



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Sluoksniuotų lukšto tašų sijų gamybos technologija ir
privalumai įrengiant atramines konstrukcijas**

Baigiamasis magistro projektas

Aurimas Pašveckas

Projekto autorius

doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

**Sluoksniuotų lukšto tašų sijų gamybos technologija ir
privalumai įrengiant atramines konstrukcijas**

Baigiamasis magistro projektas

Statybinių konstrukcijų ir gaminių inžinerija (6211EX008)

Aurimas Pašveckas

Projekto autorius

doc. dr. Ernestas Ivanauskas

Vadovas

doc. dr. Darius Albrektas

Konsultantas

doc. dr. Rėda Bistrickaitė

Recenzentė

Kaunas, 2019



Kauno technologijos universitetas

Statybos ir architektūros fakultetas

Aurimas Paševeckas

Sluoksniuotų lukšto tašų sijų gamybos technologija ir privalumai įrengiant atramines konstrukcijas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Aurimo Paševecko, baigiamasis projektas tema „Sluoksniuotų lukšto tašų sijų gamybos technologija ir privalumai įrengiant atramines konstrukcijas“ 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)

Paševeckas, Aurimas. Sluoksniuotų lukšto tašų sijų gamybos technologija ir privalumai įrengiant atramines konstrukcijas. Magistro baigiamasis projektas/vadovas doc dr. Ernestas Ivanauskas; Kauno technologijos universitetas, statybos ir architektūros fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: technologijos mokslai, statybos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *LVL, dinaminis tampros modulis, rezonansiniai virpesiai.*

Kaunas, 2019. 63 p.

SANTRAUKA

Magistrinio darbo tikslas nustatyti klijuoto medžio lukšto (LVL) ir klijuotos medienos (GLT) fizikinių mechaninių savybių kitimą keičiantis aplinkos sąlygoms ir gautus rezultatus panaudoti sijos modeliavime. Darbas sudarytas iš trijų pagrindinių dalių: literatūros analizės, standartinių ir nestandartinių tyrimų metodikų, tyrimų rezultatų analizės.

Pirmojoje dalyje pateikiama medienos sandara, medienos mechaninės ir fizikinės savybės, statiniai ir dinaminiai tyrimų metodai, LVL ir klijuotos medienos gamybos linijos.

Antroje dalyje nurodomos ir apibūdinamos standartinės ir nestandartinės tyrimų metodikos. Tai pat pateikiamos pagrindinės formulės, kurios naudojamos analizės metu.

Trečiojoje dalyje pateikiami tyrimų rezultatai bei analizė. Tai pat su gautais duomenis atliekama sijos analizė baigtinių elementų programa.

Magistriniame darbe suformuotos šešios išvados.

Darbo apimtis be priedų – **63** psl., kuriuose pateikta **58** paveikslai, **8** lentelių ir **50** literatūros šaltinių.

Paševėckas, Aurimas. Technology of laminated veneer lumber beams and advantages in installing supporting structures: Master's thesis in Civil Engineering / supervisor doc. dr. Ernestas Ivanauskas; The Faculty of Civil Engineering and Architecture Kaunas University of Technology.

Research area and field: technology science, civil engineering.

Key words: *LVL, modulus of elasticity (MOE), resonance vibration*

Kaunas, 2019. 63 p.

SUMMARY

The aim of the Master's thesis is to determine the change of the physical mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) and glued wood (GLT) by changing environmental conditions and to use the obtained results in beam simulation. The work consists of three main parts: literature analysis, standard and non-standard research methodology, analysis of research results.

The first part presents the structure of wood, mechanical and physical properties of wood, static and dynamic research methods, LVL and glued timber production lines.

The second part identifies and describes standard and non-standard test methods. It also provides basic formulas that are used during the analysis.

The third part presents the research results and analysis. The beam analysis of the finite element program also performs the received data.

By summarizing master's thesis 6 main conclusions are given.

Thesis consists of **63** pages of text, **58** figures, **8** tables and **50** references.

TURINYS

1. Aktualumas, apžvalga ir suformuluoti magistrinio darbo uždaviniai	10
1.1. Įžanga.....	10
1.2. Literatūros apžvalga.....	12
1.2.1. Natūrali mediena.....	12
1.2.2. Klijuotos medienos gaminiai	13
1.2.3. Medienos mechaninės savybės	14
1.2.4. Medienos mechaniniai bandymai	17
1.2.4.1. Statiniai tyrimo metodai.....	17
1.2.4.2. Dinaminiai tyrimo metodai.....	19
1.3. Medžio lukšto sijų gamybos linija	22
1.4. Klijuotos medienos gamybos linija.....	26
2. Tyrimų metodologija.....	28
2.1. Medienos tampriai plastiškųjų savybių tyrimas rezonansinių virpesių metodu	28
2.2. Statiniai tyrimo metodai.....	32
2.2.1. Lokaliojo lenkiamojo tamprumo modulio nustatymas	33
2.2.2. Sijos lenkiamojo stiprio nustatymas	34
2.2.3. Programinė įranga ANSYS 19.2.....	35
3. Rezultatų aptarimas	38
3.1. Klijuoto medžio lukšto sijų (LVL) tampriai plastiškųjų savybių tyrimas	38
3.2. Klijuotos medienos tampriai plastiškųjų savybių tyrimas	43
3.3. Klijuotos medienos ir LVL bandinių tyrimo duomenų statistinis apdorojimas.....	48
3.4. Klijuotos medienos ir LVL sijų tampriai plastiškųjų savybių tyrimas	49
3.5. Klijuotos medienos ir LVL sijų tyrimo duomenų statistinis apdorojimas.....	51
3.6. Klijuotos medienos ir LVL sijų lenkiamasis stipris.....	52
3.7. Klijuotos medienos ir LVL sijų stiprio lenkiant tyrimo duomenų statistinis apdorojimas	53
3.8. Klijuotos medienos ir LVL sijų stiprio lenkiant suirimo pobūdis	54
3.9. LVL sijos fizikinių ir mechaninių savybių prognozavimas ANSYS programa	54
Išvados.....	58
Literatūra	59

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 PAV. SPYGLIUOČIŲ MEDIENOS MIKROSTRUKTŪROS SCHEMA: 1 - RIEVĖ, 2 - ŠERDIES SPINDULIAI, 3 - VERTIKALUSIS SAKATAKIS, 4 - ANKSTYVOSIOS TRACHEIDĖS, 5 - VĒLYVOSIOS TRACHEIDĖS, 6 - APVADUOTOJI PORĄ, 7 - ŠERDIES SPINDULIO HORIZONTALIOJI TRACHEIDĖ	12
2 PAV. ĮVAIRIŲ KLIJŲ, SKIRTŲ MEDIENAI, STIPRIS KEIČIANTIS APLINKOS TEMPERATŪRAI.....	13
3 PAV. LAKŠTO PAVIRŠIAUS ŠIURKŠTUMO IR KLIJŲ SUKIBIMO LAIKOMOSIOS GALIOS GRAFIKAS	14
4 PAV. A) ROTORINIO SUPJAUSTYMO METU LAKŠTE ATSIKANDANTYS TEMPIMO IR GNIUŽDYMO ĮTEMPIAI B) ĮTRŪKIMAI ATSIKANDĘ PO SUPJAUSTYMO	15
5 PAV. FEM PROGRAMA PROGNOZUOTA LŪŽIO VIETA IR STATINIO KETURIŲ TAŠKŲ LENKIMO SUIRIMO BŪDAS	16
6 PAV. A) PLOKŠČIŲ LENKIMO STIPRIS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI, B) PLOKŠČIŲ TAMPRUMO MODULIS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI.....	18
7 PAV. LVL STIPRIO TEMPIANT GRAFIKAS PAGAL KETURIAS TEORIJAS	18
8 PAV. TOF AKUSTINIS METODAS A) IR LAISVOS SIJOS VIBRAVIMO METODAS B).....	20
9 PAV. RAŠTO, LAKŠTO IR LVL TAMPRUMO MODULIŲ GRAFIKAS	20
10 PAV. DINAMINIAI TYRIMO METODAI	21
11 PAV. TAMPRUMO MODULIS GAUTAS SKIRTINGAIS DINAMINIAIS TYRIMO METODAIS IR STIPRIS LENKIANT, E_1 – NE IŠ PLOKŠTUMOS, E_2 – IŠ PLOKŠTUMOS, E_p – IŠILGINĖS VIBRACIJOS METODAS, MOR – STIPRIS LENKIANT	21
12 PAV. MEDŽIO LUKŠTO (LVL) GAMYBOS LINIJA	22
13 PAV. RASTŲ SUPJOVIMAS Į LAKŠTUS	23
14 PAV. LAKŠTO KOKYBĖS NUSTATYMAS	24
15 PAV. LAKŠTŲ IŠKIRSTYMAS PAGAL MEDIENOS KLASES	24
16 PAV. LAKŠTŲ KLIJAVIMAS Į VIENTISĄ LAKŠTĄ.....	25
17 PAV. LVL PLOKŠTĖ	25
18 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS GAMYBOS LINIJA	26
19 PAV. SLOPINAMŲJŲ SVYRAVIMŲ AMPLITUDĖS GESIMO KREIVĖ	28
20 PAV. PRIVERSTINIŲ SVYRAVIMŲ REZONANSINĖ KREIVĖ.....	29
21 PAV. LAISVAI PADĖTO STRYPO MODOS.....	30
22 PAV. TYRIMUI NAUDOJAMO STENDO SCHEMA: 1 – BANDINYS, 2 – SLOPINANTYS ELEMENTAI (POROLONAS), 3 – STOVAI, 4 – VIRPESIŲ GENERATORIUS (GARSIKALBIS), 5 – SIGNALŲ GENERATORIUS, 6 – JUTIKLIS, 7 – VIRPESIŲ MATAVIMO PRIETAISAS, 8 – OSCIOGRAFAUS, 9 – FAZOMETRAS.....	31

23 PAV. LOKALIOJO LENKIAMOJO TAMPRUMO MODULIO BANDYMO SCHEMA (A) IR APKROVOS IR DEFORMACIJOS DIAGRAMA TAMPRIOSIOS DEFORMACIJOS ZONOJE (B), 1) APKROVA, 2) DEFORMACIJA.....	33
24 PAV. SIJOS LENKIAMOJO STIPRIO BANDYMO SCHEMA	34
25 PAV. SKAITINIO EKSPERIMENTO ATLIKIMO SCHEMA	35
26 PAV. MEDIENOS CHARAKTERISTIKŲ KEITIMAS BAIGTINIŲ ELEMENTŲ PROGRAMOJE.....	36
27 PAV. LVL SIJOS SKAITINIS MODELIO SKAIDYMAS Į BAIGTINIUS ELEMENTUS (MESH) ANSYS PROGRAMOJE.....	37
28 PAV. AMPLITUDĖS PASISKIRSTYMAS VISAME MEDINIO ELEMENTO ILGYJE.....	38
29 PAV. LVL BANDINIŲ DINAMINIO TAMPROS MODULIO DIAGRAMA.....	39
30 PAV. LVL BANDINIŲ SLOPINIMO KOEFICIENTO PASISKIRSTYMO DĖSNIS	40
31 PAV. LVL BANDINIŲ TAMPRUMO MODULIS: A – NEPAVEIKTI BANDINIAI, B - ŠALDYTAS -25 °C, C – DRĖKINTAS 80 % DRĖGMĖJE IR 20 °C TEMPERATŪROJE, D – SAUSAI DŽIOVINTAS 40 °C TEMPERATŪROJE	41
32 PAV. LVL BANDINIŲ SLOPINIMO KOEFICIENTAS: A – NEPAVEIKTI BANDINIAI, B - ŠALDYTAS -25 °C, C – DRĖKINTAS 80 % DRĖGMĖJE IR 20 °C TEMPERATŪROJE, D – SAUSAI DŽIOVINTAS 40 °C TEMPERATŪROJE	41
33 PAV. LVL BANDINIŲ TAMPRUMO MODULIO KITIMAS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI	42
34 PAV. LVL BANDINIŲ TAMPROS MODULIO E POKYTIS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI	43
35 PAV. LVL BANDINIŲ SLOPINIMO KOEFICIENTO TGA POKYTIS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI	43
36 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ DINAMINIO TAMPROS MODULIO DIAGRAMA.....	44
37 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ SLOPINIMO KOEFICIENTO PASISKIRSTYMO DĖSNIS	45
38 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ TAMPRUMO MODULIS: A1 – NEPAVEIKTI BANDINIAI, B1 - ŠALDYTAS -25 °C, C1 – DRĖKINTAS 80 % DRĖGMĖJE IR 20 °C TEMPERATŪROJE, D1 – SAUSAI DŽIOVINTAS 40 °C TEMPERATŪROJE.....	46
39 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ SLOPINIMO KOEFICIENTAS: A – NEPAVEIKTI BANDINIAI, B - ŠALDYTAS -25 °C, C – DRĖKINTAS 80 % DRĖGMĖJE IR 20 °C TEMPERATŪROJE, D – SAUSAI DŽIOVINTAS 40 °C TEMPERATŪROJE.....	46
40 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ TAMPRUMO MODULIO KITIMAS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI	47
41 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ TAMPROS MODULIO E POKYTIS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI	47
42 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ SLOPINIMO KOEFICIENTO TGA POKYTIS KEIČIANTIS TEMPERATŪRAI	48

43 PAV. AMPLITUDĒS PASISKIRSTYMAS VISAME MEDINIO ELEMENTO ILGYJE.....	50
44 PAV. LAISVAI PADĒTOS SIJOS SCHEMA	50
45 PAV. LVL IR KLIJUOTOS MEDIENOS STATINIO IR DINAMINIO TAMPROS MODULIŲ PALYGINIMAS: ČIA 1 – DINAMINIS TAMPROS MODULIS; 2 – STATINIS TAMPROS MODULIS.....	51
46 PAV. KLIJUOTO MEDŽIO SIJOS STATINIS KETURIŲ TAŠKŲ LENKIMAS	52
47 PAV. LVL IR KLIJUOTOS MEDIENOS LENKIAMOJO STIPRIO PALYGINIMAS.....	53
48 PAV. LVL SIJOS SUIRIMO POBŪDIS	54
49 PAV. KLIJUOTOS MEDIENOS SUIRIMO POBŪDIS.....	54
50 PAV. LVL SIJOS PRADINIAI ĮTEMPIAI.....	55
51 PAV. LVL SIJOS PRADINIS ĮLINKIS.....	55
52 PAV. LVL SIJOS ĮTEMPIAI PRIE -25 °C TEMPERATŪROS	55
53 PAV. LVL SIJOS ĮLINKIS PRIE -25 °C TEMPERATŪROS.....	56
54 PAV. LVL SIJOS ĮTEMPIAI 80 % DRĖGMĖJE IR 20 °C TEMPERATŪROJE	56
55 PAV. LVL SIJOS ĮLINKIS 80 % DRĖGMĖJE IR 20 °C TEMPERATŪROJE.....	56
56 PAV. LVL SIJOS ĮTEMPIAI PRIE 40 °C TEMPERATŪROS	57
57 PAV. LVL SIJOS ĮLINKIS 40 °C TEMPERATŪROJE	57
58 PAV. LVL SIJOS ĮLINKIS KEIČIANTIS APLINKOS POVEIKIUI	57

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 LENTELĖ. LVL PARAMETRAI	38
2 LENTELĖ. LVL BANDINIŲ TAMPROS MODULIS E IR SLOPINIMO KOEFICIENTAS $TG\Delta$	39
3 LENTELĖ. KLIJUOTOS MEDIENOS PARAMETRAI	43
4 LENTELĖ. KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ TAMPROS MODULIS E IR SLOPINIMO KOEFICIENTAS $TG\Delta$	44
5 LENTELĖ. STATISTINĖS LVL IR KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ TAMPROS MODULIO E IR SLOPINIMO KOEFICIENTO $TG\Delta$ VIDUTINĖS VERTĖS	48
6 LENTELĖ. LVL IR KLIJUOTOS MEDIENOS SIJŲ PARAMETRAI	49
7 LENTELĖ. STATISTINĖS LVL IR KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ TAMPROS MODULIO E STATINĖS IR DINAMINĖS VIDUTINĖS VERTĖS.....	51
8 LENTELĖ. STATISTINĖS LVL IR KLIJUOTOS MEDIENOS BANDINIŲ LENKIAMOJO STIPRIO F_M STATINĖS IR DINAMINĖS VIDUTINĖS VERTĖS	53

1. AKTUALUMAS, APŽVALGA IR SUFORMULUOTI MAGISTRINIO DARBO UŽDAVINIAI

1.1. Įžanga

Visam pasaulyje mažėjant naudingųjų išteklių kyla poreikis naudoti perdirbtas arba atsinaujinančias medžiagas. Plačiausiai statybų sektoriuje naudojama atsinaujinanti medžiaga – mediena ir jos gaminiai. Mediena turi geras šilumines, garso izoliavimo, gaisrines savybes, atlaiko dideles apkrovas, ilgaamžė. Medžio konstrukcijos yra sąlyginai lengvo svorio lyginant su kitomis analogiškėmis statybinėmis konstrukcijomis, tokiu būdu taupomos išlaidos transportavimo paslaugoms ar montavimui.

Siekiant perdengti didesnius tarpatramius, gauti didesnių stabilesnių matmenų gaminius, pašalinti defektus ir ydas, sukurti atsparesnes aplinkos poveikiui medines konstrukcijas yra kuriami klijuotos medienos ar sluoksniuotos lukštinės medienos gaminiai.

Statybinėms konstrukcijoms naudojamos medinės konstrukcijos turi atitikti jiems keliamus reikalavimus pagal galiojančius standartus, todėl mediena turi pasižymėti tam tikromis savybėmis – konstrukcijos ne turi deformotis dėl ją veikiančių skersinių ir ašinių jėgų, lenkiamųjų momentų, ar ją veikiančio aplinkos poveikio, pasižymėti tam tikromis akustinėmis savybėmis.

Gaminant medines konstrukcijas būtina parinkti tinkamą medieną, bei nustatyti ir prognozuoti jos savybes, parinkti tinkamiausią gamybos technologiją, kljus.

Viena iš plačiau naudojamų klijuotų medinių konstrukcijų yra klijuotas medžio lukštas (LVL). Įvertinus jų savybes keičiantis aplinkos poveikiui ir panaudojus gautus rezultatus atraminių konstrukcijų projektavimui, būtų galima naudoti mažesnius, ekonomiškесnius, atsparesnius aplinkos poveikiui elementus.

Darbo objektas – Sluoksniuotų lukšto tašų sijos LVL (Laminated veneer lumber).

Tikslas – Nustatyti skirtingo aplinkos poveikio įtaką sluoksniuotų lukšto tašų sijų fizikinėms-mechaninėms (stipris, tamprumo modulis, akustika ir kt.) savybėms. Įvertinus gautus stiprio lenkiant, tamprumo modulio ir kitus rezultatus, atlikti LVL sijų fizikinių-mechaninių savybių prognozavimą baigtinių elementų programa.

Darbo uždaviniai:

- 1) Išanalizuoti įvairių šalių mokslinę literatūrą, susijusią su šio darbo tyrimo sritimi.
- 2) Nustatyti skirtingo drėgminio režimo ir užšaldymo ir atšildymo ciklą įtaką LVL sijų fizikinėms-mechaninėms savybėms.
- 3) Iširti privalumus ir trūkumus LVL sijas lyginant su klijuotos medienos gaminiais veikiant juos pasirinkto agresyvumo aplinkos poveikiu.
- 4) Atlikti statiniais ir dinaminiais tyrimų metodais gautų tyrimų rezultatų priklausomybių analizę ir įvertinti jų patikimumą statistiškai.
- 5) Taikant baigtinių elementų programą atlikti LVL sijų ilgaamžiškumo savybių prognozavimą įvertinant galimą skirtingą aplinkos poveikį.

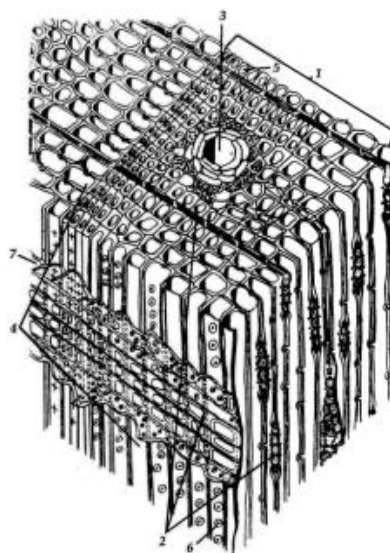
1.2. Literatūros apžvalga

1.2.1. Natūrali mediena

Kaip statybinė medžiaga statyboje dažniausiai naudojama spygliuočių mediena. Ši mediena yra vienodos spalvos ir tekstūros, lengvai apdirbama ir klijuojama, lengva, atspari fiziškai, gerai džiuanti, minkšta. Palyginus su kitomis medžiagomis, mediena turi daug pranašumų, ji yra vientisa ir lengva, gali atlaikyti dideles apkrovas, turi geras termoizoliacines savybes [1].

Mediena yra augalinės kilmės anizotropinė medžiaga, kurios 50 – 70 % tūrio sudaro poros [1]. Sausos medienos masė (apie 99 %) sudaryta iš organinių medžiagų. Nepriklausomai nuo medžio rūšies, visiškai sausa mediena turi apie 49 – 50 % anglies, apie 6 % vandenilio, 43 – 44 % deguonies ir 0,1 - 0,3 % azoto karbono, deguonis ir vandenilis sudaro kompleksą organinės medžiagos - hemiceliuliozės, celiuliozės, lignino ir vadinamosios ekstrakcijos medžiagos (dervos, guma, riebalai, taninai, pektinai ir t.t.). Priklausomai nuo augimo sąlygų, botaninės kilmės, medžių rūšies ir amžiaus, medienos komponentų santykis yra maždaug toks: 25 % hemiceliuliozės, 25 % lignino ir 50 % celiuliozės [2].

Pagrindinės spygliuočių medienos struktūros elementai: šerdies spinduliai, metinės rievės, tracheidės kurios sudaro 90 – 95 % viso medienos tūrio ir sakatačiai (sakų pripildytas siauras ilgas kanalas) [2].



1 pav. Spygliuočių medienos mikrostruktūros schema: 1 - rievė, 2 - šerdies spinduliai, 3 - vertikalusis sakatačis, 4 - ankstyvosios tracheidės, 5 - vėlyvosios tracheidės, 6 - apvaduotoji pora, 7 - šerdies spindulio horizontalioji tracheidė

1.2.2. Klijuotos medienos gaminiai

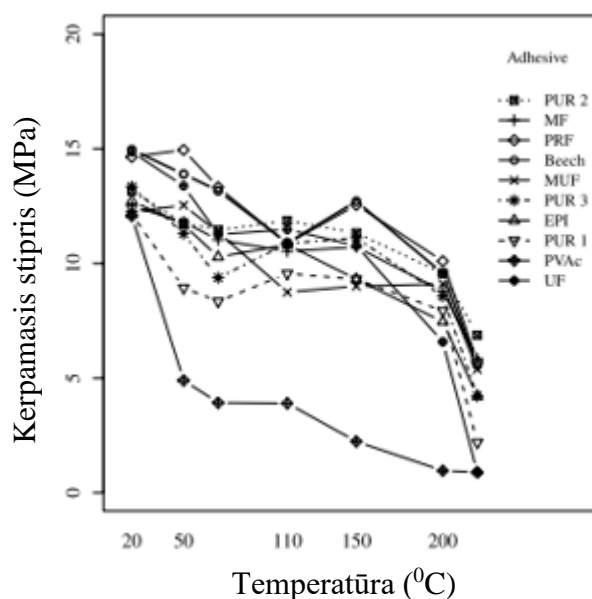
Siekiant perdengti kuo didesnius tarpatramius panaudojant kuo mažiau medienos, gauti didesnius elementus, užtikrinant jų stabilumą ir formą, išvengiant medienos ydų ir defektų, gaunant geresnių mechaninių savybių gaminius, dažnai mediena yra klijuojama į gaminius.

Klijuotos medienos gaminių grupei priskiriama sluoksniuotoji klijuota mediena ir klijuoti tašai.

Iš klijuotų tašų gaminami konstrukciniai elementai - sijos (GLT) ir plokštės (CLT).

Iš sluoksniuotosios medienos gaminama fanera, medžio lukšto sijos (LVL), kompozicinė sluoksniuotoji mediena. Sluoksniuotai medienai būdingas mažesnis anizotropiškumas nei vientisai medienai.

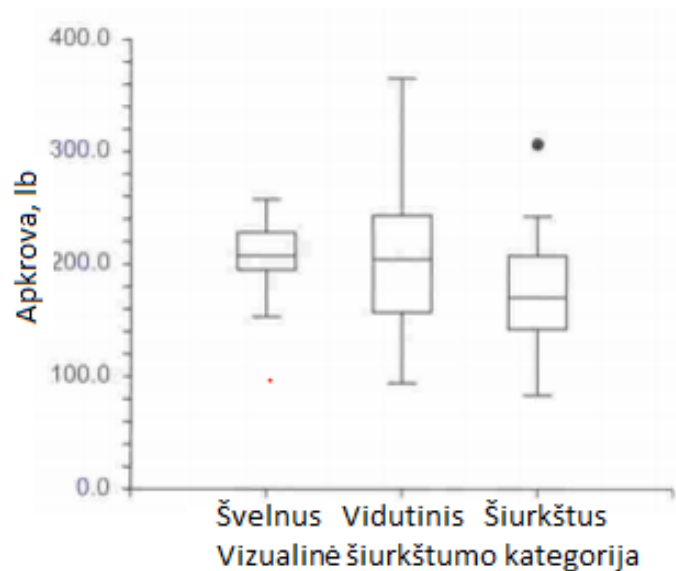
Šiluminis stabilumas klijuotoms medienos jungtims yra svarbus kriterijus klijų tinkamumui. Gaminio naudojimo metu, klijuotos medienos siūlės gali būti veikiamos aukšta temperatūra įvairiais būdais (tiesioginės saulės, gaisro, ir t.t). Tyrime [3] buvo nagrinėta įvairių klijų, tinkamų medienos gaminiams klijuoti, siūlės sukibimo stipris keičiantis temperatūrai.



2 pav. Įvairių klijų, skirtų medienai, stipris keičiantis aplinkos temperatūrai

Tyrimas parodė jog keičiantis aplinkos temperatūrai keičiasi ir klijų mechaninės savybės, didėjant temperatūrai ir keičiantis klijų cheminei sudėčiai, mažėja klijų šlyties stipris.

Lakštų paviršiaus paruošimo kokybė turi didelę įtaką klijuotų gaminių kokybei. Darbe [4] tirta klijų sukibimo kokybė nuo lakšto paviršiaus paruošimo kokybės.



3 pav. Lakšto paviršiaus šiurkštumo ir klijų sukibimo laikomosios galios grafikas

Nustatyta, kad klijų sukibimas su mediena priklauso nuo lakšto šiurkštumo. Pats blogiausias lakšto ir klijų sukibimas yra tada, kai paviršius yra labai šiurkštus, o geriausias, kai paviršius yra vidutinio šiurkštumo.

Darbe [5] buvo tyrinėta lakštinių gaminių presavimo proceso (slėgio, temperatūros, klijų sklaidos, laiko) poveikis klijų sukibimui ir savybėms. Palygintos savybės su presuotais ir nepresuotais gaminiais suklijuotais fenolio formaldehido klijų dervomis. Išsiaiškinta, kad didžiausią įtaką turi presavimo temperatūra, laikas ir jėga kuria presuojamas gaminy. Taip pat, išsiaiškinta, kad sumažinus lakšto paviršiu šiurkštumą galima sumažinti klijų kiekį ir spaudimo jėgą 40 – 45 % nesumažinant gaminio mechaninių savybių, ko pasekoje, būtų galima sumažinti presavimo laiką.

1.2.3. Medienos mechaninės savybės

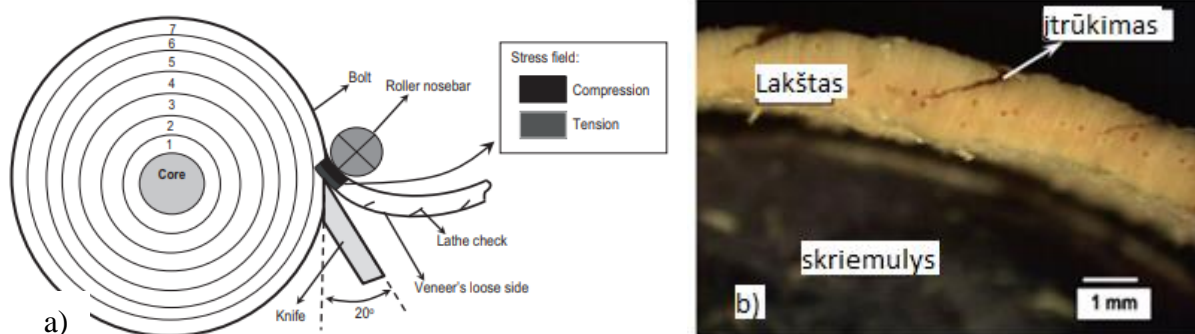
Dėl medienos struktūros, medienos mechaninės savybės skersine ir išilgine pluošto kryptimis yra skirtingos [2]. Mediena yra augalinės kilmės medžiaga, kurių ląstelių sandarą lemia aplinkos sąlygos. Todėl, medienos tankis bei stipris priklauso nuo medžio augimo sąlygų – augavietės, miško tipo [6].

Dėl įvairių faktorių medienos mechaninės savybės nėra tolygiai pasiskirsčiusios per visą gaminį. Darbe [7] iš ąžuolo ir eglės rąstų buvo išpjauti bandiniai iš centrinės, priekinės ir galinės dalies. Bandiniai buvo ištirti rezonansinių virpesių metodu. Buvo išsiaiškinta, kad tamprumo modulis centrinėje ir galinėje, bei priekinėje rąsto dalyje yra skirtingas. Nustatyta, kad ąžuolo ir

eglės tamprumo modulis skirtingose rąsto vietose skiriasi apie 20 %, o slopinimo koeficientas iki 40 %.

Kad mediena atitiktų keliamus reikalavimus, mediena turi pasižymėti tam tikromis mechaninėmis savybėmis. Mediena yra rūšiuojama pagal įvairius kriterijus [8 – 13].

Straipsnyje [21] siekiant pateikti daugiau informacijos apie lakštų gamybą ir panaudojimą, įvertinti medienos defektus atsirandančius dėl lakšto storio supjaustant juos rotaciniu pjautuvu. Prieš tyrimą rąstai buvo virinami 50 °C ir 75 °C atitinkamai 4 ir 8 valandas, paskui supjaustomi į 1, 1.5 ir 2 mm lakštus.



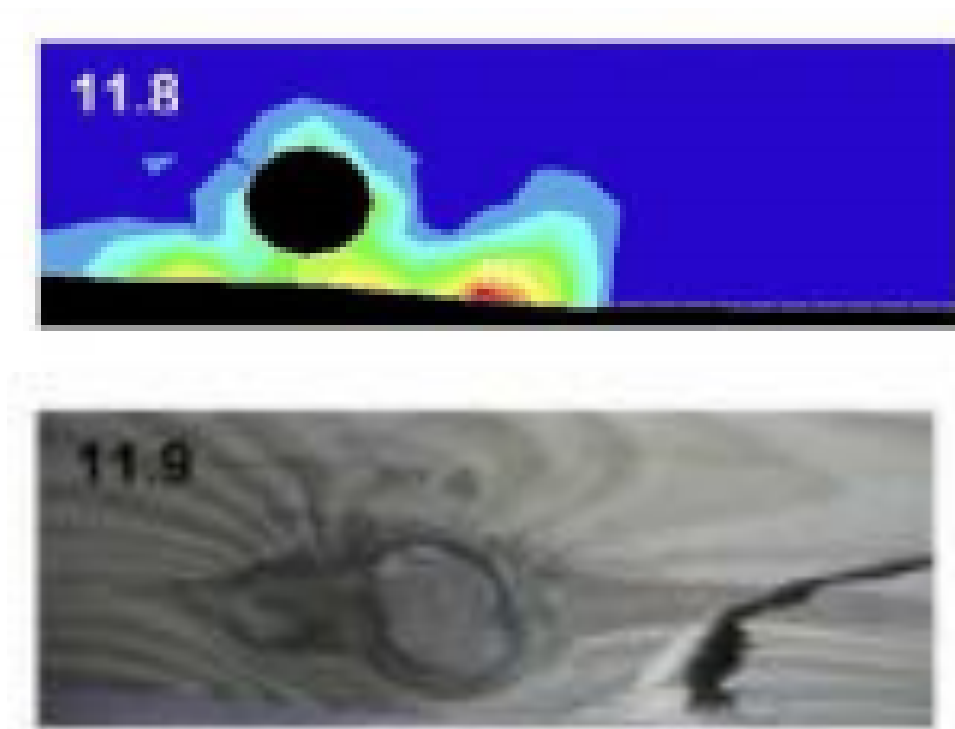
4 pav. a) Rotorinio supjaustymo metu lakšte atsirandantys tempimo ir gniuždymo įtempiai
b) įtrūkimai atsiradę po supjaustymo

Atlikus tyrimą buvo išsiaiškinta, kad padidinus rąstų virimo temperatūrą žymiai sumažėja lakšte atsirandančių įtrūkimų, todėl padidėja tamprumo modulis. Taip pat pastebėta, kad plonesnių lakštų tamprumo modulis ir sukibimas su klijais yra geresnis nei storesnių.

Klijuotos lukštinės medienos, kaip ir klijuotos medienos gamyboje sluoksnių išdėstymas pagal medienos stiprį, yra labai svarbus, kad būtų išgautas maksimalus gaminio stipris. Straipsnyje [22] atliktas bandymas su Amazonėje augančia mediena. LVL gamybai lakštai buvo suskirstyti pagal tankį ir dinaminį tamprumo modulį. Buvo panaudoti trys skirtingi LVL sluoksnių išdėstymo būdai: kai sluoksniai sudėti bet kokia tvarka; kai lakštai su didžiausiu tamprumo moduliui sudėti išorėje ir palaipsniui mažinami iki centro; kai lakštai su didžiausiu tankiu sudėti išorėje ir palaipsniui mažinant iki centro. Atlikus tyrimus buvo nustatyta, kad LVL pagamintas antru ir trečiu būdu turi geresnius mechaninius rodiklius nei LVL pagamintas iš bet kaip sudėtų sluoksnių.

Darbe [14] aprašoma mokslinės literatūros analizė ar medienos stipriui turi įtakos medžio amžius. Autorių teigimu, kad bėgant laikui konstrukcinės medienos mechaninėms savybėms didžiausią įtaką turi panaudojimo sąlygos - apkrovų dydis ir apkrovimo laikas, aplinkos poveikis ir kokius pažeidimus tai sukėlė.

Atsižvelgiant į konstrukcinės pjautinės medienos vizualinį stiprumo laipsnį, be kitų ypatumų, šakų buvimas ir dydis yra labai svarbus medienos stipriui. Straipsnyje [15] baigtinių elementų programa sukurtas metodas prognozuoti šakų įtaką medienos stipriui lenkiant. Atlikus tyrimą ir palyginus rezultatus statinio lenkimo ir baigtinių elementų programa gauta, kad programa skaičiuoja su 9,7 % paklaida.



5 pav. FEM programa prognozuota lūžio vieta ir statinio keturių taškų lenkimo suirimo būdas

Medienos tempimo stipris išilgine kryptimi priklauso nuo medienos tankio ir struktūros [17]. Ankstyvosios ir vėlyvosios medienos rievių savybės labai skiriasi. Vėlyvoji mediena yra tankesnė, mažiau poringa ir atsparesnė įtempimams palei pluoštą, palyginus su ankstyvąja mediena. Vėlyvosios ir ankstyvosios medienos santykis skiriasi kiekvienos medienos tipui, priklauso nuo augimo sąlygų, klimato ir kitų veiksnių. Darbe [16] atliktas tyrimas įvertinti stiprį tempiant, elastingumą, trūkimo pobūdį, Lietuvoje augančiai minkštajai medienai. Tyrimas atliktas su trimis medienos rūšimis – egle, pušimi ir maumedžiu. Tyrimas parodė, kad medienos mikrostruktūra ir ypač ankstyvoji ir vėlyvoji mediena turi didelę įtaką tempiamajam stipriui ir elastingumui. Nustatyta, kad tos pačios rūšies mediena gali skirtis vidutiniškai 20 %, kartais net ir 25 % - 30 %.

Medienos džiovinimas yra vienas sudėtingiausių medienos apdorojimo procesų, neparinkus tinkamų džiovinimo proceso parametrų – temperatūros, kaitinimo greičio, medienos

ir aplinkos drėgčio, išlaikymo laiko, medienos struktūra gali būti pažeista, todėl džiovinimo režimas parenkamas kiekvienos rūšies medienai atskirai [19]. Darbe [18] atliktas džiovinimo proceso metu susidarančių defektų poveikio medienos mechaninėms savybėms vertinimas rezonansinių virpesių metodu. Nustatyta, kad džiovinimo metu didėjant temperatūrai, mažėja dinaminis tampros modulis, o slopinimo koeficientas didėja. Dėl skirtingų medienos struktūrų, džiovinimo metu bandiniuose susidarė skirtingi defektai, kas turi įtakos mechaninėms medienos savybėms.

Darbe [20] keturis metus buvo tiriama įtemta LVL sija nekontroliuojamose aplinkos sąlygose. Viena sija buvo apkrauta ilgalaikė apkrova, o kita neapkrauta. Atlikus tyrimą buvo gauta, kad lynų įtempimas sumažėjo 4.5 % ir 3.4 % nuo pradinio įtempimo, kas rodo, kad tokiomis sąlygomis konstrukcija po 50 metų prarastų tik 11 – 13 % pradinio įtempio.

Spygliuočių ir lapuočių medienos struktūra skirtingomis pluošto kryptimis (skersai ir išilgai pluošto) savybės yra skirtingos.

Gniuždytas viena dažniausiai pasitaikančių apkrovos formų skersai ir išilgai pluošto. Medienos stipris gniuždant priklauso nuo medienos drėgnumo ir jo rūšies.

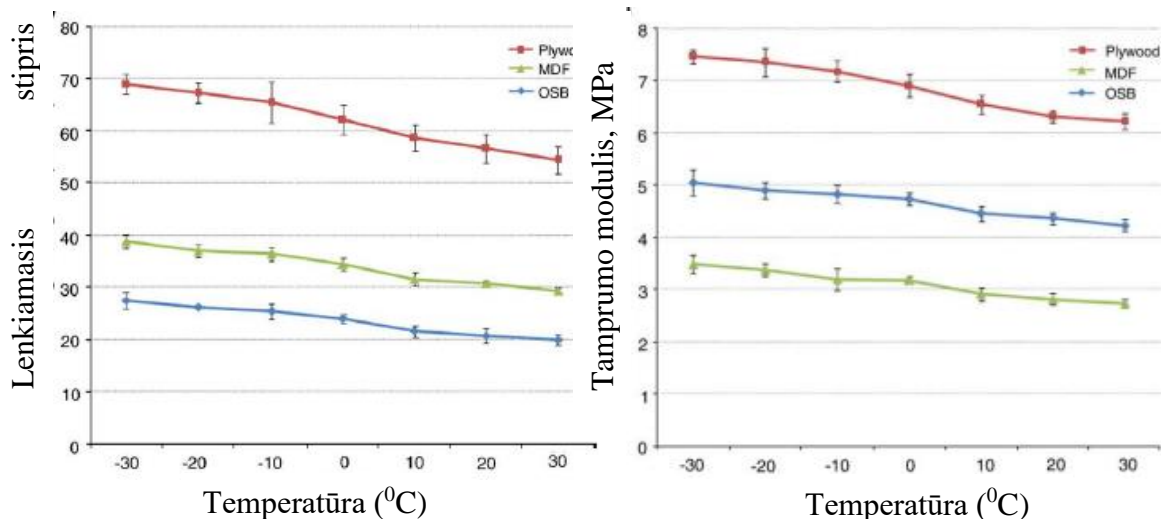
1.2.4. Medienos mechaniniai bandymai

Medienos mechaninės savybės gali būti nustatomos statiniais ir dinaminiais metodais.

1.2.4.1. Statiniai tyrimo metodai

Statiniais tyrimo metodais medienoje nustatomos labai mažos deformacijos. Atliekant statinius bandymus, bandiniai sugadinami ar kitaip mechaniškai pažeidžiami todėl, matavimus reikia atlikti daug kartų ir ištirti daug bandinių. Statiškai gali būti nustatytos įvairios medienos savybės.

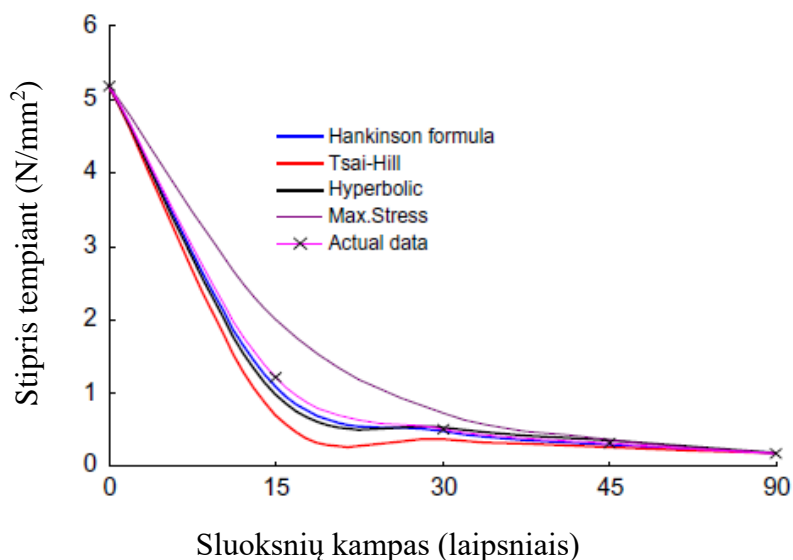
Darbe [23] buvo tirta OSB ir medžio lukšto plokščių temperatūros (+ 30 °C iki – 30 °C) įtaka lenkiamajam stipriui ir tamprumo moduliui. Jie nustatė, kad temperatūra turi didelę įtaką, kai temperatūra kito nuo – 30 °C iki 0 °C stipris lenkiant ir tamprumo modulis sumažėjo 9,8 % ir 7,4 %. Kai nuo 0 °C iki +30 °C sumažėjo 12,5 % ir 9.6 %.



6 pav. a) Plokščių lenkimo stipris keičiantis temperatūrai, b) Plokščių tampromo modulis keičiantis temperatūrai

Kai kurie autoriai teigia, kad medienos mechaninėms savybėms įtakos turi modifikavimas Straipsnyje [24] medžio lukštas iš *Monopetalanthus* rūšies buvo pakaitintas skirtingomis temperatūromis (120, 160, 200, 240 °C) ir priklijuoti prie LVL sijos išorės. Bandymu buvo nustatomos mechaninės savybės ir suirimo pobūdis. Atlikus tyrimą geresnius rezultatus parodė tik kaitinta mediena iki 240 °C.

Darbe [25] buvo tiriama trijų sluoksnių LVL stipris tempiant, keičiant sluoksnių klijavimo kampą (15°, 30°, 45°), pagal keturias teorijas.



7 pav. LVL stiprio tempiant grafikas pagal keturias teorijas

Atlikus tyrimą gauta, kad tempiamasis stipris greitai krito tarp 0^0 ir 15^0 , didžiausias įtempis gautas kai sluoksniai buvo pakreipti 0^0 .

Mažėjant brandžios medienos, ieškoma kas ją galėtų pakeisti. Darbe [26] aprašomas tyrimas ar jauna ir vidutinių matmenų mediena yra tinkama LVL gamyboje ir palyginta su 25 metų brandžia mediena. Buvo atlikti statiniai tamprumo modulio ir stiprio lenkiant tyrimai 140 LVL bandiniams. Nustatyta, kad jaunos medienos lenkimo stipris 7 – 22 % ir tamprumo modulis 12 % yra mažesni už brandžios medienos. Taip pat nustatyta, kad 3 mm lakštai turi mažesnę stiprį lenkiant nei 5.25 mm lakštai.

Straipsnyje [27] buvo nagrinėjamas spinduliavimo į gylį santykio poveikis lenkiamajam LVL stipriui. Tyrimui, buvo pagamintos iš medžio lukštų plokštės, naudojant fenolio formaldehido (PF) klijus. Bandiniai buvo paruošti iš plokštės ją supjaustant, siekiant nustatyti lenkimo jėgą, tankį, drėgmės kiekį ir atsparumą tempimui. Atlikus tyrimą nustatyta, kad optimaliausias storio lenkiant bandinio tarpatramio ir aukščio santykis yra 10, o didžiausias stipris kai ilgio ir aukščio santykis 20.

Statiniais tyrimų metodais gali nustatyti įvairias medienos ir jų gaminių mechanines savybes – elastingumą, atsparumą, standumą.

1.2.4.2. Dinaminiai tyrimo metodai

Dinaminių tyrimų privalymas yra tai, kad tyrimams nereikia gaminti specialių matmenų ir formos bandinių. Medienos mechanines savybes galima nustatyti ir prognozuoti dar augančio ar jau nukirsto medžio.

Tiriant dinaminiais metodais vienas svarbiausių medžiagos mechaninių rodiklių – tampros modulis, nustatomas panaudojant garsinio dažnio virpesius. Nuo medžiagos tampros modulio ir tankio priklauso mechaninių virpesių sklidimo greitis. Tampros modulis apskaičiuojamas pagal formulę:

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

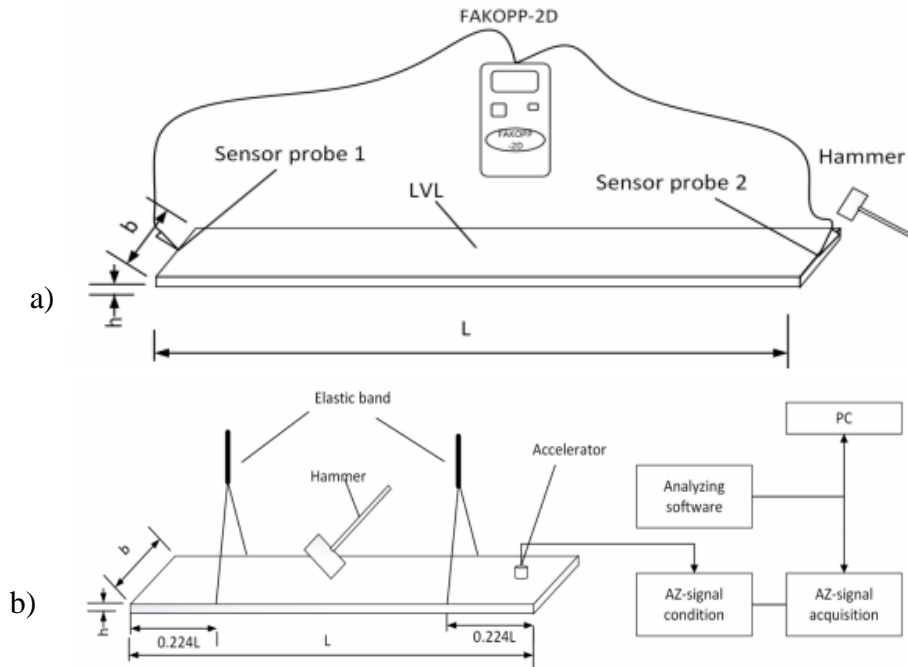
čia: c – virpesių sklidimo greitis medžiagoje;

ρ – medžiagos tankis.

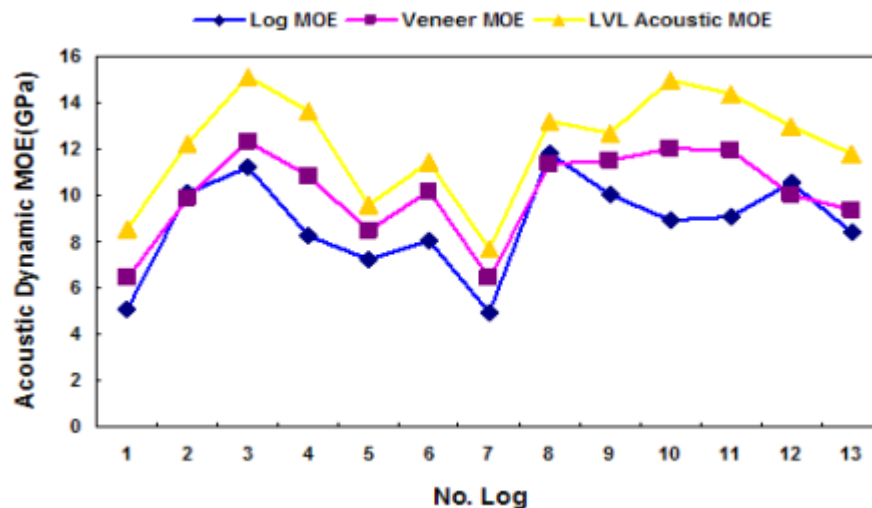
Fiksuojant virpesių sklidimo greitį medžiagoje medienos mechanines savybes galima nustatyti ultragarsu.

Straipsnyje [28] aprašomas tyrimas iširti naudojimo galimybes rezonanso pagrindu veikiančios akustinės technologijos, rūšiuoti rąstus iš Kinijos skirtus laminuotų medienos lukšto

(LVL) gaminiams. Pirmiausia, 238 rąstai buvo patikrinti akustiniam dažniui nustatyti naudojant Director HM200™ prietaisą ir nustatytas tampumo modulis, paskui supjaustyti į lakštus. Supjausčius, lakštai buvo patikrinti ultragarsu 2800 DME Digital Metriguard Veneer Tester ir nustatytas tampumo modulis. Pagaminus LVL sijas jos buvo patikrintos laisvos sijos vibravimo ir TOF metodu ir nustatytas tampumo modulis.



8 pav. TOF akustinis metodas a) ir laisvos sijos vibravimo metodas b)



9 pav. Rąsto, lakšto ir LVL tampumo modulių grafikas

Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad tarp rezultatų, buvo didelė koreliacija, tačiau abu būdai yra tinkami ir atitinka standartuose reikalaujamas normas LVL gamybai.

Dinaminis tampros modulis gali būti apskaičiuotas ir pagal smūgio sukeltos virpesių bangos sklidimo greitį bandinyje [30]. Darbe [29] atliktas tyrimas, kuriame buvo palyginti tuopos ir beržo medžio lukšto lakštų sijos (LVL) statiniai su dinaminiais tyrimo metodais.

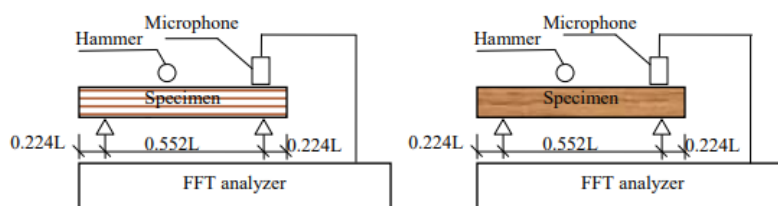


Fig. 1. Out-plane flexural vibration test

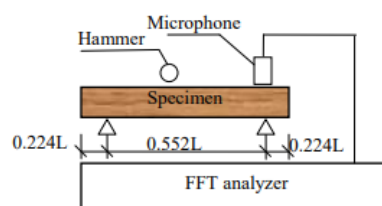


Fig. 2. In-plane flexural vibration test

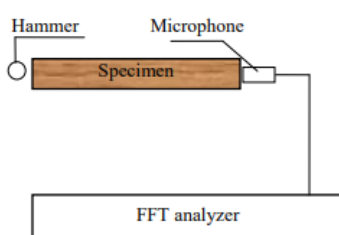


Fig. 3. Longitudinal vibration test

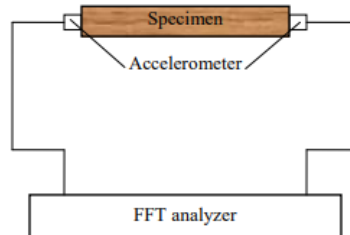
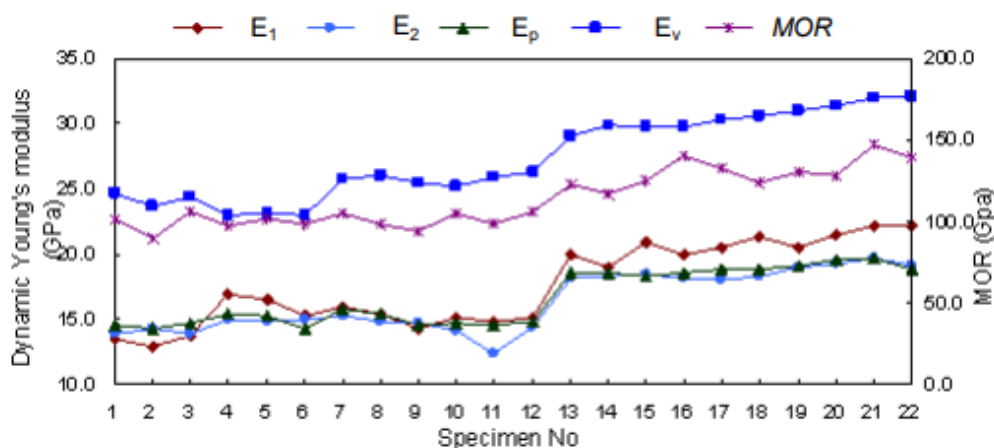


Fig. 4. Longitudinal transmission test

10 pav. Dinaminiai tyrimo metodai

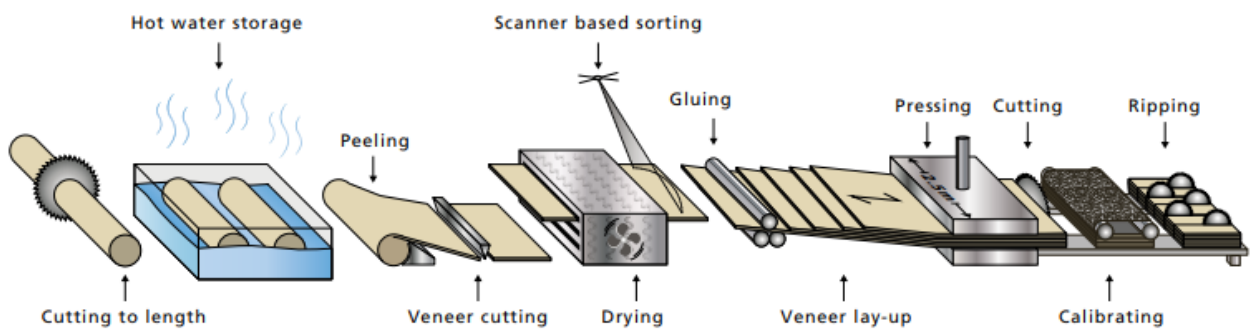
Atlikus tyrimą buvo nustatyta, kad tamprumo modulio ir stiprio lenkiant buvo nedidelė koreliacija, todėl visi keturi dinaminiai tyrimo metodai gali būti naudojami nustatant LVL sijos stiprį lenkiant. Stipris lenkiant gautas labai panašus į paskaičiuotą dinaminio tyrimo.



11 pav. Tamprumo modulis gautas skirtingais dinaminiais tyrimo metodais ir stipris lenkiant, E_1 – ne iš plokštumos, E_2 – iš plokštumos, E_p – išilginės vibracijos metodas, MOR – stipris lenkiant

Tobulėjant sistemoms ir gerėjant medienos mechaninių savybių tikslingumui, yra kuriami nauji įrenginiai. Darbe [31] aprašoma medžio kompozitui tirti sukurta sistema pagrįsta „Labview“ sistema. Bandinys laisvai atremiamas keturiomis kraštinėmis. Į bandinį smūgiuojama specialiu smūgiavimo prietaisu. Bandinio virpesius fiksuoja mikrofona, užfiksuoti duomenys apdorojami ir analizuojami. Tyrimui buvo panaudota LVL sija.

1.3. Medžio lukšto sijų gamybos linija

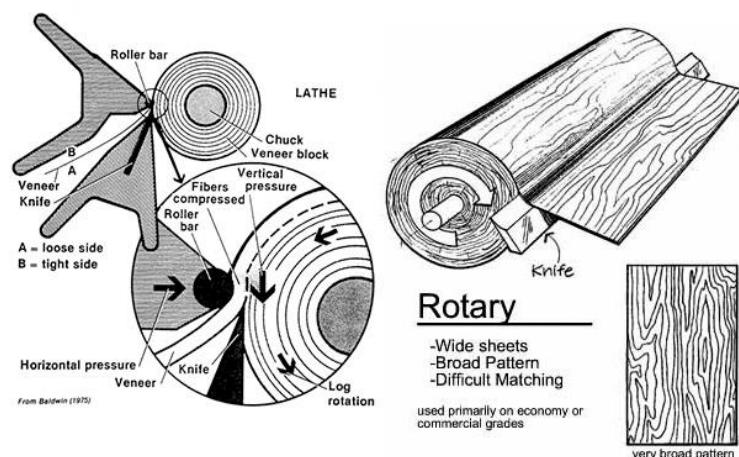


12 pav. Medžio lukšto (LVL) gamybos linija

Klijuoto medžio lukšto produkcija gaminama iš 3 mm storio lakštų, juos suklijuojant vandens pagrindo klijais į vientisą lakštą. Gaminama iš minkštosios medienos – daugiausiai pušies. Gaminamos laikančiosios konstrukcijos - sijos, sienų plokštės, grindų plokštės. Gaminių ilgius riboja tik gamybos linija ir transportavimas.

LVL produkcijos gamybos etapai:

- 1) medienos atrinkimas ir rąsto supjaustymas į reikiamus ilgius;
- 2) rąsto mirkymas šiltame vandenyje;
- 3) rąsto supjovimas į 3mm lakštus, šiame etape yra pirminė medžio lukšto kokybės kontrolė – lakštas yra skenuojamas ir kur mediena yra netolygi su dideliais jos trūkumais yra nupjaunama, dažniausiai priekinė ir galinė dalis.



13 pav. Rastų supjovimas į lakštus

- 4) lakštai supjaustomi į mažesnius lakštus, maždaug 3x3m, taip yra sumažinama tikimybė kad prastesnė mediena bus didesniai plote.
- 5) lakštų džiovinimas su "Smart" 4-6 aukštų džiovinimo sistema, kuri apima rūšiavimo linijas su aukšto tikslumo drėgmės matavimu, defektų aptikimu ir automatinio sauso faneravimo būdu.
- 6) lakštų išrūšiuojimas pagal tankį, stiprį, drėgnumą.

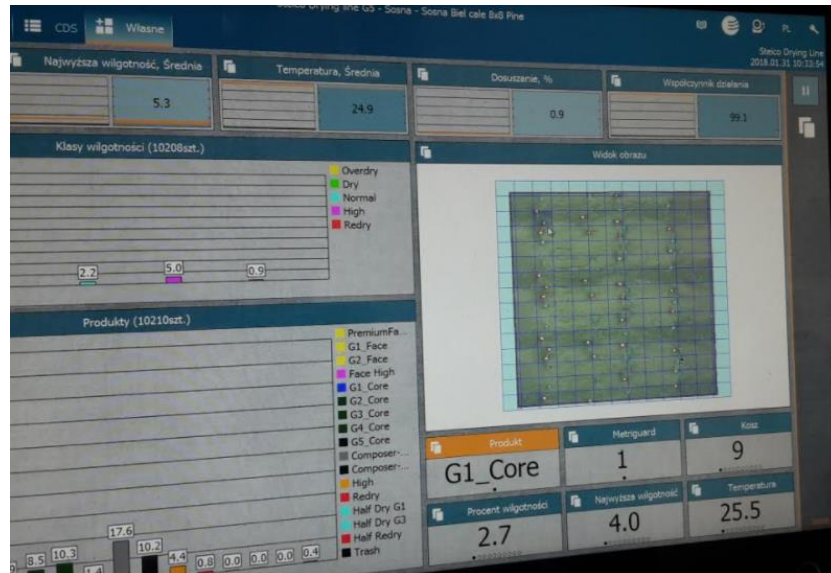
Drėgmės kiekis: Mecano MVA arba DMA drėgmės analizatorius naudojamas lakštų drėgmės kiekiui išmatuoti. Lakštai su per didele drėgme yra pašalinami ir dar kartą džiovinami.

Tankis ir stiprumas:

Ultragarsinis garso skleidimo laikas ir mikrobangų technologija naudojami kiekvieno lakšto sluoksnio savitojo svorio ir elastingumo modulio nustatymui. Lakštai yra suskirstomi į skirtingas kategorijas pagal jų stiprumo potencialą.

Visas procesas yra automatizuotas, kad būtų kuo mažesnis žmogiškasis klaidos faktorius.

Vizualiniai defektai: "Meacno" VDA spalvų kamera naudojama aptikti atvirus defektus ir išanalizuoti bendrą kiekvieno lakšto vizualinę išvaizdą. Šie duomenys gali būti naudojami kartu su faneros stipriosiomis savybėmis, siekiant nustatyti galutinį faneros laipsnį ir jo padėtį lakštų išdėstymo metu.



14 pav. Lakšto kokybės nustatymas



15 pav. Lakštų išskirstymas pagal medienos klases

- 7) Lakšto priekinių ir galinių kampų nupjovimas kampu, kad būtų kuo geresnis sukibimas su kitu lakštu ir neliktų tarp jų tarpelio. Tokių siūlių išdėstymas ir kiekis gaminyje yra griežtai kontroliuojamas, kad vienoj linijoj nebūtų dviejų ir daugiau jungimo siūlių ir taip nebūtų susilpnintas gaminys. Lakštai yra kljuojami taip, kad viršutinis lakštas perrištų siūlę.



16 pav. Lakštų kljavimas į vientisą lakštą

- 8) Suklijuotų lakštų presavimas karštu presu. Presavimo procesas trunka 2-3 valandas. Po presavimo gaminy yra lėtai ataušinamas, kad neįvyktų medžiagų deformacijos dėl greito medžiagos atšalimo.
- 9) Lakštai supjaustomi į tam tikrą ilgį ir sandėliuojami.

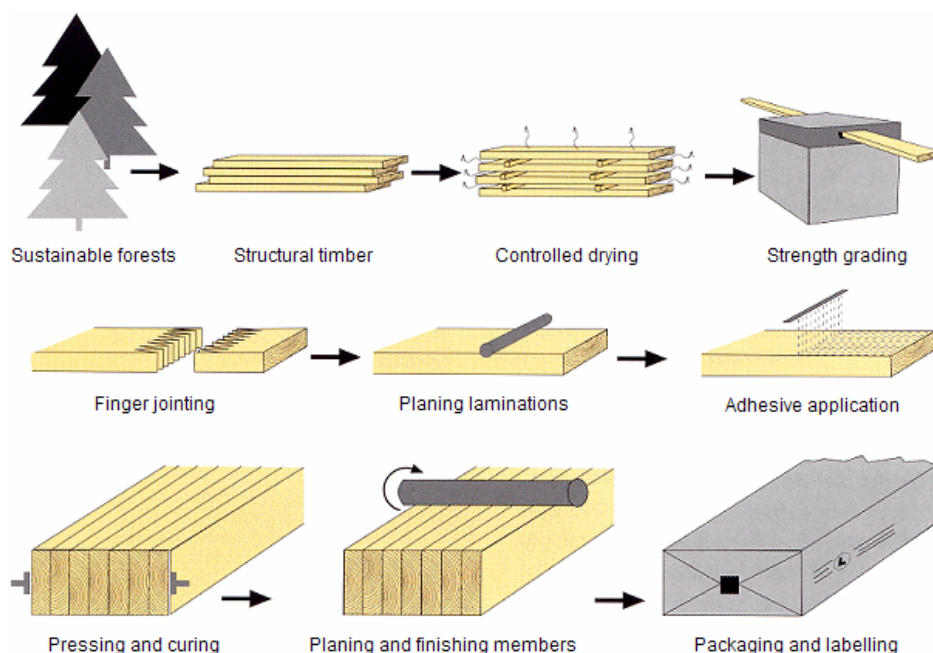


17 pav. LVL plokštė

Apžvelgus LVL produkcijos gamybą galima matyti, kad gaminių kokybę, patikimumą bandoma užtikrinti kiekviename gamybos žingsnyje. Galutiniame rezultate tai leidžia konstrukcijose naudoti mažesnius, patikimesnius, ekonomiškесnius elementus. Gaunamas sausas (8-15% drėgnumo) gaminy kuris nesideformuos dėl džiūvimo. Aukščiausios klasės lakštai dedami į vidurį, kad būtų kuo mažiau veikiami išorinio poveikio ir neprarastų savo savybių. Vienodas stiprumas per visą gaminio ilgį, nes silpnos medienos vietos yra pašalinamos, o šakos

neina per visą konstrukcijos storį, tik per vieną lakštą. Vandeniui nepralaidūs klėjai užtikrina, kad gaminys neišsikraipys, nepakeis matmenų, išliks toks koks buvo pagamintas.

1.4. Klijuotos medienos gamybos linija



18 pav. Klijuotos medienos gamybos linija

Klijuota mediena - nustatyta kaip konstrukcinė medienos dalis, sudaryta iš bent dviejų lygiagrečių laminavimo medžiagų, kurios gali sudaryti iš vienos arba dviejų greta esančių plokščių, kurių storis nuo 6 mm iki 45 mm [32]. Gaminama iš džiovintos eglės, pušies, maumedžio ar kitos medienos, dvigubo pjovimo lentų, jas suklijuojant vandens pagrindo klėjais į reikiamo dydžio gaminius. Gaminamos laikančiosioms medinėms konstrukcijoms – išlenktoms ir tiesioms. Ilgis priklauso nuo gamybos linijos ir transportavimo galimybių. [33].

Klijuoto medienos produkcijos gamybos etapai:

- 1) medienos atrinkimas ir supjaustymas į reikiamus dydžius.
- 2) kontroliuojamas lentų džiovinamos iki $12 \pm 2\%$ drėgnumo. Lentos su per didele drėgme yra pašalinamos ir dar kartą džiovinamos.
- 3) lentų kalibravimas iš keturių pusių ir suskirstymas pagal medienos stiprio klases.
- 4) medienos defektų sužymėjimas ir suskirstymas į išorines ir vidines lameles.
- 5) išpjaustomi defektai. Paruoštos lamelės dyginio sujungimo būdu yra sujungiamos ilgiu į "begalinę" lamelę, kuri yra supjaunama reikalingu ilgiu.
- 6) atliekamas tikslus lamelių 4 pusių obliavimas ir vandens pagrindo klijų užliejimas.

- 7) po klijų užliejimo lamelės iškart patenka į tiesioms sijoms presuoti skirtą hidraulinį presą arba lenktoms sijoms presuoti skirtą hidraulinį presą.
- 8) po presavimo sijos nukreipiamos į pjaustymo ilgiu stakles, kur sijos supjaunamos ilgiu, nupjaunami jų galai pagal tikslus matmenis.
- 9) galutinio obliavimo staklės, sijos obliuojamos pagal tikslus matmenis pločio ir aukščio atžvilgiu.
- 10) atliekama visų sijos šonų vizuali kokybės kontrolė ir nedidelių defektų pašalinimas (užtaisomos iškritusios šakos, atsivėrusios sakų kišenėlės).
- 11) sijos mechanizuotai apvyniojamos apsaugine plėvele, supakuojamos ir paruošiamos pakrovimui.

Apžvelgus klijuotos medienos produkcijos gamybą galima matyti, kad gaminių kokybę bandoma užtikrinti kiekviename gamybos žingsnyje. Galutiniame rezultate tai leidžia konstrukcijose naudoti mažesnius, patikimesnius, ekonomiškесnius elementus. Gaunamas sausas (8-15 % drėgnumo) gaminyс kuris nesideformuos dėl džiūvimo.

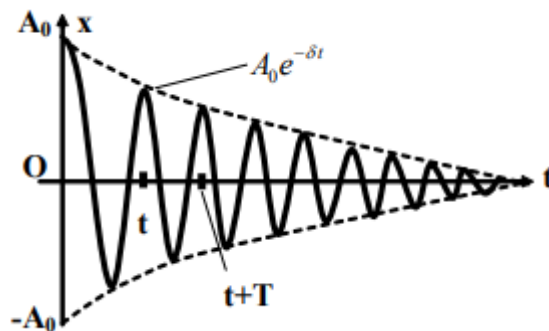
2. TYRIMŲ METODOLOGIJA

2.1. Medienos tampriai plastiškųjų savybių tyrimas rezonansinių virpesių metodu

Gaminant klijuotos medienos ir lukštinius gaminius, reikia žinoti ne tik medienos mechanines savybes, bet ir jos atskirų elementų savybes [44].

Mediena priskiriama prie tampriai plastiškų medžiagų [44]. Jų mechaninės savybės apibrėžiamos elastinių kietųjų dalelių ir klampių skysčių, todėl klasikiniai tyrimo metodai vertinant tamprumo modulį ir energijos išsklaidymą – slopinimo koeficientą, nėra tikslūs [36]. Dažnai tamprumo modulis yra nustatomas pagal garso dažnio virpesius. Naudojant priverstinius arba laisvuosius virpesius apskaičiuoti tamprumo modulį ir slopinimo koeficientą, gaunami tikslesni rezultatai. Šio metodo esmė – priversti tiriamąjį objektą virpėti savaisiais (rezonansiniais) dažniais ir, analizuojant jo amplitudines – dažnines charakteristikas, įvertinti mechanines savybes (dinaminį tampros modulį (MOE), slopinimo koeficientą ir kt.).

Laisvųjų virpesių atveju virpesiai bus gęstantys. Tokiai sistemai suteikus pradinį judesį, svyravimo energija pamažu virs vidine ir laisvųjų svyravimų amplitudė mažės, tol, kol virpesiai užges. Slopinamieji virpesiai pavaizduoti 19 pav. [39].



19 pav. Slopinamųjų svyravimų amplitudės gesimo kreivė

Slopinamųjų svyravimų diferencialinė lygtis [39].

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\delta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (2.1)$$

Lygties dalinis sprendinys:

$$x = A_0 e^{-\delta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (2.2)$$

čia A – slopinamųjų svyravimų amplitudės mažėjimo eksponentinis dėsnis,

$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ – ciklinis dažnis esant slopinimui,

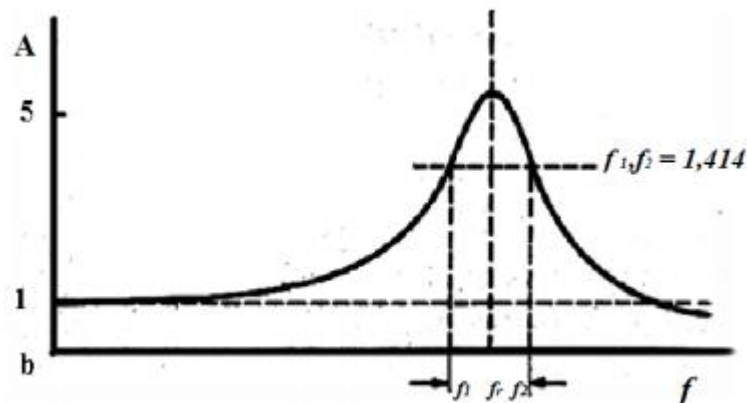
$\delta = \frac{\beta}{2m}$ – slopinimo koeficientas,

Slopinimo koeficientą galima įvertinti fiksuojant virpesių gesinimo laiką.

φ_0 – pradinė svyravimo fazė.

Tampriųjų savybių įvertinimas fiksuojant šių virpesių dažnį nėra pakankamai tikslus, nes laisvųjų virpesių dažnis priklauso nuo slopinimo koeficiento.

Priverstinių virpesių atveju bandinį veikia kintamojo dažnio jėga. Nustačius amplitudę ir rezonansinį dažnį, reikia nustatyti du dažnius, kuriems esant rezonansinė amplitudė sumažėja 1,414 karto [45]. Tampriosios savybės fiksuojant virpesių dažnį nėra tikslios, nes virpesių amplitudė priklauso nuo slopinimo laipsnio. Esant skirtingam slopinimui gaunamos skirtingos dažninės charakteristikos. Esant mažesniai slopinimui virpesių amplitudė bus didesnė ir mažesnis dažnių juostos plotis, o esant didesniai amplitudė bus mažesnė ir didesnis dažnių juostos plotis [38]. Priverstinių svyravimų rezonansinę kreivę 20 pav. [45].



20 pav. Priverstinių svyravimų rezonansinė kreivė

Priverstinių svyravimų diferencialinė judesio lygtis [39]:

$$\frac{d^2s}{dt^2} + 2\delta \frac{ds}{dt} + \omega_0^2 s = x_0 \cos \omega t, \quad (2.3)$$

2.1.1. Strypo formos bandinių tyrimas

Vienas iš labiausiai naudojamų tyrimams formų yra strypo forma. Tai gali būti įvairių matmenų, vientisas ar klijuotas tašas. Nuo galų įtvirtinimo priklauso strypo rezonansinis dažnis. Strypą veikia tolygiai pasiskirsčiusi apkrova nuo svorio ir tampros jėgų [43].

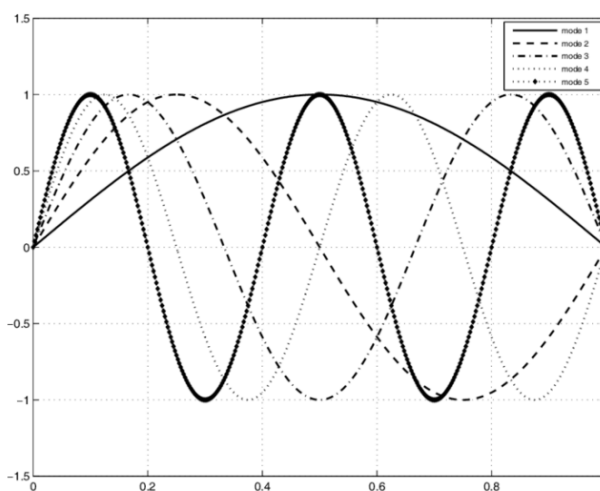
Tampriai plastiškos medžiagos pasižymi klampiomis savybėmis, todėl tampros modulio E ir slopinimo koeficiento $tg\delta$ išraiškos bus [43]:

$$E = \left(\frac{\mu l^4}{I c_i^4}\right) f_{rez}^2 \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^4\right], \quad (2.4)$$

$$tg\delta = \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right) \left[1 - \frac{3}{4} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^2 + \frac{23}{32} \left(\frac{\Delta f}{f_{rez}}\right)^4\right], \quad (2.5)$$

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

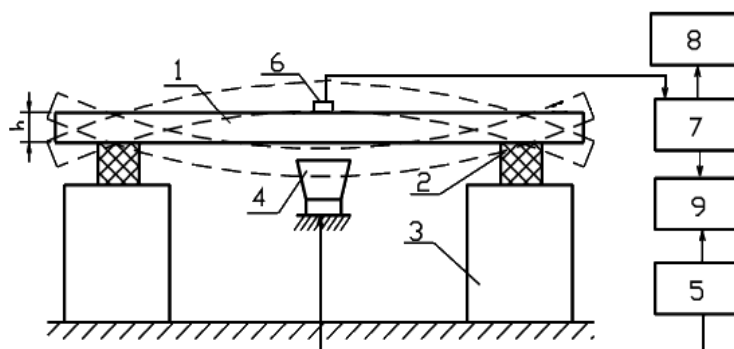
Laisvai padėto strypo išlinkimo modos pavaizduotos 21 pav. [40].



21 pav. Laisvai padėto strypo Modos

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

Tašų svoris buvo nustatomas elektroninėmis svarstyklėmis 50 g tikslumu, plotis ir storis matuoti slankmačiu 0,1 mm tikslumu, ilgis – rulete 1 mm tikslumu. Drėgnis drėgmėmačiu 1 % tikslumu. Aplinkos sąlygos statybinių konstrukcijų eksploatacijos metu imituotos klimatinėje kameroje, kurioje temperatūra palaikyta 0,2 °C tikslumu, o santykinė drėgmė – 1% tikslumu. Tašų mechaninės savybės matuotos skersinių rezonansinių virpesių metodu naudojant originalią metodiką ir įrangą 22 pav. [41]:



22 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 prietaisas, 8 – oscilografas, 9 – fazometras

Tiriamas bandinys(1) laisvai padedamas ant dviejų tamprių elementų (2), kurie yra laisvai padėti ant stovų (3), taip sukuriant ekstremaliausią situaciją – laisvai padėtas elementas. Garsiakalbio (4), kuris yra valdomas elektrinių signalų generatoriumi (5), yra sužadinami tiriamojo bandinio (1) rezonansiniai virpesiai. Virpesiai fiksuojami jutikliu (6), kuris yra pritvirtintas prie bandinio (1). Keičiant generatoriaus (5) dažnį, sužadinami bandinio (1) virpesiai, kurie išmatuojami fazometru (9). Oscilografo (8) ekrane stebima virpesių forma. Iš matavimo prietaiso (7) ir generatoriaus (5) į fazometrą (9) paduodami signalai išlinkimo krypties nustatymui.

Naudojant aprašytą įrangą, medienos bandinių amplitudinė – dažninė charakteristika nustatyta 20 – 2000 Hz dažnių diapazone (matavimų paklaida ± 0.1 Hz) [42].

Nustačius strypo matmenis, tankį, virpesių dažnį, išlinkimo formą, apskaičiuojamas medienos dinaminis tampros modulis E ir slopinimo koeficientas $\text{tg}\delta$.

Tampros modulis apskaičiuojamas pagal [44]:

$$E = \frac{4f_r^2 \pi^2 l^4 \rho s}{A^2 I}. \quad (2.6)$$

čia: f_r – rezonansinis dažnis, kuriuo virpėdamas bandinys išlinksta pirma moda, l – bandinio ilgis, ρ – medžiagos tankis, s – bandinio skerspjūvio plotas, A – koeficientas, priklausantis nuo bandinio tvirtinimo būdo ir išlinkimo formos, I – bandinio skerspjūvio inercijos momentas.

Slopinimo koeficientas apskaičiuojamas pagal [44]:

$$tg\delta \approx \eta = \frac{f_2 - f_1}{f_r}. \quad (2.7)$$

čia: f_r – rezonansinis dažnis, f_1, f_2 – dažniai, kuriais virpančio bandinio amplitudė sumažėja $\sqrt{2}$ karto.

Atlikus eksperimentą ir gavus tampros modulio ir slopinimo koeficiento skaitines vertes, reikia jas matematiškai statistiškai apdoroti [37].

Apskaičiuojami svarbiausi statistiniai rodikliai.

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

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.8)$$

2. Dispersija s^2 apskaičiuojama pagal formulę:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (2.9)$$

3. Vidutinis kvadratinis nuokrypis s apskaičiuojamas formulę:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.10)$$

4. Variacijos koeficientas v apskaičiuojamas:

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (2.11)$$

Jei variacijos koeficientas $v \leq 5 - 10\%$ tada rezultatų sklaida ne didelė; jei $15 - 20\%$ - didelė; jeigu $\geq 20\%$ - labai didelė.

2.2. Statiniai tyrimo metodai

Tiriant statiniu metodu yra matuojamos labai mažos deformacijos. Norint gauti tikslesnius rezultatus, bandinį reikia apkrauti iki tokių įtempių, kai nebelieka linijinės priklausomybės tarp deformacijos ir įtempių [44].

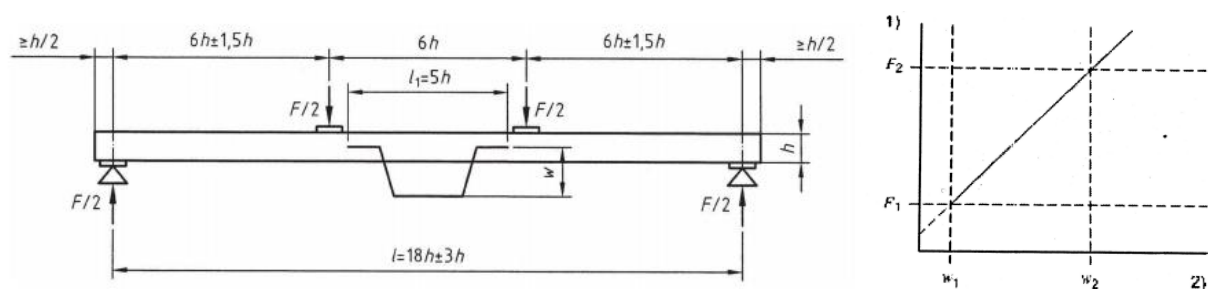
Gaminius bandant statiškai galima nustatyti įvairias medienos fizikines ir mechanines savybes ir jų priklausomybes nuo faktorių.

2.2.1. Lokaliojo lenkiamojo tamprumo modulio nustatymas

Statybinės medienos ir klijuotos sluoksninės medienos tamprumo modulio nustatymas yra standartizuotas pagal LST EN 408: 2010+A1 [46] standartą.

Prieš atliekant bandymus turi būti išmatuoti matmenys 1 % tikslumu, drėgnis, tankis, bandiniai turi būti kondicionuoti standartinėse aplinkos sąlygose (20 ± 2) °C temperatūroje, esant (65 ± 5) % santykiniam oro drėgnumui [46].

Lenkiant bandinys simetriškai apkraunamas dviejuose taškuose tarpatramyje, 18 kartų didesniame už bandinio aukštį (23 pav.).



23 pav. Lokaliojo lenkiamojo tamprumo modulio bandymo schema (a) ir apkrovos ir deformacijos diagrama tampriosios deformacijos zonoje (b), 1) apkrova, 2) deformacija

Apkrovimo įranga turi gebėti matuoti apkrovą 1 % tikslumu nuo naudojamos bandiniui apkrovos arba, kai mažesnė nei 10 % naudojamos didžiausios apkrovos, 0.1 % tikslumu nuo naudojamos didžiausios apkrovos. Deformacija w turi būti paskaičiuota kaip abiejų pusių matavimų vidurkis neutralioje ašyje ir turi būti matuojama pamatinio ilgio, kuris yra 5 bandinio skerspjūvio aukščiai, viduryje [46].

Panaudojant duomenis, gautus atliekant bandymą nubraižomas apkrovos ir deformacijos grafikas (23 pav. b)).

Regresinei analizei naudojama grafiko atkarpa tarp $0,1 F_{\max}$ ir $0,4 F_{\max}$.

Lokalusis tamprumo modulis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$E_{m,l} = \frac{a l_1^2 (F_2 - F_1)}{16 I (w_2 - w_1)}; \quad (2.12)$$

čia: $(F_2 - F_1)$ – apkrovos prieaugis regresinėje apkrovos ir deformacijos tiesėje, N;

$(w_2 - w_1)$ – deformacijos prieaugis, atitinkantis $F_2 - F_1$, mm;

a – atstumas tarp apkrovos taško ir arčiausios atramos, per lenkiamąjį bandymą, mm;

l_1 – matuoklio ilgis, mm

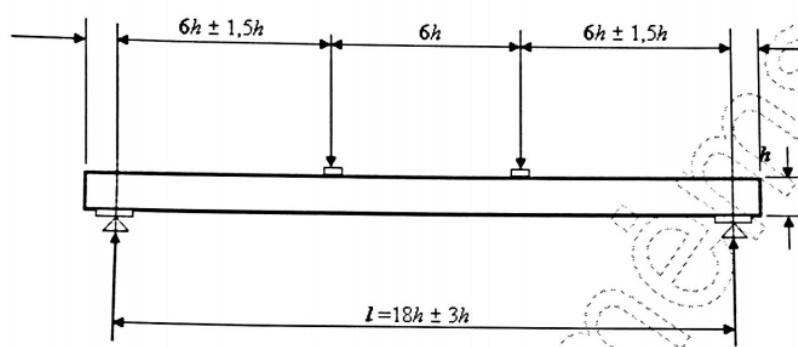
I – skerspjūvio inercijos momentas, mm⁴.

Pagal šią metodiką lokalusis tamprumo modulis turi būti apskaičiuotas 1 % tikslumu.

2.2.2. Sijos lenkiamojo stiprio nustatymas

Statybinės medienos ir klijuotos sluoksninės medienos lenkiamojo stiprio nustatymas yra standartizuotas pagal LST EN 408:2010+A1 [46] standartą.

Lenkiant bandinys simetriškai apkraunamas dviejuose taškuose tarpatramyje, 18 kartų didesniame už bandinio aukštį (24 pav.). Bandinys paprastai padėtas ant atramų.



24 pav. Sijos lenkiamojo stiprio bandymo schema

Apkrovimo įranga turi gebėti matuoti apkrovą 1 % tikslumu nuo naudojamos bandiniui apkrovos

Apkrova turi būti panaudojama, kai apkrovos įtaiso judesys pastovus ir sureguliuotas taip, kad didžiausia apkrova pasiekama per (300 ± 120) s [46].

Lenkiamasis stipris f_m apskaičiuojamas pagal formulę:

$$f_m = \frac{a \cdot F_{max}}{2W}; \quad (2.13)$$

čia: a – atstumas tarp apkrovos tašo ir arčiausios atramos, per lenkiamąjį bandymą, mm;

F_{max} – didžiausia apkrova, N;

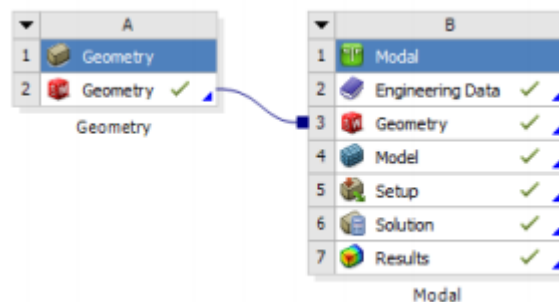
W – skerspjūvio atsparumo momentas, mm^4 .

Pagal šią metodiką lenkiamasis stipris turi būti apskaičiuotas 1 % tikslumu.

2.2.3. Programinė įranga ANSYS 19.2

ANSYS – tai daugiafunkcinis baigtinių elementų programinis paketas skirtas modeliuoti sudėtingiausius mazgus ir konstrukcijas, tiesinius bei netiesinius kontaktinius uždavinius, apskaičiuojant įtempimus, poslinkius. Sukuriant produkto ir jo darbinės terpės skaitinį modelį ANSYS programiniai paketai leidžia globaliai nagrinėti projektuojamą objektą. Paketo pagalba galima spręsti tiek mokslinės, tiek ir inžinerinės pakraipos problemas.

ANSYS 19.2 programoje nusibraižomas dinaminis tiriamasis objektas. Išlaikomi LVL sijos matmenys $75 \times 100 \times 2400$ mm, 23 medžio lukšto lakštai 3 mm storio suklijuoti klizais. Sudaromas dinaminis modelis, 25 paveikslas.



25 pav. Skaitinio eksperimento atlikimo schema

Sukurtiems stendo geometrijos elementams parenkamos reikalingos medžiagos (medžio savybės, klizai ir kt.), tada skaidoma į baigtinius elementus (Mesh), kaip pateikta 26 pav. Medžio lukšto tampros modulis yra parenkamas iš ankščiau atliktų tyrimų, pagal temperatūrų pasikeitimus. Kadangi, klizų rūšis ir savybės buvo nežinomos, todėl klizai programoje buvo įvertinti kaip medienos charakteristikos, nes yra žinoma, kad klizai turi geresnes charakteristikas už medienos. Medienos charakteristikos pateikiamos 26 paveiksle.

LVL pradinė

Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,4699E+10
Poisson's Ratio	0,3
Bulk Modulus	1,2249E+10
Shear Modulus	5,6535E+09

LVL drėkinta 80%

Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,432E+10
Poisson's Ratio	0,3
Bulk Modulus	1,1933E+10
Shear Modulus	5,5077E+09

LVL šaldyta iki -25°C

Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,6409E+10
Poisson's Ratio	0,3
Bulk Modulus	1,3674E+10
Shear Modulus	6,3112E+09

LVL sausai džiovinata

Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	1,4017E+10
Poisson's Ratio	0,3
Bulk Modulus	1,1681E+10
Shear Modulus	5,3912E+09

26 pav. Medienos charakteristikų keitimas baigtinių elementų programoje



27 pav. LVL sijos skaitinis modelio skaidymas į baigtinius elementus (Mesh) ANSYS programoje

Suskaidžius sijos geometriją į baigtinius elementus, atliekama statinė analizė tam, kad gauti reikiamus skaičiavimo rezultatus. Statinė analizė nustato nagrinėjamo elemento poslinkius, įtempius, deformacijas, kurias sukelia aplinkos poveikis ar jį veikiančios apkrovos.

3. REZULTATŲ APTARIMAS

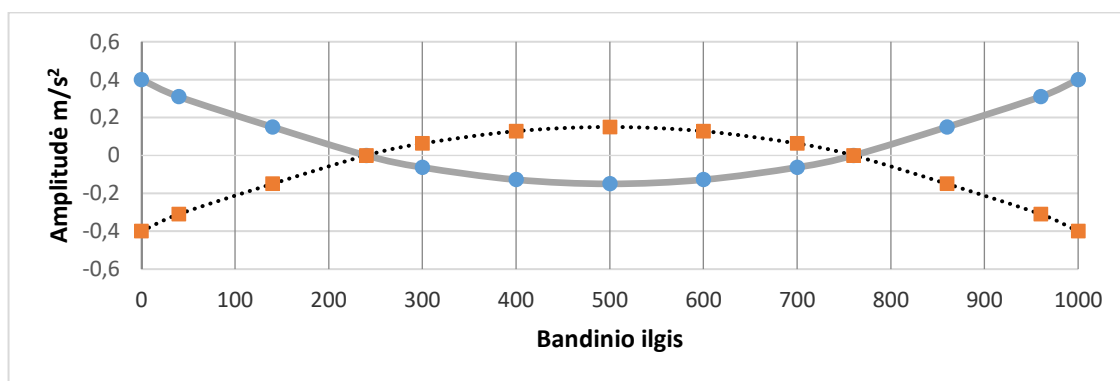
3.1. Klijuoto medžio lukšto sijų (LVL) tarpiai plastiškųjų savybių tyrimas

Tyrimams panaudoti 10 vnt. LVL (Laminated veneer lumber) tašelių. Prieš atliekant tyrimus bandiniai buvo kondicionuoti klimatinėje kameroje dvi savaites 60 % drėgmėje ir 20 °C temperatūroje. Matmenys buvo 830 - 1200x75x100 ribose, drėgnis 11,4 – 12,7 %, tankis 590 – 670 kg/m³ ribose. Tašelių duomenys pateikti 1 lentelėje.

1 lentelė. LVL parametrai

Bandinys	Ilgis, mm	Plotis, mm	Storis, mm	Masė, kg	Drėgnis, %	Tankis, kg/m ³	Skerspj.pl. mm ³
1	840	100	75	3,75	13,8	595,23	0,0075
2	830	100	75	3,95	14,0	634,53	0,0075
3	990	100	75	4,60	12,5	619,52	0,0075
4	989	100	75	4,55	13,9	613,41	0,0075
5	1199	100	75	5,75	14,7	639,42	0,0075
6	1200	100	75	5,90	14,0	655,55	0,0075
7	1198	100	75	5,63	15,0	626,59	0,0075
8	1199	100	75	5,65	14,0	628,30	0,0075
9	1199	100	75	5,70	14,5	633,86	0,0075
10	1197	100	75	6,00	15,0	668,33	0,0075

Tyrimų metu nustatyti tašelių rezonansiniai dažniai ir išlinkimo formos. Nustatyti rezonansiniai dažniai prie kurių bandiniai išlinko artima pirmai teorinei strypo išlinkimo formai (modai). Strypo išlinkimo forma pateikta 27 pav.



28 pav. Amplitudės pasiskirstymas visame medinio elemento ilgyje

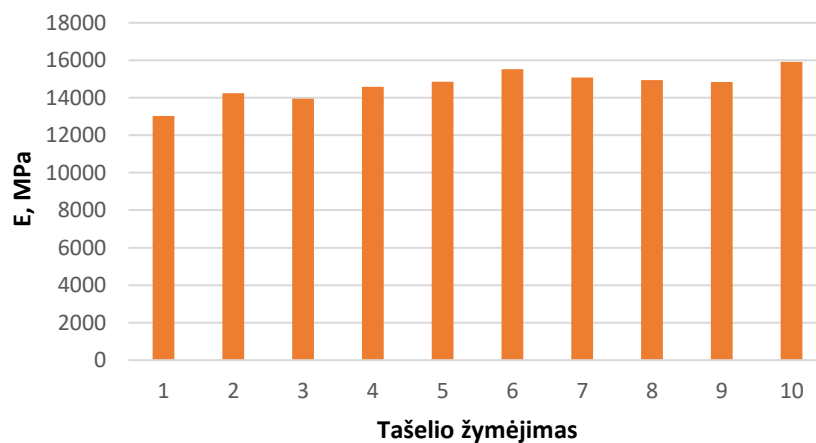
Kitų bandinių išlinkimo forma buvo analogiška.

Taikant deformuojamo strypo virpesių teorinius skaičiavimus (2.6 formulė), apskaičiuojamas bandinių tampros modulis. Bandiniai buvo veikiami po 7 paras. Skaičiavimo duomenys pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė. LVL bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ

Grupė	Nepaveiktas bandinys		Šaldytas -25 °C		Drėkintas 80% drėgmėje ir 20 °C temperatūroje		Sausai džiovintas 40 °C		
	Bandinys	E, MPa	tgδ	E, MPa	tgδ	E, MPa	tgδ	E, MPa	tgδ
	1	13026	0,014	14305	0,015	12874	0,014	12323	0,020
	2	14239	0,017	15441	0,018	14026	0,017	13657	0,013
	3	13958	0,011	15264	0,010	13735	0,013	13367	0,014
	4	14586	0,010	15982	0,012	14209	0,011	14060	0,013
	5	14864	0,012	16153	0,011	14522	0,012	14408	0,012
	6	15527	0,011	17363	0,011	15055	0,016	14821	0,012
	7	15083	0,008	16967	0,007	14630	0,012	14517	0,012
	8	14946	0,011	17315	0,011	14701	0,011	14365	0,012
	9	14849	0,008	16611	0,011	14621	0,008	14158	0,012
	10	15913	0,008	18687	0,007	14832	0,008	14497	0,011
	Vidurkis	14699	0,011	16409	0,011	14320	0,012	14017	0,013

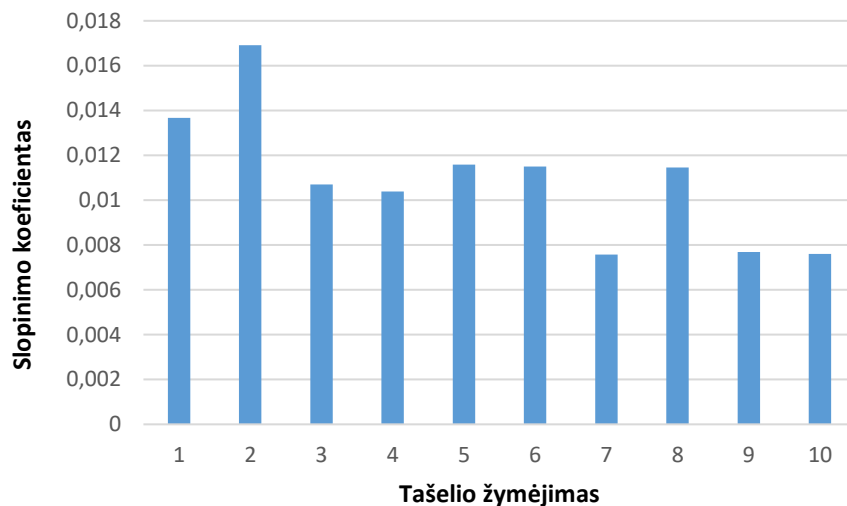
Gauta, kad tampros modulis po kondicionavimo klimatinėje kameroje kito tarp 13026 – 15913 MPa ribose. Žinome, kad LVL tampros modulis pagal gamintoją yra 14000 MPa. Tašelių tampros modulio pasiskirstymas pateiktas 28 paveiksle.



29 pav. LVL bandinių dinaminio tampros modulio diagrama

Iš gautų duomenų matome, kad tampros modulis tašeliuose skiriasi tarpusavyje, tai galima paaiškinti tuo, kad elementas yra suklijuotas iš plonų 3mm lakštų, kurių mechaninės savybės skiriasi elemento ilgyje.

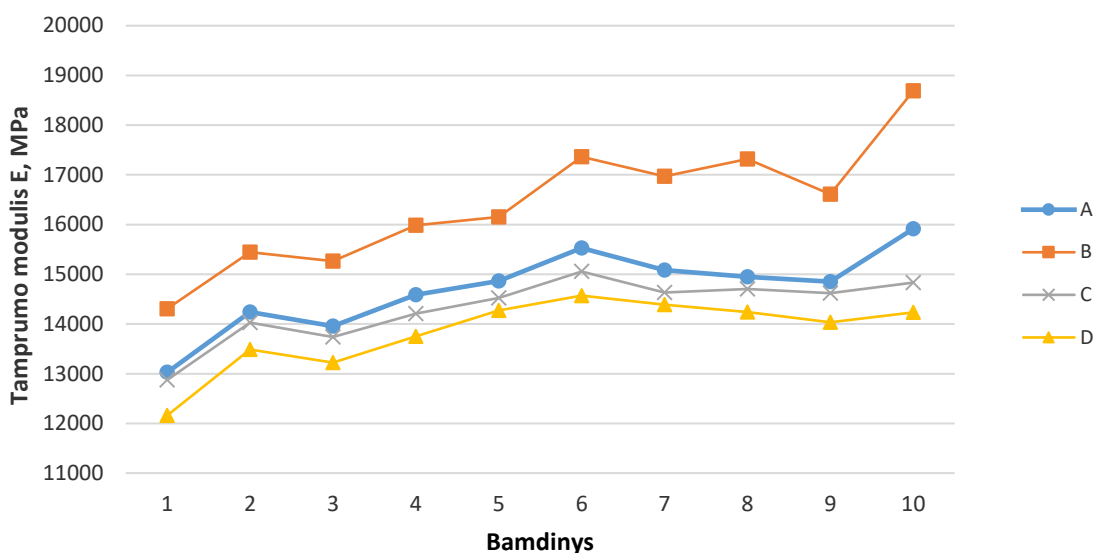
Taip pat, buvo įvertintos bandinių klampiosios savybės (slopinimo koeficientas). Fiksuojant virpesių amplitudę bandinio viduryje, virpant rezonansiniu dažniu, nustatyti f_1 ir f_2 dažniai, kai amplitudė sumažėja $\sqrt{2}$ karto. Pagal 2.7 formulę apskaičiuotas slopinimo koeficientas.



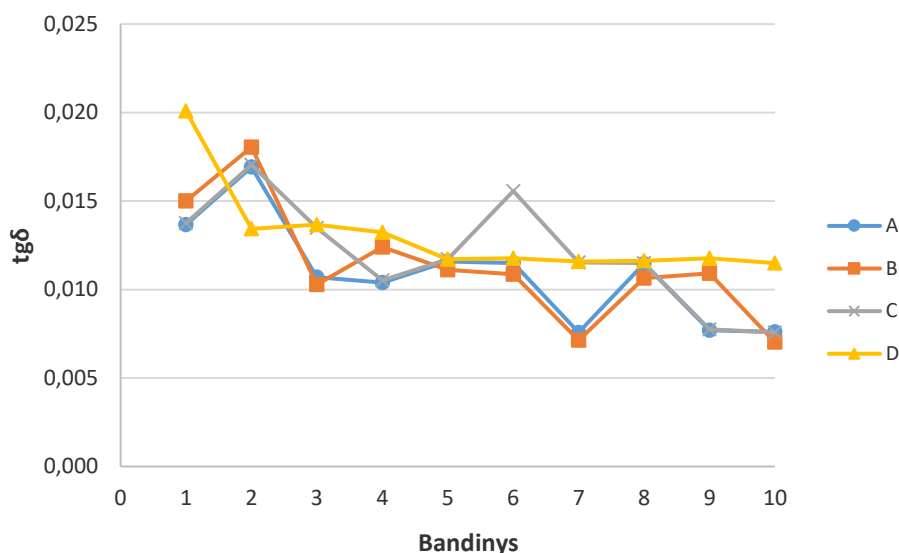
30 pav. LVL bandinių slopinimo koeficiento pasiskirstymo dėsnis

Palyginti gauto slopinimo koeficiento su esančiu literatūroje nepavyko. Gauta, kad bandinių slopinimo koeficientas svyravo tarp 0.008 – 0.017 ribose. Analizuojant duomenis, matome, kad tarpusavyje tašelių slopinimo koeficientas skiriasi 0 – 53 %. Tai atsiranda dėl medienos mechaninių savybių kitimo tašelio ilgyje, ydų, defektų ar klijų.

Vėliau LVL bandiniai buvo šaldomi -25°C temperatūroje, sauso šilto oro ir drėkinami 80 % ir 20°C temperatūroje po 7 paras. Po to, taikant tą pačią metodiką, įvertintas dinaminis tamprumo modulis ir slopinimo koeficientas. Rezultatai pateikti 2 lentelėje.



31 pav. LVL bandinių tamprumo modulis: A – nepaveikti bandiniai, B - šaldytas -25 °C, C – drėkintas 80 % drėgmėje ir 20 °C temperatūroje, D – sausai džiovintas 40 °C temperatūroje

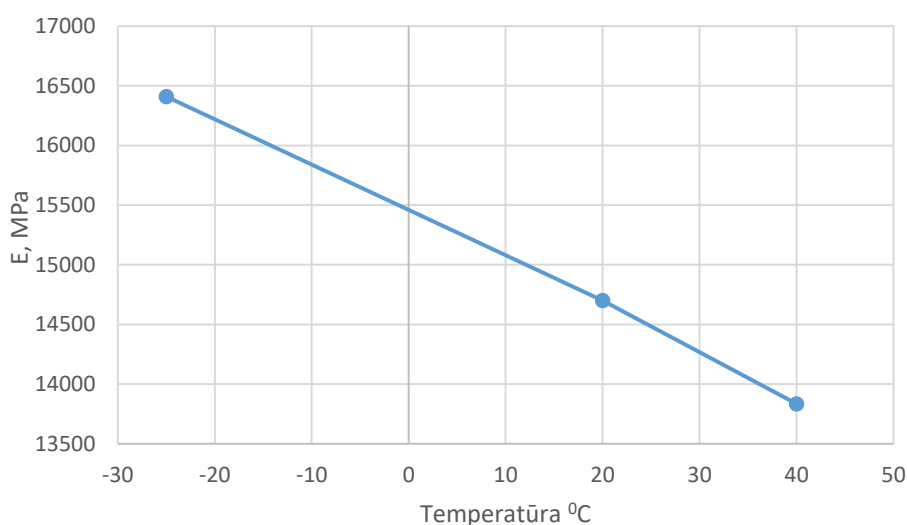


32 pav. LVL bandinių slopinimo koeficientas: A – nepaveikti bandiniai, B - šaldytas -25 °C, C – drėkintas 80 % drėgmėje ir 20 °C temperatūroje, D – sausai džiovintas 40 °C temperatūroje

Analizuojant gautus rezultatus, matome, kad šaldant medienos lukšto tašų tampros modulis padidėjo 11,6 % – tapo tampresni, slopinimo koeficientas padidėjo 4 %. Tai tikriausiai susiję su pagrindinių medienos elementų – celiuliozės, lignino, hemiceliuliozės sustandėjimu. Masė nepakito. Pašaldžius dar 7 paras tampros modulis praktiškai nekito. Sausame šiltame ore, nors mediena šiek tiek džiūvo (masė sumažėjo iki 100g per 7 paras), tai mechaninėms savybėms įtakos beveik neturėjo. Tampros modulis sumažėjo 6 %, tuo tarpu slopinimo koeficientas

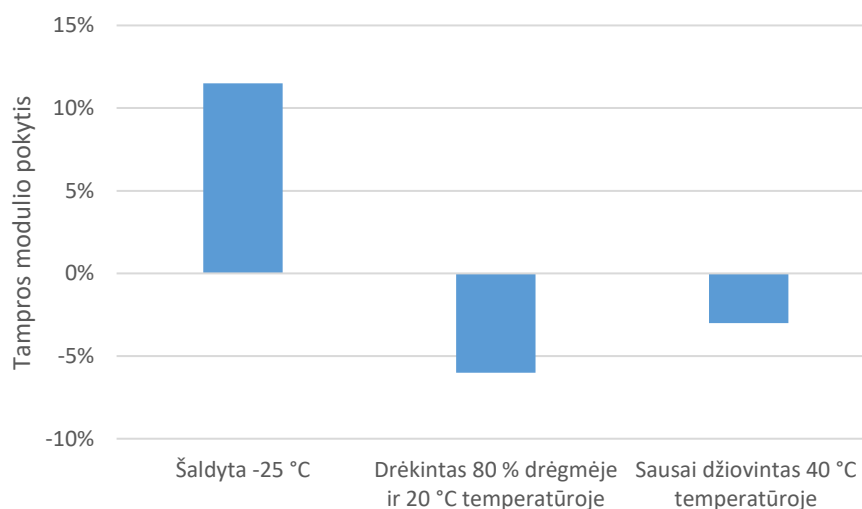
padidėjo 20 %. Drėkinimo metu tašų masė didėjo 50 – 100 g per 7 paras, praktiškai visa drėgmė gėrėsi tik į paviršinius sluoksnius ir šie tapo plastiškesni. Tampros modulis sumažėjo 3 %, slopinimo koeficientas padidėjo 10 %. Vėliau didėjant tašo vidutiniam drėgmeniui dinaminis tampros modulis mažėjo iki 1% per 7 paras. Po antros savaitės dinaminis tamprumo modulis kito 1 – 2 %, o po trečio etapo tyrimai buvo nutraukti, nes rezultatai stabilizavosi.

Pastebime, kad klijuotų medžio lukšto sijų tamprumo modulis ir slopinimo koeficientas keičiasi priklausomai nuo aplinkos sąlygų. Mažėjant temperatūrai tamprumo modulis didėja, o temperatūrai didėjant tamprumo modulis mažėja.

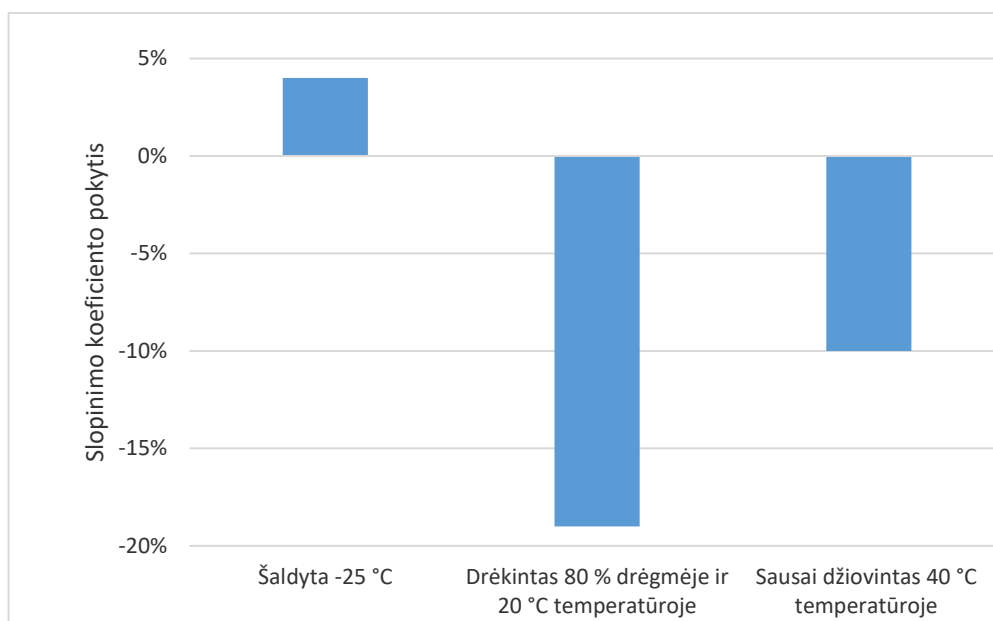


33 pav. LVL bandinių tamprumo modulio kitimas keičiantis temperatūrai

Yra žinoma, kad mažėjant temperatūrai medienos mechaninės savybės gerėja, o didėjant temperatūrai mechaninės savybės blogėja [47,48].



34 pav. LVL bandinių tampros modulio E pokytis keičiantis temperatūrai



35 pav. LVL bandinių slopinimo koeficiento tgδ pokytis keičiantis temperatūrai

3.2. Klijuotos medienos tampriai plastiškųjų savybių tyrimas

Tyrimas atliekamas analogiškai LVL bandiniams tirti naudotas metodus.

Tyrimams panaudoti 10 klijuotų medienos (GLT) tašelių. Prieš atliekant tyrimus bandiniai buvo kondicionuoti klimatinėje kameroje savaitę 60 % drėgmėje ir 20 °C temperatūroje. Matmenys buvo 995 - 1043x80x100 ribose, drėgnis 10,8 – 12,1 %, tankis – 395 – 462 kg/m³ ribose. Tašelių duomenys pateikti 3 lentelėje.

3 lentelė. Klijuotos medienos parametrai

Bandinys	Ilgis, mm	Plotis, mm	Storis, mm	Masė, kg	Drėgnis, %	Tankis, kg/m ³	Skerspj.pl. mm ³
1A	995	100	80	3,35	10,9	420,85	0,008
2A	995	100	80	3,60	11,0	452,26	0,008
3A	1043	100	80	3,55	11,2	425,45	0,008
4A	997	100	80	3,45	12,0	432,54	0,008
5A	1040	100	80	3,85	10,8	462,74	0,008
6A	995	100	80	3,50	11,7	439,69	0,008
7A	995	100	80	3,20	12,1	402,01	0,008
8A	996	100	80	3,50	11,6	439,25	0,008
9A	995	100	80	3,20	11,0	402,01	0,008
10A	996	100	80	3,15	11,5	395,33	0,008

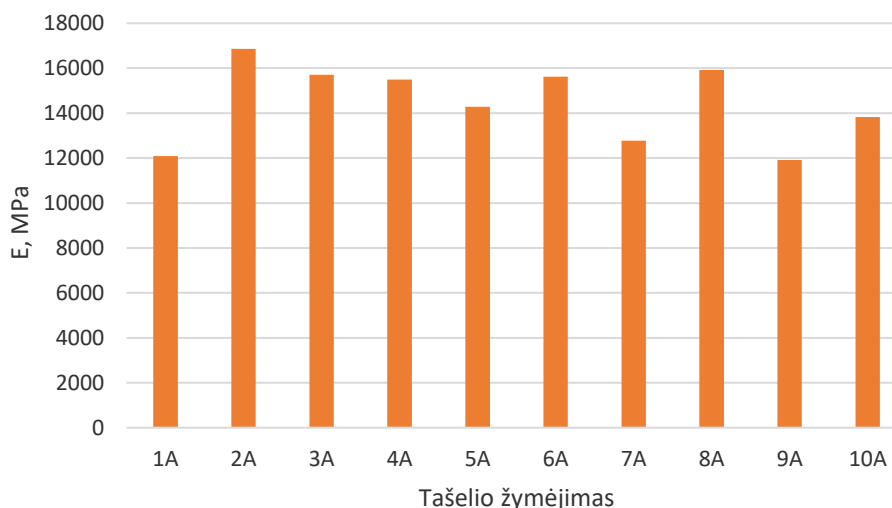
Tyrimų metu nustatyti tašelių rezonansiniai dažniai ir išlinkimo formos. Nustatyti rezonansiniai dažniai prie kurių bandiniai išlinko artima pirmai teorinei strypo išlinkimo formai (modai). Strypo išlinkimo forma pateikta 27 paveiksle.

Taikant deformuojamo strypo virpesių teorinius skaičiavimus (2.6 formulė), apskaičiuojamas bandinių tampros modulis. Skaičiavimo duomenys pateikti 4 lentelėje.

4 lentelė. Klijuotos medienos bandinių tampros modulis E ir slopinimo koeficientas tgδ

Grupė	Nepaveiktas bandinys		Šaldytas -25 °C		Drėkintas 80% drėgmėje ir 20 °C temperatūroje		Sausai džiovintas 40 °C	
	E, MPa	tgδ	E, MPa	tgδ	E, MPa	tgδ	E, MPa	tgδ
1A	12092	0.009	12919	0.011	11683	0.012	10715	0.012
2A	16859	0.008	17664	0.010	16451	0.010	15153	0.006
3A	15701	0.009	16461	0.008	15102	0.013	13906	0.009
4A	15495	0.012	16318	0.010	14783	0.015	13828	0.011
5A	14275	0.005	15096	0.011	13625	0.012	12185	0.010
6A	15625	0.010	16520	0.012	15028	0.014	13745	0.015
7A	12773	0.011	13715	0.012	12209	0.013	10891	0.011
8A	15926	0.008	17027	0.008	15604	0.010	13904	0.011
9A	11916	0.011	12773	0.004	11366	0.014	10401	0.012
10A	13822	0.008	14621	0.012	13308	0.015	12411	0.011
Vidurkis	14448	0.009	15311	0.010	13916	0.013	12714	0.011

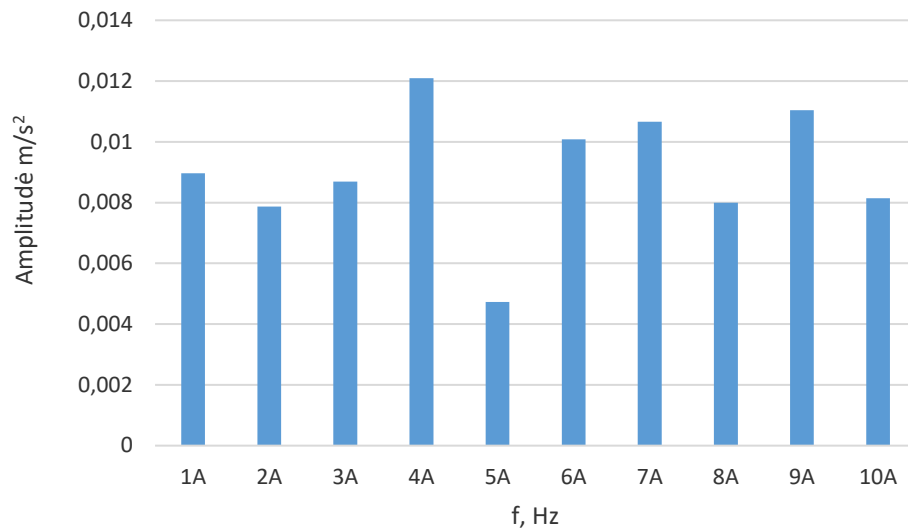
Gauta, kad tampros modulis po kondicionavimo klimatinėje kameroje kito tarp 11916 – 16859 MPa ribose. Iš kitų tyrimų yra žinoma, kad eglės tampros modulis yra 6600 - 17200 MPa ribose [49]. Tašelių tampros modulio pasiskirstymas pateiktas 35 paveiksle.



36 pav. Klijuotos medienos bandinių dinaminio tampros modulio diagrama

Iš gautų duomenų matome, kad tampros modulis tašeliuose skiriasi tarpusavyje, tai galima paaiškinti tuo, kad elementas yra suklijuotas iš lamelių, kurių tampriosios savybės skiriasi elemento ilgyje, dėl šakų ar medienos defektų.

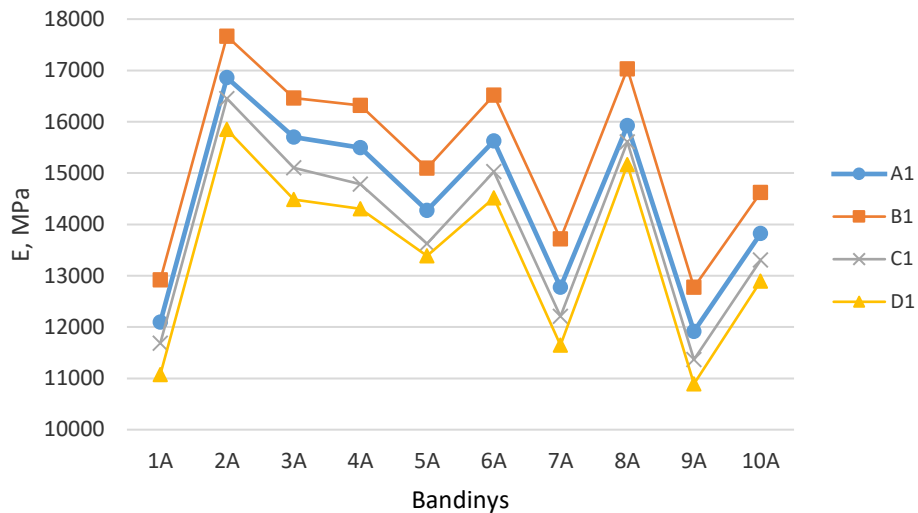
Pagal 2.7 formulę apskaičiuotas slopinimo koeficientas.



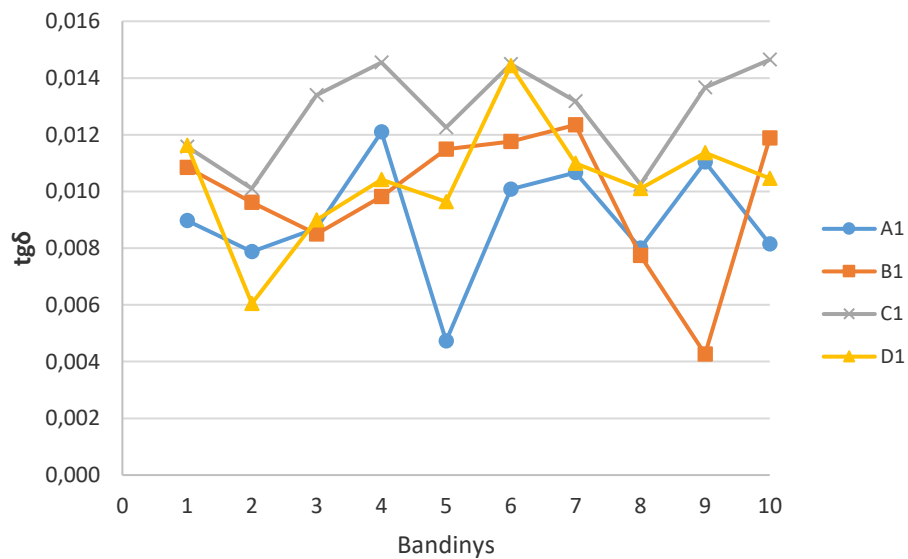
37 pav. Klijuotos medienos bandinių slopinimo koeficiento pasiskirstymo dėsnis

Ankstesniuose darbuose nustatyta, kad eglės medienos slopinimo koeficientas yra apie 0,036 [43]. Gautas slopinimo koeficientas yra 3 kartus mažesnis, šios savybės yra būdingos rezonansinei medienai [43]. Skirtingų tašelių slopinimo koeficientas tarpusavyje skiriasi 25 – 59 %.

Vėliau klijuotos medienos bandiniai po 7 paras buvo veikiami šalčio -25°C , sauso šilto oro ir drėkinami 80 % ir 20°C temperatūroje. Po to, taikant tą pačią metodiką, įvertintas dinaminis tamprumo modulis ir slopinimo koeficientas. Rezultatai pateikti 4 lentelėje.



38 pav. Klijuotos medienos bandinių tamprumo modulis: A1 – nepaveikti bandiniai, B1 – šaldytas -25°C , C1 – drėkintas 80 % drėgmėje ir 20°C temperatūroje, D1 – sausai džiovintas 40°C temperatūroje



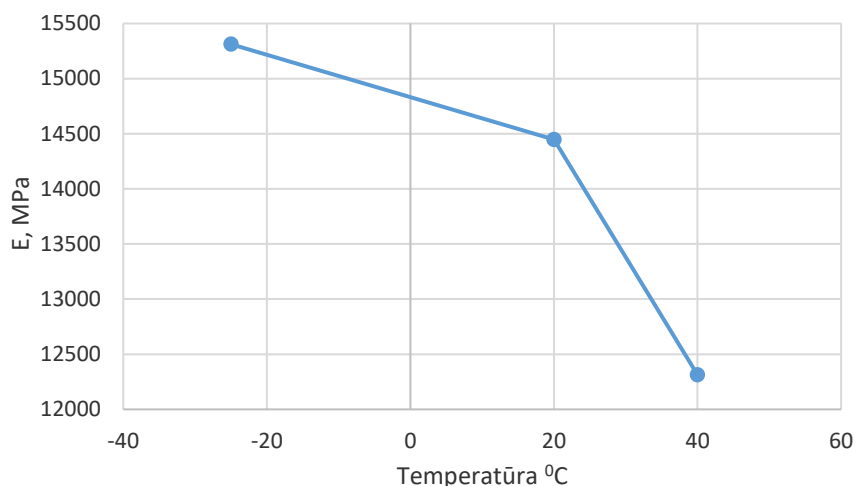
39 pav. Klijuotos medienos bandinių slopinimo koeficientas: A – nepaveikti bandiniai, B – šaldytas -25°C , C – drėkintas 80 % drėgmėje ir 20°C temperatūroje, D – sausai džiovintas 40°C temperatūroje

Analizuojant gautus rezultatus, matome, kad šaldant klijuotos medienos tašų tampros modulis po 7 parų padidėjo 6 % – tapo tampresni, slopinimo koeficientas padidėjo 9 %. Tai tikriausiai susiję su pagrindinių medienos elementų – celiuliozės, lignino, hemiceliuliozės sustandėjimu. Masė nepakito. Sausame šiltame ore, nors mediena šiek tiek džiuvo (masė

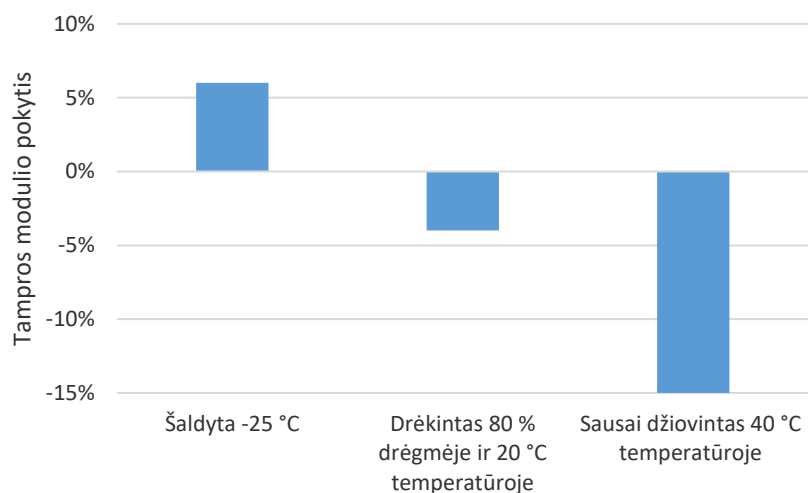
sumažėjo iki 100g) tampros modulis sumažėjo 15 %, tuo tarpu slopinimo koeficientas padidėjo 18 %. Drėkinimo metu tašų masė didėjo 50 – 100 g. Tampros modulis sumažėjo 4 %, slopinimo koeficientas padidėjo 41 %. Visais atvejais po antros savaitės elementų tampros modulis kito 1 – 2 %, po trečios savaitės bandiniai stabilizuodavosi, todėl bandymai buvo nutraukiami.

Pastebime, kad klijuotų medžio sijų tamprumo modulis ir slopinimo koeficientas keičiasi priklausomai nuo aplinkos sąlygų. Mažėjant temperatūrai tamprumo modulis didėja, o temperatūrai didėjant tamprumo modulis mažėja.

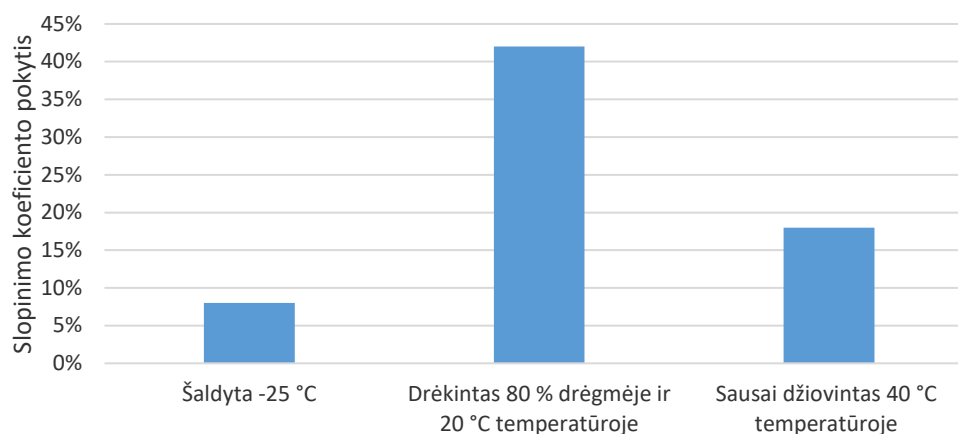
Drėgmės kiekis ir temperatūra turi didelį poveikį medienos mechaninėms savybėms [50].



40 pav. Klijuotos medienos bandinių tamprumo modulio kitimas keičiantis temperatūrai



41 pav. Klijuotos medienos bandinių tampros modulio E pokytis keičiantis temperatūrai



42 pav. Klijuotos medienos bandinių slopinimo koeficiento tgd pokytis keičiantis temperatūrai

3.3. Klijuotos medienos ir LVL bandinių tyrimo duomenų statistinis apdorojimas

Gauti klijuotos medienos ir LVL bandinių tampros moduliai ir slopinimo koeficientai apdoroti statistškai, įvertinti svarbiausi statistiniai rodikliai: aritmetinis vidurkis, dispersija, vidutinis kvadratinis nuokrypis, variacijos koeficientas. Vidurkiai pateikiami 5 lentelėje.

5 lentelė. Statistinės LVL ir klijuotos medienos bandinių tampros modulio E ir slopinimo koeficiento tgd vidutinės vertės

Statistinis rodiklis	LVL tampros modulis E, MPa			
	Nepaveiktas	Šaldytas -25 °C	Drėkintas 80% drėgmėje ir 20 °C temperatūroje	Sausai džiovinta 40 °C
Vidurkis	14699	16409	14320	13835
Dispersija	926051	2133457	528390	645801
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	962	1460	727	803
Variacijos koeficientas	6.5	8.9	5.1	5.8
Statistinis rodiklis	LVL slopinimo koeficientas tgd			
	Nepaveiktas	Šaldytas -25 °C	Drėkintas 80% drėgmėje ir 20 °C temperatūroje	Sausai džiovinta 40 °C
Vidurkis	0.0109	0.0113	0.0120	0.01304
Dispersija	0.000010	0.000014	0.0000023	0.000008
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	0.0031	0.0037	0.0015	0.0029
Variacijos koeficientas	28.5	32.4	12.6	22.0
Statistinis rodiklis	Klijuotos medienos tampros modulis E, MPa			
	Nepaveiktas	Šaldytas -25 °C	Drėkintas 80% drėgmėje ir 20 °C temperatūroje	Sausai džiovinta 40 °C

Vidurkis	14448	16409	13916	13835
Dispersija	2714293	2658835	2873783	2730965
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	1647	1630	1695	1652
Variacijos koeficientas	11.4	9.9	12.2	11.9
Statistinis rodiklis	LVL slopinimo koeficientas tgδ			
	Nepaveiktas	Šaldytas -25 °C	Drėkintas 80% drėgmėje ir 20 °C temperatūroje	Sausai džiovinta 40 °C
Vidurkis	0.0090	0.0098	0.0128	0.0104
Dispersija	0.000001	0.000007	0.0000023	0.000008
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	0.0011	0.0027	0.0015	0.0028
Variacijos koeficientas	11.7	27.4	11.8	26.9

LVL ir klijuotos medienos bandinių rezultatus apdorojus statistiškai pastebime, kad LVL tašelių tampros modulio variacijos koeficiento sklaida yra nedidelė, ji svyruoja tarp 5,1 – 8,9 %, tai rodo jog tašelių mechaninės savybės gan tolygiai pasiskirsčiusios per bandinius, o klijuotos medienos tampros modulio variacijos koeficiento sklaida yra tarp didelės ir labai didelės ji svyruoja tarp 12,6 – 32,4 %, tai parodo kad tašeliu mechaninės savybės pasiskirsčiusio netolygiai.

Matome, kad LVL ir klijuotos medienos bandinių slopinimo koeficiento variacijos sklaida yra didelė arba labai didelė – 11,7 – 32,4 %. Didžiausi slopinimo koeficiento pokyčiai buvo bandiniams šaldant 32,4 % ir 27,4 %. Mažiausi pokyčiai buvo bandinius drėkinant ir džiovinant 12,6 % ir 11,8 %.

3.4. Klijuotos medienos ir LVL sijų tampriai plastiškųjų savybių tyrimas

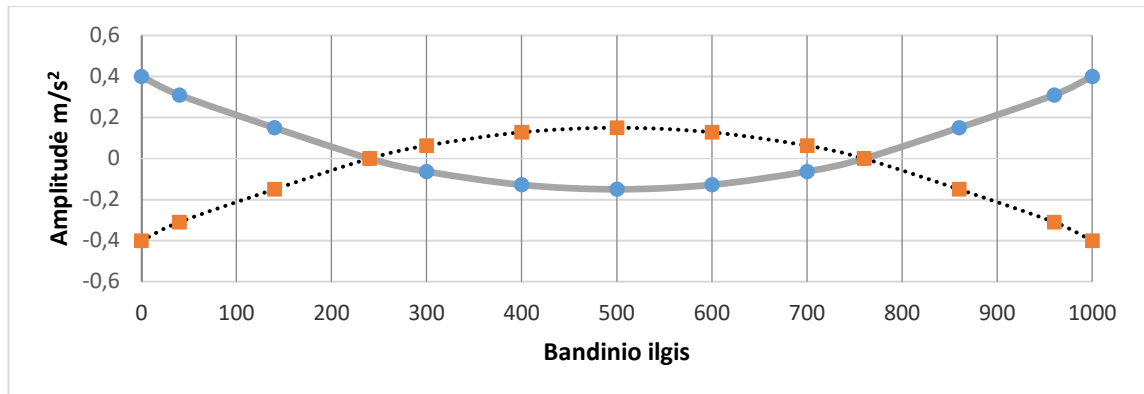
Tyrimams panaudotos 4 LVL ir 4 klijuotos medienos sijos. LVL sijų matmenys buvo 2400x75x100, drėgnis 10,09 – 12,4 %. Klijuotos medienos sijų matmenys buvo 2200x80x100. Sijų duomenys pateikti 6 lentelėje.

6 lentelė. LVL ir klijuotos medienos sijų parametrai

Bandinys	Ilgis, mm	Plotis, mm	Storis, mm	Masė, kg	Drėgnis, %	Tankis, kg/m³	Skerspj.pl. mm³
1	2400	100	75	11	11.1	611.11	0.0075
2	2400	100	75	10.8	12.4	600.00	0.0075
3	2400	100	75	11.05	11.7	613.89	0.0075
1A	2200	100	80	7.45	9.5	423.30	0.008
2A	2200	100	80	7.6	10.5	431.82	0.008

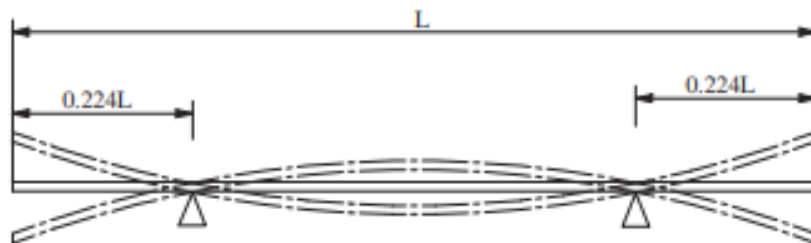
3A	2200	100	80	8.1	10.0	460.23	0.008
----	------	-----	----	-----	------	--------	-------

Tyrimų metu nustatyti tašelių rezonansiniai dažniai ir išlinkimo formos. Nustatyti rezonansiniai dažniai prie kurių bandiniai išlinko artima pirmajai teorinei strypo išlinkimo formai (modai). Strypo išlinkimo forma pateikta 42 paveiksle.



43 pav. Amplitudės pasiskirstymas visame medinio elemento ilgyje

Ilgos sijos laisvai padėtos ant atramų schema pateikta 43 paveiksle.



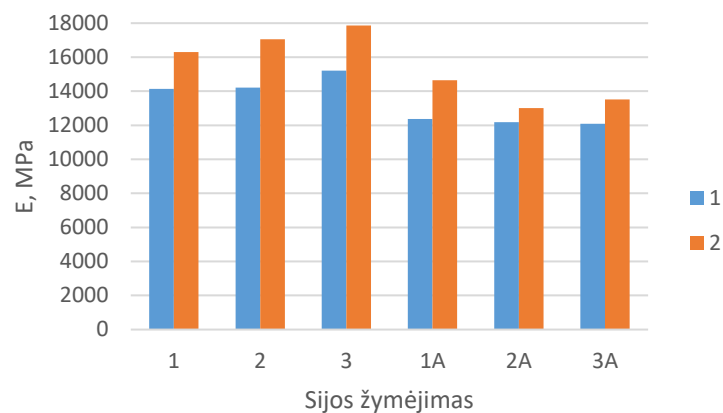
44 pav. Laisvai padėtos sijos schema

Strypas išlinko pirmajai teorinei išlinkimo formai (modai). Taikant deformuojamo strypo virpesių teorinius skaičiavimus (2.6 formulė), apskaičiuojamas bandinių tampros modulis. Skaičiavimo duomenys pateikti 7 lentelėje. Gauta, kad LVL tampros modulis kito 14144 –

15216 MPa ribose. Pagal gamintoją yra žinoma, kad LVL tampros modulis ne mažesnis kaip 14000 MPa. Klijuotos medienos (eglės) tampros modulis yra 6600 - 17200 MPa ribose [49].

Vėliau buvo nustatytas sijų tampros modulis statiškai lenkiant pagal LST EN 408:2010+A1 metodiką. Tiriant šiuo metodu buvo atliktas keturių taškų sijos lenkimas. Kai apkrova pasiekė 2,5 kN, 5 kN, 7,5 kN ir 10 kN, fiksuotas bandinio įlinkis 0,1 mm tikslumu. Tampros modulis $E_{m,l}$ apskaičiuotas pagal formulę 2.12. Rezultatai pateikti 44 pav.

Nustatyta, kad statinis ir dinaminis tampros moduliai yra artimi. Skirtumas tarp jų 6 – 17 %. Dinaminis tampros modulis LVL sijose kito tarp 14144 – 15217 MPa, o statinis 16300 – 17860 MPa ribose. Klijuotos medienos dinaminis tampros modulis kito tarp 12081 – 12369 MPa, o statinis 13020 – 14650 MPa ribose.



45 pav. LVL ir klijuotos medienos statinio ir dinaminio tampros modulių palyginimas: čia 1 – dinaminis tampros modulis; 2 – statinis tampros modulis

Iš gautų rezultatų matome, kad sijų tampros modulis tarp dinaminio ir statinio metodo skiriasi tarpusavyje 6 – 17 %.

3.5. Klijuotos medienos ir LVL sijų tyrimo duomenų statistinis apdorojimas

Gauti klijuotos medienos ir LVL sijų tampros moduliai apdoroti statiškai, įvertinti svarbiausi statistiniai rodikliai. Vidurkiai pateikiami 8 lentelėje.

7 lentelė. Statistinės LVL ir klijuotos medienos bandinių tampros modulio E statinės ir dinaminės vidutinės vertės

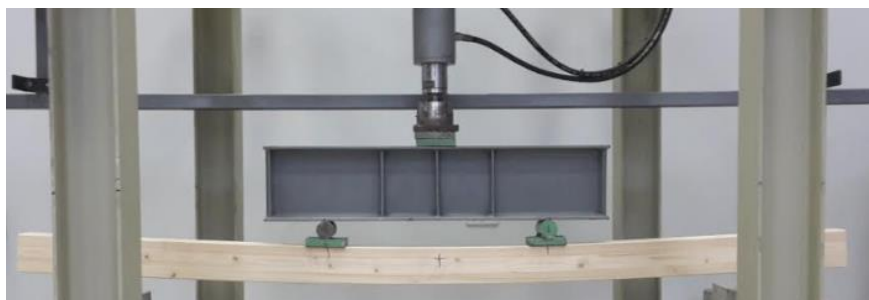
Statistinis rodiklis	Dinaminis tampros modulis		Statinis tampros modulis	
	LVL	Klijuota mediena	LVL	Klijuota mediena

Vidurkis	14524	12211	17070	13730
Dispersija	575496	41330	1216800	1328450
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	759	203	1103	1153
Variacijos koeficientas	5	2	6	8

LVL ir klijuotos medienos bandinių rezultatus apdorojus statistiškai pastebime, kad LVL tašelių tampros modulio variacijos koeficiento sklaida tarp dinaminio ir statinio yra nedidelė, ji yra 5 ir 6 %, o klijuotos medienos tampros modulio variacijos koeficiento sklaida yra tai pat nedidelė, 2 ir 8 %.

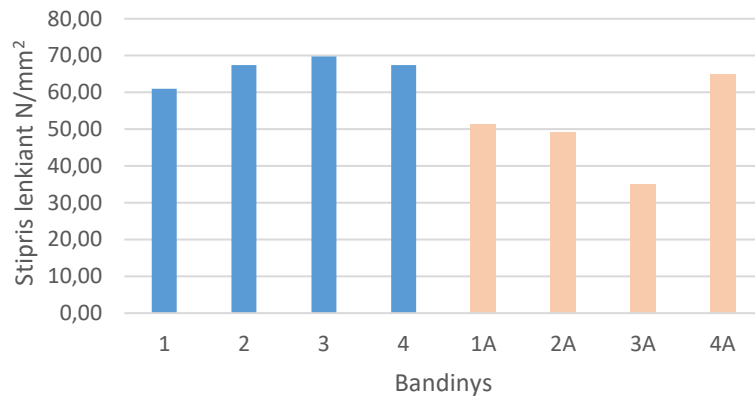
3.6. Klijuotos medienos ir LVL sijų lenkiamasis stipris

Sijos keturių taškų stipris lenkiant buvo atliktas pagal LST EN 408:2010+A1 standartą. Pagal standartą minimalus bandinių skaičius turi būti 10, tačiau neturint išteklių testas buvo atliktas su keturiom LVL ir keturiom klijuoto medžio sijomis. Sijų duomenys pateikti 6 lentelėje.



46 pav. Klijuoto medžio sijos statinis keturių taškų lenkimas

Pagal formulę (2.13) paskaičiuojamas lenkiamasis stipris f_m . Sijų stipris lenkiant pateiktas 44 paveiksle.



47 pav. LVL ir klijuotos medienos lenkiamojo stiprio palyginimas

3.7. Klijuotos medienos ir LVL sijų stiprio lenkiant tyrimo duomenų statistinis apdorojimas

Gauti klijuotos medienos ir LVL bandinių stipriai lenkiant, įvertinti svarbiausi statistiniai rodikliai: aritmetinis vidurkis, dispersija, vidutinis kvadratinis nuokrypis, variacijos koeficientas. Vidurkiai pateikiami 8 lentelėje.

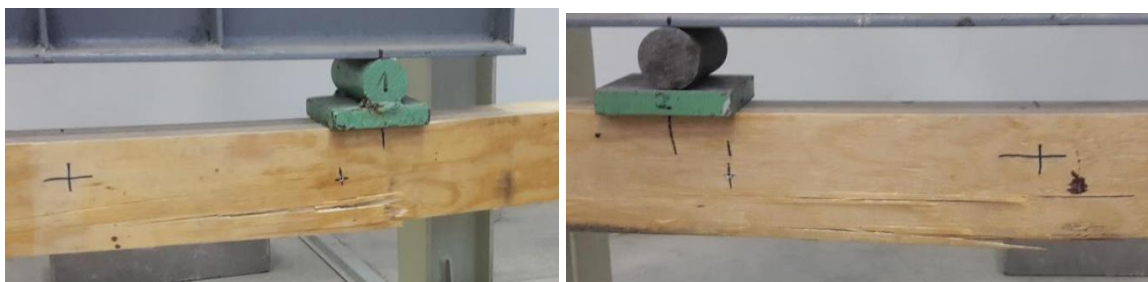
8 lentelė. Statistinės LVL ir klijuotos medienos bandinių lenkiamojo stiprio f_m statinės ir dinaminės vidutinės vertės

Statistinis rodiklis	Lenkiamasis stipris, f_m , N/mm ²	
	LVL	Klijuota mediena
Vidurkis	66	50
Dispersija	26	296
Vidutinis kvadratinis nuokrypis	5	17
Variacijos koeficientas	8	34

LVL ir klijuotos medienos bandinių rezultatus apdorojus statistiškai pastebime, kad LVL tašelių lenkiamojo stiprio variacijos koeficiento sklaida yra nedidelė - 8 %, o klijuotos medienos lenkiamojo stiprio variacijos koeficiento sklaida yra labai didelė - 34 %.

3.8. Klijuotos medienos ir LVL sijų stiprio lenkiant suirimo pobūdis

Atlikus bandymą buvo nustatyti sijų suirimo pobūdžiai.



48 pav. LVL sijos suirimo pobūdis



49 pav. Klijuotos medienos suirimo pobūdis

Iš gautų rezultatų matome, kad LVL sijos suiro per sijos centrą arba ties apkrovos vieta, tai parodo, kad LVL sijų stipris yra tolygiai pasiskirstęs per elementą. Klijuotos medienos surimo pobūdis buvo per centrą, ties apkrovos vieta, atramoje, tai parodo, kad sijų stipris nėra tolygiai pasiskirstęs.

3.9. LVL sijos fizikinių ir mechaninių savybių prognozavimas ANSYS programa

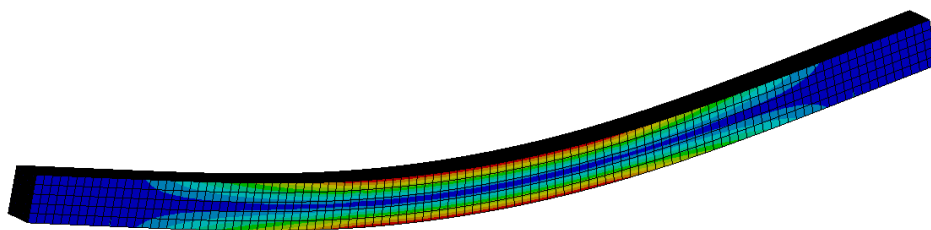
Dėl per didelės duomenų sklaidos, buvo nuspręsta nebetęsti tyrimo su klijuota mediena.

Lokalusis tamprumo modulis neturi šlyties poveikio ir gaunamas sijos centre, kur yra didžiausia tikimybė, kad sija suirs, todėl skaičiuojant baigtinių elementų programa (FEM) yra tikslesnis nei globalusis tamprumo modulis. Anksčiau nustačius lokaliajo lenkiamojo tamprumo modulį $E_{m,l}$ ir lenkiamąjį stiprį f_m pagal EN 408:2010+A1 ANSYS programoje nusibraižomas

pradinis dinaminis sijos modelis apkrautas 20 kN apkrova, gaunami įtempiai ir įlinkiai, 49, 50 paveikslas. Sijos atrėmimo ir apkrovimo schemą žiūrėti 25 paveiksle.

A: Pradinis
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
Custom
2018-12-27 10:00

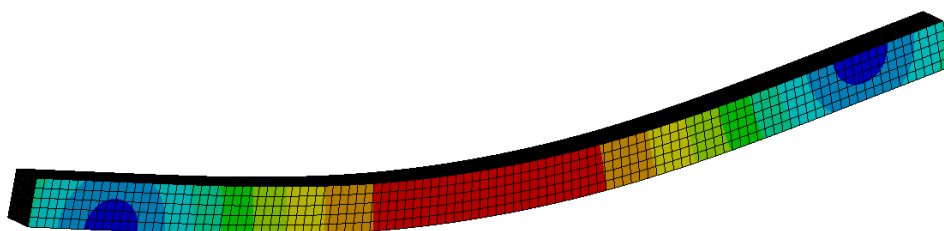
4.7409e7 Max
4.2141e7
3.6874e7
3.1606e7
2.6339e7
2.1071e7
1.5802e7
1.0535e7
5.2677e6
27.948 Min



50 pav. LVL sijos pradiniai įtempiai

A: Pradinis
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
2018-12-27 10:00

0.022567 Max
0.020059
0.017552
0.015045
0.012537
0.01003
0.0075223
0.0050149
0.0025074
0 Min

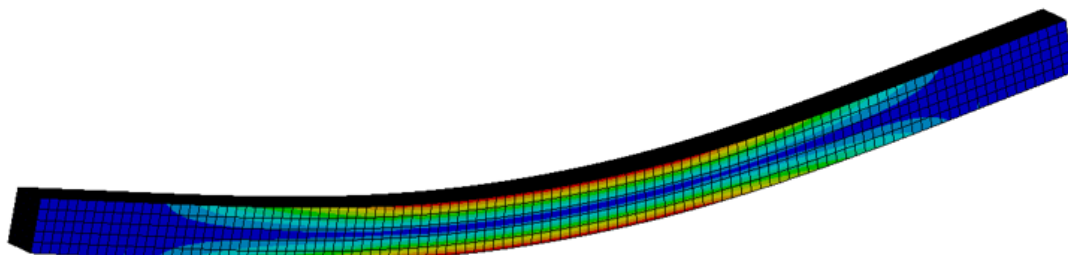


51 pav. LVL sijos pradinis įlinkis

Vėliau programoje pakeičiamas medienos tampros modulis ir imituojamas sijos šaldymas iki -25°C temperatūros.

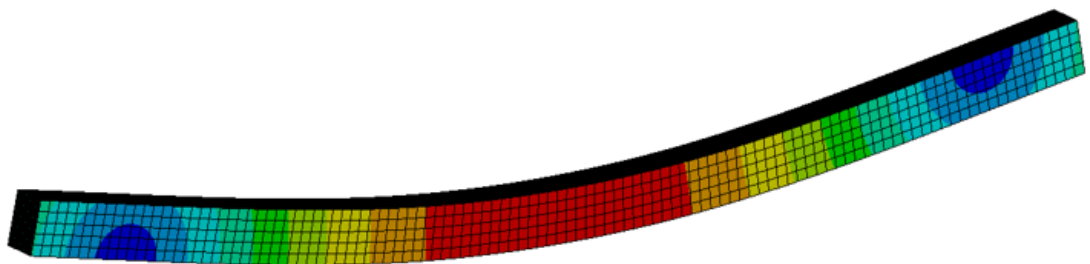
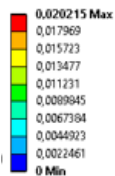
B: Šaldytas iki -20
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
2018-12-27 09:59

4.7409e7 Max
4.2141e7
3.6874e7
3.1606e7
2.6339e7
2.1071e7
1.5803e7
1.0535e7
5.2677e6
27.946 Min



52 pav. LVL sijos įtempiai prie -25°C temperatūros

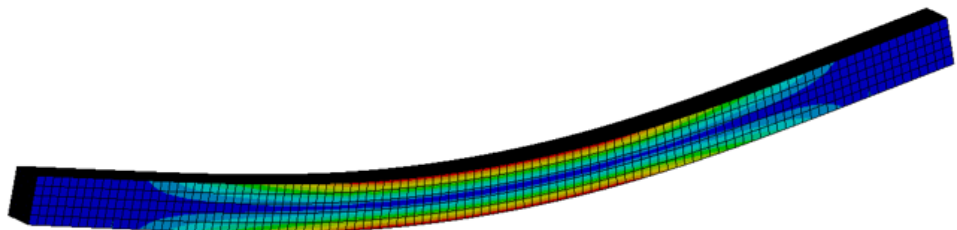
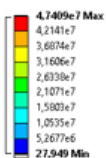
B: Saldytas iki -20
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
2018-12-27 09:59



53 pav. LVL sijos įlinkis prie -25°C temperatūros

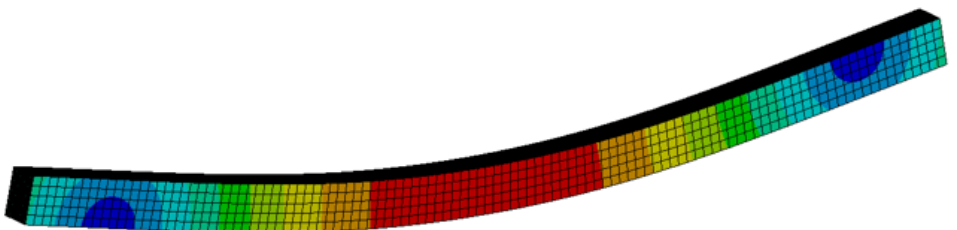
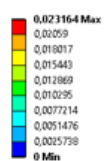
Taip pat programoje pakeičiamas medienos tampros modulis ir imituojamas sijos drėkinimas 80 % drėgmėje ir 20°C temperatūroje.

C: Drėkinta 80 procentu
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: Pa
Time: 1
2018-12-27 09:58



54 pav. LVL sijos įtempiai 80 % drėgmėje ir 20°C temperatūroje

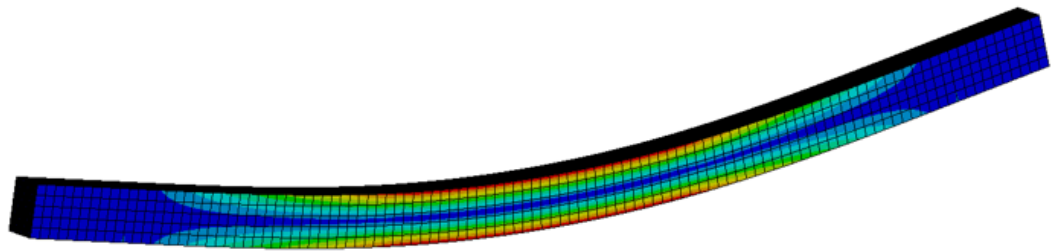
C: Drėkinta 80 procentu
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: m
Time: 1
2018-12-27 09:58



55 pav. LVL sijos įlinkis 80 % drėgmėje ir 20°C temperatūroje

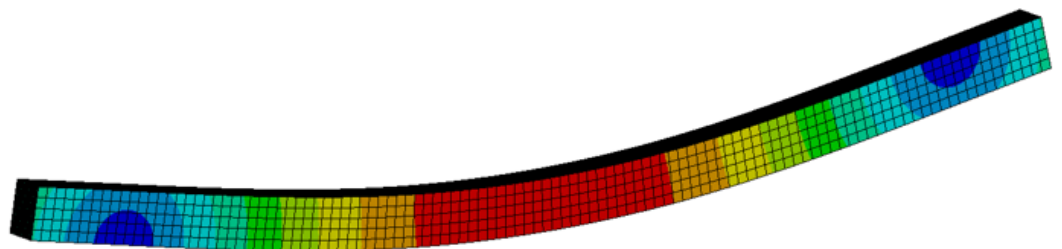
Taip pat programoje pakeičiamas medienos tampros modulis ir imituojamas sijos sausas džiovinimas 40°C temperatūroje.

Dr Sausai džiovinimas
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress
 Unit: MPa
 Time: 1
 2018-12-27 09:56

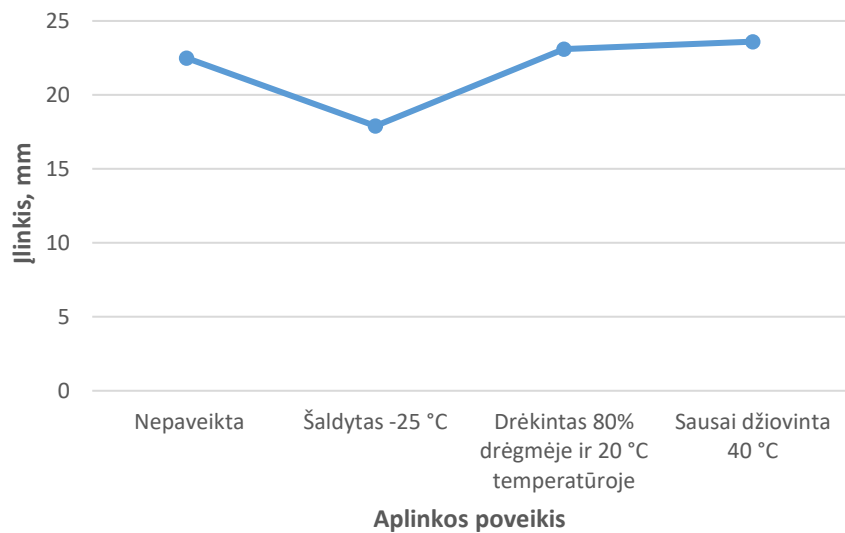


56 pav. LVL sijos įtempiai prie 40 °C temperatūros

Dr Sausai džiovinimas
 Total Deformation
 Type: Total Deformation
 Unit: mm
 Time: 1
 2018-12-27 09:57



57 pav. LVL sijos įlinkis 40 °C temperatūroje



58 pav. LVL sijos įlinkis keičiantis aplinkos poveikiui

Iš gautų rezultatų matome, kad programa galima prognozuoti elemento fizikines – mechanines savybes keičiantis aplinkos poveikiui.

Gauta, kad įtempiai LVL sijose nekito nuo aplinkos poveikio, tačiau, sijos įlinkis kito tarp 17,9 iki 23,6 mm.

IŠVADOS

- 1) Statiniu lokaliajo lenkiamojo tamprumo modulio bandymais ir dinaminiu skersinių rezonansinių virpesių metodu nustatytos LVL ir klijuotos medienos bandinių tampros modulio vertės atitinka žinomas. Tai rodo, kad tyrimo būdai yra tinkami minimų tyrimų atlikimui.
- 2) Gauta, kad medžio lukšto (LVL) ir klijuotos medienos sijų tamprumo modulis ir slopinimo koeficientas keičiasi priklausomai nuo aplinkos sąlygų. Mažėjant temperatūrai tamprumo modulis ir slopinimo koeficientas didėja, o temperatūrai ir drėgnei didėjant tamprumo modulis mažėja, o slopinimo koeficientas didėja. Drėgmės kiekis turi didelį poveikį mechaninėms savybėms.
- 3) Nustatyta, kad šaldant medienos lukšto tašų (LVL) tampros modulis padidėjo 11,6 %, slopinimo koeficientas padidėjo 4 %. Sausame šiltame ore tampros modulis sumažėjo 6 %, tuo tarpu slopinimo koeficientas padidėjo 20 %. Drėkinimo metu tampros modulis sumažėjo 3 %, slopinimo koeficientas padidėjo 10 %.
- 4) Nustatyta, kad šaldant klijuotos medienos tašų tampros modulis padidėjo 6 %, slopinimo koeficientas padidėjo 9 %. Sausame šiltame ore tampros modulis sumažėjo 15 %, tuo tarpu slopinimo koeficientas padidėjo 18 %. Drėkinimo metu tampros modulis sumažėjo 4 %, slopinimo koeficientas padidėjo 41 %.
- 5) Nustatyta, kad LVL tašelių tampros modulio variacijos koeficiento sklaida yra nedidelė, ji svyruoja tarp 5,1 – 8,9 %, o klijuotos medienos tampros modulio variacijos koeficiento sklaida yra tarp didelės ir labai didelės ji svyruoja tarp 12,6 – 32,4%.
- 6) Gauta, kad LVL sijų lenkiamasis stipris svyruoja tarp 60,96 ir 69,81 N/mm², o klijuotos medienos 35,10 – 64,91 N/mm². Nustatyta, kad LVL sijų lenkiamojo stiprio variacijos koeficiento sklaida yra nedidelė - 8 %, o klijuotos medienos lenkiamojo stiprio variacijos koeficiento sklaida yra labai didelė - 34 %.

LITERATŪRA

1. Mačiulaitis R. A. Jefimovas, P. Zdanevičius. *Research of natural wood combustion and charring processes. Journal of civil engineering and management* [interaktyvus]. 2012 Volume 18(5): 631–641. [žiūrėta 2018-04-10]. DOI: 10.3846/13923730.2012.720935, Prieiga per: <https://www.tandfonline.com>
2. Jakimavičius, Č. *Medienotyra*. Kaunas: Technologija, 2003. 271 p.
3. Clauß S. M. Joscak, P. Niemz. *Thermal stability of glued wood joints measured by shear tests* [interaktyvus]. *Eur. J. Wood Prod.* (2011) 69: 101–111. . [žiūrėta 2018-04-10]. ISSN 0018-3768. Prieiga per: <https://doi.org/10.1007/s00107-010-0411-4>
4. Neese J.L., J.E. Reeb, J.W. Funck. *Relating traditional surface roughness measures to gluebond quality in plywood* [interaktyvus]. *Forest products journal* 54 (1) 2004: pp. 67 – 73. [žiūrėta 2018-04-10]. ISSN 0015-7473. Prieiga per: <http://web.b.ebscohost.com>
5. Bekhta P., P. Niemz, J. Sedliacik. *Effect of pre-pressing of veneer on the glueability and properties of veneer-based products* [interaktyvus]. *Eur. J. Wood Prod.* (2012) 70:99–106. [žiūrėta 2018-04-10]. ISSN 1436-736X. Prieiga per: <https://link.springer.com>
6. Saladis J. Aleinikovas M. *Pušų medienos fizinių ir mechaninių savybių kintamumas bei koreliaciniai ryšiai tarp jų* [interaktyvus]. *Miškininkystė*, 2004, Nr. 1 (55), 60–67. [žiūrėta 2018-05-10]. elaba:6207838. Prieiga per: <http://gs.elaba.lt>
7. Vobolis J., D. Albrektas. *Comparison of Viscous Elastic Properties in Wood of Leaf and Coniferous Tree* [interaktyvus]. *Materials science (Medžiagotyra)*. Vol. 13, No. 2. 2007. [žiūrėta 2018-05-11]. ISSN 1392–1320. Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu>
8. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 1611-1/A1:2004]. *Pjautinė mediena. Spygliuočių medienos rūšiavimas pagal išvaizdą. 1 dalis. Europinės eglės, kėniai, pušys, Duglaso pocūgė ir maumedžiai: Europos standartas LST EN 1611-1/A1:2004 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.
9. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 1315-2:1999]. *Matmenys . Klasifikavimas : apvalioji spygliuočių mediena: Europos standartas LST EN 1315-2:1999 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1999.
10. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 313 – 1:1998]. *Matmenys . Klasifikavimas : apvalioji spygliuočių mediena: Europos standartas LST EN 313 – 1:1998 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 1998.
11. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 313 – 2 :2004]. *2 Sluoksniuotoji mediena. Klasifikacija ir terminija. 2 dalis. Terminija: Europos standartas LST EN 313 – 3:2004 turi Lietuvos standarto statusą*. Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2004.

12. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 635 – 1:2002]. *1 Sluoksniuotoji mediena. Klasifikacija pagal paviršiaus išvaizdą. 1 dalis. Bendrosios taisyklės: Europos standartas LST EN 635 – 1:2002 turi Lietuvos standarto statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
12. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 635 – 2:2002]. *2 Sluoksniuotoji mediena. Klasifikacija pagal paviršiaus išvaizdą. 2 dalis. Lpauočių mediena: Europos standartas LST EN 635 – 2:2002 turi Lietuvos standarto statusą.* Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2002.
14. Cavalli, A., D. Cibecchini, M. Togni, S. H. Sousa. *A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber* [interaktyvus]. Construction and Building Materials [114]. 2016. pp. 681 – 687.
[žiūrėta 2018-05-11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
15. V. Bano, F. Arriaga, A. Soilan, M. Guaita. *Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation* [interaktyvus]. p. 9.
[žiūrėta 2018-05-11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
16. Daknevičiūtė V., D. Milašienė, K. Ukvalbergienė. *Tensile Strength, Elasticity and Cracking Character of Softwood Tissues* [interaktyvus]. Materials science (Medžiagotyra). Vol. 21, No. 2. 2015. pp. 260-264. [žiūrėta 2018-05-20]. ISSN: 2029–7289. Prieiga per: <http://www.matsc.ktu.lt>
17. Forest Products Laboratory. 2010. *Wood handbook—Wood as an engineering material.* General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. p. 508.
18. Styraitė J., D. Albrektas. *Džiovinimo proceso metu susidarančių defektų poveikio medienos mechaninėms savybėms vertinimas* [interaktyvus]. Pramonės inžinerija 2017. pp. 166 – 172.
[žiūrėta 2018-05-20]. eLABa ID 26018254. Prieiga per: <https://www.ebooks.ktu.lt>
19. Poncsak S., D. Kocafe, M. Bouazara, A. Pichette. *Effect of high temperature treatment on the mechanical properties of birch* [interaktyvus]. Wood Sci Technol, 2006: p. 649. [žiūrėta 2018-05-20]. ISSN 1432-5225. Prieiga per: <https://link.springer.com>
20. Granello G., S. Giorgini, A. Palermo, M. ASCE, D. Carradine, Ph.D., S. Pampanin, and R. Finch, Ph.D. *Long-Term Behavior of LVL Posttensioned Timber Beams* [interaktyvus]. J. Struct. Eng., 2017, 143(12). [žiūrėta 2018-05-20]. Prieiga per: <https://ascelibrary.org>
21. Darmawana W., D. Nandikaa, Y. Massijayaa, A. Kabea, I. Rahayua, L. Denaudb, B. Ozarskac. *Lathe check characteristics of fast growing sengon veneers and their effect on LVL glue-bond and bending strength* [interaktyvus]. Journal of Materials Processing Technology 215 (2015) pp. 181–188. [žiūrėta 2018-06-11]. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>

22. Rodolfo de Melo R., C. Henrique Soares Del Menezzi. *Effects of grading of veneers on properties of LVL made from Schizolobium amazonicum Huber ex Ducke* [interaktyvus]. Eur. J. Wood Prod. [73]. 2015. pp. 677–683. [žiūrėta 2018-06-20]. ISSN 1436-736X. Prieiga per: <https://link.springer.com>
23. Ayrilmis N., U. Buyuksari, N. As. *Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures* [interaktyvus]. Cold Regions Science and Technology 63 (2010) pp. 40–43. [žiūrėta 2018-06-20]. doi:10.1016/j.coldregions.2010.05.004. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
24. Wang W., Y. Wu, A. Chen, X. Zhou, Z. Zhang, W. Xu. *Effect of Surface Carbonization on Mechanical Properties of LVL* [interaktyvus]. BioResources 14(1), pp. 453-46. [žiūrėta 2018-06-20]. ISSN: 1930-2126. Prieiga per: <http://stargate.cnr.ncsu.edu>
25. Sei-Chang Oh. *Applying failure criteria to the strength evaluation of 3-ply laminated veneer lumber according to grain direction by uniaxial tension test* [interaktyvus]. Construction and Building Materials 25 (2011) pp. 1480 – 1484. [žiūrėta 2018-06-20]. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.08.002. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
26. Rahayu I., L. Denaud, J. Ruelle, W. Darmawan, N. Nugroho, R. Marchal. *The effect of juvenility and veneer thickness on bending strength of Douglas-fir laminated veneer lumber* [interaktyvus]. J Indian Acad Wood Sci (June 2016) 13(1):64–72. [žiūrėta 2018-06-20]. ISSN: 0972-172. Prieiga per: <https://link.springer.com>
27. Bal B., *The effect of span-to-depth ratio on the impact bending strength of poplar LVL* [interaktyvus]. Construction and Building Materials 112 (2016) pp. 355–359. [žiūrėta 2018-06-20]. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.197. Prieiga per: <https://www.sciencedirect.com>
28. Zhou Z., Zhao M., Wang Z., Jianhe Wang B., Guan X. *Acoustic Testing and Sorting of Chinese Poplar Logs for Structural LVL Products* [interaktyvus]. Zhou et al. (2013). “Acoustic sorting of poplar,” BioResources 8(3), pp. 4101-4116. [žiūrėta 2018-09-20]. ISSN: 1930-2126. Prieiga per: <http://ojs.cnr.ncsu.edu>
29. Xue B., Hu Y. *Analysis of the Microstructure and Mechanical Properties of Laminated Veneer Lumber* [interaktyvus]. BioResources 8(2), pp. 2681-2695. [žiūrėta 2018-11-15]. ISSN: 1930-2126. Prieiga per: <http://ojs.cnr.ncsu.edu>
30. Niemz P., Mannes D. *Non-destructive testing of wood and wood-based materials*. Journal of Cultural Heritage 13S (2012) S26–S34
31. Zhu X., Cao J., Wang F. Liu Y. *Non-destructive Testing of Wood Composites based on Virtual Instrument* [interaktyvus]. 2010 3rd International Congress on Image and Signal

- Processing (CISP2010). pp. 3368 – 3371. [žiūrėta 2018-11-15]. DOI: 10.1109/CISP.2010.5647629 Prieiga per: <https://ieeexplore.ieee.org>
32. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 14080:2013]. *Medinės konstrukcijos. Klijuotoji sluoksninė mediena ir klijuotoji masyvioji mediena. Reikalavimai*. LST EN 14080:2013 turi Lietuvos standarto statusą, Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2013.
33. H.Ramagea M., H., Marta Busse-Wicherc, George Feredaya, Thomas Reynolds, *The wood from the trees: The use of timber in construction*.
34. Maureen E. Puettmann, James B. Wilson, *Life-cycle analysis of wood products: cradle-to-gate lci of residential wood building materials* [interaktyvus]. Wood Fiber Sci, 37 (2005), pp. 18-29. [žiūrėta 2018-12-20]. Prieiga per: <https://wfs.swst.org>
35. Kasal, B., Heudusche, A. *Radial Reinforcement of Curved Glue Laminated Wood Beams with Composite Materials* [interaktyvus]. Forest Products Journal 54 (1) 2004: pp. 74 – 79. [žiūrėta 2018-12-20]. ISSN: 0015-7473. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
36. Vobolis, J. *Tribologija*. Kaunas. Technologija. 1994. p. 186.
37. Liukaitis, J., Kleveckas, T. *Medžiagų tyrimo pagrindai*. Technologija, 2007. p. 16 – 17.
38. Su, G.-Y., Li, Y.-X., Li, X.-Y., Müller, R. *Free and forced vibrations of nanowires on elastic substrates* [interaktyvus]. International Journal of Mechanical Sciences. Vol. 138–139. 2018. p. 62-73. [žiūrėta 2018-12-20]. Doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.01.039. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>
39. Navickas J. Fizika II. Kaunas. Ardiva. 2008. p. 108.
40. Qibo Mao. *Application of Adomian Modified Decomposition Method to Free Vibration Analysis of Rotating Beams* [interaktyvus]. Mathematical Problems in Engineering Volume 2013, Article ID 284720, p. 10. [žiūrėta 2018-12-20]. Prieiga per: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/284720>
41. Vobolis, J., Albrektas, D. *Comparison of Viscous Elastic Properties in Wood of Leaf and Coniferous Tree* [interaktyvus]. Materials science Vol. 13 (2). 2007 p. 147 – 151. [žiūrėta 2018-12-20]. Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu>
42. Albrektas, D., Vobolis, J. *Modeling and Study of Glued Wood Panel Materials Science* [interaktyvus]. Medžiagotyra 10 (4) 2004. p. 370 – 373. [žiūrėta 2018-12-20]. ISSN: 1392-1320 ISSN: 1392-1320.
43. Albrektas, D. *Medienos tampriai plastiškųjų savybių įvertinimo metodikos sukūrimas ir tyrimas*. Daktaro disertacija. Kaunas. 2006 p.178.

44. Vobolis, J., Albrektas, D. *The Influence of Wood Structure Destruction on Viscous Elastic Properties* [interaktyvus]. MATERIALS SCIENCE (MEDŽIAGOTYRA). Vol. 15 (1). 2009 p. 53-58. [žiūrėta 2018-12-20]. ISSN: 1392-1320. Prieiga per: <http://citeseerx.ist.psu.edu>
45. Revuckaitė, E. *Medinių elementų tampriai plastiškųjų savybių modeliavimas ir tyrimas*. Kaunas. 2018 p. 65
46. Lietuvos standartizacijos departamentas [LST EN 408: 2010+A1]. *Medinės konstrukcijos. Statybinė mediena ir klijuotoji sluoksninė mediena. Tam tikrų fizikinių ir mechaninių savybių nustatymas: Europos standartas LST EN 408: 2010+A1 turi Lietuvos standarto statusą*, Vilnius: Lietuvos standartizacijos departamentas, 2010.
47. Cihad Bal B. and I. Bektas. *The Effects of Heat Treatment on Some Mechanical Properties of Juvenile Wood and Mature Wood of Eucalyptus grandis* [interaktyvus]. Drying Technology. 2013, 31: 479–485 [žiūrėta 2018-12-21]. ISSN: 0737-3937. Prieiga per: <http://web.b.ebscohost.com>
48. Ayrilmis, Nadir ; Buyuksari, Umit ; As, Nusret. *Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures*. Cold Regions Science and Technology [interaktyvus]. 2010, (63), 40–43, [žiūrėta 2018-12-21]. ISSN: 0165-232X. Prieiga per: <https://ac.els-cdn.com>
49. Vobolis, J., Albrektas, D. *Analysis of Wood Peculiarities by Resonant Vibration Method* [interaktyvus]. Baltic Forestry : Journal of Forest Science in Lithuania, Latvia and Estonia, 13(1), 109-115. [žiūrėta 2018-12-21]. ISSN: 1392-1355. Prieiga per: <https://www.balticforestry.mi.lt>
50. C. C. Gerhards, *Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects* [interaktyvus]. Forest Products Laboratory. Forest Service, U.S. Department of Agriculture. 1982. p. 36. [žiūrėta 2018-12-21]. Prieiga per: <https://www.researchgate.net>