

DAUGIASLUOKSNIŲ AKUSTINIŲ MEDINIŲ GRINDŲ GAMYBOS TECHNOLOGIJOS IR KONSTRUKCIJOS VERTINIMAS

Simona Skėrė

<https://orcid.org/0009-0004-3811-5759>

Šiaulių valstybinė kolegija / Higher Education Institution

Anotacija

Šiuolaikinėms medinėms grindims keliami ne tik estetiški ir ilgaamžiškumo, bet ir vis aukštesni akustinio komforto reikalavimai. Trūksta sisteminio pagrindimo, kaip gamybos technologija, sluoksnių struktūra, medžiagų parinkimas veikia konstrukcijos vibracinį atsaką ir praktinį akustinio sluoksnio integravimą. Straipsnyje analizuojamos perspektyviausios technologijos ir konstrukciniai sprendimai.

Pagrindiniai žodžiai: akustinės grindys; daugiasluoksnė konstrukcija; inžinerinės medinės grindys; skaitmeninis modeliavimas; vibracinis atsakas.

Įvadas

Triukšmas gyvenamojoje ir darbo aplinkoje yra ne tik akustinio komforto, bet ir visuomenės sveikatos problema. Ilgalaikis triukšmo poveikis siejamas su klausos sutrikimais, miego kokybės blogėjimu, padidėjusia širdies ir kraujagyslių ligų rizika, neigiamu poveikiu psichologinei savijautai. A. Mehrotra ir kt. (2024), L. Yang ir kt. (2023) pažymi, kad triukšmas gali sukelti tiek klausos, tiek sisteminių, su kitomis organizmo funkcijomis susijusių sveikatos sutrikimų. O. Hahad ir kt. (2025) taip pat pabrėžia aplinkos triukšmo ryšį su stresu, nerimu ir kitais psichikos sveikatos padariniais. Dėl šių priežasčių pastatų konstrukcijoms keliami vis didesni garso izoliacijos ir akustinio komforto reikalavimai.

Vienas reikšmingiausių triukšmo šaltinių daugiabučiuose ir kituose daugiaaukščiuose pastatuose yra smūginis garsas, susidarantis vaikstant, perkeliant baldus ar daiktams atsitrenkiant į grindų paviršių. Y. Jeon, J. K. Ryu ir P. J. Lee (2010) nustatė, kad gyventojų nepasitenkinimas vidaus akustine aplinka yra glaudžiai susijęs su smūginio garso, perduodamo per grindų ir perdangų konstrukcijas, keliamu dirginimu. Todėl grindų sistema turi būti vertinama ne vien pagal jos estetinę išvaizdą, atsparumą dėvėjimuisi ar matmenų stabilumą, bet ir pagal konstrukcijos gebėjimą mažinti vibracijų, struktūrinio garso perdavimą.

Moksliniuose tyrimuose nagrinėjamos įvairios akustinės savybės gerinančios medžiagos ir daugiasluoksnės konstrukcijos. J. Nurzyński ir Ł. Nowotny (2023), analizuodami kompozicinių plokščių grindis, parodė, kad grindų akustinis efektyvumas priklauso nuo visos konstrukcijos, todėl skirtingiems grindų tipams negali būti taikomas vienas universalus sprendimas. V. Hongisto ir kt. (2022) nustatė, kad komercinių termoizoliacinių medžiagų akustinės savybės reikšmingai skiriasi priklausomai nuo jų struktūros, tankio ir mechaninių parametrų. Tai rodo, kad medžiagos paskirtis ar porėtumas savaime neužtikrina tinkamo akustinio rezultato – būtina įvertinti jos sąveiką su kitais grindų konstrukcijos sluoksniais.

Reikšmingą poveikį akustinei elgsenai turi ir dangos storis, jos konstrukcinė sandara. J. Li ir kt. (2024), tirdami neorganinę garsą izoliuojančią grindų dangą, nustatė, kad jos poveikis smūginiam garsui priklausė nuo naudojamo sluoksnio storio, o nustatytas smūginio garso sumažėjimas siekė nuo 6 iki 14,3 dB. G. Ciaburro ir kt. (2024) analizavo sluoksniuotą konstrukciją, sudarytą iš perdirbtos membranos ir korio geometrijos kompozito. Jie nustatė, kad medžiagų derinimas, konstrukcijos geometrija gali pagerinti garso slopinimo charakteristikas. Šie tyrimai patvirtina, kad akustinių grindų savybės priklauso ne tik nuo pasirinktos medžiagos, bet ir nuo sluoksnių storio, jų išdėstymo, sujungimo ir bendro konstrukcijos standumo.

Medinių daugiasluoksnių konstrukcijų akustinį elgesį galima preliminariai vertinti taikant skaitmeninio modeliavimo metodus. Y. Yang ir kt. (2021), nagrinėdami kryžmai sluoksniuotų medienos plokščių vibroakustines charakteristikas, nustatė, kad baigtinių elementų modelių rezultatai žemųjų dažnių srityje pakankamai gerai sutampa su eksperimentiniais duomenimis. Tačiau aukštesniuose dažniuose atsiranda didesnių skirtumų, kuriuos gali lemti medžiagų savybių neapibrėžtumas, sudėtingesnės vibracijų formos ir realios konstrukcijos sujungimų ypatumai. Todėl skaitmeninis modeliavimas yra tinkamas konstrukciniams variantams atrinkti, tačiau jo rezultatai turi būti vertinami kaip vibracinio atsako rodikliai, kuriuos vėlesniuose etapuose būtina patvirtinti akustiniais bandymais.

Kita aktuali tyrimų kryptis yra antrinių žaliavų ir perdirbtų medžiagų taikymas akustinėms konstrukcijoms. T. Astrauskas, T. Januševičius ir R. Grubliauskas (2021) analizavo popieriaus dumblo ir molio kompozitų panaudojimą akustinėse plokštėse, o J. Wang ir B. Ding (2020) tyrė perdirbtos gumos užpildo įtaką betono šiluminėms ir akustinėms savybėms. R. K. Dahal, B. Acharya ir A. Dutta (2022) pažymi, kad biologinės kilmės kompozitai gali pasižymėti palankiomis akustinėmis savybėmis, tačiau jų taikymas turi būti derinamas su mechaninio stiprumo, ilgaamžiškumo ir technologinio stabilumo reikalavimais. Vadinasi, kuriant tvarias akustines grindis neužtenka identifikuoti gerai garsą sugeriančią medžiagą – ji turi būti suderinama su grindų gamybos technologija ir nebloginti konstrukcijos eksploatacinių savybių.

Tyrimų apžvalga rodo, kad mokslinėje literatūroje dažniausiai atskirai nagrinėjamos akustinių medžiagų savybės, atskiros grindų konstrukcijos arba garso izoliavimo sprendimai. Vis dėlto trūksta kompleksinių tyrimų, kuriuose būtų kartu vertinama medinių grindų gamybos technologija, praktikoje naudojami sluoksnių storio deriniai, konstrukcijos vibracinis atsakas ir galimybė integruoti papildomą akustinį sluoksnį. Ši žinių spraga ypač aktuali daugiasluoksniams modulinėms medinėms grindims, kurioms vienu metu keliami gamybos efektyvumo, stabilumo, tvarumo, mechaninio atsparumo ir akustinio komforto reikalavimai.

Tyrimo problema formuluojama taip: kaip medinių grindų gamybos technologija ir daugiasluoksnės konstrukcijos parametrai veikia grindų vibracinį atsaką ir kokie technologiniai bei konstrukciniai sprendiniai yra perspektyviausi integruotoms akustinėms modulinėms grindims kurti?

Tyrimo objektas – daugiasluoksnių medinių grindų gamybos technologijos ir konstrukcinių sluoksnių deriniai.

Tyrimo tikslas – įvertinti medinių grindų gamybos technologijas ir daugiasluoksnės konstrukcijos parametrų įtaką vibraciniam atsakui, parinkti perspektyviausius sprendinius tolesniam akustinių modulinų grindų vystymui.

Tikslui pasiekti keliami uždaviniai: 1) apibendrinti medinių grindų gamybos procesus ir akustinį elgesį lemiančius veiksnius; 2) palyginti pagrindines grindų technologijas pagal gamybos efektyvumą, kokybę, kainą, tvarumą ir akustinio potencialo kriterijus; 3) skaitmeniniu modeliavimu įvertinti praktikoje taikomų ąžuolo ir faneros sluoksnių kombinacijų vibracinį atsaką; 4) įvertinti akustinio sluoksnio dengimo technologijų ir turimos gamybinės įrangos tinkamumą; 5) nustatyti pagrindines technologines rizikas ir tolesnių eksperimentinių tyrimų kryptis.

Tyrimo metodologija grindžiama mokslo literatūros ir technologinių procesų analize, svertinės sumos daugiakriteriu vertinimu, lyginamąja skaitmenine konstrukcijų analize ir praktinio gamybos pritaikomumo vertinimu. Tyrimo indėlis siejamas su integruotu vertinimo principu, kuriame medinių grindų gamybos technologijos atranka derinama su praktikoje naudojamų ąžuolo ir beržo faneros sluoksnių kombinacijų skaitmenine vibracinio atsako analize, akustinio sluoksnio integravimo technologiniu vertinimu. Tyrimas neapsiriboja atskiros medžiagos arba konstrukcijos charakterizavimu, bet susieja konstrukcinį sprendimą su jo gamybiniu realizavimu.

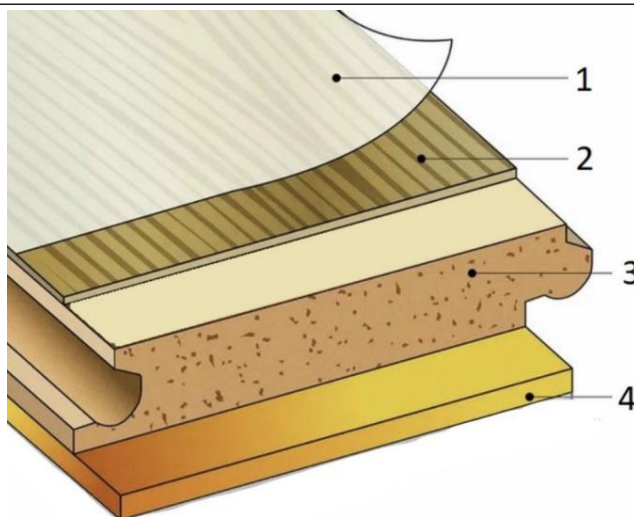
Daugiasluoksnių medinių grindų technologinis ir akustinis pagrindimas

Medinių grindų gamybos ciklas prasideda nuo žaliavos atrankos ir kontroliuojamo džiovinimo. Vidaus patalpoms skirtos lentos paprastai džiovinamos iki 6–9 proc. drėgnio, nes drėgmės svyravimai tiesiogiai veikia matmenų stabilumą, vidinių įtempių ir plyšių susidarymą. Po džiovinimo ruošiniai obliuojami, kalibruojami, pašalinami defektai ir, kai reikia, jungiami pirštinėmis jungtimis. Özçifçi ir Yapıcı (2008) nustatė, kad didesnis pirštinės jungties ilgis gali padidinti lenkimo stiprį, todėl atliekų mažinimo sprendiniai gali būti suderinami su pakankamu mechaniniu patikimumu, jei kontroliuojami sujungimo parametrai.

Toliau gamybos procesas išsiskiria pagal produkto tipą. Masyvios medienos grindys gaminamos iš vientisos lentos, kuri profiluojama, šlifuojama ir dengiama apdaila. Inžinerinėse grindyse ant faneros, HDF ar kito stabilizuojančio pagrindo klijuojamas kietmedžio dėvimasis sluoksnis. Kryžminė pagrindo struktūra mažina drėgmės sukeltas deformacijas, o sluoksnių ir klijų mechaninės savybės suteikia galimybę valdyti bendrą standumą ir slopinimą. Kompozitinėse grindyse mediena derinama su polimeriniu arba mineraliniu branduoliu, akustinėse sistemose papildomai integruojamas elastingas sluoksnis.

Tiriamos grindys (1 pav.), kurioms bus ieškoma tinkamiausio gamybos būdo, sudarytos iš keturių sluoksnių:

- 1) paviršiaus apdaila – UV lakas, UV alyva arba oksidacinė alyva, apsauganti medieną ir gerinanti išvaizdą;
- 2) viršutinis dėvimasis sluoksnis – kietmedžio sluoksnis, suteikiantis natūralų vaizdą, atsparumą dėvėjimuisi ir galimybę grindis atnaujinti;
- 3) pagrindo sluoksnis – beržo fanera, užtikrinanti konstrukcijos stabilumą ir mažinanti deformacijų riziką;
- 4) integruotas akustinis sluoksnis – kuriamas sluoksnis, kuris užteptas ant lentos.



1 pav. Nagrinėjamos daugiasluoksnės grindų konstrukcijos schema: 1 – paviršiaus apdaila; 2 – kietmedžio dėvimasis sluoksnis; 3 – faneros pagrindas; 4 – integruojamas akustinis sluoksnis

Akustiniu požiūriu svarbios dvi susijusios, bet skirtingos savybės: garso izoliacija ir garso absorbcija. Smūginio garso izoliacijos pagerėjimas pagal EN ISO 717-2 išreiškiamas rodikliu ΔL_w , apskaičiuojamu kaip normuoto smūgio garso slėgio lygio skirtumas tarp atskaitos perdangos ir perdangos su grindų danga. Didesnė ΔL_w reikšmė rodo didesnę dangos poveikį smūginio garso mažinimui. Porėtos ir elastingos medžiagos dalį garso bei vibracijų energijos išsklaido dėl vidinės trinties. Yin ir Guan (2024), Kuznetsova ir kt. (2024) pabrėžė porėtumo, srauto varžos ir hierarchinės porų struktūros svarbą garso absorbcijai.

Vien konstrukcijos standumo didinimas nėra tapatus akustinės izoliacijos gerėjimui. Standesnė plokštė gali mažiau deformuotis, tačiau galutinis smūginio garso rezultatas priklauso ir nuo masės, slopinimo, kontaktinio standumo, atrėmimo sąlygų, visos perdangos sistemos. Todėl skaitmeninio projektavimo etapo metu absoliutus poslinkis gali būti naudojamas konstrukcijų vibraciniam jautrumui palyginti, tačiau negali pakeisti standartizuotų ΔL_w ar $L_{n,w}$ bandymų. Ši skirtis svarbi interpretuojant toliau pateikiamus rezultatus.

Tyrimo metodika

Tyrimas atliktas keturiais nuosekliais etapais. Pirmajame etape analizuoti medinių grindų gamybos procesai, mokslinėje literatūroje aprašomi konstrukciniai ir akustiniai veiksniai, praktikoje taikomos technologijos. Buvo nagrinėjamas žaliavų paruošimas, džiovinimas, profiliavimas, sluoksnių klijavimas ir presavimas, paviršiaus apdaila, kokybės kontrolė, akustinio sluoksnio integravimo galimybės.

Antrajame etape aštuonios technologinės alternatyvos įvertintos svertinės sumos metodu: masyvios medienos, inžinerinės daugiasluoksnės, laminuotos, termiškai modifikuotos medienos, bambuko, kompozitinės hibridinės, perdirbtos medienos grindys ir inžinerinės grindys su kamštiniu arba guminiu akustiniu sluoksniu. Vertinti penki kriterijai:

gamybos efektyvumas X1,

paviršiaus ir struktūros kokybė X2,

kaina X3,

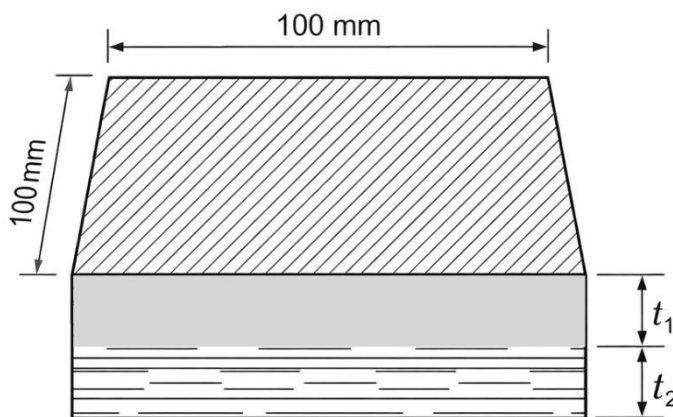
tvarumas X4,

akustinis potencialas X5.

Daugiakriteris vertinimas šiame tyrime taikytas kaip pirminės technologinės atrankos, o ne universalaus technologijų reitingavimo metodas. Vertės X1–X5 nustatytos remiantis literatūros analize ir kiekvienos technologijos charakteristikomis, apibendrintomis 2 lentelėje. Kiekviena alternatyva vertinta 0–1 balo skalėje, kurioje didesnė reikšmė reiškė palankesnę atitikimą konkrečiam kriterijui. Kainos kriterijus vertintas atvirkščiai – mažesnei kainai suteiktas didesnis balas. Kriterijų svoriai nustatyti pagal kuriamo produkto technologinius prioritetus: didžiausia reikšmė suteikta gamybos efektyvumui ir akustiniam potencialui (1,0), tvarumui – 0,9, o konstrukcijos kokybei ir kainai – po 0,8. Todėl gautas įvertinimas interpretuojamas kaip konkretaus produkto kūrimo kontekstui pritaikyta atrankos priemonė, o ne kaip universali skirtingų grindų technologijų kokybės klasifikacija.

$$W = \sum a_i X_i, \quad i = 1, \dots, 5.$$

Trečiajo etapo metu atliktas praktikoje taikomų daugiasluoksnių konstrukcijų skaitmeninis palyginimas. Modeliuoti 100×100 mm dvisluoksniai elementai, sudaryti iš ąžuolo viršutinio sluoksnio ir beržo faneros pagrindo (2 pav.). 100×100 mm elementas pasirinktas kaip lokalus reprezentatyvus daugiasluoksnės konstrukcijos fragmentas, kurio tikslas – vienodomis sąlygomis palyginti sluoksnių storio įtaką konstrukcijos vibraciniam atsakui. Toks modelis nėra skirtas visos realaus ilgio grindų lentos modalinei ar akustinei elgsenai prognozuoti, todėl rezultatai interpretuojami kaip santykinis konstrukcinių variantų palyginimas. Mažesnis modelis taip pat leidžia išlaikyti vienodą geometriją ir skaitmeninio modelio diskretizaciją visiems tiriamiems variantams.



2 pav. Skaitmeniniame modeliavime naudoto 100×100 mm dvisluoksnio elemento schema

Šiuo metu gamyboje atitinkamai naudojami tokio storio ąžuolo ir beržo faneros sluoksniai: viršutinis sluoksnis gali būti 3, 4 arba 6 mm, o pagrindo sluoksnis gali būti 6, 9, 12 arba 15 mm storio. 1 lentelėje pateiktos naudojamos kombinacijos, X žymi praktikoje taikomas konstrukcines kombinacijas: 3–9, 3–12, 4–6, 4–9, 4–12, 4–15 ir 6–15 mm, kur pirmasis skaičius žymi viršutinio sluoksnio, o antrasis – faneros storį.

1 lentelė. Viršutinio ir pagrindo sluoksnių kombinacijos

Pagrindo sluoksnio storis, mm	Viršutinio sluoksnio storis, mm		
	3	4	6
6		X	
9	X	X	
12	X	X	
15		X	X

Skaitmeninis modeliavimas atliktas „SimScale“ aplinkoje, taikant supaprastintą linijinį tamprųjų konstrukcijos modelį. Ažuolo viršutinis sluoksnis ir beržo faneros pagrindas modeliuoti kaip homogenizuotos medžiagos, kurioms visose nagrinėtose konstrukcijose taikytos vienodos medžiagų savybės. Kadangi tyrimo tikslas buvo ne absoliučiai prognozuoti realios grindų lentos mechanines ar akustines charakteristikas, o palyginti skirtingas sluoksnių storio kombinacijas tarpusavyje, medienos lokalus nevienalytiškumas ir atskirų faneros sluoksnių struktūra modelyje nebuvo detalizuojami. Modelyje taikytas tūrinis baigtinių elementų tinklelis, kurio tankis parinktas taip, kad būtų pakankamai tiksliai aprašyta 100×100 mm bandinio geometrija ir sluoksnių sąlyčio zona. Visiems konstrukciniams variantams naudotas vienodas tinklelio sudarymo principas. Sluoksniai modeliuoti kaip tarpusavyje standžiai sujungti, t. y. nevertintas jų praslydimas ar atsiskyrimas. Ribinės sąlygos ir apkrovos pobūdis visiems variantams išlaikyti vienodi, todėl rezultatai buvo naudojami santykiniam skirtingų konstrukcijų vibracinio atsako palyginimui. Konstrukcijų atsakas vertintas taikant 100, 250, 500, 1000, 2000, 4000 ir 5000 Hz dažnius pagal absoliutaus poslinkio amplitudę.

Ketvirtajame etape vertinti du akustinio sluoksnio dengimo būdai – mechanizuotas dengimas volais ir rankinis dengimas mentele arba voleliu. Jie palyginti pagal sluoksnio storio kontrolę, pakartojamumą, našumą, jautrumą medžiagos klampai ir pritaikomumą prototipavimui, serijinei gamybai. Kartu analizuotas turimos gamybinės įrangos tinkamumas ir pagrindinės technologinės rizikos pjovimo, profiliavimo, klijų dengimo, presavimo ir paviršiaus apdirbimo etapuose.

Tyrimo ribotumas – skaitmeninėje dalyje vertintas konstrukcijos poslinkis, o ne tiesioginis smūginio garso slėgio lygis. Sukurtas skaitmeninis modelis nebuvo patikrintas atliekant eksperimentus, todėl gautos absoliučios poslinkio reikšmės laikomos skaitmeninėmis prognozėmis. Modelio paskirtis – vienodomis sąlygomis palyginti konstrukcinius variantus ir atrinkti perspektyviausias kombinacijas tolesniam eksperimentiniam tyrimui. Taip pat daugiakriterio vertinimo svoriai nustatyti pagal konkretaus produkto kūrimo prioritetus, todėl kitame gamybos ar rinkos kontekste technologijų eiliškumas gali keistis.

Tyrimo rezultatai

Medinių grindų gamybos technologijų atranka

Daugiakriterio vertinimo rezultatai buvo atlikti su aštuoniomis skirtingomis gamybos technologijomis, kurios aprašytos 2-oje lentelėje.

Lyginant technologijas matyti, kad inžinerinės ir kompozitinės grindys pasižymi geriausiu balansu tarp efektyvumo, stabilumo ir tvarumo. Termiškai modifikuota ir bambuko mediena išsiskiria natūraliu ilgaamžiškumu, o mokslinėje literatūroje pateikta informacija rodo, kad papildomi elastingi sluoksniai gali prisidėti prie smūginio garso mažinimo, tačiau šiame tyrime nagrinėtų konstrukcijų faktinis akustinis efektyvumas tiesiogiai nebuvo matuotas. Norint kiekybiškai vertinti kiekvieną

variantą ir palyginti juos tarpusavyje, reikia atlikti variantų analizę. Pirmiausiai kiekvienas 2-oje lentelėje aprašytas kriterijus vertinamas pagal technologiją. Vertinimo rezultatai pateikti 3-ioje lentelėje. Kuo variantas labiau atitinka kriterijų, tuo aukštesniu balu įvertinamas. Kaina vertinta atvirkščiai – mažesnė kaina susieta su didesniu balu. Maksimalus galimas įvertinimas – 1 balas.

2 lentelė. Medinių grindų gamybos technologijų palyginimas pagal kriterijus

Technologija	Trumpas aprašymas	Gamybos efektyvumas (X ₁)	Paviršiaus / struktūros kokybė (X ₂)	Kaina (X ₃)	Tvarumas (X ₄)	Akustinio sprendinio integravimo potencialas (X ₅)
1. Masyvios medienos frezavimas	Tradicinis metodas – viena medienos rūšis (ąžuolas, uosis, klevas). Lentos džiovinamos, obliuojamos, profiluojamos, šlifuojamos ir dengiamos apdaila.	Vidutinis – ilgas džiovinimas, bet efektyvus apdirbimas.	Puiki išvaizda, didelis ilgaamžiškumas, bet jautrumas drėgmei.	Aukšta (didelės žaliavos sąnaudos).	Vidutinis – atsinaujinanti, bet intensyvi medienos panauda, reikia ieškoti likučių panaudojimo būdų.	Vidutinis – kieta struktūra perduoda vibracijas.
2. Inžinerinės (daugiasluoksnės) grindys	2–3 sluoksnių konstrukcija: viršutinis lukštas + fanera ar HDF + stabilizuojantis sluoksnis.	Aukštas – automatizuotos presavimo ir profiliavimo linijos.	Didelis matmenų stabilumas ir estetinė kokybė.	Vidutinė–aukšta.	Aukštas – optimizuotas medienos sunaudojimas.	Aukštas – galima integruoti akustinius sluoksnius.
3. Laminuotos grindys (HDF + dekoratyvinis sluoksnis)	Plokštės su dekoratyvine plėvele ir melamino danga.	Labai aukštas – visiškai automatizuotos linijos.	Vienoda, bet dirbtinė išvaizda.	Žema.	Vidutinis – ribota perdirbimo galimybė.	Žemas – kietas paviršius perduoda smūgį.
4. Termiškai modifikuota mediena	Mediena kaitinama (160–220°C) mažo deguonies aplinkoje, gerinant stabilumą ir spalvą.	Vidutinis – reikalinga kruopšti kontrolė.	Didesnis matmenų stabilumas, tamsesnė spalva.	Vidutinė–aukšta.	Aukštas – be cheminių priedų, ilgas tarnavimo laikas.	Vidutinis – aukštas – mikrostruktūra gerina slopinimą.
5. Bambuko grindys	Presuoti ir klijuoti bambuko pluoštai.	Aukštas – trumpas augimo ciklas, greita gamyba.	Kietos, stabilios, unikalūs raštas.	Vidutinė.	Labai aukštas – CO ₂ neutralus ciklas.	Vidutinis – artimas kietmedžiui.
6. Kompozitinės hibridinės grindys (mediena + polimeras)	Medienos lukštas su polimeriniu arba mineraliniu branduoliu.	Aukštas – ekstruderinė gamyba.	Itin stabili, atspari drėgmei.	Vidutinė – aukšta.	Vidutinis – priklauso nuo plastiko kiekio.	Aukštas – geras vibracijų slopinimas.
7. Perdirbtos ar atkurtos medienos grindys	Naudojama sena ar gamybos likutinė mediena.	Vidutinis – reikalingas rankinis paruošimas.	Kintanti kokybė, autentiškas vaizdas.	Vidutinė.	Labai aukštas – žiedinė ekonomika.	Vidutinis – panašus į masyvios medienos savybes.

Technologija	Trumpas aprašymas	Gamybos efektyvumas (X ₁)	Paviršiaus / struktūros kokybė (X ₂)	Kaina (X ₃)	Tvarumas (X ₄)	Akustinio sprendinio integravimo potencialas (X ₅)
8. Korku arba guma paremti akustiniai sluoksniai	Inžinerinės grindys su integruotu kamštiniu ar guminiu sluoksniu pagrindu.	Vidutinis – aukštas – laminuojama presuojant.	Elastinga ir stabili konstrukcija.	Vidutinė.	Aukštas – dažnai perdirbtas kamštis.	Labai aukštas – papildomos medžiagos didina akustiką.

3 lentelė. Variantų įvertinimas pagal kriterijus

Varianto nr.	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	0.9	1.0	0.6	0.8	0.9
2	0.9	0.9	0.6	0.9	0.9
3	1.0	0.6	1.0	0.6	0.3
4	0.6	0.9	0.6	0.9	0.8
5	0.9	0.9	0.8	0.9	0.6
6	0.9	0.9	0.6	0.6	0.9
7	0.6	0.6	0.8	1.0	0.6
8	0.6	0.9	0.6	0.9	1.0

Aukščiausią apibendrintą reikšmę pasiekė inžinerinės daugiasluoksnės grindys ($W = 3,81$). Ši alternatyva surinko aukštus gamybos efektyvumo, konstrukcijos kokybės, tvarumo ir akustinio pritaikymo balus. Masyvios medienos grindų rezultatas buvo beveik toks pats ($W = 3,80$), tačiau jų pasirinkimą riboja didesnės aukštos kokybės žaliavos sąnaudos, ilgesnis džiovinimo procesas ir didesnis jautrumas drėgmės pokyčiams. Bambuko grindys užėmė trečią vietą ($W = 3,67$), o inžinerinės grindys su papildomu kamštiniu ar guminiu sluoksniu – ketvirtą ($W = 3,61$). Bendros reikšmės pateiktos 4-oje lentelėje.

4 lentelė. Medinių grindų gamybos technologijų apibendrintojo vertinimo rezultatai

Vieta	Technologija	W reikšmė
1	Inžinerinės (daugiasluoksnės) grindys	3,81
2	Masyvios medienos grindys	3,80
3	Bambuko grindys	3,67
4	Inžinerinės grindys su kamštiniu arba guminiu sluoksniu	3,61
5	Kompozitinės hibridinės grindys	3,54
6	Termiškai modifikuotos medienos grindys	3,41
7	Perdirbtos arba atkurtos medienos grindys	3,22
8	Laminuotos grindys	3,12

Rezultatas nereiškia, kad akustinio sluoksniu alternatyva yra atmetina. Ji vertinta kaip atskiras technologinis variantas, kuriam būdingas labai aukštas akustinis potencialas, tačiau mažesnis gamybos efektyvumas. Praktiniu požiūriu racionaliausia pasirinkti inžinerines grindis kaip bazinę platformą ir akustinį sluoksnį integruoti į jau valdomą daugiasluoksnės konstrukcijos gamybos procesą. Taip derinamas pirmosios alternatyvos technologinis stabilumas ir aštuntosios alternatyvos akustinė funkcija.

Sluoksnių storio įtaka vibraciniam atsakui

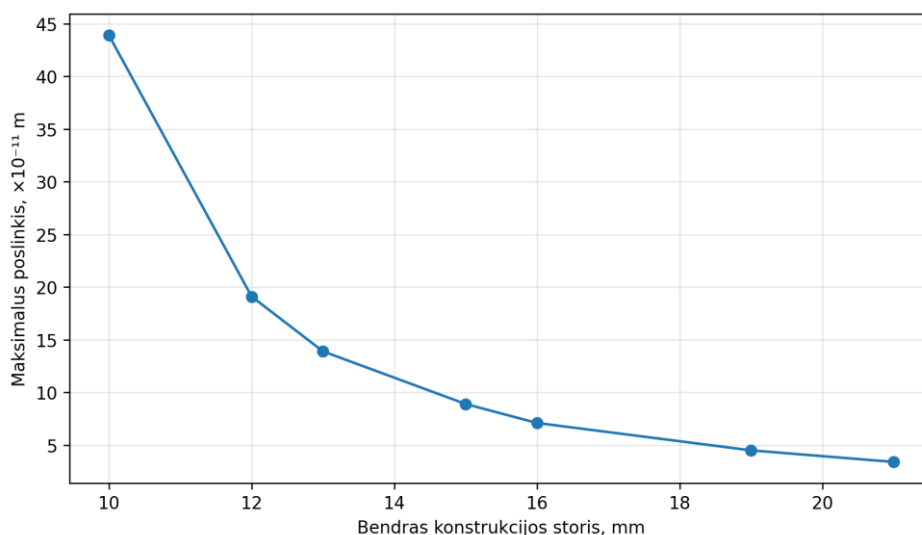
Skaitmeninio modeliavimo rezultatai parodė aiškią bendro konstrukcijos storio ir maksimalaus poslinkio priklausomybę. Didžiausias poslinkis – $43,9 \times 10^{-11}$ m – nustatytas ploniausioje 4–6 mm

konstrukcijoje, kurios bendras storis buvo 10 mm. Mažiausias poslinkis – $3,4 \times 10^{-11}$ m – gautas storiausioje 6–15 mm konstrukcijoje. Tarp šių variantų poslinkio amplitudė sumažėjo apie 92,3 proc. Rezultatai pateikti 5-oje lentelėje.

5 lentelė. Konstrukcinių kombinacijų maksimalūs poslinkiai

Kombinacija	Viršutinis sluoksnis, mm	Faneros pagrindas, mm	Bendras storis, mm	Maksimalus poslinkis, $\times 10^{-11}$ m
3–9	3	9	12	19,1
3–12	3	12	15	8,9
4–6	4	6	10	43,9
4–9	4	9	13	13,9
4–12	4	12	16	7,1
4–15	4	15	19	4,5
6–15	6	15	21	3,4

Vien bendras storis ne iki galo paaiškina rezultatą, nes 12–16 mm diapazone analizuotos skirtingos viršutinio sluoksnio ir faneros proporcijos. Pavyzdžiui, 3–12 mm kombinacijoje maksimalus poslinkis siekė $8,9 \times 10^{-11}$ m, o 4–9 mm kombinacijoje, kurios bendras storis buvo dviem milimetrais mažesnis, poslinkis buvo $13,9 \times 10^{-11}$ m. Tai rodo, kad pagrindo storio didinimas turėjo nuoseklų poveikį konstrukcijos standumui. Bendro konstrukcijos storio ir maksimalaus poslinkio priklausomybė pateikta 3-iaame paveiksle.



3 pav. Bendro konstrukcijos storio ir maksimalaus poslinkio priklausomybė

Detalesnis sluoksnių įtakos palyginimas atliktas keičiant vieną sluoksnį ir išlaikant kitą. Kai viršutinis ąžuolo sluoksnis buvo 4 mm, faneros storio didinimas nuo 6 iki 9 mm sumažino maksimalų poslinkį 68,3 proc., nuo 9 iki 12 mm – 48,8 proc., o nuo 12 iki 15 mm – 37,3 proc. Kai faneros pagrindas buvo 9 mm, viršutinio sluoksnio padidinimas nuo 3 iki 4 mm poslinkį sumažino 27 proc. Esant 12 mm fanerai, toks pat viršutinio sluoksnio padidinimas poslinkį sumažino 19,3 proc., o esant 15 mm fanerai viršutinio sluoksnio didinimas nuo 4 iki 6 mm sumažino poslinkį 23,9 proc.

Vadinasi, faneros storio didinimas bendroje konstrukcijoje turėjo didesnę ir nuoseklesnę poveikį nei viršutinio sluoksnio storinimas. Tai susiję su tuo, kad fanera sudaro didesnę skerspjuvio dalį ir yra pagrindinis daugiasluoksnio elemento stabilizuojantis sluoksnis. Vis dėlto viršutinio sluoksnio įtaka taip pat reikšminga, ypač vertinant pokytį vienam papildomam storio milimetrai ir paviršiaus vibracijų pasiskirstymą.

Visuose tirtuose variantuose poslinkio amplitudė iki maždaug 1000 Hz keitėsi nedaug, o ryškesnis augimas pasireiškė 2000–5000 Hz diapazone. Ploniausia 4–6 mm konstrukcija buvo jautriausia dažnio didėjimui: jos poslinkis nuo $15,38 \times 10^{-11}$ m ties 100 Hz išaugo iki $43,95 \times 10^{-11}$ m ties 5000 Hz. Minėtina, kad 6–15 mm konstrukcijos poslinkis padidėjo nuo 2,58 iki $3,41 \times 10^{-11}$ m. Šis rezultatas patvirtina, kad storesnės konstrukcijos pasižymėjo stabilesniu vibraciniu atsaku visame tirtame dažnių intervale. Rezultatai pateikti 6-oje lentelėje.

6 lentelė. Konstrukcinių kombinacijų poslinkio reikšmės skirtinguose dažniuose, $\times 10^{-11}$ m

Kombinacija	100 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	5000 Hz
3–9	9,65	9,66	9,70	9,85	10,50	14,19	19,10
3–12	5,61	5,62	5,63	5,70	5,97	7,35	8,85
4–6	15,38	15,40	15,48	15,80	17,22	26,58	43,95
4–9	7,83	7,83	7,86	7,97	8,43	10,92	13,94
4–12	4,76	4,76	4,78	4,83	5,03	6,06	7,14
4–15	3,25	3,25	3,26	3,29	3,40	3,94	4,48
6–15	2,58	2,58	2,59	2,61	2,69	3,06	3,41

Šiame tyrime nustatytas absoliutus poslinkis apibūdina konstrukcijos vibracinį jautrumą esant pasirinktoms modeliavimo sąlygoms, tačiau nėra tiesioginis smūginio garso izoliacijos rodiklis. Mažesnė deformacijos amplitudė rodo mažesnę konstrukcijos mechaninį atsaką į vienodą sužadinimą, tačiau ryšys su smūginio garso izoliacija priklauso ir nuo konstrukcijos masės, slopinimo, akustinio sluoksnio dinaminio standumo, sluoksnių sąlyčio, atrėmimo į perdangą. Todėl šiame etape skaitmeninis modeliavimas naudojamas konstrukciniams variantams atrinkti, o ne jų akustiniam efektyvumui kiekybiškai nustatyti.

Išvertinus konstrukcijas tolimesniam maketo kūrimui, paaiškėjo, kad 4–12, 4–15 ir 6–15 mm kombinacijos pasižymėjo mažiausiomis poslinkio reikšmėmis. Vis dėlto storiausia 6–15 mm konstrukcija sunaudoja daugiausia kietmedžio ir faneros, todėl vien mažiausio poslinkio kriterijaus nepakanka. 4–12 ir 4–15 mm variantai gali sudaryti racionalesnį standumo, medžiagų sąnaudų ir produkto storio kompromisą. Galutinė atranka turi būti tikslinama laboratoriniais smūginio garso, lenkimo, adhezijos ir matmenų stabilumo bandymais. Praktinis tyrimo rezultatas – susiaurintas konstrukcinių variantų skaičius iki 4–12, 4–15 ir 6–15 mm kombinacijų, nustatyta didesnė faneros pagrindo storio įtaka vibraciniam atsakui ir suformuota akustinio sluoksnio dengimo strategija: rankinis dengimas prototipavimo etapui ir dengimas volais serijinei gamybai

Akustinio sluoksnio dengimo technologijos ir gamybinis pritaikomumas

Akustinis sluoksnis numatomas kaip ketvirtasis daugiasluoksnių grindų elementas, dengiamas ant faneros pagrindo. Analizuoti du jo formavimo būdai. Mechanizuotas dengimas volais leidžia reguliuojamu tarpu kontroliuoti medžiagos kiekį ir pasiekti nekintantį sluoksnio storį visame paviršiuje. Tai svarbu ne tik produkto geometrijai, bet ir vienodoms mechaninėms, akustinėms savybėms. Metodo pranašumai – didelis našumas, pakartojamumas ir galimybė integruoti procesą į automatizuotą liniją. Pagrindiniai apribojimai – investicijos į įrangą ir poreikis suderinti volų medžiagą, tarpą, greitį su kompozito klampa ir takumu.

Volais atliekamas užtepimas (4 pav.) yra pramonėje plačiai taikomas sprendimas, leidžiantis užtikrinti tolygų medžiagos paskirstymą ir nekintantį sluoksnio storį. Tokiu atveju gali būti naudojami dozavimo arba paskirstymo volai, pritaikyti klampesnėms polimerinėms ar kompozicinėms medžiagoms. Dažniausiai naudojami guminiai, poliuretaniniai arba metaliniai volai

su reguliuojamu tarpu, leidžiančiu kontroliuoti užtepamo sluoksnio storį. Šis metodas pasižymi dideliu našumu, pakartojamumu ir tinkamumu automatizuotai gamybai, tačiau reikalauja investicijų į įrangą ir medžiagos savybių (klampos, takumo) suderinimo su technologiniu procesu.



4 pav. Dviejų volų padengimo mašina SENR

Rankinis dengimas mentele, dantyta glaistykle ar voleliu yra lankstesnis ir nereikalauja specialios įrangos, todėl tinkamas mažoms medžiagos partijoms, receptūros paieškai ir pirminiems prototipams. Tačiau šiuo būdu sunkiau užtikrinti vienodą sluoksnio storį, o rezultatą labiau veikia operatoriaus darbo technika. Lokalus storio netolygumas gali keisti kontaktinį standumą, masės pasiskirstymą ir vibracinį atsaką. Todėl rankinis metodas rekomenduojamas technologijos vystymo etapui, o volinis – patvirtintai receptūrai ir serijinei gamybai.

Papildomai įvertinus abu užtepimo metodus technologiniu požiūriu, nustatyta, kad pagrindiniai skirtumai susiję su sluoksnio storio kontrolės tikslumu, proceso pakartojamumu ir pritaikomumu pramoninei gamybai. Volais atliekamas užtepimas leidžia pasiekti, kad visame paviršiuje sluoksnio storis būtų vienodas, o tai yra kritiška užtikrinant vienodas akustines savybes visame grindų plote. Rankinis užtepimas dažniau lemia lokalius storio netolygumus, kurie gali turėti įtakos vibracijų pasiskirstymui ir akustiniam atsakui.

Taip pat svarbus veiksnys yra medžiagos klampa. Mažesnės klampos medžiagos lengviau paskirstomos volais, o didesnės klampos kompozitai gali būti efektyviau užtepami rankiniu būdu prototipavimo etape.

Atsižvelgiant į tai galima teigti, kad volais atliekamas užtepimas yra tinkamesnis galutiniam produktui ir serijinei gamybai, o rankinis metodas – technologijos vystymo, bandymų ir medžiagos pritaikymo etapui.

Rezultatų aptarimas

Daugiakriteris vertinimas parodė, kad daugiasluoksnės inžinerinės grindys yra tinkama bazė integruotam akustiniam sluoksniui. Nors jų apibendrintas įvertis tik nežymiai viršijo masyvios medienos grindų rezultatą, svarbiausias pranašumas yra galimybė kontroliuoti atskirų sluoksnių savybes, užtikrinti matmenų stabilumą ir pritaikyti esamą klijavimo bei presavimo technologiją. Kaip tik todėl akustinį sluoksnį tikslinga vertinti ne kaip atskirą grindų alternatyvą, bet kaip papildomą inžinerinės konstrukcijos funkcinį elementą.

Skaitmeninis modeliavimas atskleidė, kad konstrukcijos vibracinį atsaką labiau ir nuosekliau veikia faneros pagrindo, o ne viršutinio ažuolo sluoksnio storis. Tai suteikia galimybę mažinti

konstrukcijos vibracinį jautrumą nedidinant brangesnės kietmedžio žaliavos sąnaudų. Modeliavimo rezultatai taip pat leido susiaurinti tolesnių eksperimentų apimtį ir atrinkti konstrukcijas, kuriose standumo, bendro storio ir medžiagų sąnaudų santykis gali būti palankiausias.

Vis dėlto mažesnis absoliutus poslinkis savaime nepatvirtina geresnės smūginio garso izoliacijos. Galutinį akustinį rezultatą lemia ne tik grindų plokštės standumas, bet ir masė, slopinimas, akustinio sluoksnio dinaminis standumas, atrėmimo, sąlyčio su perdanga sąlygos. Todėl modeliavimo rezultatai laikytini konstrukcijų santykinio vibracinio jautrumo, o ne tiesioginio įverčio rodikliu.

Akustinio sluoksnio dengimo analizė parodė, kad rankinis metodas tinkamesnis receptūros kūrimo ir prototipavimo etapui, o dengimas volais – pakartojamai serijinei gamybai. Tolesniuose tyrimuose svarbu kiekybiškai kontroliuoti sluoksnio storį, masę ploto vienetui, tankį, porėtumą, kietėjimo sąlygas ir sukibimo stiprį. Šių rodiklių susiejimas su laboratoriniais smūginio garso bandymais leistų nustatyti, kurie konstrukciniai ir technologiniai parametrai iš tikrųjų lemia kuriamų grindų akustinį efektyvumą.

Išvados

1. Pagal svertinės sumos daugiakriterį vertinimą inžinerinės daugiasluoksnės grindys pasiekė didžiausią apibendrintą rezultatą $W = 3,81$ ir buvo atrinktos kaip tinkamiausia bazinė technologija akustiniam sluoksniui integruoti. Jos suderina aukštą gamybos efektyvumą, konstrukcijos stabilumą, tvarumo potencialą ir pritaikomumą turimai gamybinei įrangai.

2. Skaitmeniniu modeliavimu nustatyta, kad didėjant bendram ąžuolo ir faneros konstrukcijos storiui maksimalus poslinkis nuosekliai mažėjo: nuo $43,9 \times 10^{-11}$ m 4–6 mm kombinacijoje iki $3,4 \times 10^{-11}$ m 6–15 mm kombinacijoje. Tarp kraštinių variantų poslinkis sumažėjo apie 92,3 proc.

3. Faneros pagrindo storio didinimas maksimalų poslinkį sumažino 37–68 proc., o viršutinio ąžuolo sluoksnio storinimas – 19–27 proc. Todėl faneros storis laikytinas nuoseklesniu konstrukcijos vibracinio jautrumo valdymo parametru, nors viršutinio sluoksnio įtaka taip pat išlieka reikšminga.

4. Tolesniems maketo tyrimams perspektyviausios 4–12, 4–15 ir 6–15 mm konstrukcijos. Galutinis variantas negali būti parenkamas vien pagal mažiausią poslinkį – turi būti vertinamos medžiagų sąnaudos, bendras produkto storis, lenkimo savybės, adhezija ir standartizuotas smūginio garso izoliacijos pagerėjimas.

5. Akustinio sluoksnio dengimas volais yra tinkamiausias serijinei gamybai dėl geresnės storio kontrolės ir pakartojamumo, o rankinis dengimas – medžiagos receptūros kūrimui ir prototipavimui. Pagrindinės proceso rizikos susijusios su ruošinių matmenimis, sluoksnio vienodumu, presavimo slėgiu ir paviršiaus apdirbimu; jos gali būti valdomos standartizuojant parametrus ir taikant tarpinę kokybės kontrolę.

6. Absoliutus poslinkis šiame tyrime yra preliminarus konstrukcijos vibracinio atsako, o ne tiesioginis akustinės izoliacijos rodiklis. Numatytą technologinę kryptį būtina patvirtinti laboratoriniais smūginio garso izoliacijos matavimais pagal ISO 10140-3, rezultatus įvertinant pagal ISO 717-2, kartu atliekant akustinio sluoksnio, adhezijos, lenkimo ir matmenų stabilumo bandymus.

Literatūros sąrašas

1. Mehrotra, A., Shukla, S. P., Shukla, A. K., Manar, M. K., Singh, S. K., Mehrotra, M. (2024). A comprehensive review of auditory and non-auditory effects of noise on human health. *Noise & Health*, 26(121), 59–69. https://doi.org/10.4103/nah.nah_124_23
2. Yang, L., Gutierrez, D. E., Guthrie, O. W. (2023). Systemic health effects of noise exposure. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 27(1), 21–54. <https://doi.org/10.1080/10937404.2023.2280837>
3. Hahad, O., Kuntic, M., Al-Kindi, S., et al. (2025). Noise and mental health: Evidence, mechanisms, and consequences. *Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology*, 35, 16–23. <https://doi.org/10.1038/s41370-024-00642-5>
4. Jeon, J. Y., Ryu, J. K., Lee, P. J. (2010). A quantification model of overall dissatisfaction with indoor noise environment in residential buildings. *Applied Acoustics*, 71, 914–921.
5. Nurzyński, J., Nowotny, Ł. (2023). Acoustic performance of floors made of composite panels. *Materials*, 16(5), 2128. <https://doi.org/10.3390/ma16052128>
6. Hongisto, V., Saarinen, P., Alakoivu, R., Hakala, J. (2022). Acoustic properties of commercially available thermal insulators – An experimental study. *Journal of Building Engineering*, 54, 104588. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104588>
7. Li, J., Meng, Q., Lu, H., Xu, G. (2024). Improving building floor acoustics with innovative inorganic sound insulation coating. *Buildings*, 14(11), 3663. <https://doi.org/10.3390/buildings14113663>
8. Ciaburro, G., Romero, V. P., Iannace, G., Bravo Moncayo, L. (2024). Improving acoustic properties of sandwich structures using recycled membrane and honeycomb composite (RMHCC). *Buildings*, 14(9), 2878. <https://doi.org/10.3390/buildings14092878>
9. Yang, Y., Fenemore, C., Kingan, M. J., Mace, B. R. (2021). Analysis of the vibroacoustic characteristics of cross laminated timber panels using a wave and finite element method. *Journal of Sound and Vibration*, 494, 115842. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2020.115842>
10. Astrauskas, T., Januševičius, T., Grubliauskas, R. (2021). Acoustic panels made of paper sludge and clay composites. *Sustainability*, 13, 637. <https://doi.org/10.3390/su13020637>
11. Junqiang, W., Bin, D. (2020). Experimental studies of thermal and acoustic properties of recycled aggregate crumb rubber concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101836. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101836>
12. Dahal, R. K., Acharya, B., Dutta, A. (2022). Mechanical, thermal, and acoustic properties of hemp and biocomposite materials: A review. *Journal of Composites Science*, 6, 373. <https://doi.org/10.3390/jcs6120373>
13. Özçifçi, A., Yapıcı, F. (2008). Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1543–1550. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020>
14. Yin, Y., Guan, W. (2024). Sound absorption characteristics of unsaturated porous material calculated by modified transfer matrix method. *Buildings*, 14(2), 466. <https://doi.org/10.3390/buildings14020466>
15. Kuznetsova, S., Deleplanque, S., Allein, F., Dubus, B., Miniaci, M. (2024). Hierarchical meta-porous materials as sound absorbers. *Proceedings of the Royal Society A*, 480, 20230831. <https://doi.org/10.1098/rspa.2023.0831>
16. International Organization for Standardization. (2013). *EN ISO 717-2:2013. Acoustics — Rating of sound insulation in buildings and of building elements — Part 2: Impact sound insulation*. Geneva: International Organization for Standardization.

ASSESSMENT OF THE MANUFACTURING TECHNOLOGY AND STRUCTURE OF MULTILAYER ACOUSTIC WOODEN FLOORING

Summary

The article presents an assessment of the manufacturing technology and structural parameters of multilayer acoustic wooden flooring. The study combined a review of wooden flooring production processes, a weighted-sum multicriteria comparison of eight technological alternatives, comparative numerical modelling of seven oak top-layer and birch-plywood substrate combinations, and an evaluation of acoustic-layer application methods and manufacturing risks. The alternatives were assessed according to production efficiency, structural quality, cost, sustainability and acoustic potential. Engineered multilayer flooring achieved the highest aggregate score ($W = 3.81$) and was selected as the most suitable base technology for an integrated acoustic layer. Numerical models of 100×100 mm two-layer elements were analysed over the 100–5000 Hz range under identical modelling conditions. The maximum displacement decreased from 43.9×10^{-11} m for the 4–6 mm configuration to 3.4×10^{-11} m for the 6–15 mm configuration. Increasing plywood thickness reduced maximum displacement by approximately 37–68%, whereas increasing the oak top-layer thickness reduced it by approximately 19–27%. The 4–12, 4–15 and 6–15 mm combinations showed the lowest displacement values and the most stable response over the analysed frequency range. Roller application was identified as the preferred method for serial production because of its layer-thickness control and repeatability, while manual application is more appropriate for formulation development and prototyping. The absolute displacement used in the study is a preliminary indicator of structural vibrational sensitivity and cannot be interpreted as a direct measure of impact sound insulation. Therefore, the selected configurations should be validated by laboratory tests according to EN ISO 717-2, together with adhesion, bending, dimensional stability and durability testing.

Keywords: acoustic flooring; engineered wood flooring; multilayer structure; vibrational response; numerical modelling.