aprašytas dinaminis tyrimo metodas, panaudojant specialų stendą. Bandinys laisvai uždedamas ant dviejų tamprų kūnų (strypų). Garso stiprintuvu sužadunami bandinio virpesiai, kurie fiksuojami jutikliu. Jutikliu užfiksuoti virpesiai keliauja į duomenų surinkimo sistemą. Apdoroti duomenys matomi kompiuterio ekrane. Tai kylančios ir besileidžiančios kreivės (rezonansiniai dažniai). Stendo schema pateikiama 6 pav.



(b)

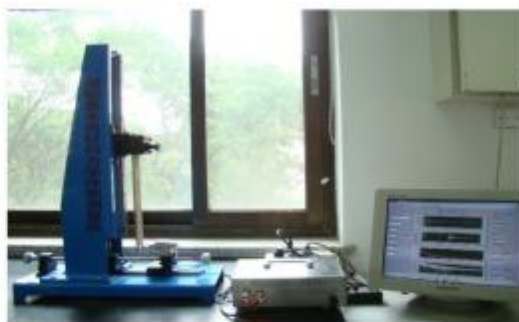
6 pav. Specialus stendas, kuriuo fiksuojami rezonansiniai virpesiai: a) stendo schema: 1 - bandinys, 2 – tamprus kūnas (strypas), 3 – jutiklis, 4 – stiprintuvas, 5 – duomenų rinkimo sistema, 6 – kompiuteris, b) stendo bendras vaizdas

Pekino miškų universitete atliktas tyrimas, kurio metu aprašyta [24] dinamiškai tirtų vidutinio tankio medienos drožlių plokščių (MDF) metodika ir įranga (7 pav.). Bandymui naudoti 12, 15 ir 18 mm storio MDF bandiniai. Kiekvienas bandinys uždedamas ant specialaus stendo, turinčio keturias atramas ir pažymimas vienodai, vienas nuo kito nutolusiais taškais. Šiuose taškuose (charakteringose zonose) pritvirtinamas jutiklis. Smūgiuojančiu plaktuku, bandinyje sukeliama vibracija (virpesiai), kurią fiksuoja prie bandinio pritvirtintas jutiklis. Duomenys apdorojami duomenų surinkimo sistemoje ir matomi kompiuterio ekrane. Vėliau šie duomenys analizuojami ir apdorojami grafiškai. Tam, kad gauti tikslesnius duomenis, šis bandymas kartojamas tris kartus.

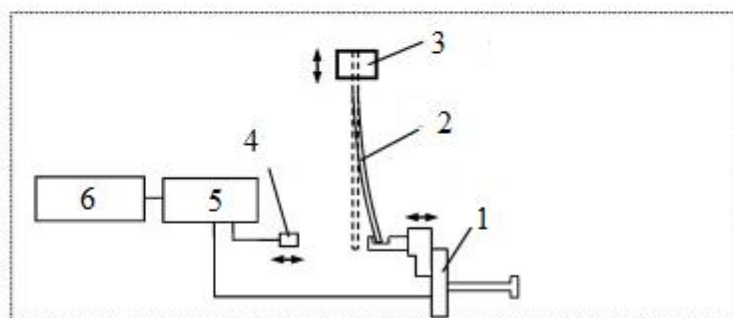


7 pav. Specialus stendas su keturiomis atramomis: 1 - atramos, 2 – bandinys, 3 – smūgiuojantis plaktukas, 4 – jutiklis, 5 – duomenų surinkimo sistema, 6 – kompiuteris

Darbe [25] aprašytas dinaminio tampros modulio nustatymas, kuomet tirti itin ploni skirtingų matmenų medienos drožlių plokštės bandiniai. Specialiame stende (8 pav.), bandinys tvirtinamas vertikalia padėtimi. Gembiškai įtvirtintas bandinys (kuomet vienas bandinio galas įtvirtintas, o kitas – laisvas) yra virpinamas. Prie jo pritvirtintas jutiklis fiksuoja dažnius ir perduoda juos į kompiuterį.



(a)



(b)

8 pav. Specialus stendas, kuriame bandinys tvirtinamas vertikaliai: a) stendo bendras vaizdas, b) stendo schema: 1 – poslinkio mechanizmas, bandinyje sužadinantis vibraciją, 2 – bandinys, 3 – gnybtas, laikantis bandinį, 4 – jutiklis, 5 – duomenų surinkimo sistema, 6 – kompiuteris

Nagrinėjant medienos ir jos gaminių akustines ir tampriai plastiškąsias savybes, remiamasi Hugo dėsnio – ryšiu tarp apkrovos ir tokio tampraus kūno deformacijų. Kitaip tariant – prielaida, kad apkraunama medžiaga yra idealiai tampri, t.y., veikiamą apkrovą, ji tuoju deformuojasi (garso greičiu), o apkrovą pašalinus, tuoju pat grįžta į pirminę būseną [2].


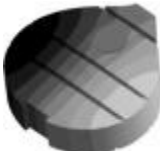

Mediena yra naudojama įvairių muzikos instrumentų gamyboje, siekiant sustiprinti garsą. Šioje srityje medienos panaudojimą dažniausiai lemia jos fizikinės ir mechaninės savybės. Iš medienos gaminama virpanti muzikos instrumento detalė – rezonansinė lenta (deka). Dekai virpančios stygos energiją perduoda ją supančiai aplinkai. Autorius E. Jansson darbe [26] detaliai aprašo muzikos instrumentų – smuiko ir gitaros konstrukciją, gamybą ir akustines bei tampriąsias savybes. Autorius teigia, kad gaminant smuiką atsižvelgiama į pagrindines mechaninės savybes: standumą, masę ir vidinę trintį. Kai mediena yra pašalinama iš smuiko vidaus (baro) sumažėja masė ir standumas. Sumažėjus masei, sumažėja ir rezonansinis dažnis. Rezonansinio dažnio sustiprinimui, muzikos instrumento viduje yra tvirtinamos dekų. Jos amplitudinė – dažninė charakteristika nulemia kuriamo garso tembrą (sužadina nuo žemų iki aukštų dažnių virpesius). Autorius teikia, kad geresniam žemų dažnių išspinduliavimui gaminama didesnė deka, o norint pagerinti aukštesnių

dažnių išspinduliavimą, deką reikia papildomai sustandinti. Pasak autoriaus, gitaros rezonatorius analogiškas smuiko rezonatoriui – jį sudaro viršutinė ir apatinė dekos iš rezonansinės medienos.

Darbe [27] tirtas smuiko skambesys. Tyrime naudoti du smuikai: vienas iš jų pagamintas iš įprastinės rezonansinės medienos, kitas iš bambuko. Atlikus bandymą pastebėta, kad abiejų smuikų garso bangų amplitudinė – dažninė charakteristika išliko labai panaši (užfiksuota 200 - 1500 Hz garso dažnių diapazone). Vis tik įdomu yra tai, kad smuikas pagamintas iš bambuko sudaro unikalų skambesį, kuris visiškai skiriasi nuo įprastų medinių smuikų skambesio.

Straipsnyje [28] aprašomos medinės gitaros rezonansinės savybės. Tyrimui naudotos keturios lapuočių medienos rūšys augančios Indijos ir Afrikos šalyse (raudonmedžio, cirikato ir dviejų rūšių juodmedžio). Skirtingų medienos rūšių bandiniai išdžiovinti 20 ° C temperatūroje, esant 65 % drėgniui, tol kol visų bandinių drėgnis susivienodina. Procesas atliekamas dinaminio skersinių rezonansinių virpesių metodu, kai garso virpesiai bandiniuose sužadunami smūgiuojančiu plaktuku. Atlikus bandymą pastebėta, kad tropiniuose kraštuose augančios tirtos medienos rūšys turi mažesnę slopinimo koeficientą, nei mediena auganti Europoje. Tai reiškia, kad tirta mediena, turi geras akustines savybes, todėl iš jos pagamintos detalės (dekos) sustiprina gitaros skleidžiamą garsą.

Dar vienas tyrimas atliktas Portugalijoje. Straipsnyje aprašytas [29] portugališkos gitaros, turinčios išskirtinę „kriaušės“ formą, skambesys. Darbe ypatingas dėmesys skirtas gitaros geometrinėms formoms. Todėl tyrime pateikti rezultatai, kuomet yra keičiami gitaros geometriniai parametrai (9 pav.). Juose aiškiai matoma, kad keičiant muzikos instrumento geometriją, keičiasi ir jo rezonansinės savybės.

Režimas	Gitaros forma	Rezonansinis dažnis (Hz)
A0		213
A1		554
A2		638

Režimas	Gitaros forma	Rezonansinis dažnis (Hz)
A3		908

9 pav. Portugališkos gitaros geometrinių formų ir rezonansinio dažnio pokytis

Kalbant apie akustines savybes būtina paminėti, kad jos yra svarbios uždaroje patalpose. Triukšmo kontrolės ir jos sumažinimo problema yra labai aktuali. Tam, kad sumažinti triukšmo lygį patalpose yra kuriamos specialios sistemos: akustinės grindys, durys, lubos, sienos, pertvaros ir pan.

Daugelio lubų, sienų bei pertvarų konstrukcijose naudojamos įvairios medienos plokštės. Darbe [30] lyginamas akustinių sienelių skirtumas, kai jos yra pagamintos iš skirtingo tankio plokštės. Kalbant apie akustines sieneles, yra žinoma, kad perforuoti skydai padeda slopinti garso sklaidimą patalpoje, t. y., mažina vidutinių bei aukštų garso bangų sklaidimą. Tyrimas atliktas naudojant vidutinio tankio 800 kg/m^3 ir mažo tankio 500 kg/m^3 plokštes. Nustatyta, kad mažo tankio plokštė turi blogesnes izoliacines savybes. Tanki medinė konstrukcija atspindi garsą, jis atsимуša ir susidaro aidas. Šis reiškinys gali būti kaip privalumas pavyzdžiui, gaminant muzikos instrumentus arba įrenginėjant koncertų sales.

Lygus paviršius efektyviai spinduliuoja triukšmą nuo visų plokštumų [31]. Perforuotoje plokštėje yra mažesnis garso spinduliavimo paviršius. Plokštės rezonansinių virpesių ir tuo pačiu garso mažinimas priklauso nuo vidinės trinties – slopinimo. Rezonanso metu padidėjusios virpesių amplitudės spinduliuojamo garso lygis sustiprėja, t. y., plokštė padidina šaltinio spinduliuojamą garso lygį. Norint efektyviai slopinti garsą, naudojamos sluoksniuotos plokštės, kai vienas iš sluoksnių yra garsą slopinanti medžiaga (šiuo atveju porėta medžiaga).

Darbe [32] aprašoma garso izoliacija panaudojant medienos plokštes. Medienos plokštės absorbuojamas garsas priklauso nuo jos standžio bei pagrindinių matmenų. Garso izoliacija mažėja priklausomai nuo plokštės slopinančių savybių (jos standžio ir masės). Kai plokštės storis išauga, jos standis santykinai padidėja labiau nei masė ir žemos izoliacijos sritis pasislenka į žemų dažnių sritį.

Sprendžiant patalpos triukšmo mažinimo problemas taip pat labai svarbu atkreipti dėmesį į garsą absorbuojančių elementų konstrukcijas [33]. Patalpose smūginį garsą geriausiai absorbuoja grindys, kuriose yra tarpai.

Akustinės grindys sugeria į jas krentantį garsą. Kuo didesnė grindų masė, tuo garsas yra labiau absorbuojamas. Darbe [34] medinių grindų masei padidinti yra naudojamas betonas bei absorbuojančios medžiagos sluoksnis. Čia aprašomos keturios skirtingos medinių grindų konstrukcijos: medinės grindys su vienu, dviem, trimis betono sluoksniais ir medinių grindų konstrukcija su vienu betono sluoksniu bei pakabinamomis lubomis. Ištirta, kad ketvirtoji konstrukcija, kurioje panaudojama garsą absorbuojantis elementas (pakabinamos lubos) užtikrina geresnę garso izoliaciją.

Smūginis garsas sklinda pastato konstrukcijomis (sienomis ir perdangomis). Straipsnyje [35] aprašoma paprastų medinių ir plaukiojančių grindų bei universalių atviro tipo pakabinamų lubų sistemos įtaka garso izoliacijai. Atlikus tyrimą nustatyta, kad plaukiojančių grindų, kurių konstrukcijoje panaudojamos tampriosios medžiagos sluoksnis ir pakabinamų lubų konstrukcija garsą patalpoje slopina geriau, t. y., ši konstrukcija, beveik visiškai izoluoja triukšmą patalpoje, priešingai nei paprastų medinių grindų su tokio paties tipo pakabinamų lubų sistema (ši konstrukcija slopina tik žemus dažnius).

Dažniausiai konstrukcijų garso izoliaciją nulemia netinkami konstrukciniai mazgai ir jungtys. Straipsnyje [36] aprašomas masyvių medinių grindų standumo tyrimas, naudojant skirtingas grindų konstrukcijas: trijose konstrukcijose grindys išklotos horizontalia padėtimi lygi grindų sijų ašiai (visais trimis atvejais skiriasi grindų lentų pločiai ir tvirtinimo būdas), o ketvirtoje - jos išklotos vertikalio padėtimi lygia grindų sijų ašiai. Tyrimo duomenys rodė, kad ketvirtoji konstrukcija, kuomet grindys išklotos vertikalio, jų standumą padidina 5 - 10 kartų.

Akustinėms savybėms įtakos turi konstrukcijos sudedamosios dalys. Projektuojant akustinius langus, būtina apsvarstyti ir įvertinti kiekvieną galimą triukšmo šaltinį ir metodą, kaip jį slopinti. Italijoje ištirtos [37] 45 akustinių langų konstrukcijos bei kiekviena detalė atskirai (medinis lango rėmas, aliuminio profilis, lango stiklo storis). Tyrimas parodė, kad geriausia garso izoliacija pasiekama, kai tarpas tarp dviejų lygiagrečių stiklų yra didesnis ir padengtas garsą absorbuojančiomis medžiagomis, o pats tarpas (ertmė tarp stiklų) užpildoma garsą absorbuojančiomis dujomis. Taip taip įtakos turi ir pati rėmo konstrukcija. Nustatyta, kad ypač medinis lango rėmas – geriausia tiek išorinio, tiek vidinio garso izoliacija.

1.3. Apdailos ir minkštinančių medžiagų tampriai plastiškosios savybės

Daugeliu atvejų, garso sugėrimui naudojamos poringos medžiagos (porolonas, medienos plaušas, stiklo vata ir kt.). Geriausiai garsą absorbuojančios medžiagos yra tos, kurios turi atviras poras. Tokios medžiagos puikiai sugeria žemų ir aukštų dažnių garsą. Jeigu medžiaga turi uždaras poras, garso absorbcija gaunama blogesnė. Darbe [38] aprašomas tyrimas, kurio metu nustatytas porolono

slopinimo koeficientas, kai yra skirtingas porolono storis. Porolonas tirtas dinaminiais metodais. Nustatyta, kad 100 mm storio porolono (100 - 2000 Hz garso dažnių diapazone) slopinimo koeficientas apie 0,62 - 0,89, o 30 mm storio (800 - 5000 Hz garso dažnių diapazone) – apie 0,7 - 0,91. Nustačius tampros modulį, skenuojančiu elektroniniu mikroskopu tirta porolono morfologija. Nustatyta, kad slopinimo koeficientas priklauso nuo medžiagos ląstelių sienelių standumo ir porėtumo. Kuo medžiaga porėtesnė, tuo ji labiau absorbuoja garsą.

Straipsnyje [39] taip pat nagrinėjama porolono struktūra bei jo slopinimo koeficientas. Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu ištirta bandinio struktūra rodo, kad bandinys turi pusiau atviras poras. Remiantis tuo, bandinys tirtas 200 - 400 Hz garso dažnių diapazone. Nustatyta, kad 400 Hz dažnių diapazone, porolono slopinimo koeficientas – apie 0,19.

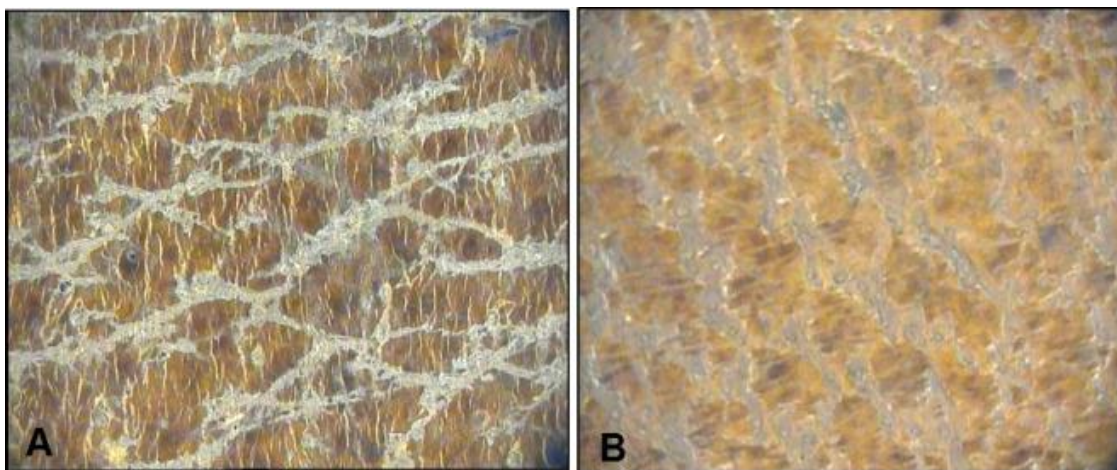
Malaizijoje tirtos porolono akustinės ir mechaninės savybės [40]. Bandymas atliekamas pagal standartinę metodiką, 50 – 6400 Hz garso dažnių diapazone, tačiau tiriant skirtingomis temperatūromis (140 ° C, 150 ° C ir 160 ° C) paveiktus bandinius. Nustatyta, kad bandinys, kuris buvo veikiamas 140 ° C, labiausiai absorbuoja garsą, t. y., 1552 Hz garso dažnį, porolonas sugebėjo absorbuoti 94,40 % (slopinimo koeficientas 0,944), o 160 °C, 6400 Hz garso dažnį absorbavo iki 55 %. Šių savybių ryšys – aukštesnėputų temperatūra, kuri sukelia didesnę anglies dvideginio dujų slėgį, todėl labiausiai ištempia ląstelių sieneles. Dėl šių ląstelių sienelių išplitimo, susidarė santykinai didesnis ląstelių dydis, dėl to sumažėjo porolono santykinis tankis, tuo pačiu ir slopinimo koeficientas.

Darbe [41] aprašomas porolono mechaninių savybių atsparumas gniuždymui, kurių tankiai: I – $339 \pm 180 \text{ kg/m}^3$, II – $376 \pm 210 \text{ kg/m}^3$, III – $364 \pm 800 \text{ kg/m}^3$. Mechaniniai bandymai atlikti gniuždymo metodu. Bandinys spaudžiamas mechanizme, kuriame veikia dvi jėgos (viena iš viršaus, kita iš apačios). Atlikus bandymą pateikiama išvada: kuo tvirtesnis sukibimas tarp medžiagos cheminių elementų, tuo reikia didesnės gniuždymo jėgos.

Straipsnyje aprašoma kaip keičiasi porolono mechaninės ir akustinės savybės, kai jis yra maišomas su tekstilės atliekomis [42]. Tekstilės atliekos, tai medžiagos, pagamintos iš sintetinių pluoštų, kurių sudėtis: 15 % nailono, 40 % poliakrilo ir 45 % modalino. Šiomis medžiagomis, siekiama pagerinti porolono akustines savybes. Tekstilės pluoštai, naudojami kaip sudėtinė armuojanti medžiaga, kurios tankis $0,0051 \text{ kg/m}^3$ ir sudaro apie 10 - 50 % bandinio. Iš porolo ir tekstilės atliekų pagaminti ritinio formos bandiniai, kurie tiriami 100 - 3200 Hz garso dažnių diapazone. Nustatyta, kad šiuo atveju slopinimo koeficientas 0,86 (prieš tai nustatyta, kad vien tik tekstilės atliekų slopinimo koeficientas 0,593). Autorių teigimu, porolono ir tekstinės medžiagų junginys padeda absorbuoti garsą, todėl šios medžiagos gali būti naudojamos statybose, ypač statant ekologiškus namus.

Garsą sugeria ne tik didelį porėtumą turinčios medžiagos, bet ir minkštos medžiagos, kurių porėtumas yra mažas. Vienos iš tokių medžiagų yra dirbtinė ir natūrali oda, plačiai naudojamos interjero, baldų, avalynės, rankinių bei kitų aksesuarų gamybai. Straipsnyje [43] aprašomi du odos apdirbimo procesai ir tų procesų įtaką odos mechaninėms savybėms. Oda yra rauginama skirtingais būdais: pirmuoju būdu oda mirkoma natūraliose rauginėse medžiagose, išgautose iš augalų; antruoju būdu oda mirkoma tanine ir laikoma specialiame rezervuare, kuris yra pripildytas CO₂. Po rauginimo, nustatytos šių bandinių atsparumo tempimui ir dilimui ribos. Atliktas bandymas parodė, kad šiuo atveju apdirbimo procesas neturėjo reikšmės bandinio mechaninėms savybėms. Nustatyta, kad abiem apdirbimo atvejais, odos tempiamasis stipris ne mažesnės kaip 9,80 N/mm².

Egipte atliktas tyrimas [44], kurio metu tirti trijų skirtingų istorinių knygų viršeliai, pagaminti iš natūralios odos. Per ilgus metus iš odos pagaminti knygos viršeliai prarado lankstumą, todėl ieškota būdų kaip pakeisti natūralios odos tampriai plastiškąsias savybes ir atstatyti jos elastingumą. Bandiniai impregnuojami natūraliais glicerolio ir sėmenų aliejais. Po impregnavimo, tempimo būdu ištirtas odų elastingumas. Pastebėta, kad glicerino ir sėmenų aliejus didina odos elastingumą ir leidžia ją ištemti 1 - 2 mm.



10 pav. Natūralios odos mikrostruktūra: a) prieš impregnavimą glicerolio ir sėmenų aliejais, b) po impregnavimo glicerolio ir sėmenų aliejais

Triukšmas ir jo slopinimas yra viena iš opiausių problemų ne tik patalpose, bet ir automobiliuose. Sėkmingas tokio triukšmo panaikinimas padidina klientų pasitenkinimą ir padeda išvengti brangių remonto darbų. Straipsnyje [45] aprašomas tyrimas, kurio metu statiškai ir dinamiškai tirtos natūrali ir dirbtinė oda, kurios naudojamos automobilių sėdynių gamyboje. Tyrimo metu nustatytos šių medžiagų stipruminės ir akustinės savybės. Nustatyta, kad abi medžiagos garsą iš aplinkos sugeria beveik vienodai. Tačiau, pastebėtos kitos savybės – natūrali oda yra tampresnė ir plastiškesnė ir dėl

toji linkusi labiau deformuotis nei dirbtinė oda, tačiau dėl didesnių tampriųjų savybių natūrali oda yra ilgaamžiškesnė ir atsparesnė tempimui (sunkiau plyšta).

Norint apsaugoti medinius elementus nuo aplinkos veiksnių, dažniausiai naudojamos įvairios apdailos medžiagos. Tačiau tokios medžiagos veikia ne tik kaip apsauga. Įsiskverbdomos į medinio elemento paviršių, jos veikia šio elemento fizikines, mechanines ir akustines savybes.

Lakas – skysta apdailos medžiaga, kuri medinio elemento paviršiuje sudaro skaidrią, pusiau matinę arba matinę dangą [46]. Darbe [47] aprašytas mechaninis bandymas (tempimas), siekiant ištirti japoniško lako „Urushi“ plėvelės elastingumą. Nustatyta, kad šio lako mechaninės savybės priklauso nuo UV spinduliavimo trukmės. Po 400 h UV spinduliavimo, lako tampros modulis padidėjo nuo 1686 MPa iki 2139 MPa, o tai rodo, kad UV spinduliavimas padidina „Urushi“ lako standumą ir mažina elastingumą nuo 10,56 % iki 2,82 %. Rezultatai rodo, kad veikiant UV spinduliais "Urushi" lako danga tampa standesnė ir trapesnė.

Straipsnyje [48] aprašomas alkidinio lako elastingumo nustatymo tyrimas. Šio lako klampumas tiriamas mechaniniais tempimo bandymais, kuomet nulakuotas medienos paviršius pradeda džiūti ir atsiranda įtempiai. Matavimų metu bandinio plokštelės padengtos alkidinės emulsijos plėvelėmis, kurių storis 150 μm. Gautos dangos plėvelės išdžiovintos normaliomis laboratorinėmis sąlygomis. Iš dangos išgaravus drėgmei, plėvelės storis suplonėjo iki 70 μm. Dažniausiai, lako elastingumas priklauso nuo džiūvimo laiko, dangos įsiskverbimo į medieną gylio ir dangos storio. Kuo dangą storesnė, tuo ji sunkiau džiūsta. Nustatyta, kad 0,4 - 1mm storio dangą išdžiūsta apie 66 %, tokios dangos tampros modulis 24 MPa.

Apdailos medžiagų ir apdailinamų paviršių mechaninės ir akustinės savybės priklauso nuo jų cheminės sudėties, aplinkos sąlygų ir daugelių kitų veiksnių. Straipsnyje [49] pateikiama šelako ir poliesterio dangų tampriai plastiškosios savybės bei šių savybių poveikis medinių muzikos instrumentų skleidžiamo garso kokybei. Šiam bandymui naudota medienos pušis, kurios paviršius nulakuotas šelako ir poliesterio lako dangomis, vėliau bandinys tiriamas dinaminio metodu. Nustatyta, kad šelako lako slopinimo koeficientas yra apie 0,61. Šelakas pušies slopinimo koeficientą padidina tik 5 %, o poliesteris didina iki 5 - 50 %. Rezultatai parodė, kad šelako lakas padarė mažesnę neigiamą poveikį medienos akustinėms savybėms. Pateikta išvada: lyginant su neapdailintos medienos mechaninėmis savybėmis, po apdailos pastebėta, kad šelakas didina tamprumą, mažina vidinę trintį ir slopina akustines savybes.

Darbe [50] aprašomi ištirtikelių rūšių lakai, kurie yra naudojami medinių muzikos instrumentų paviršiaus apsaugai. Bandymas atliekamas naudojant dvi medienos rūšis labiausiai naudojamas muzikos instrumentų gamyboje – eglės ir klevo medieną. Akustinių ir mechaninių savybių

nustatymui pagaminta po penkis kiekvienos medienos rūšies bandinius, kurių matmenys 145 x 10x 2,5 mm. Bandiniai dengiami trijų skirtingų tipų dangomis: poliuretanine, pagamintu iš alkidinės hidroksilintos dervos, akrilo poliuretanine, paruoštu naudojant akrilo hidroksilintą dervą ir tradicine danga, pagaminta naudojant terpentinę ir sėmenų aliejų. Bandinius padengus apdailos medžiagomis ir ištyrus dinaminiu metodu pastebėta, kad po padengimo, pasikeitė bandinių rezonansinis dažnis (nepriklausomai nuo lako rūšies, eglės bandinių dažnio pokytis $\pm 3,1$ %, o klevo bandinių $\pm 0,7$ %). Akustinė analizė parodė, kad danga praktiškai neturi įtakos dažniui, tačiau sukuria nedidelį garso slopinimą (apie ± 9 %).

Medienos aliejus – skysta ir klampi medžiaga, kuri įsigeria į medienos paviršių ir sudaro apsauginį sluoksnį. Įsiskverbdama į medienos paviršių aliejinė danga dažniausiai keičia fizikines, mechanines ir akustines medienos savybes.

Straipsnyje [51] nagrinėjama linų sėmenų aliejaus įtaka archeologinei medienai. Medienos bandiniai paimti iš įvairių jos sluoksnių. Padengus šių bandinių paviršių aliejine danga ištirta, kad linų sėmenų aliejus į medieną maksimaliai įsiskverbia apie 0,4 mm. Tolimesni tyrimai parodė, kad šis aliejus įsiskverbdamas į medienos paviršiuje esančias ląstelės sienelės, jas sustandina ir suteikia elastingumo, t. y., sumažina medienos trapumą ir padidina tamprumą.

Darbe [52] pateikiamas tyrimas, kuriame tiriama kaip medienos aliejus keičia klijuotos medienos stiprumines savybes. Medienos aliejus ant bandinio paviršiaus dengiamas rankiniu būdu. Dangai išdžiūvus, bandinys yra lenkiamas statiškai. Pastebėta, kad medienos aliejus, sustiprina klijuotos medienos mechanines savybes nuo 30 % iki 50 %.

Darbe [53] aprašoma sėmenų aliejaus įtaka pušies medienos cheminėms, fizikinėms ir mechaninėms savybėms. Konkrečiai šiame darbe nagrinėjama pušies medienos bandinių matmenų stabilumas, ilgaamžiškumas ir mechaninės savybės po terminio apdorojimo (160 – 210 ° C) sėmenų aliejuje. Po modifikavimo pasikeitė medienos spalva (patamsėjo), matmenų stabilumas padidėjo iki 60 %, tačiau lyginant su termiškai neapdorota mediena, pomodifikavimo aliejine danga, medienos mechaninės savybės pablogėjo.

2. Darbo metodika

2.1. Medienos tampriai plastiškųjų savybių tyrimas rezonansinių virpesių metodu

Mediena tampriai plastiška medžiaga, todėl jos savybių tyrimui gali būti panaudoti laisvieji arba priverstiniai virpesiai [54].

Laisvųjų virpesių atveju sistemos judesio lygtis užrašoma taip [54]:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} + cx = 0, \quad (2.2)$$

$$x = a e^{-bt} \sin(k_1 t + \alpha), \quad (2.3)$$

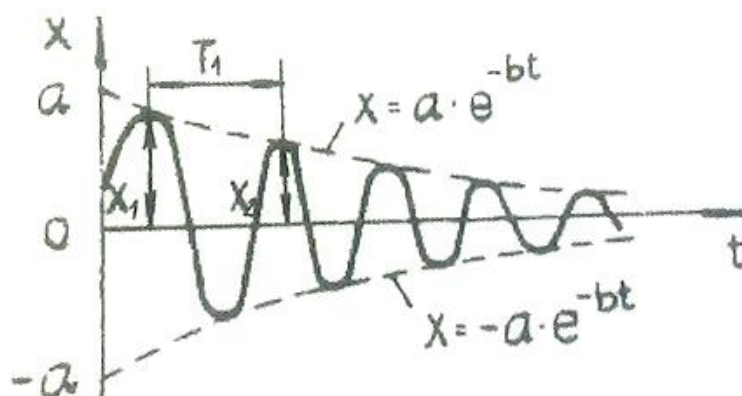
čia: a – pradinė amplitudė,

$k_1 = \sqrt{a^2 - b^2}$ - dažnis esant slopinimui,

$b = \frac{k}{2m}$ - slopinimo koeficientas,

α – pradinė virpesių fazė.

Virpesiai, kurie sklis pagal šios lygties dėsnį, bus gęstantys. Suteikus tokiai sistemai pradinį judesį, ji svyruos, kol virpesiai užges. Tokie virpesiai pavaizduoti 11 pav. [55]:



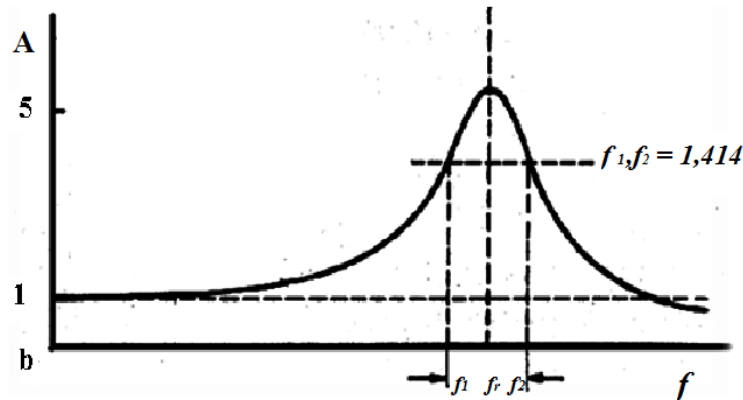
11 pav. Sistemos, kurioje yra slopinimas, virpesių gesimo kreivė

Fiksuojant virpesių gesinimo laiką, galima įvertinti bandinio slopinimo koeficientą – klampiąsias bandinio savybes.

Priverstinių virpesių atveju, lygtis yra išreikšta taip [54]:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} + cx = Q_0 \sin wt \quad (2.4)$$

Šiuo atveju bandinį veikia kintamojo dažnio jėga. Nustačius rezonansinį dažnį ir amplitudę, reikia nustatyti dar du dažnius, kuriems esant rezonansinė amplitudė sumažėja 1,414 karto. Priverstinių virpesių rezonansinė kreivė pateikiama 12 pav. [56]

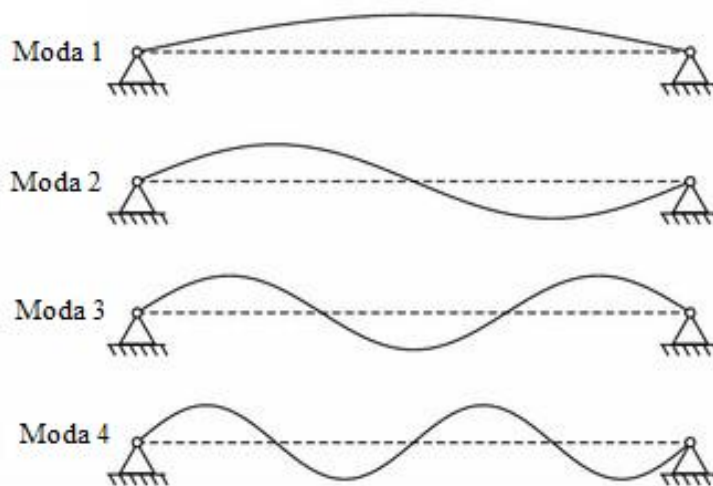


12 pav. Priverstinių svyravimų rezonansinė kreivė

Virpesių amplitudė priklauso nuo slopinimo laipsnio. Todėl tampriųjų savybių įvertinimas fiksuojant šių virpesių dažnį nėra pakankamai tikslus. Esant skirtingam slopinimui, galimos labai skirtingos amplitudinės dažninės charakteristikos. Kai slopinimas mažesnis, bus didesnė virpesių amplitudė ir mažesnis dažnių juostos plotis. Esant didesniam slopinimui, atitinkamai virpesių amplitudė bus žemesnė ir platesnė dažnių juosta [54].

2.1.1. Strypo formos bandinių tyrimo metodika

Vienas iš labiau žinomų ir plačiausiai naudojamų tyrimams kūnų formų yra strypo formos kūnas. Strypo rezonansinis dažnis priklauso nuo galų tvirtinimo būdo. Mediniai strypo formos kūnai, gali būti įtvirtinti įvairiai. Strypo formos tvirtinimo būdai pateikiami 13 pav. [57]:



13 pav. Strypo formos tvirtinimo būdai ir jų išlinkimo formos (modos)

Rezonansinių virpesių metodas pagrįstas strypo išlinkimo nuo z , priklausančio nuo išilginės koordinatės x ir laiko t , lygtimi. Strypas neapkraunamas išorine jėga, todėl jį veikia tik tolygiai pasiskirsčiusi apkrova, kylanti nuo svorio ir tampros jėgų [57].

Medžiagos tampros modulio apskaičiavimui, reikia įvertinti medžiagos tvirtinimo būdą bei geometrinius parametrus ir nustatyti svyravimų dažnį.

Tampriai pastiškosios medžiagos pasižymi klampiosiomis (slopinančiomis) savybėmis. Tampriai plastiškos medžiagos tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$ išreiškiamas taip [10]:

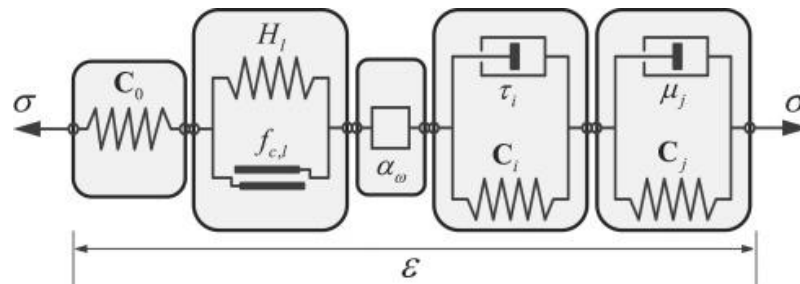
$$E = \left(\frac{\mu l^4}{lc_i^4}\right) f_{rez}^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^4 \right], \quad (2.5)$$

$$tg\delta = \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right) \left[1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^2 + \frac{23}{32} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^4 \right], \quad (2.6)$$

Čia f_{rez} – rezonansinis i -tosios formos virpesių dažnis, c_i – atitinkanti jai charakteringa lygties šaknis, Δf – rezonansinės kreivės plotis atitinkamo rezonansinio dažnio srityje.

2.2. Tiriamųjų bandinių modeliai ir teorinis pagrindimas

Tampriai plastiškas savybes galima vaizduoti mechaniniais modeliais (įvairiomis spyruoklių ir slopintuvų kombinacijomis. Tokio mechaninio modelio schema pavaizduota 14 pav. [58]:



14 pav. Tarpiai plastiškos medžiagos mechaninis modelis: σ – įtempis, C_0 – įtempimų tenzorius, α_ω – deformacijos kintamasi, C_i, C_j – deformacijų tenzorius, $\tau_i - \mu_j$ – deformacijos koeficientas, ϵ – deformacija

Medienos mechaninės savybės skirtingos ne tik pluošto kryptimis. Jos gali skirtis atskirose medienos sortimento zonose, esant tai pačiai pluošto orientacijai.

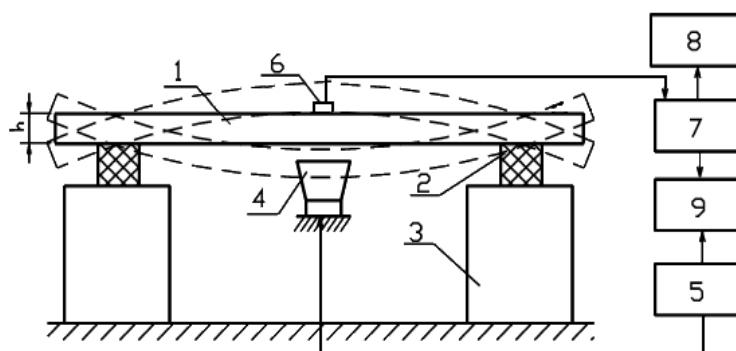
2.3. Dinaminio tampros modulio ir slopinimo koeficiento tyrimo metodika ir įranga

Tyrimai atlikti remiantis teorinio izotropinio strypo teorija [10]. Bandymui pasirinkta po 40 vnt. ąžuolo ir pušies medienos bandinių, kurių parametrai pateikiami 1 lentelėje.

1 lentelė. Medienos bandinių parametrai

Medienos rūšis	Matmenys, mm	Tankis, ρ (kg/m ³)	Drėgnis, ω (%)
Pušis	690 × 96 × 15	400...550	12...15
Ąžuolas	690 × 96 × 15	560...700	10...12

Bandinių tyrimui naudotas specialus stendas 15 pav. [59]:



15 pav. Tyrimui naudojamo stendo schema: 1 – bandinys, 2 – slopinantys elementai (porolonas), 3 – stovai, 4 – virpesių generatorius (garsiakalbis), 5 – signalų generatorius, 6 – jutiklis, 7 – virpesių matavimo prietaisais, 8 – oscilografas, 9 – fazometras

Prieš atliekant tyrimus neapdailinti ąžuolo ir pušies medienos bandiniai buvo kondicionuoti klimatinėje kameroje dvi savaites 60 % drėgnyje ir 20 ° C temperatūroje. Bandinių masė buvo nustatoma elektroninėmis svarstyklėmis 0,01 g tikslumu, plotis, storis – slankmačiu 0,02 mm tikslumu, ilgis – slankmačiu 0,5 mm tikslumu. Drėgnis drėgmėmačiu 1 % tikslumu (drėgnis buvo apie 10 - 12 %).

Tiriamas bandinys 1, laisvai uždedamas ant dviejų tamprių elementų 2, kurie yra pritvirtinti prie specialių stovų 3. Garsiakalbiu 4, kuris yra valdomas elektrinių signalų generatoriumi 5, sužadunami tiriamojo elemento 1 rezonansiniai virpesiai. Šie virpesiai yra fiksuojami jutikliu 6, kuris yra pritvirtintas prie tiriamojo elemento 1. Keičiant generatoriaus dažnį 5, sužadunami bandinio virpesiai 1. Jie išmatuojami fazometru 9. Virpesių forma stebima oscilografo 8 ekrane. Tiriamojo elemento 1 išlinkimo krypties nustatymui fazometru 9 yra matuojama virpesių fazė. Tam į fazometrą 9 paduodami signalai iš matavimo prietaiso 7 ir generatoriaus 5.

Naudojant aprašytą įrangą, medienos bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika nustatyta 20 - 2000 Hz dažnių diapazone [60]. Nustačius dažnius, apskaičiuojama medienos dinaminis tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $\text{tg}\delta$.

Medienos bandinių slopinimas įvertinamas fiksuojant rezonansiniu dažniu f_r , kuriuo virpėdamas bandinys išlinksta moda [57, 61], artima teorinio izotropinio strypo pirmajai modai [10] ir virpesių amplitudė. Šiuo atveju nustatyta, kad sortimentai išlinksta pirmąja moda [57, 61].

Derinant generatorių, nustatomi kiti du dažniai – f_1 ir f_2 , kuriais virpančio bandinio amplitudė sumažėja 1,414 karto. Remiantis nustatytais parametrais, apskaičiuotas ir tampros modulis [10]:

$$E = \frac{4 f_r^2 \pi^2 l^4 \rho s}{A^2 l}; \quad (2.8)$$

čia: E – tampros modulis, f_r – rezonansinis dažnis, kuriuo virpėdamas bandinys išlinksta moda, artima teorinio izotropinio strypo modai, l – bandinio ilgis, ρ – medžiagos tankis, s – bandinio skerspjūvio plotas, A – koeficientas, priklausantis nuo bandinio tvirtinimo būdo ir išlinkimo formos, l – bandinio skerspjūvio inercijos momentas.

Remiantis nustatytais parametrais, apskaičiuojamas slopinimo koeficientas [10]:

$$\text{tg}\delta = \frac{f_2 - f_1}{f_r}; \quad (2.9)$$

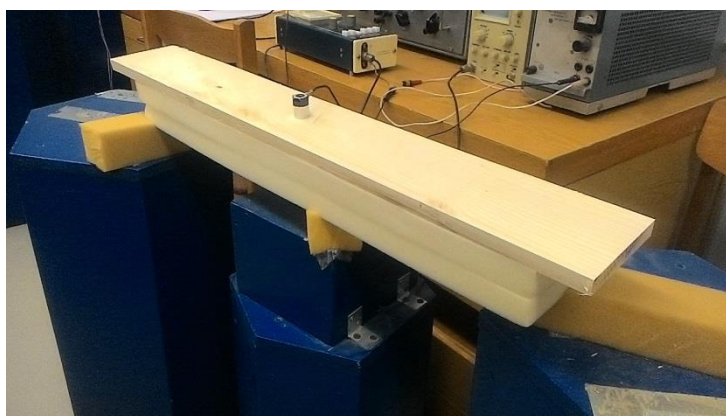
čia: f_r – rezonansinis dažnis, f_1 , f_2 – dažniai, kuriais virpančio bandinio amplitudė sumažėja 1,414 karto.

Vėliau ąžuolo ir pušies bandiniai buvo suskirstyti į keturias grupes. Vienos grupės bandiniai apdailinti pentaftaliniu laku, antros – aliejine danga (abejomis apdailos medžiagomis, po du sluoksnius iš abiejų pusių), trečiosios – padengti 60 mm storio porolono sluoksniu (16 pav.), ketvirtosios – 1 mm storio dirbtine oda. Šių medžiagų charakteristikos pateikiamos 2 lentelėje.

2 lentelė. Apdailos ir minkštinančių medžiagų charakteristikos

Medžiagos	Medžiagos charakteristika
Pentaftalinis lakas	Sudėtyje nelakių medžiagų masės dalis $46 \pm 3 \%$
Aliejinė danga	Tankis $0,101 \text{ kg/m}^3$, lakiųjų organinių junginių kiekis 130 g/l
Porolonas	Storis 3 cm , tankis 25 kg/m^3 , didelio elastingumo 13N , HR 3030
Dirbtinė oda	Storis 1 mm , $65\% \text{ PU}$, $35\% \text{ PES}$, gramatūra $360 \text{ g/m}^2 \pm 10 \text{ g/m}^2$

Po to, taikant tą pačią metodiką, vėl įvertintos bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos, virpant rezonansiniais dažniais – modos. Apskaičiuoti dinaminiai tampros moduliai ir slopinimo koeficientai [10, 62].



16 pav. Tiriamas sortimentas padengtas 60 mm storio porolono sluoksniu

Gauti bandinių tampros moduliai ir slopinimo koeficientai apdoroti statistiškai [63].

1. Aritmetinis vidurkis \bar{x} apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (2.10)$$

2. Dispersija s^2 apskaičiuojama:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.11)$$

čia: $x_i - \bar{x}$ – atskiro rezultato nuokrypis nuo aritmetinio vidurkio;

n – rezultatų skaičius.

3. Vidutinis kvadratinis nuokrypis s apskaičiuojamas:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}; \quad (2.12)$$

4. Variacijos koeficientas v apskaičiuojamas:

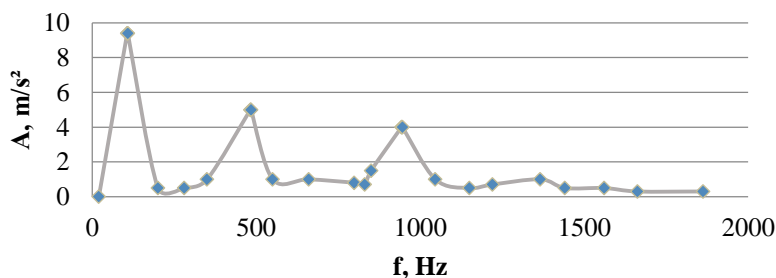
$$v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\%; \quad (2.13)$$

Jeigu variacijos koeficientas $v \leq 5$ – 10 % rezultatų skaida ne didelė; jeigu 15 - 20 % - didelė; jeigu $v \geq 20$ % - labai didelė.

3. Rezultatų aptarimas

3.1. Ažuolo medienos bandinių tampriai plastiškųjų savybių tyrimas

Tyrimo metu naudoti 40 atsitiktinai pasirinkti neapdailinti ažuolo medienos elementai. Skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatyti šių elementų rezonansiniai dažniai ir išlinkimo formos. Neapdailintų ažuolo medienos elementų amplitudinės – dažninės charakteristikos buvo nustatytos 20 - 2000 Hz dažnių diapazone. Vieno iš jų amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 17 pav.

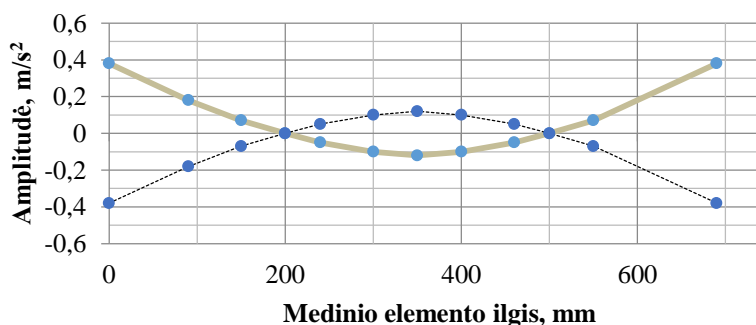


17 pav. Neapdailinto ažuolo bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika

Minėtame dažnių diapazone užfiksuoti keli (šiuo atveju trys) rezonansiniai dažniai. Kitų bandinių amplitudinės dažninės charakteristikos buvo panašios, skyrėsi tik virpesių amplitudės ir šiek tiek rezonansiniai dažniai.

Virpėdamas kiekvienu iš rezonansinių dažnių, bandinys išlinksta atitinkama forma (moda).

Nustatyta, kad bandinių išlinkimo forma, virpant jiems pirmuoju rezonansiniu dažniu, yra artima pirmajai teorinei styro išlinkimo formai (modai). Vieno iš elementų išlinkimo forma pavaizduota 18 pav.



18 pav. Amplitudės pasiskirstymas visame medinio elemento ilgyje

Kitų elementų išlinkimo forma buvo analogiška.

Taikant deformuojamo strypo virpesių teorinius skaičiavimus (2.8 formulė), buvo apskaičiuotas bandinių tampros modulis. Skaičiavimo duomenys pateikti 3 lentelėje.

Analizuojant ąžuolo bandinių amplitudines – dažnines charakteristikas, buvo įvertintos ąžuolo medienos klampiosios savybės (slopinimo koeficientas). Tam buvo fiksuojama virpesių amplitudė bandinio viduryje, jam virpant rezonansiniu dažniu bei nustatyti dažniai f_1 ir f_2 , kai ši amplitudė mažėja 1,414 karto. Taikant formulę (2.9), apskaičiuotas slopinimo koeficientas. Slopinimo koeficiento duomenys pateikti 3 lentelėje.

Vėliau ąžuolo medienos bandiniai buvo suskirstyti į keturias grupes (kiekvienoje grupėje po 10 bandinių). Vienos grupės bandiniai apdailinti aliejine danga, antros – pentaftaliniu laku (abejomis apdailos medžiagomis, po du sluoksnius iš abiejų pusių), trečiosios – dengti 30 mm vėliau 60 mm storio porolono sluoksniu, ketvirtosios – 1 mm storio dirbtine oda. Po to, taikant tą pačią metodiką, vėl įvertintos jų amplitudinės – dažninės charakteristikos, virpant rezonansiniais dažniais – modos. Apskaičiuoti dinaminis tampros modulis ir slopinimo koeficientas.

3 lentelė. Neapdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

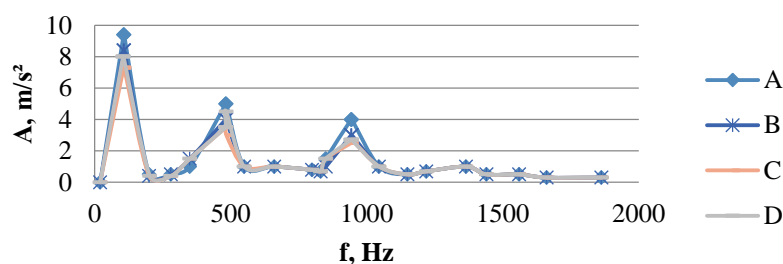
Grupė	I gr.		II gr.		III gr.		IV gr.	
	Bandinio Nr.	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$	Tampros modulis E , MPa
1 B	9504	0,036	9730	0,031	9478	0,039	8970	0,027
2 B	9916	0,026	8650	0,026	9266	0,039	9066	0,029
3 B	8774	0,023	9988	0,038	9227	0,039	9200	0,038
4 B	9652	0,038	10355	0,042	9202	0,039	9222	0,038
5 B	9599	0,03	9252	0,04	9917	0,041	9517	0,040
6 B	8885	0,027	8305	0,023	10202	0,042	9200	0,038
7 B	9075	0,032	10500	0,042	9410	0,04	9400	0,038
8 B	8995	0,027	7930	0,023	8961	0,027	8901	0,027
9 B	9207	0,03	10240	0,044	8813	0,027	9889	0,03
10 B	8811	0,027	9500	0,023	9930	0,032	9899	0,032
Vidurkis	9242	0,03	9445	0,033	9441	0,036	9326	0,034

Gauta, kad neapdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis vidutiniškai kito 9242 - 9445 MPa ribose. Yra žinoma, kad ąžuolo medienos tampros modulis išilgai pluošto kinta 9200 - 1500 MPa [19, 59].

Gautas slopinimo koeficientas kaip ir tampros modulio atveju buvo palygintas su literatūros duomenimis. Ankstesniuose darbuose yra nustatyta, kad ąžuolo medienos slopinimo koeficientas

apie 0,034 [5, 59]. Gauta, kad ąžuolo medienos bandinių slopinimo koeficientas vidutiniškai kito 0,03 - 0,036 ribose.

Pirmosios grupės ąžuolo medienos bandinių paviršiai buvo padengti aliejine danga po du sluoksnius iš abiejų bandinio pusių. Po kiekvieno apdailos padengimo, naudojant jau aprašytą metodiką, įvertinamos bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 19 pav.



19 pav. Aliejine apdailos medžiaga dengto ąžuolo bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – pirmas aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, B – antras aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, C – pirmas aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje, D – antras aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje

Nustatyta, kad ąžuolo medienos bandinius padengus aliejine apdailos medžiaga, bandinių rezonansinis dažnis kito 1 %, o virpesių amplitudė mažėjo iki 5 %. Tolimesniam ąžuolo medienos bandinių mechaninių ir klampiųjų savybių nagrinėjimui apskaičiuoti šių bandinių tampros modulis ir slopinimo koeficientas. Jie pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Aliejine apdailos medžiaga apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

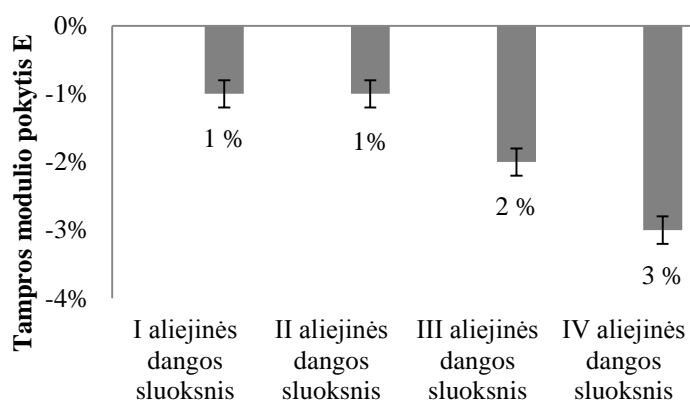
Grupė	Neapdailintas bandinys		I aliejinės dangos sluoksnis		II aliejinės dangos sluoksnis		III aliejinės dangos sluoksnis		IV aliejinės dangos sluoksnis		
	Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$
1 B		9504	0,036	9503	0,037	9487	0,037	9291	0,039	9215	0,039
2 B		9916	0,026	8946	0,026	9844	0,027	9589	0,027	9310	0,028
3 B		8774	0,023	8774	0,023	8610	0,022	8534	0,025	8303	0,029
4 B		9652	0,038	9652	0,038	9539	0,038	9465	0,039	9249	0,039
5 B		9599	0,03	9595	0,032	9574	0,032	9539	0,031	9389	0,034
6 B		8885	0,027	8883	0,028	8886	0,038	8853	0,039	8571	0,039
7 B		9075	0,032	9075	0,032	9070	0,034	8987	0,038	8875	0,039

8 B	8995	0,027	8994	0,027	8866	0,027	8749	0,027	8558	0,039
9 B	9207	0,03	9207	0,03	9194	0,03	9185	0,031	9158	0,032
10 B	8811	0,027	8811	0,027	8805	0,027	8719	0,028	8634	0,039
Vidurkis	9242	0,03	9144	0,031	9187	0,032	9091	0,033	8926	0,036

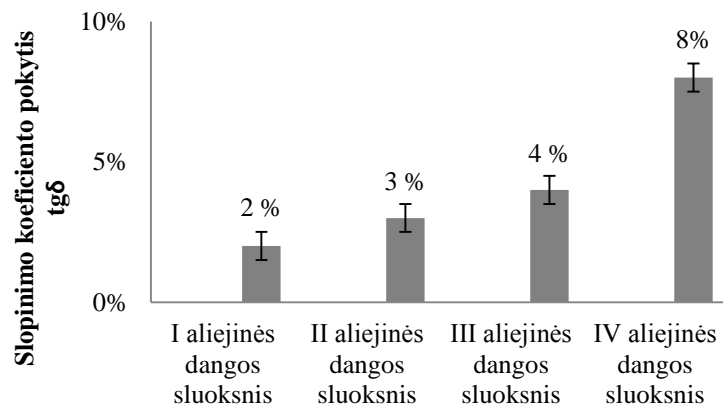
Pastebime, kad ąžuolo medienos bandinių tampros modulio ir slopinimo koeficiento pokyčiai po padengimo aliejine apdaila yra nežymūs. Tampros modulis vidutiniškai kito 8926 – 9091 MPa ribose, o slopinimo koeficientas vidutiniškai kito 0,03 - 0,036 ribose.

Po pirmojo aliejinės apdailos sluoksnio padengimo bandinio paviršiuje, tampros modulis sumažėjo iki 1 %, tuo tarpu slopinimo koeficientas padidėjo 2 %. Po antrojo sluoksnio padengimo tampros modulis sumažėjo taip pat 1 %, o slopinimo koeficientas išaugo iki 3 %. Po pirmojo dangos sluoksnio (III apdailos sluoksnio) antroje bandinio pusėje tampros modulis sumažėjo iki 2 %, o slopinimo koeficientas padidėjo iki 4 %. Ryškiausi pokyčiai pastebimi po paskutinio aliejinės dangos sluoksnio (IV apdailos sluoksnio) padengimo. Matome, kad tampros modulis sumažėjo 3 %, o slopinimo koeficientas padidėjo iki 8 % (20 ir 21 pav.).

Tampros modulio nežymus mažėjimas greičiausiai susijęs su masės pokyčiu, o didėjant masei ir apdailinant medžiaga, kurios tampros modulis gerokai mažesnis už medienos [48, 49], apdailinto medienos elemento tampros modulis sumažėjo. Bet kuriuo atveju viskas vyksta paklaidos ribose ir kadangi aliejinės apdailos medžiagos yra sąlyginai mažai (4 g užteptos aliejinės dangos, bandinio tampros modulį vidutiniškai sumažino 3 %) galima teigti, kad aliejinė apdailos medžiaga praktiškai nepakeitė akustinių ir tampriai plastiškųjų bandinio savybių.

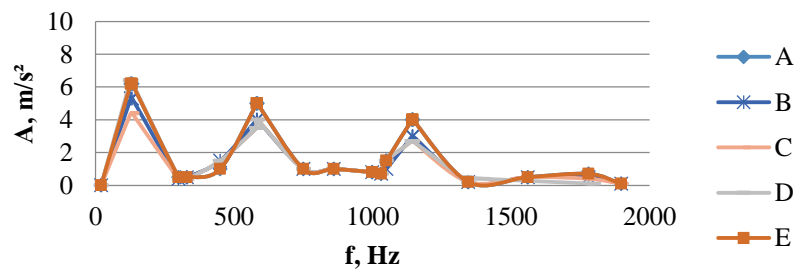


20 pav. ąžuolo medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga



21 pav. Ažuolo medienos bandinių slopinimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga

Antrosios grupės 10 ažuolo medienos bandinių paviršius buvo padengtas pentaftaliniu laku. Tyrimo metodika analogiška bandinių padengimo aliejinės apdailos medžiagos tyrimo nustatymui. Įvertintos bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 22 pav.



22 pav. Laku dengto ažuolo medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailintas paviršius, B – pirmas lako sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, C – antras lako sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, D – pirmas lako sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje, E – antras lako sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje

Skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatyta, kad ažuolo medienos bandinių paviršių padengus pirmuoju lako sluoksniu dažnių amplitudė sumažėjo 10 %, padengus antruoju vienoje bandinio pusėje ir antroje bandinio pusėje dar dviem sluoksniais, dažnių amplitudė sumažėjo iki 20 %. Ryškiausiai dažnių amplitudė kito 20 - 1120 Hz dažnių diapazone. Po kiekvieno bandinio padengimo laku, rezonansiniai dažniai pasislinko 1 - 2 Hz.

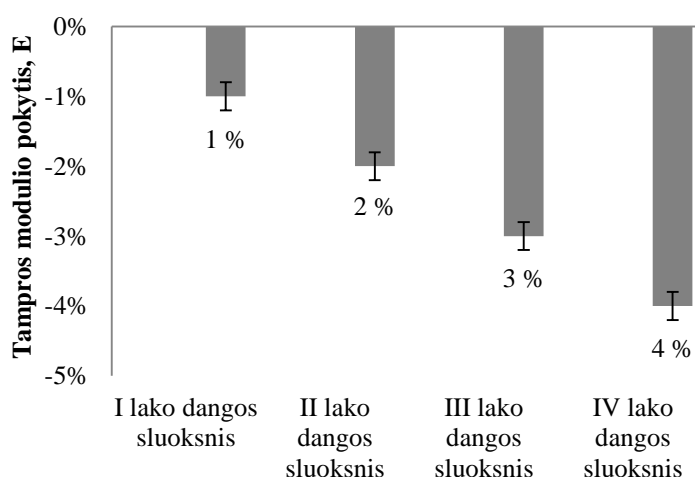
Nustačius bandinių amplitudinės – dažnines charakteristikas, 5 lentelėje pateikti apskaičiuoti šių bandinių tampros modulis ir slopinimo koeficientas.

5 lentelė. Pentaftaliniu laku apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

Grupė	Neapdailintas bandinys		I lako dangos sluoksnis		II lako dangos sluoksnis		III lako dangos sluoksnis		IV lako dangos sluoksnis	
	Bandinio Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa
1 B	9733	0,031	9730	0,033	9721	0,033	9382	0,037	9282	0,04
2 B	8655	0,026	8650	0,026	8640	0,027	8438	0,033	8380	0,038
3 B	10010	0,038	9988	0,038	9965	0,039	9757	0,042	9507	0,045
4 B	10455	0,042	10355	0,043	10109	0,043	9849	0,047	9600	0,049
5 B	9352	0,04	9252	0,04	8757	0,041	8691	0,043	8602	0,045
6 B	8415	0,023	8305	0,023	8201	0,024	8058	0,026	7902	0,027
7 B	10569	0,042	10500	0,042	10441	0,044	10403	0,044	10206	0,046
8 B	7941	0,023	7930	0,023	7929	0,023	7855	0,027	7858	0,029
9 B	10251	0,044	10240	0,044	10232	0,044	10127	0,047	10113	0,049
10 B	9522	0,023	9500	0,023	9429	0,023	9413	0,028	9271	0,029
Vidurkis	9490	0,033	9445	0,034	9342	0,035	9197	0,037	9072	0,04

Pastebime, kad ąžuolo medienos bandinius padengus pentaftaliniu laku po du sluoksnius iš abiejų bandinio pusių, bandinių tampros modulis vidutiniškai kito nuo 9445 MPa iki 9072 MPa, o slopinimo koeficientas vidutiniškai kito 0,034 - 0,04 ribose.

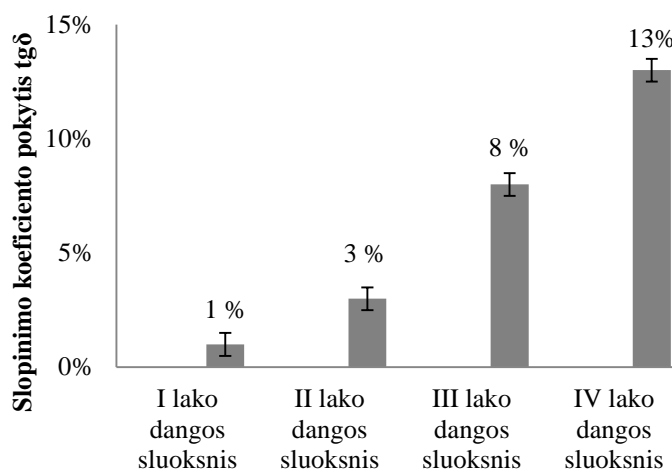
Apskaičiuota, kad ąžuolo medienos tampros modulis po pirmojo padengimo pentaftaliniu laku sumažėjo 1 %, o po ketvirtojo sumažėjo 4 %. Pastebime, kad didėjant lako kiekiui bandinių paviršiuje, tendencingai mažėja ąžuolo medienos bandinio tamprosios savybės (23 pav.).



23 pav. ąžuolo medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku

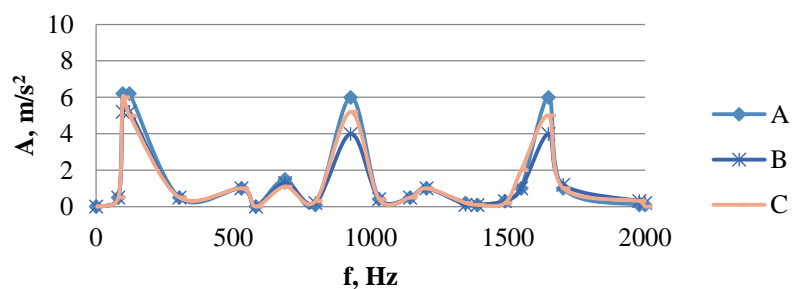
Apskaičiuota, kad didėjantis lako kiekis bandinio paviršiuje keičia ąžuolo medienos bandinių klampiąsias savybes. Pastebime, kad slopinimo koeficientas nuolatos didėjo. Po pirmojo lako sluoksnio padengimo bandinio paviršiuje, slopinimo koeficientas padidėjo 1 %, po antrojo lako sluoksnio padidėjo 3 %, po trečiojo – 8 %, o padengus ketvirtuoju sluoksniu, jis padidėjo iki 13 % (24 pav.).

Šią ąžuolo medienos bandinių tampros modulio ir slopinimo koeficiento tendenciją galima paaiškinti tuo, kad lako tampros modulis yra gerokai mažesnis už medienos tampros modulį [48, 49], todėl didėjant apdailos medžiagos kiekiui ir masei, mažėja bandinio tamprumas. Užteptas lako sluoksnis įsigėrė į medienos ląsteles ir sudarė apie 0,5 - 1 mm storio dangą, o bandinio masę padidino 5 - 6 g, todėl jis labiau nei aliejinė apdailos medžiaga įtakojo (didino) medienos slopinimo koeficientą ir mažino tamprumą.



24 pav. ąžuolo medienos bandinių slopinimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku

Trečiosios grupės 10 ąžuolo medienos bandinių paviršiai buvo apdailinti 30 mm, vėliau 60 mm storio porolono sluoksniu. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikiama 25 pav.



25 pav. Porolonu dengto ąžuolo medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailintas bandinio paviršius, B – bandinio paviršių apdailinus 30 mm storio porolono sluoksniu, C – bandinio paviršių apdailinus 60 mm storio porolono sluoksniu

Matome, kad porolonas gerai slopina virpesius. Užklįjavus 30 mm storio porolono sluoksni bandinio amplitudė sumažėjo apie 15 %, o sluoksnio storį padvigubinus sumažėjo iki 30 %. Be to, sumažėjo tokio bandinio ir rezonansinių dažnių vertės (kai kuriais atvejais iki 5%).

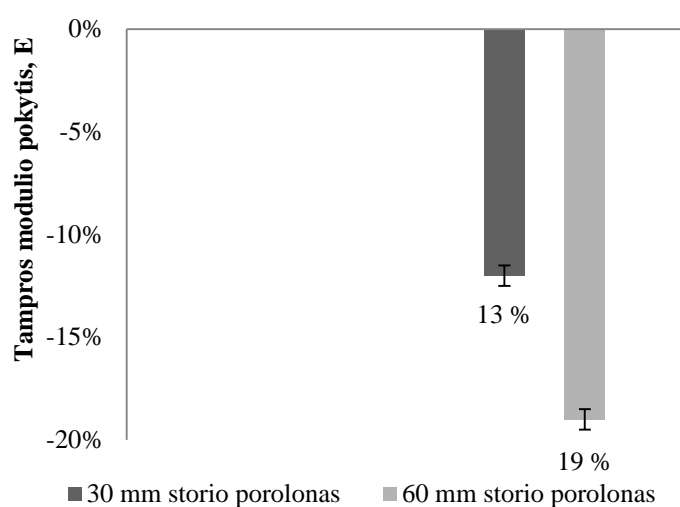
Remiantis nustatytomis ąžuolo medienos bandinių amplitudinėmis – dažninėmis charakteristikų vertėmis, toliau apskaičiuoti šių bandinių tampros modulis ir slopinimo koeficientas. Duomenys pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. 30 mm ir 60 mm storio porolonu apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

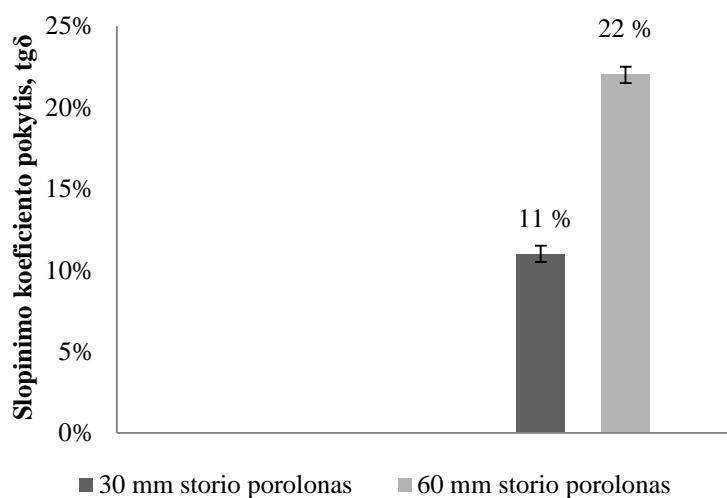
Grupė	Neapdailintas bandinys		30 mm storio porolonas		60 mm storio porolonas		
	Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$
1 B		9478	0,039	8022	0,042	7773	0,047
2 B		9266	0,039	8386	0,04	7655	0,043
3 B		9227	0,039	8286	0,04	7773	0,045
4 B		9202	0,039	8303	0,04	7774	0,045
5 B		9917	0,041	8600	0,043	7604	0,049
6 B		10202	0,042	9000	0,047	8603	0,049
7 B		9410	0,040	8530	0,042	7773	0,046
8 B		8961	0,027	7021	0,03	6794	0,032
9 B		8813	0,027	7964	0,031	7273	0,034
10 B		9930	0,032	8684	0,035	7274	0,039
Vidurkis		9441	0,037	8280	0,04	7630	0,044

Matome, kad porolonu apdailintų ąžuolo medienos elementų tampros modulis vidutiniškai kito 8280- 7630 MPa ribose. Slopavimo koeficientas taip pat vidutiniškai kito 0,04 - 0,044.

Ąžuolo medienos bandinių mechanines savybes labiausiai įtakojo 60 mm storio porolono sluoksnis. Tai galima paaiškinti tuo, kad jis sudarė reikšmingą kompozito „mediena - porolonas“ masės dalį. Pastebime, kad 30 mm storio porolonu dengtų bandinių tampros modulis sumažėjo iki 13 %, o slopavimo koeficientas padidėjo iki 11 %, tačiau 60 mm storio porolono sluoksniu dengtų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis sumažėjo iki 19 %, o slopavimo koeficientas priešingai – padidėjo iki 22 %. ąžuolo medienos bandinių tampros modulio ir slopavimo koeficiento pokytis procentais pateiktas 26 ir 27 pav.



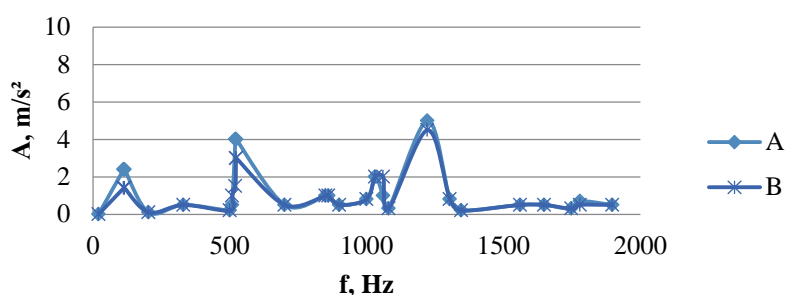
26 pav. ąžuolo medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu



27 pav. ąžuolo medienos bandinių slopavimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu

Slopinimo koeficientas padidėja, o tampros modulis sumažėja greičiau dėl to, kad porolonas yra plastiškas [38 - 41], be to, jis sudaro didesnę kompozito „mediena – porolonas“ dalį. Didėjant porolono storiui, kompozito „mediena – porolonas“ masė didėja iki 10 g. Didėjant bandinio masei, didėja ir bandinio tankis (kito 700 - 780 kg/m³) todėl šis pokytis ženkliai keičia ir medienos mechanines savybes.

Paskutinės – ketvirtosios grupės ąžuolo medienos bandiniai buvo apdailinti 1 mm storio dirbtine oda. Naudojant tą patį skersinių rezonansinių virpesių metodą, nustatytos šių bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 28 pav.



28 pav. Dirbtine oda dengto ąžuolo medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailinto bandinio paviršius, B – bandinio paviršius apdailinus 1 mm storio dirbtine oda

Matome, kad skirtingai nei porolonas dirbtinė oda virpesių amplitudę įtakoja mažiau. Taip yra dėl to, kad oda skirtingai nei porolonas yra mažo porėtumo ir mažiau slopino garsą [42]. Be to, kompozitas „mediena - oda“ sudarė gerokai mažesnę nei kompozitas „mediena - porolonas“ dalį. Oda rezonansinių dažnių vertes kai kuriais atvejais mažina iki 5 %.

7 lentelėje pateiktos ąžuolo medienos bandinių apdailintų dirbtine oda tampros modulio ir slopinimo koeficiento reikšmės.

7 lentelė. 1 mm storio dirbtine oda apdailintų ąžuolo medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

Grupė	Neapdailintas bandinys		1 mm storio dirbtinė oda		
	Bandinio Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$
	1 B	8970	0,027	9344	0,03
	2 B	9066	0,029	9126	0,032
	3 B	9200	0,038	9521	0,041
	4 B	9222	0,038	9402	0,04

5 B	9517	0,04	9917	0,043
6 B	9200	0,038	9402	0,04
7 B	9400	0,038	9610	0,044
8 B	8901	0,027	9261	0,034
9 B	9889	0,03	10013	0,036
10 B	9899	0,032	10023	0,042
Vidurkis	9326	0,034	9562	0,038

Oda, panašiai kaip ir porolonas, slopino bandinių virpesius, dėl to nustatytas gerokai didesnis slopinimo koeficientas. Apskaičiuota vidutinė vertė apie 0,038. Apskaičiuota, kad slopinimo koeficientas didėjo iki 13 %. Žinome, kad oda yra pakankamai tampri, ko pasekoje 3 % išaugo kompozito „mediena - oda“ tampros modulis, kuris siekė 9562 MPa.

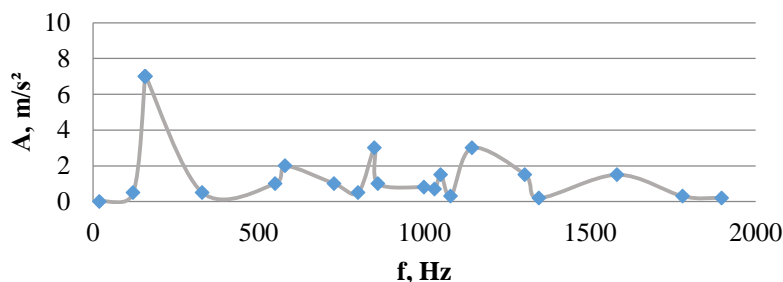
Matome, kad aliejinė danga mažiausiai įtakojo ąžuolo medienos bandinių tampriai plastiškąsias savybes, t. y., tampros modulį mažino 3 %, o slopinimo koeficientą didino 8 %. Pentaftalinio lako danga mažino tampros modulį iki 4 %, o slopinimo koeficientą priešingai – didino iki 13 %. Dirbtinė oda panašiai kaip ir aliejinė danga didino tampros modulį iki 3 %, o slopinimo koeficientą iki 13 %. Labiausiai bandinių tampriai plastiškąsias savybes įtakojo 60 mm storio porolonas. Jis tampros modulį sumažino iki 19 %, o slopinimo koeficientą didino iki 22 %.

Šiuos tampros modulio ir slopinimo koeficiento pokyčius greičiausiai įtakojo po apdailos padidėjęs bandinių tankis. Yra žinoma, kad ąžuolo medienos tankis yra 560 - 700 kg/m³ [63]. Atlikto tyrimo metu nustatyta, kad neapdailintų ąžuolo medienos bandinių tankis kito 680 - 700 kg/m³ ribose. Bandinio paviršių apdailinus 60 mm storio porolono sluoksniu, kompozito „mediena - porolonas“ tankis padidėjo ir vidutiniškai kito 770 - 780 kg/m³ ribose. Tankiui padidėjus, tampros modulis sumažėjo 19 %, o slopinimo koeficientas padidėjo 22 %. Bandinius padengus aliejine apdailos medžiaga ir pentaftaliniu laku tankis (680 - 700 kg/m³) padidėjo ir kito 685 - 690 kg/m³ ribose. Po padengimo lako dangos storis susidarė 1 - 2 mm, o aliejinės dangos storis tik 0,5 - 1 mm. Lakuotų bandinių tampros modulis sumažėjo 4 %, o aliejuotų – 3 % ir t.t. Kuo storesne apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis padengtas medienos bandinys, tuo labiau didėjo bandinių tankis ir keitėsi medienos mechaninės savybės, t. y., mažėjo medienos tampros modulis ir didėjo slopinimo koeficientas.

3.2. Pušies medienos bandinių tampriai plastiškųjų savybių tyrimas

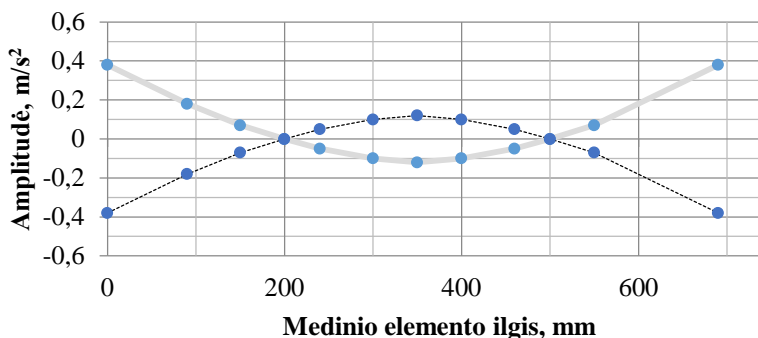
Tyrimas atliekamas analogišku ąžuolo medienos bandiniams tirti naudotu metodu. Naudoti 40 atsitiktinai pasirinkti neapdailinti pušies medienos elementai (lentelės). Skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatyti šių elementų rezonansiniai dažniai ir išlinkimo formos. Neapdailintų

pušies medienos elementų amplitudinės – dažninės charakteristikos buvo nustatytos 20 - 2000 Hz dažnių diapazone. Vieno iš jų amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 29 pav.



29 pav. Neapdailinto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika

Minėtame dažnių diapazone užfiksuoti keli rezonansiniai dažniai. Virpėdamas kiekvienu iš dažnių, bandinys išlinko atitinkamomis formomis. Nustatyta, kad bandinių išlinkimo forma, virpant jiems pirmuoju rezonansiniu dažniu, yra artima pirmajai teorinei strypo išlinkimo formai (modai). Vieno iš elementų išlinkimo forma pavaizduota 30 pav.



30 pav. Amplitudės pasiskirstymas visame medinio elemento ilgyje

Kitų elementų išlinkimo forma buvo analogiška.

Taikant deformuojamo strypo virpesių teorinius skaičiavimus (2.8 formulė), buvo apskaičiuotas bandinių tampros modulis. Skaičiavimo duomenys pateikti 8 lentelėje.

Analizuojant pušies bandinių amplitudines – dažnines charakteristikas, buvo įvertintos šių bandinių klampiosios savybės (slopinimo koeficientas). Tam buvo fiksuojama virpesių amplitudė bandinio viduryje, jam virpant rezonansiniu dažniu bei nustatyti dažniai f_1 ir f_2 , kai ši amplitudė mažėja 1,414 karto. Taikant formulę (2.9), apskaičiuotas slopinimo koeficientas. Slopinimo koeficiento duomenys pateikti 8 lentelėje.

Vėliau taikytas jau aprašytas procesas, kuris buvo naudotas ąžuolo medienos bandiniams tirti, t. y., pušies medienos bandiniai buvo suskirstyti į keturias grupes (kiekvienoje grupėje po 10 bandinių).

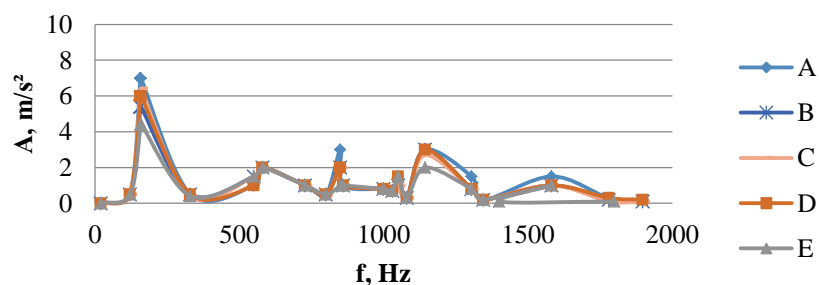
Vienos grupės bandiniai apdailinti aliejine danga, antros – pentaftaliniu laku (abejomis apdailos medžiagomis, po du sluoksnius iš abiejų pusių), trečiosios – dengti 30 mm vėliau 60 mm storio porolono sluoksniu, ketvirtosios – 1 mm storio dirbtine oda. Po to, taikant tą pačią metodiką, vėl įvertintos jų amplitudinės – dažninės charakteristikos, virpant rezonansiniais dažniais – modos. Apskaičiuoti dinaminis tampros modulis ir slopinimo koeficientas.

8 lentelė. Neapdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

Grupė	I gr.		II gr.		III gr.		IV gr.	
Bandinio Nr.	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$	Tampros modulis E , MPa	Slopinimo koeficientas $tg\delta$
1 B	12612	0,042	14104	0,047	6678	0,047	6786	0,047
2 B	9495	0,044	11809	0,044	6666	0,039	6627	0,039
3 B	8593	0,044	13264	0,039	6627	0,049	6800	0,049
4 B	7099	0,038	11719	0,045	8202	0,047	8202	0,047
5 B	8977	0,044	10131	0,039	7917	0,038	7917	0,038
6 B	12390	0,042	9082	0,041	8202	0,046	8202	0,046
7 B	11668	0,043	13072	0,042	9410	0,045	7410	0,045
8 B	8984	0,044	9686	0,046	8961	0,047	7961	0,045
9 B	8695	0,044	8221	0,045	8813	0,04	8813	0,04
10 B	10406	0,043	15053	0,044	8913	0,042	6813	0,042
Vidurkis	9892	0,043	11614	0,043	8039	0,044	7553	0,044

Gauta, kad 40 neapdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis vidutiniškai kito 7553 - 11614 MPa ribose. Žinoma, kad pušies medienos tampros modulis 6600 - 17200 MPa [19, 59]. Ankstesniuose darbuose nustatyta, kad pušies medienos slopinimo koeficientas yra apie 0,038 - 0,51 [5, 59]. Tyrimo metu nustatyta, kad naudotų pušies medienos bandinių slopinimo koeficientas vidutiniškai kito 0,043 - 0,044 ribose.

Pirmosios grupės pušies medienos bandinių paviršiai buvo padengti aliejine danga po du sluoksnius iš abiejų bandinio pusių. Po kiekvieno apdailos padengimo, naudojant jau aprašytą metodiką, įvertinamos bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 31 pav.



31 pav. Aliejine apdailos medžiaga dengto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailintas bandinio paviršius B – pirmas aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, C – antras aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, D – pirmas aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje, E – antras aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje

Aliejinė apdailos medžiaga skirtingai nei kitos pasirinktos apdailos medžiagos mažiausiai įtakojo bandinių akustines savybes. Po pirmojo ir antrojo apdailos medžiagos padengimo, rezonansinių dažnių kreivė mažėjo 1 %. Po trečiojo ir ketvirtojo karto, rezonansiniai dažniai sumažėjo 2 %. Didėjant dengiamos apdailos medžiagos kiekiui, šiek tiek kito virpesių amplitudė – ji mažėjo. Po pirmojo aliejinės apdailos medžiagos padengimo, amplitudė sumažėjo iki 1 karto, o po ketvirtojo apdailos sluoksnio sumažėjo iki 3 kartų.

Vėliau apskaičiuotos tampros modulio ir slopinimo koeficiento reikšmės pateikiamos 9 lentelėje.

9 lentelė. Aliejine apdailos medžiaga apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

Grupė	Neapdailintas bandinys		I aliejinės dangos sluoksnis		II aliejinės dangos sluoksnis		III aliejinės dangos sluoksnis		IV aliejinės dangos sluoksnis		
	Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$
1 B		12612	0,042	12527	0,044	12344	0,047	12340	0,048	12428	0,049
2 B		9495	0,044	9225	0,045	9192	0,048	9190	0,049	9153	0,05
3 B		8593	0,044	8472	0,045	8313	0,048	8310	0,049	8293	0,05
4 B		7099	0,038	7037	0,039	6893	0,04	6890	0,041	6879	0,042
5 B		8977	0,044	8952	0,045	8741	0,047	8740	0,049	8723	0,05
6 B		12390	0,042	12369	0,044	12299	0,047	12289	0,048	12248	0,049
7 B		11668	0,043	11589	0,045	11584	0,048	11583	0,049	11510	0,05
8 B		8984	0,044	8967	0,045	8961	0,047	8958	0,049	8942	0,05
9 B		8695	0,044	8685	0,045	8677	0,048	8676	0,0499	8647	0,051

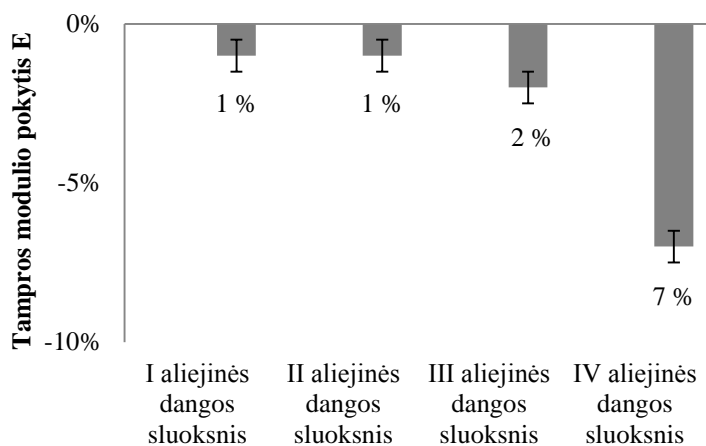
10 B	10406	0,043	10299	0,044	10295	0,047	10285	0,0493	10249	0,05
Vidurkis	9892	0,043	9812	0,045	9730	0,047	9726	0,0487	9707	0,049

Pastebime, kad pušies medienos bandinius apdailinus aliejine danga, keitėsi jų mechaninės savybės. Tampros modulis vidutiniškai kito 9707 - 9812 MPa ribose, o slopinimo koeficientas – 0,045 - 0,049 ribose.

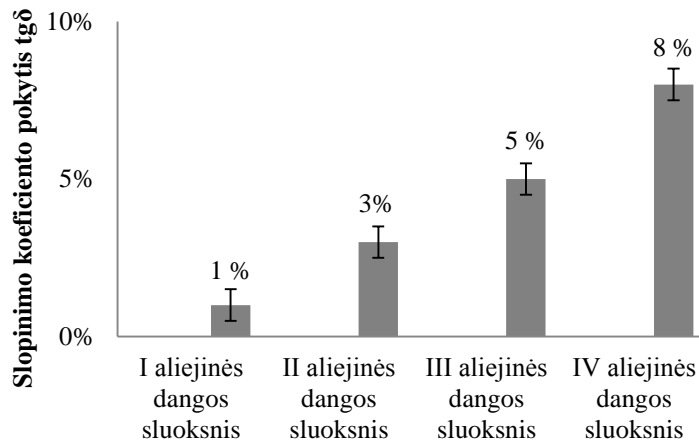
Pirmasis ir antrasis aliejinės dangos sluoksnis pušies medienos bandinių tampros modulį sumažino 1 %, trečiasis – 2 %, o ketvirtasis – 7 % (32 pav.).

Slopinimo koeficiento pokytis po pirmojo aliejinės apdailos sluoksnio padidėjo 1 % , po antrojo – 3 %, po trečiojo 5 %, o po ketvirtojo – 8 %. Šios reikšmės pateiktos 33 pav.

Pastebime, kad storesnis aliejinės apdailos medžiagos sluoksnis mažina ir bandinių tampros modulį ir didina slopinimo koeficientą. Po ketvirtojo sluoksnio padengimo, dangos storis (iš abiejų bandinio pusių) sudarė apie 0,5 - 1 mm bandinio storio. Taip greičiausiai yra dėl to, kad didėjant aliejinės apdailos medžiagos kiekiui, didėjo ir bandinio tankis, kuriam keičiantis, kito ir medienos mechaninės savybės.

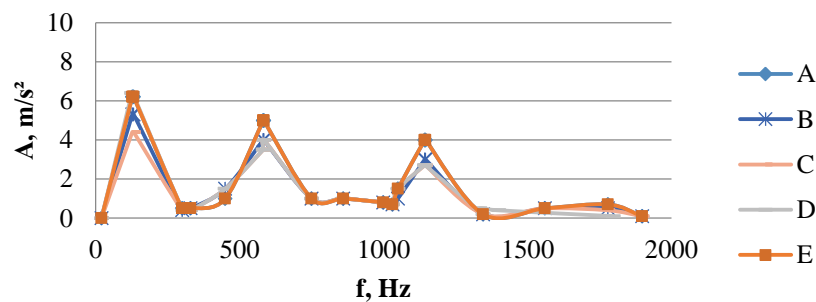


32 pav. Pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga



33 pav. Pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo aliejine apdailos medžiaga

Antrosios grupės 10 pušies medienos bandinių paviršius buvo padengtas pentaftaliniu laku. Bandymo metu įvertintos šių bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Vieno iš jų charakteristika pateikta 34 pav.



34 pav. Apdailinto laku pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailintas bandinio paviršius, B – pirmas lako sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, C – antras lako sluoksnis pirmoje bandinio paviršiaus pusėje, D – pirmas lako sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje, E – antras lako sluoksnis antroje bandinio paviršiaus pusėje

Skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatyta, kad pušies kaip ir ąžuolo medienos bandinių paviršių padengus pirmuoju lako sluoksniu dažnių amplitudė sumažėjo 10 %, padengus antruoju vienoje bandinio pusėje ir antroje bandinio pusėje dar dviem sluoksniais, dažnių amplitudė sumažėjo iki 17 %, t. y., 3 % mažiau nei ąžuolo medienos bandinių. Po kiekvieno bandinio padengimo laku, rezonansiniai dažniai pasislinko iki 5 Hz.

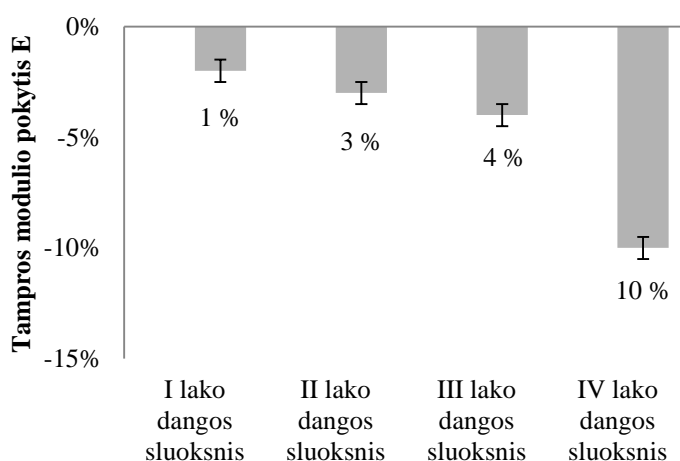
Taikant ankstesniuose bandymuose aprašytą metodiką, nustatytos laku apdailintų pušies medienos bandinių mechaninės savybės, kurios yra pateiktos 10 lentelėje.

10 lentelė. Pentaftaliniu laku apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

Grupė	Neapdailintas bandinys		I lako dangos sluoksnis		II lako dangos sluoksnis		III lako dangos sluoksnis		IV lako dangos sluoksnis	
	Bandinio Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa
1 B	14104	0,047	14064	0,048	13792	0,049	13692	0,049	13672	0,051
2 B	11809	0,044	11530	0,044	11521	0,045	11471	0,045	11451	0,046
3 B	13264	0,039	13178	0,041	13001	0,042	12978	0,042	12908	0,043
4 B	11719	0,045	11526	0,046	11507	0,046	11487	0,047	11447	0,048
5 B	10131	0,039	9888	0,04	9814	0,04	9782	0,041	9762	0,042
6 B	9082	0,041	8559	0,042	8415	0,042	8400	0,043	8390	0,044
7 B	13072	0,042	12943	0,043	12832	0,044	1273	0,044	1260	0,046
8 B	9686	0,046	9496	0,047	9344	0,048	9325	0,049	9301	0,05
9 B	8221	0,045	8183	0,046	8150	0,047	8102	0,048	7992	0,049
10 B	15053	0,044	14973	0,045	14524	0,046	14413	0,047	14310	0,049
Vidurkis	11614	0,043	11434	0,044	11290	0,045	10092	0,045	10049	0,047

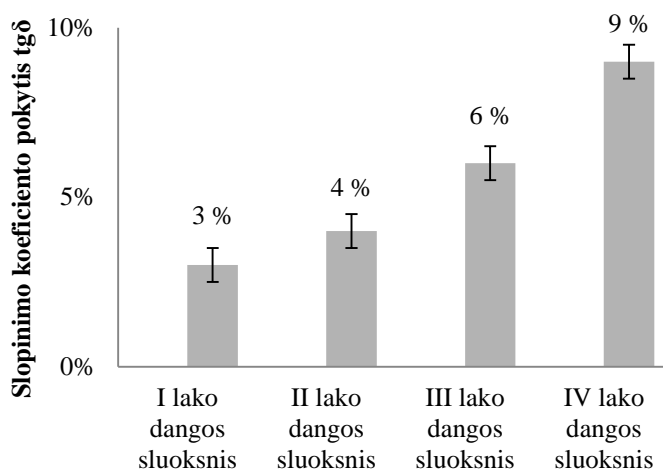
Matome, kad bandinius apdailinus pentaftaliniu laku po du sluoksniu iš abiejų pusių tampros modulis vidutiniškai kito 10049 - 11434 MPa ribose, o slopinimo koeficientas – 0,044 - 0,047 ribose.

Statistiškai įvertinus tampros modulio ir slopinimo koeficiento vertes, pastebime, kad tendencija išliko ta pati, kaip ir ištirtų ažuolo medienos bandinių, t. y., didėjant lako kiekiui, mažėjo pušies medienos bandinių tampros modulis. Tirtų pušies medienos bandinių paviršių padengus pirmuoju lako sluoksniu tampros modulis sumažėjo iki 1 %, o padengus ketvirtuoju lako sluoksniu, tampros modulis sumažėjo iki 10 % (35 pav.).



35 pav. Pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku

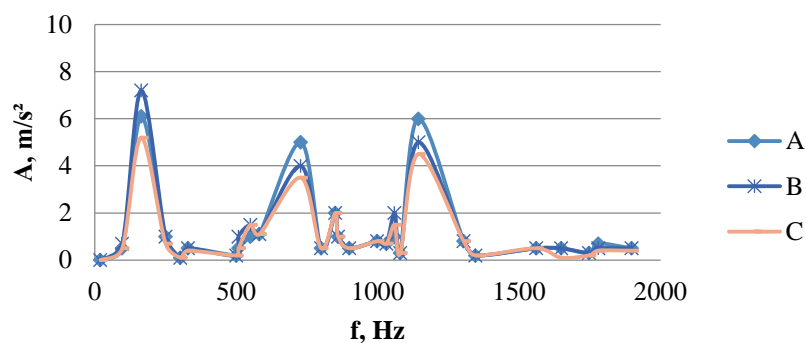
Pastebime, kad mažėjant tampros moduliui, tendencingai didėjo slopinimo koeficientas. Nustatyta, kad po pirmojo lako sluoksnio padengimo, pušies medienos bandinių tampros moduliui sumažėjus iki 1 %, slopinimo koeficientas padidėjo 3 %. Po antrojo lako sluoksnio, tampros modulis sumažėjo iki 3 %, tuo tarpu slopinimo koeficientas padidėjo 4 %, o po trečiojo sluoksnio padidėjo dar 6 %. Po ketvirtojo apdailos sluoksnio, bandinių tampros modulis sumažėjo iki 10 %, o slopinimo koeficientas padidėjo iki 9 % (36 pav.).



36 pav. Pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo pentaftaliniu laku

Pastebime, kad kaip ir ąžuolo taip ir pušies medienos bandinių tampros modulis mažėjo, didėjant lako kiekiui bandinio paviršiuje. Tai tikriausiai įtakoja didėjantis bandinio tankis. Yra žinoma, kad pušies medienos tankis yra 400 – 500 kg/m³ [64]. Nustatyta, kad pasirinktų pušies medienos bandinių tankis kito 490 - 510 kg/m³ ribose. O po apdailinimo pentaftaliniu laku kito 500 - 520 kg/m³ ribose. Taigi matome, kad po apdailinimo laku, tampros modulis mažėjo 10 %.

Trečiosios grupės 10 pušies medienos bandinių paviršiai buvo apdailinti 30 mm, vėliau 60 mm storio porolono sluoksniu. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikiama 37 pav.



37 pav. Porolonu dengto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailinto bandinio paviršiaus, B – bandinio paviršių apdailinus 30 mm storio porolono sluoksniu, C – bandinio paviršių apdailinus 60 mm storio porolono sluoksniu

Pastebime, kad nepriklausomai nuo medžio rūšies, porolonas gerai absorbuoja garsą ir mažina virpesius. Bandinio paviršiuje priklijavus 30 mm virpesių amplitudė sumažėja iki 13 %, o 60 mm storio poroloną iki 27 %.

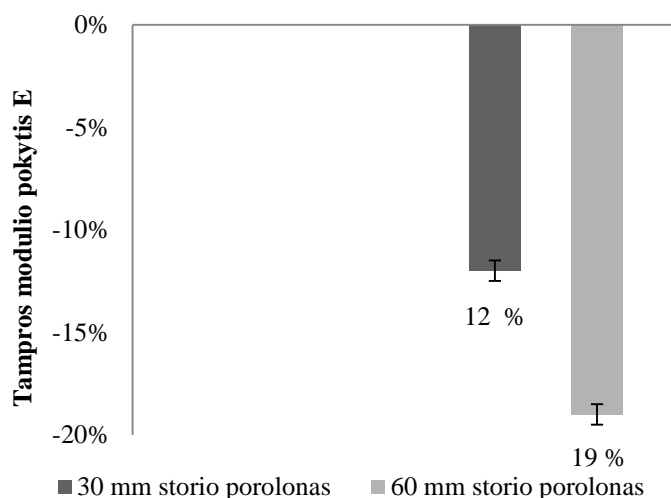
Nustačius pušies medienos bandinių amplitudinėmis – dažninėmis charakteristikų vertėmis, toliau apskaičiuoti šių bandinių tampros modulis ir slopinimo koeficientas. Duomenys pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. 30 mm ir 60 mm storio porolonu apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

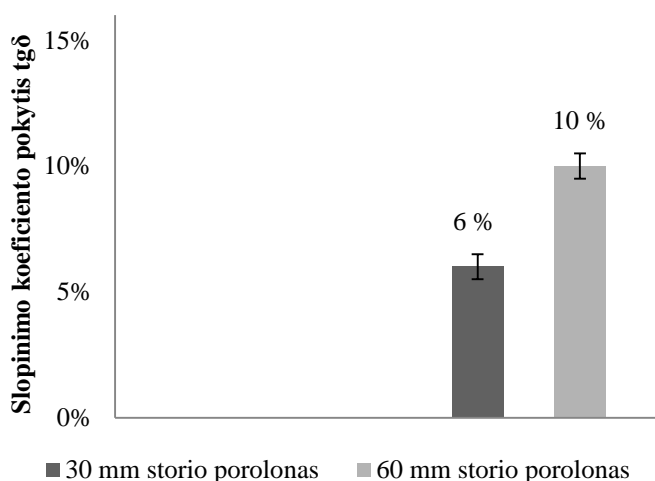
Grupė	Neapdailintas bandinys		30 mm storio porolonas		60 mm storio porolonas		
	Bandinio Nr.	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$
	1 B	6678	0,047	5479	0,049	4774	0,052
	2 B	6666	0,039	5356	0,043	4655	0,054
	3 B	6627	0,049	6227	0,05	4774	0,063
	4 B	8202	0,047	7302	0,058	6774	0,063
	5 B	7917	0,038	6917	0,04	6604	0,042
	6 B	8202	0,046	8103	0,056	6603	0,058
	7 B	9410	0,045	7410	0,049	7073	0,049
	8 B	8961	0,047	7961	0,049	7773	0,057
	9 B	8813	0,04	7713	0,041	7263	0,046
	10 B	8913	0,042	7813	0,043	7274	0,044
	Vidurkis	8039	0,044	7028	0,048	6428	0,048

Matome, kad porolonu apdailintų pušies medienos elementų tampros modulis vidutiniškai kito 7028 - 6428 MPa ribose. Slopinimo koeficientas taip pat vidutiniškai kito 0,048 - 0,048.

Pušies kaip ir ąžuolo medienos bandinių mechanines savybes labiausiai įtakojo 60 mm storio porolono sluoksnis. Čia jis taip pat sudarė reikšmingą kompozito „mediena - porolonas“ masės dalį. Pastebime, kad 30 mm storio porolonu dengtų pušies medienos bandinių tampros modulis sumažėjo iki 12 %, o slopinimo koeficientas padidėjo 6 %. 60 mm storio porolono sluoksniu dengtų medienos bandinių tampros modulis sumažėjo iki 19 %, o slopinimo koeficientas padidėjo 13 %. Pušies medienos bandinių tampros modulio ir slopinimo koeficiento pokytis procentais pateiktas 38 ir 39 pav.

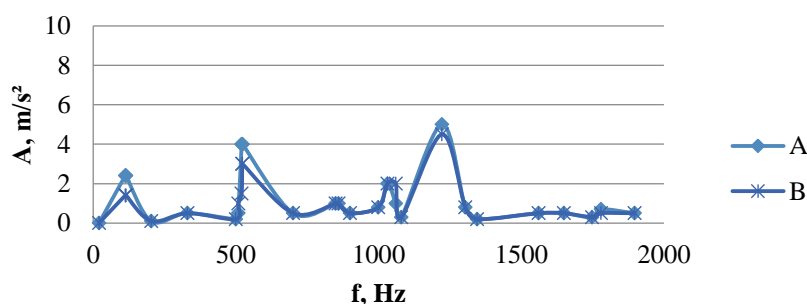


38 pav. Pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu



39 pav. Pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo 30 mm ir 60 mm storio porolonu

Ketvirtosios grupės pušies medienos bandiniai buvo apdailinti 1 mm storio dirbtine oda. Naudojant tą patį skersinių rezonansinių virpesių metodą, nustatytos šių bandinių amplitudinės – dažninės charakteristikos. Vieno iš bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika pateikta 40 pav.



40 pav. Dirbtine oda dengto pušies medienos bandinio amplitudinė – dažninė charakteristika: A – neapdailinto bandinio paviršiaus, B – bandinio paviršių apdailinus 1 mm storio dirbtinės odos sluoksniu

Nustatyta, kad virpesių amplitudė aukščiausia kilo iki 5 m/s^2 , 1221 - 1223 Hz dažnių diapazone. Apdailinus oda, rezonansinis dažnis pasislinko 1 - 2 Hz, o virpesių amplitudė sumažėjo iki $4,5 \text{ m/s}^2$. Oda rezonansinių dažnių vertes kai kuriais atvejais mažino iki 5 %.

12 lentelėje pateiktos pušies medienos bandinių apdailinus oda tampros modulio ir slopinimo koeficiento reikšmės.

12 lentelė. 1 mm storio dirbtine oda apdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $tg\delta$

Grupė Bandinio Nr.	Neapdailintas bandinys		1 mm storio dirbtinė oda	
	E , MPa	$tg\delta$	E , MPa	$tg\delta$
1 B	6786	0,047	7344	0,05
2 B	6627	0,039	6926	0,042
3 B	6800	0,049	6821	0,052
4 B	8202	0,047	8402	0,049
5 B	7917	0,038	8117	0,04
6 B	8202	0,046	8402	0,049
7 B	7410	0,045	7610	0,047
8 B	7961	0,045	8061	0,049
9 B	8813	0,040	9013	0,044
10 B	6813	0,042	6910	0,046
Vidurkis	7553	0,044	7761	0,047

Jau minėta, kad oda, pušies kaip ir ąžuolo medienoje slopino rezonansinius virpesius. Čia pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento vidutinė vertė 0,047. Pastebime, kad slopinimo

koeficientas gerokai padidėjo, t. y., pušies medienoje jis išaugo iki 7%. Tamprios odos mechaninės savybės taip pat padidino medienos tamprumą. Apskaičiuota, kad neapdailintų pušies medienos bandinių tampros modulis kito 6200 - 9500 MPa ribose. Po apdailinimo dirbtine oda jis padidėjo iki 7761 MPa. Pokytis tarp neapdailinto ir apdailinto bandinio susidarė iki 3 %.

Žinoma, kad pušies medienos tankis yra apie 400 - 550 kg/m³ [64]. Nustatyta, kad neapdailintų pušies medienos bandinių tankis kito 490 - 510 kg/m³ ribose. Matome, kad visos medžiagos keitė medienos bandinių mechanines savybes. Didesnis apdailos medžiagos storis ir tankis labiau mažino medienos bandinių tampros modulį ir didino slopinimo koeficientą. Apdailinus pušies medienos bandinius aliejine danga, baninių tankis kito 494 - 510 kg/m³ ribose. Šis pokytis tampros modulį sumažino 7 %, o slopinimo koeficientą padidino 8 %. Pentaftalinio lako danga padengtų bandinių tankis kito 500 - 512 kg/m³ ribose, tai tampros modulį mažino 10 %, o slopinimo koeficientą priešingai – didino iki 9 %. 1 mm storio dirbtinė oda didino pušies bandinių tankį 494 - 514 kg/m³ ribose. Šis pokytis tampros modulį didino 3 %, o slopinimo koeficientą iki 7 %. Labiausiai bandinių tampriai plastiškąsias savybes įtakojo 60 mm storio porolonas. Jis bandinio tankį didino 540 - 560 kg/m³ ribose. Padidėjęs tankis tampros modulį sumažino iki 19 %, o slopinimo koeficientą didino iki 13 %.

3.3. Ažuolo ir pušies medienos bandinių tyrimo duomenų palyginimas

Gauti azuolo ir pušies medienos bandinių tampros modulis ir slopinimo koeficientas apdoroti statistiškai. Vidurkiai pateikiami 13 lentelėje.

13 lentelė. Statistinės azuolo ir pušies medienos bandinių tampros modulio E ir slopinimo koeficiento $tg\delta$ vidutinės vertės

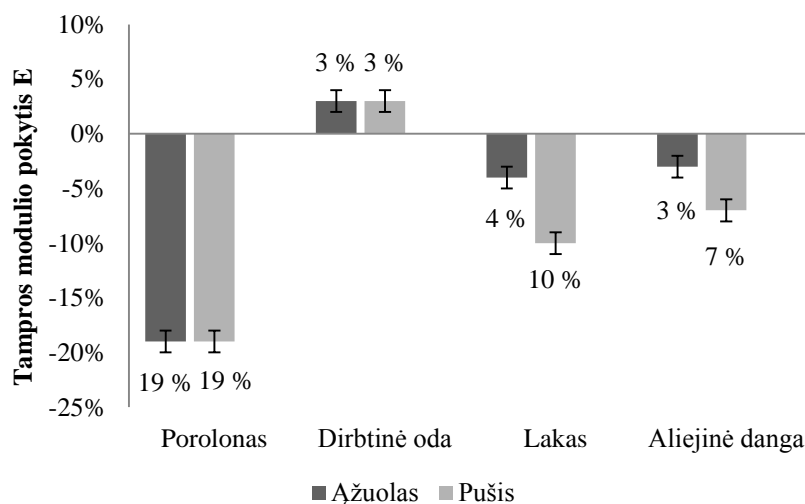
		Tampros modulis E							
Medienos rūšis	Statistinis rodiklis	I gr.		II gr.		III gr.		IV gr.	
		Neapdailinti bandiniai	Apdailinti aliejine apdailos medžiaga	Neapdailinti bandiniai	Apdailinti pentaftaliniu laku	Neapdailinti bandiniai	Apdailinti porolonu	Neapdailinti bandiniai	Apdailinti dirbtine oda
Ažuolas	Vidurkis	9242	8926	9445	9072	9441	7630	9326	9562
	Dispersija	4198418	1913457	5495858	2529128	5467481	7223542	3061996	2032125
	Vidutinis kvadratinis nuokrypis	2049	1383	2344	1590	2338	2687	1749	1425
	Variacijos koeficientas, %	22	15	24	17	24	35	18	14
Pušis	Vidurkis	9892	9707	11614	10049	8039	6428	7553	7761
	Dispersija	7318497	7186908	7200796	8213933	1511043	1162841	1199114	1216539
	Vidutinis kvadratinis nuokrypis	2705	2680	2683	2865	1229	1078	1095	1102
	Variacijos koeficientas, %	27	28	23	28	14	18	15	14

		Slopinimo koeficientas tgδ							
Medienos rūšis	Statistinis rodiklis	I gr.		II gr.		III gr.		IV gr.	
		Neapdailinti bandiniai	Apdailinti aliejine apdailos medžiaga	Neapdailinti bandiniai	Apdailinti pentaftaliniu laku	Neapdailinti bandiniai	Apdailinti porolonu	Neapdailinti bandiniai	Apdailinti dirbtine oda
Ažuolas	Vidurkis	0,03	0,036	0,033	0,04	0,036	0,044	0,034	0,038
	Dispersija	$7,5 \times 10^{-7}$	$3,24 \times 10^{-7}$	$3,99 \times 10^{-6}$	$1,01 \times 10^{-6}$	$5,92 \times 10^{-7}$	$1,54 \times 10^{-6}$	$5,44 \times 10^{-7}$	$1,36 \times 10^{-6}$
	Vidutinis kvadratinis nuokrypis	0,0009	0,0006	0,0012	0,001	0,0008	0,0012	0,0007	0,0012
	Variacijos koeficientas, %	3	2	6	3	2	3	2	3
Pušis	Vidurkis	0,045	0,049	0,043	0,047	0,044	0,048	0,044	0,047
	Dispersija	$4,3 \times 10^{-8}$	$1,96 \times 10^{-7}$	$6,88 \times 10^{-7}$	$7,52 \times 10^{-7}$	$3,96 \times 10^{-7}$	$3,89 \times 10^{-7}$	$3,96 \times 10^{-7}$	$4,23 \times 10^{-7}$
	Vidutinis kvadratinis nuokrypis	0,0002	0,0004	0,0008	0,0009	0,0006	0,002	0,0006	0,0007
	Variacijos koeficientas, %	0,5	1	2	2	1,5	4	1,4	1,3

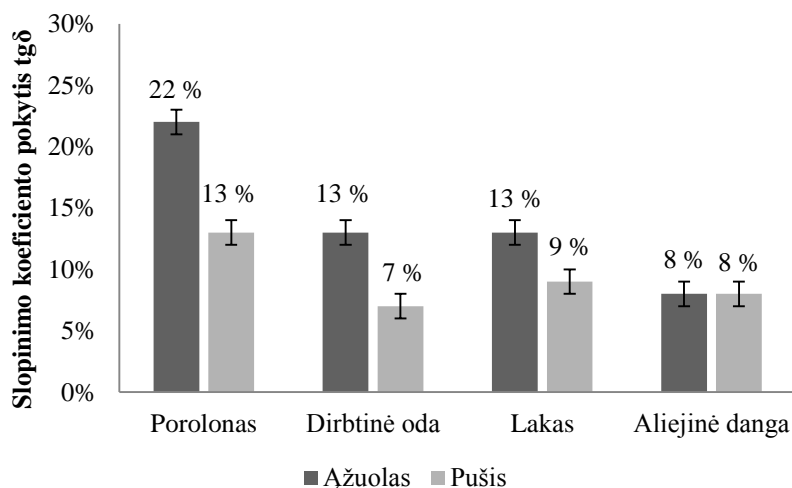
Yra žinoma, jeigu variacijos koeficientas $v \leq 5 - 10\%$ rezultatų skaida ne didelė; jeigu $15 - 20\%$ - didelė; jeigu jis $\geq 20\%$ - labai didelė [63]. Ažuolo ir pušies medienos bandinių rezultatus apdorojus statistiškai pastebime, kad apdailintų bandinių tampros modulio variacijos koeficiento sklaida svyruoja tarp didelės ir labai didelės, t. y., $14 - 35\%$. Tokia didelė verčių sklaida yra dėl to, kad labai skirtingos (ir kinta pačiame diapazone) medienos mechaninės savybės. Didžiausia tampros modulio skaida (35%) užfiksuota ažuolo medienos bandiniuose padengtuose porolonu. Apdailintuose pušies medienos bandiniuose didžiausią sklaidą matome bandinius apdailinus laku ir aliejine danga (28%). Mažiausią sklaidą pastebime bandinius padengus oda. Abiejų rūšių medienoje ji siekia – 14% .

Matome, kad ažuolo ir pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento variacijos sklaida yra nedidelė – $0,5 - 4\%$. Slopinimo koeficiento kaip ir tampros modulio didžiausia variacijos sklaida pastebima pušies bandinius apdailinus porolonu (4%). Mažiausia – apdailinus aliejine danga (1%). Tuo tarpu apdailintuose ažuolo medienos bandiniuose slopinimo koeficiento sklaida beveik visais atvejais sudarė 3% , tik aliejine danga dengti bandiniai sudarė 2% .

Neapdailintų ažuolo medienos bandinių tampros moduliai vidutiškai kito $9242 - 9445$ MPa ribose, o pušies kito $7553 - 11614$ MPa ribose. Po padengimo įvairiomis apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis ažuolo tampros modulis kito $7630 - 9562$ MPa ribose, o pušies kito $6428 - 10049$ MPa ribose. Neapdailintų ažuolo medienos bandinių slopinimo koeficientas vidutiniškai kito $0,03 - 0,036$ ribose, pušies – $0,044 - 0,045$ ribose. Bandinius apdailinus, slopinimo koeficientas didėjo. Pastebime, kad ažuolo medienos bandinių slopinimo koeficientas kito $0,036 - 0,044$ ribose, o pušies medienos bandinių kito $0,047 - 0,049$ ribose.



41 pav. Ažuolo ir pušies medienos bandinių tampros modulio E pokytis procentais po padengimo apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis



42 pav. Ažuolo ir pušies medienos bandinių slopinimo koeficiento $tg\delta$ pokytis procentais po padengimo apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis

Analizuojant tyrimo metu gautus duomenis (41 ir 42 pav.) pastebime, kad skirtingos apdailos ir minkštinančios medžiagos skirtingai įtakoja ažuolo ir pušies medienos bandinių tampriai plastiškąsias savybes. Greičiausiai taip yra dėl to, kad skiriasi apdailos medžiagų ir medienos bandinių masė. Didesnės masės apdailos medžiagos labiau įtakojo medienos bandinių tampriąsias savybes. Atlikto tyrimo metu nustatyta, kad neapdailintų ažuolo medienos bandinių masė kito 0,7 - 0,8 kg ribose. Bandinio paviršių apdailinus 60 mm storio porolono sluoksniu, kompozito „mediena - porolonas“ masė padidėjo ir vidutiniškai kito 0,76 - 0,87 kg ribose. Padidėjus kompozito „mediena - porolonas“ masei, bandinio tampros modulis sumažėjo 19 %, o slopinimo koeficientas padidėjo 22 %. Tos pačios masės ažuolo medienos bandinius padengus aliejine danga (kuri sudarė apie 0,5 – 1

mm bandinio storio) ir pentaftaliniu laku (kuris sudarė apie 1 – 2 mm dangos storio) masė kito 0,71 - 0,82 kg ribose. Pastebime, kad masė didėjo neženkiai, todėl tampros modulio pokytis buvo nežymus, t. y., padengus aliejine apdailos medžiaga sumažėjo 3 %, o slopinimo koeficientas padidėjo 8 %. Tampros modulio mažėjimas pastebimas ąžuolo medienos bandinius padengus laku. Čia jis sumažėja 4 %, tačiau slopinimo koeficientas didėja 13 %. Taip yra greičiausiai dėl to, kad lakas skirtingai nei aliejinė danga labiau įsigėrė į medieną ir sudarė didesnę bandinio masės dalį.

Nustatyta, kad neapdailintų pušies medienos bandinių masė kito 0,47 - 0,58 kg ribose. Čia kaip ir ąžuolo medienos bandinių tampros modulį ir slopinimo koeficientą įtakojo tos pačios apdailos medžiagų savybės, t. y., jų svoris, storis ir tankis. Labiausiai bandinių tampriai plastiškąsias savybes įtakojo 60 mm storio porolonas. Jis bandinių masę didino 0,483 - 0,65 kg. Padidėjusi masė tampros modulį sumažino iki 19 %, o slopinimo koeficientą didino iki 13 %. Pastebime, kad pušies medienos bandinių slopinimo koeficientas 6 % mažesnis nei ąžuolo medienos bandinių. Tam įtakos greičiau turėjo tai, kad pušies medienos masė tankis yra gerokai mažesni nei ąžuolo, dėl to porolonas mažiau įtakojo slopinimo koeficientą. Pušies medienos bandinius padengus laku tampros modulis sumažėjo 10 %. Manoma, kad tai nutiko dėl to, kad lakas pušies medienos bandinių paviršiuje sudarė storesnę dangą (1 - 2 mm) nei ąžuolo medienos bandinių. Be to, yra žinoma, kad lako tampros modulis yra mažesnis už medienos tampros modulį ir siekia iki 10 MPa [48, 49]. Dėl to lakas mažina pušies medienos tamprumą. Dėl šių pačių priežasčių, alieninė danga taip pat mažina medienos tamprumą tik šiek tiek mažiau (iki 3 %).

Pastebime, kad 1 mm storio dirbtinė oda vienodai įtakojo ąžuolo ir pušies medienos bandinių tampros modulį ir slopinimo koeficientą. Tai galima paaiškinti tuo, kad oda skirtingai nei porolonas sudarė mažesnę kompozito „mediena - oda“ masės dalį. ąžuolo ir pušies kompozitų „mediena - oda“ masė didėjo apie 0,01 kg. Oda skirtingai nei lakas neįsigėrė į medienos paviršių. Dėl šių priežasčių dirbtinė oda labiau didino nei mažino medienos tampriai plastiškąsias savybes.

Analizuojant tyrimų rezultatus galima teigti, kad, panaudojus apdailos ir kitas medžiagas, galima keisti ir valdyti medinių elementų tampriai plastiškąsias ir akustines savybes. Be to, žinant atskirų medžiagų tampriai plastiškąsias savybes, galima prognozuoti ir projektuoti pagal poreikį gaminius, skirtus sustiprinti arba priešingai, slopinti, sugerti virpesius ir triukšmą.

Išvados

1. Dinaminiu skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatytos pušies ir ąžuolo medienos bandinių tampros modulio ir slopinimo koeficiento vertės atitinka žinomas. Tai rodo, kad įranga yra tinkama minimų tyrimų atlikimui.
2. Gauta, kad ąžuolo ir pušies medienos tampros modulio ir slopinimo koeficiento pokytis apdailinant skirtingomis apdailos ir minkštinančiomis medžiagomis yra skirtingas. Porolonas, lakas ir aliejinė apdailos medžiaga mažina tampros modulį ir didina slopinimo koeficientą. Tuo tarpu oda priešingai didina tampros modulį ir slopinimo koeficientą.
3. Nustatyta, kad didesnė apdailos ar kitos medžiagos masė daro didesnę įtaką viso bandinio savybėms. Dėl to porolonas labiau įtakojo bandinio tampriai plastiškąsias savybes nei apdailos medžiagos (atitinkamai tampros modulis mažėjo iki 19 %, o slopinimo koeficientas išaugo iki 22 %), o lakas – labiau nei aliejinė danga.
4. Nustatyta, kad tradicinės medienos apdailos medžiagos (lakas, aliejinė danga) taip pat, nežymiai gali pakeisti medinių elementų mechanines ir akustines savybes – tampros modulis gali sumažėti iki 10 %, slopinimo koeficientas padidėja iki 13 %.
5. Nustatyta, kad didžiausia tampros modulio variacijos sklaida gauta ąžuolo medienos bandinius padengus 60 mm storio porolonu – 35 %, mažiausia bandinius padengus dirbtine oda – 14 %.
6. Nustatyta, kad slopinimo atveju variacijos koeficientas yra mažas. Mažiausia sklaida bandiniuose apdailintuose aliejine danga (pušies – 1 %, ąžuolo – 2 %), didesnė sklaida gauta bandinius padengus porolono – 4 %.
7. Panaudojant apdailos ir minkštinančias medžiagas, galima modeliuoti ir prognozuoti medinių elementų akustines ir tampriai plastiškas savybes.

Literatūros sąrašas

1. Morkevičius, A. Medienos medžiagos. Vilnius: HOMO LIBER, 2001. p. 9 – 48 p.
2. Jakimavičius, Č. Medienotyra. Kaunas: Technologija, 2006. p. 13 – 158 p.
3. Anis Nazihah Mat Daud, Rosly Jaafar, Shahrul Kadri Ayop, Mohd Ikhwan Hadi Yaacob, Md Supar Rohani. Elastic constant determination of hardwoods using ultrasonic insertion technique. Ultrasonics [17]. 2017. p. 194 – 198.
4. Cavalli, A., Cibecchini, D., Togni, M., Sousa, S. H.A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber. Construction and Building Materials [114]. 2016. P. 681 – 687.
5. Kretschmann, D. E. Mechanical Properties of Wood. Chapter 5: Research General Engineer. p. 2 – 5.
6. Diakhate, M., Bastidas-Arteaga, B., Pitti, R. M., Schoefs, F. Cluster analysis of acoustic emission activity within wood material: Towards a real-time monitoring of crack tip propagation. Engineering Fracture Mechanics Vol. 180. 2017. p. 254 – 267.
7. Ilic, J. Dynamic MOE of 55 Species Using Small Wood Beams. Holz – und werkstoff 61 (3) 2003. p.167 – 172.
8. Kloiber, M., Reinprecht, L., Hrivnák, J., Tippner, J. Comparative evaluation of acoustic techniques for detection of damages in historical wood. Journal of Cultural Heritage Vol. 20. 2016. P. 622 – 631.
9. Dackermann, U., Elsener, R., Li, J., Crews, K. A comparative study of using static and ultrasonic material testing methods to determine the anisotropic material properties of wood. Construction and Building Materials [102]. 2016. P. 963 – 976.
10. Timoshenko, S., Young, D. H., Weaver, W. Jr. Vibration problems in engineering. Moscow. Mashinostroenie, 1985. P. 472.
11. Oliveira, F. G. R., Sales, A. Relationship between density and ultrasonic velocity in Brazilian tropical woods. Bioresource Technology [97]. 2006. p. 2443 – 2446.
12. Qin, J., Liu, X., Abeele, K. V. D., Cu, G. The study of wood knots using acoustic nondestructive testing methods. Ultrasonics [88]. 2018. p. 43 – 50.
13. Sjökvist, L. S., Brunskog, J. An experimental and statistical study of the behavior of the vibration field in two coupled lightweight wooden joist floors. Applied Acoustics Vol.74. 2013. p. 517 – 520.
14. Ebadi, M. M., Doudak, G., Smith, I. Vibration responses of glulam beam-and-deck floors. Engineering Structures Vol.156. 2018. p. 235 – 242.
15. Baltrušaitis, A., Laurinavičius, A., Ukvalbergienė, K., Pranckevičienė, V., Minelga, D. Acoustic and Elastic Properties of Modified Oak Wood. Materials science Vol. 15 (4). 2009. p. 316 – 320.
16. Kusumaningtyas, I., Yordaniansyah, H., Purwanto, T. A. Acoustical properties of *petung* bamboo for the top plate of guitars. Applied Acoustics Vol. 112. 2016. p. 123 – 130.
17. Molin, N. E., Lindgren, L. E., Jansson, E. V. Parameters of Violin Plates and their Influence on the Plate Modes. Journal Acoustical Society America 83 (1). 1988. p. 281 – 291.
18. Konopka, D., Gebhardt, C., Kaliske, M. Numerical modelling of wooden structures. Journal of Cultural Heritage Vol. 27. 2017. p. S93 – S102.
19. Bucur, V., Lanceleur, P., Roge, B. Acoustic properties of wood in tridimensional representation of slowness surfaces. Ultrasonics Vol. 40. 2002. p. 537 – 541.
20. Ribeiro, A.S., Jesus, A. M. P., Lima, A.M., Lousada, J. L. C. Study of strengthening solutions for glued-laminated wood beams of maritime pine wood. Construction and Building Materials. Vol.23. 2009. p. 2738 - 2745.
21. F. de Moura, M. F. S., Dourado, N. Mode I fracture characterization of wood using the TDCB test. Theoretical and Applied Fracture Mechanics. Vol. 94. 2018. p. 40 – 45.
22. Qiwen Qiu, Q., Lau, D. Measurement of structural vibration by using optic-electronic sensor. Measurement Vol. 117. 2018. p. 435 – 443.

23. Guan, C., Zhang, H., Zhou, L., Wang, X. Dynamic determination of modulus of elasticity of full-size wood composite panels using a vibration method. *Construction and Building Materials*. Vol.100. 2015. p.201 – 206.
24. Guan, C., Zhang, H., Wang, X., Miao, H., Zhou, L., Liu, F. Experimental and Theoretical Modal Analysis of Full-Sized Wood Composite Panels Supported on Four Nodes. *Materials* 2017, 10(6), 683.
25. Guan, C., Zhang, H., Hunt, J. H., Yan, H. Determining shear modulus of thin wood composite materials using a cantilever beam vibration method. *Construction and Building Materials*. Vol. 121. 2016. p. 285 – 289.
26. Jansson, E. *Acoustics for violin and guitar makers. Chapter V: Vibration Properties of the Wood and Tuning of Violin Plates*, 2002.
27. Aditanoyo, T., Prasetyo, I., Bagus, I., Putra, A. Study on Vibro-acoustics Characteristics of Bamboo-based Violin. *Procedia Engineering*. Vol. 170. 2017.p. 286 – 292.
28. Sproßmann, R., Zauer, M., Wagenführ, A. Characterization of acoustic and mechanical properties of common tropical woods used in classical guitars. *Results in Physics*. Vol.7. 2017. p. 1737-1742.
29. Vieira, M., Infante, V., Serrão, P., Ribeiro, A. M.R. Experimental-numerical correlation of the dynamic behavior of the Portuguese guitar. *Applied Acoustics*. Vol.131. 2018. p. 51 – 60.
30. Asdrubali, A., Ferracuti, B., Lombardi, L., Guattari, C., Evangelisti, L., Grazieschi, G. A review of structural, thermo-physical, acoustical, and environmental properties of wooden materials for building applications. *Building and Environment*. Vol. 114. 2017. p. 307-332.
31. Peng, F. Sound absorption of a porous material with a perforated facing at high sound pressure levels. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 425. 2018. p. 1-20.
32. Cao, X., Hua, H., Zhang, Z. Sound radiation from shear deformable stiffened laminated plates. *Journal of Sound and Vibration*. Vol. 330. 2011.p. 4047-4063.
33. Rijal, R., Samali, B., Shrestha, R., Crews, K. Experimental and analytical study on dynamic performance of timber floor modules (timber beams). *Construction and Building Materials*. Vol. 122. 2016. p. 391-399.
34. Martins, C., Santos, P., Almeida, P., Godinho, L., Dias, A. Acoustic performance of timber and timber-concrete floors. *Construction and Building Materials*. Vol. 101 (1). 2015. p. 684-691.
35. Caniato, M., Bettarello, F., Fausti, P., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, Ch. Impact sound of timber floors in sustainable buildings. *Building and Environment*. Vol. 120 (1) 2017. p. 110-122.
36. Gubana, A. State-of-the-Art Report on high reversible timber to timber strengthening interventions on wooden floors. *Construction and Building Materials*. Vol. 97. 2015. p. 25-33.
37. Granzotto, N., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C., Fausti, P., Caniato, M. Energy and acoustic performances of windows and their correlation. *Energy and Buildings*. Vol. 136 (1). 2017. p. 189-198.
38. Soto, G., Castro, A., Vechiatti, N., Iasi, F., Armas, A., Marcovich, N. E., Mosiewicki, M.A. Biobased porous acoustical absorbers made from polyurethane and waste tire particles. *Polymer Testing*. Vol. 57. 2017. p. 42-51.
39. K.Gao, K., van Dommelen, J.A.W., Geers, M.G.D. Microstructure characterization and homogenization of acoustic polyurethane foams: Measurements and simulations. *International Journal of Solids and Structures*. Vol. 100 -101. 2016. p. 536-546.
40. Najib, N.N., Ariff, Z.M., Bakar, A.A., Sipaut, C.S. Correlation between the acoustic and dynamic mechanical properties of natural rubber foam: Effect of foaming temperature. *Materials & Design*. Vol. 32 (2). 2011. p. 505-511.
41. Oliveira-Salmazo, L., Lopez-Gil, A., Silva-Bellucci, F., Job, A. E., Rodriguez-Perez, M. A. Natural rubber foams with anisotropic cellular structures: Mechanical properties and modeling. *Industrial Crops and Products*. Vol. 80. 2016. p. 26-35.
42. Tiuca, A. E., Vermeşana, H., Gabora, T., Vasileb, O. Improved sound absorption properties of polyurethane foam mixed with textile waste. *Energy Procedia* Vol. 85. 2016. p. 559 – 565.

43. Onem, E. Quality properties of leather produced in water and supercritical fluid (SCF) media. *Journal of CO2 Utilization*. Vol. 23. 2018. p. 75 – 79.
44. Hassan, R. R. A. A preliminary study on using linseed oil emulsion in dressing archaeological leather. *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 21. 2016. p. 786-795.
45. Andrea Stoll, A., Cavalcante, M. Chapter 3 – Stick-Slip Characteristics of Leather/Artificial Leather. *Automotive Buzz, Squeak and Rattle*. 2012. p. 63 – 98.
46. Kedainienė., G. Medienos apdaila. Kaunas: Kauno kolegija, 2005. p. 10 – 11.
47. Liu, X., Elmahdy, A. E., Wildman, R.D., Ashcroft, I. A., Ruiz, P. D. Experimental investigation and material modelling of fresh and UV aged Japanese lacquer (*Urushi*). *Progress in Organic Coatings*. Vol. 70 (4). 2011. p. 160-169.
48. Mirone, G. Elastic modulus profiles in the cross sections of drying alkyd coating films: modelling and experiments. *European Polymer Journal* 40 2004. p. 549 – 560.
49. Ghaznavi, M. Traditional Varnishes and Acoustical Properties of Wooden Soundboards *Science International* 1 (12). 2013. p. 401-407.
50. Rodriguez, R., Arteaga, E., Rangel, D., Salazar, R., Vargas, S., Estevez, M. Mechanical, chemical and acoustic properties of new hybrid ceramic-polymer varnishes for musical instruments. *Journal of Non-Crystalline Solids*. Vol. 355 (2). 2009. p. 132-140.
51. Łucejko, J. J., La Nasa, J., Mc Queen, C. M. A., Braovac, S., Colombini, M. P., Modugno, F. Protective effect of linseed oil varnish on archaeological wood treated with alum. *Microchemical Journal*. Vol. 139. 2018. p. 50-61.
52. Hussin, M. H., Samad, N. A., Latif, N. H. A., Rozuli, N. A., Yusoff, S. B., Gambier, F., Brosse, N. Production of oil palm (*Elaeis guineensis*) fronds lignin-derived non-toxic aldehyde for eco-friendly wood adhesive. *International Journal of Biological Macromolecules*. Vol. 113 (1). 2018. p. 1266-1272.
53. Manoj Kumar, D. Improvements in stability, durability and mechanical properties of radiota pine wood after heat – treatment in a vegetable oil. University of Canterbury. 2010.
54. Su, G.-Y., Li, Y.-X., Li, X.-Y., Müller, R. Free and forced vibrations of nanowires on elastic substrates. *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 138–139. 2018. p. 62-73.
55. Vobolis, J. Tribologija. Kaunas. Technologija. 1994. p. 186.
56. Al-Jabiry, A. Effect of Glucose (C₆H₁₂O₆) Addition on Piezoelectric Properties for Sensor Application. *American Journal of Biomedical Engineering* 2(6). 2012. p. 287-292
57. Preumont, A. *Solid Mechanics and Its Applications. Twelve Lectures on Structural Dynamics*. 2013. p.77-111.
58. Hassani, M. M., Wittel, F. K., Hering, S., Herrmann, H. J. Rheological model for wood. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 283 (1). 2015. p. 1032-1060.
59. Vobolis, J., Albrektas, D. Comparison of Viscous Elastic Properties in Wood of Leaf and Coniferous Tree. *Materials science* Vol. 13 (2). 2007 p. 147 – 151.
60. Albrektas, D., Vobolis, J. Modeling and Study of Glued Wood Panel *Materials Science (Medžiagotyra)* 10 (4) 2004. p. 370 – 373.
61. Nikiforov, A. S. *Acoustics Designing of Ship Structures*. Leningrad, 1990. p.17 - 21.
62. Vobolis, J., Aleksiejūnas, M. Investigation of Wood Mechanical Properties by the Resonance Vibrations Method *Materials Science (Medžiagotyra)* 9 (1) 2003. p. 139 – 143.
63. Liukaitis, J., Kleveckas, T. Medžiagų tyrimo pagrindai. *Technologija*, 2007. p. 16 – 17.
64. Sofia, K., José, L. L., Sofia, L., Helena, P. Radial variation of wood density components and ring width in cork oak trees. *Original article*. 64 (2007). p. 211–218.
65. Zelle, L., Ammer, Ch., Annighöfer, P., Biber, P., Marshall, J., Schütze, G., Gaztelurrutia, M. del Río, Pretzsch, H. Tree ring wood density of Scots pine and European beech lower in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*. Vol. (400). 2017. p. 363 – 374.