

# MAŽO GALINGUMO LAZERIO TECHNOLOGINIŲ REŽIMŲ POVEIKIS MEDIENOS PJŪVIO KOKYBEI

**Gitana Ginevičienė, Gytis Baltrušaitis, Žygmantas Kujalavičius, Alma Pocienė**

*Kauno kolegija*

**Anotacija.** Beržinė fanera plačiai naudojama dekoratyvinių produktų gamybai. Jų apdaila ir formos kontūravimas atliekami dujiniais CO<sub>2</sub> lazeriais, kurių veikimo principas pagrįstas lokalizuoto lazerio spindulio pluošto poveikiu, suardančiu medžiagos struktūrą. Lazerio spinduliuotės parametų rinkinio (galia ir greitis) poveikis medžiagai pagrįstas abliacijos ir karbonizacijos procesu. Sluoksniuotoji mediena (fanera) pasižymi teigiamomis savybėmis: natūrali, didelio stiprumo, lengvai apdirbama, bet turi ir trūkumų: degi, anizotropiška, su sandaros ydomis, neatspari drėgmės ir temperatūros pokyčiams, mažas kietumas ir atsparumas dilimui. Beržinė fanera išlaiko savybių stabilumą veikiant skirtingiems išoriniams veiksniams, tačiau graviruojant ir pjaunant, taikant dujinio CO<sub>2</sub> lazerio spinduliuotės poveikio skirtingus technologinius parametrus, mikrostruktūra suardoma iš dalies ar per visą medžiagos storį. Suirus medžiagai lieka tuštuma ir suanglėjusi prapjovos sienelė. Graviravimo ir pjovimo technologinių procesų veikimo principai skirtingi ir daro skirtingą poveikį apdirbto ruošinio kokybei. Šio tyrimo tikslai – nustatyti prapjovos sienelės mikrostruktūros kitimus pjovimo zonoje taikant dujinio CO<sub>2</sub> lazerio spinduliuotės poveikį skirtinga galia ir greičiu, palyginti su graviravimo būdu pašalintos mikrostruktūros zonoje apdirbto ruošinio krašto kitimais, įvertinti pjūvio kokybę pagal vertinimo kriterijus, nustatyti optimalias pjovimo lazerių parametų reikšmes, naudingas našumui ir sąnaudoms. Pjovimo zonos kokybę vertinama pagal šiuos kriterijus: visos mikrostruktūros pašalinimas, susiformavęs geometrinių pokyčių modelis apdirbto ruošinio krašte, prapjovos sienelės ir mikrostruktūros, likusios šalia pjovimo zonos, angležėjimas. Pjovimo ir graviravimo proceso metu vyksta greita medžiagos oksidacijos reakcija, kurios metu išsiskiria šiluma ir susidaro karščio paveikta zona. Dėl fototerminės abliacijos mechanizmo paveikta lazerio spinduliuote mikrostruktūra virsta nuodegomis, kurias pašalinus lieka gili tuštuma arba išėma medžiagoje. Pjūvio vietoje susiformuoja karbonizuota prapjovos sienelė su skirtingomis morfoliginėmis ir kolorimetrinėmis savybėmis. Siekiant ekologiškų medžiagų panaudojimo komercinių gaminių gamybai ir technologinio proceso eigos stabilumo bei ekonomiško, sukurtas produkcijos, apdirbtos graviravimo ir pjovimo būdu, kokybės vertinimo metodas.

**Reikšminiai žodžiai:** dujinis CO<sub>2</sub> lazeris, beržinė fanera, abliacija, karbonizacija, pjūvio kokybė.

## Įvadas

Lazerinio graviravimo ir pjovimo technologijos pritaikomos daugumos inžinerinių medžiagų apdorojimui. Jos naudojamos vis dažniau, nes užtikrina gerą kokybę, aukštą našumą bei palankios aplinkai. Tačiau jų pritaikymas nehomogeninėms medžiagoms vis dar sudėtingas. Natūralių medžiagų, tokių kaip fanera, situacija yra dar sudėtingesnė, nes tai lakštinė konstrukcinė medžiaga, suklajuota iš nelyginio skaičiaus lukšto sluoksnių taip, kad gretimuose sluoksniuose medienos pluoštai būtų suglausti 90° kampu (Morkevičius ir kt., 2004). Wagnerova ir kt. (2022) paminėjo ne tik medžiagos struktūrą, bet ir fizikines savybes, tokias kaip medienos amžius, drėgmė ir kt. Dujinių lazerių gamintojai pateikia optimalių parametų rekomendacijas techninėse specifikacijose, bet medienos lukšto lakštų plokštės pasižymi nestabilumu lokalizuoto lazerio spindulio pluošto kintamų parametų rinkinio (galia ir greitis) poveikiui. Medienos ruošiniai (gaminiai) yra anizotropiški, neatsparūs drėgmės ir temperatūros pokyčiams, degūs, su sandaros ydomis. Yra įvairių lazerinio apdirbimo aspektų, kuriuos galima modeliuoti skirtingais metodais, kad būtų galima numatyti kokybės charakteristikas,

būtinai bet kokiam gamybos procesui (Schaaf, 2010, cit. iš Begic-Hajdarevic ir kt., 2016).

Graviravimo ir pjovimo lazerių technologinių procesų veikimo principai ir poveikis medžiagos mikrostruktūrai skirtingi. Tačiau abiem atvejais mikrostruktūra suardoma iš dalies ar per visą medžiagos storį. Suirus medžiagai, lieka gili tuštuma arba išėma, suanglėjusi likusios mikrostruktūros prapjova ir susidariusios nuodegos. Galutinio produkto abliacijos ir karbonizacijos lygis yra labai svarbūs graviravimo ir pjovimo dujinio CO<sub>2</sub> lazerių kokybės rodikliai. Abu rodikliai valdomi parenkant atitinkamus lazerio proceso parametrus, kurie yra skirtingi kiekvienai medžiagai ir jos storiui (Begic-Hajdarevic ir kt., 2016). Pjūvio kokybei turi įtakos medžiagos fizikinės, mechaninės bei šiluminės savybės.

Irawan ir kt. (2008) ištyrė, kaip vyksta mikrostruktūros pokyčiai, ir nustatė, kad procesas palieka gilią tuštumą priklausomai nuo medžiagos savybių ir lazerio technologinių parametų. Suardytos mikrostruktūros gylis tiesiškai priklauso nuo lazerio spinduliuotės parametų rinkinio, tačiau lazerio galia turi būti optimizuota priklausomai nuo medžiagos savybių (Klank ir kt., 2002, cit. iš Irawan ir kt., 2008). Pritam (2016) rekomenduoja didinti lazerinių skenavimų dažnį su mažesne galia ir didesniu judėjimo greičiu, norint pasiekti gilesnes ertmes. Kiekviena medžiaga turi

savo mechanines, šilumines, fizikines ir optines savybes, kurios daro įtaką pjovimo kokybei (Mushtaq ir kt., 2020). Medienos ir panašių medžiagų nehomogeniškumas bei matmenų nestabilumas dėl jų gebėjimo absorbuoti drėgmę apsunkina pjovimo kokybę ir rezultatų pakartojamumą (Bogosanovic ir kt., 2012, cit. iš Wagnerova ir kt., 2022). Gurau ir kt. (2017) pastebėjo, kad yra mažai informacijos apie skirtingų lazerio technologinių režimų daromą įtaką spinduliuotės abliacijos procesams, apie lokalizuoto lazerio spindulio pluošto parametru rinkinio, suardančio medžiagos paviršiaus struktūrą, poveikį apdailos procesams ir pritaikymą aiškiai apibrėžtos vaizdinės produkcijos gamybai (Ginevičienė ir kt., 2021).

Graviruojant ir pjaunant lazeriu karščio paveiktoje zonoje vyksta medienos anglėjimas. Karbonizuotas medienos gylys yra lygus pluošto plociui (Dogaru, 1985, cit. iš Petru ir kt., 2014). Petru ir kt. (2014) tyrimo metu nustatė, kad maža lazerio galia negali įveikti visos medžiagos storio, o didelė lazerio galia sudegina medieną. Suanglinimo lygis daro įtaką paviršiaus spalvai. Drėgmės kiekio padidėjimas medžiagoje sumažina karbonizacijos lygį, nes energijos perteklius daro poveikį vandens išgarinimui iš medienos (Petru ir kt., 2014). Rejani ir kt. (2021) išsiaiškino, kad nupjauto krašto paviršius padengiamas labai smulkiais anglies dalelėmis ir jų kiekis didėja didėjant lakšto storiui, bet, didėjant lakšto storiui, pjovimo apimtį efektyvumas mažėja. Caiazzo ir kt. (2005) (cit. iš Mushtaq ir kt., 2020) nagrinėjo lazerinio pjovimo kintamųjų parametru įtaką anglėjimui ir pastebėjo su pjovimu susijusias problemas: karščio paveiktos zonos, paviršiaus šiurkštumo, nuodegų ir dryžių susidarymas pjaunamame paviršiuje. Mushtaq ir kt. (2020) padarė išvadą, kad optimalių parametru parinkimas, karščio paveiktos zonos plotis, matmenų pokyčiai ir energijos sąnaudos gali būti kontroliuojami optimizuojant greitį ir galią. Choudhury ir kt. (2010) atliko eksperimentinį tyrimą lazeriu ir nustatė, kad karščio paveikta zona tiesiogiai priklauso nuo lazerio galios. Ji didėja didėjant lazerio galiai, o didėjant pjovimo greičiui – mažėja (Sheng ir kt., 1995, cit. iš Madič ir kt., 2012). Pjovimo kokybei didelę įtaką daro spinduliuotės greitis (Mushtaq ir kt., 2020). Dėl padidėjusio greičio sumažėja termiškai paveikta sritis, susiformuoja mažiau terminiu pažeidimų ruošinyje. Pjovimo gylys kinta atvirkščiai proporcingai didėjant pjovimo greičiui. Padidėjus pjovimo greičiui ir sumažėjus lazerio spinduliuotės galiai, sumažėja karščio paveiktos zonos plotas (Madič ir kt., 2012; Rajaram ir kt., 2003; Mushtaq ir kt., 2020). Norint pjauti skirtingo storio

medžiagą, reikalingas kontroliuojamas greitis, kuris padeda pasiekti gerą pjūvio kokybę.

Medžiagų pjovimo ir graviravimo metu susiformuoja geometrinis modelis apdirbto ruošinio krašte. Madič ir kt. (2013) pastebėjo, kad pjūvio paviršiaus tyrimas suteikia vertingos informacijos apie terminio apdirbimo pėdsakų medžiagoje (dryžių) daromą įtaką pjūvio kokybei. Parthiban ir kt. (2015) išsiaiškino, kad mažesnis pjovimo greitis pagerina pjovimo kokybę ir medžiagos paviršiaus šiurkštumą pjovimo lazeriu metu. Mushtaq ir kt. (2020) padarė išvadą, kad paviršiaus šiurkštumas didėja didėjant spinduliuotės galiai ir greičiui.

Naudojant mažo galingumo CO<sub>2</sub> lazerius medžiagos paviršių apdailai ir kontūravimui, galima pagerinti pjūvio kokybę. Lazerio galios valdymas laikomas labai svarbiu veiksniu, siekiant sumažinti ruošinio anglėjimą, dryžių ir karščio paveiktos zonos susidarymą. Madič ir kt. (2012) analizė atskleidė, kad pjovimo greitis turi didžiausią įtaką karščio paveiktai zonai, taip pat svarbu lazerio galia bei fokusavimo padėtis.

Remdamiesi tyrimo rezultatų analize Kang ir kt. (2020) patvirtino, kad naudojant mažą lazerio galią (8 ir 16 W) ir skenavimo greitį (12 ir 15 mm/s) galima gauti gerą pjovimo kokybę.

Pjaunant lazeriu apdorojimo parametrai ir lazerio sąlygos turi įtakos pjovimo našumui, ypač pjovimo efektyvumui, pjovimo briaunos kokybei, o struktūros savybės gali turėti įtakos nupjautos briaunos kokybei ir prapjovos plociui (Rejani ir kt., 2021). Daugelyje praktinių pritaikymų dažnai reikia pasirinkti pjovimo lazeriu parametru reikšmes taip, kad būtų pasiekti du tikslai vienu metu, t. y. norima pjovimo kokybė ir aukštas našumo lygis (Jankovič, 2019).

Publikuota daug tyrimu rezultatų, kurie pateikia konkrečių medžiagų apdorojimo modelius ir veiksnis, turinčius įtakos galutinio produkto kokybei, nes didėja lazerinių technologiju, taupančių laiką ir sąnaudas, taikymo komerciniams tikslams poreikis. Tačiau grafinių elementu (objektu) pavaizdavimo sluoksniuotoje medienoje dujiniu CO<sub>2</sub> lazeriu kokybės vertinimo metodikos trūksta.

**Šio darbo tikslas** – atlikti pjaustymo kokybės apžvalginį tyrimą, remiantis literatūros šaltiniu analize apie graviravimą ir pjovimą CO<sub>2</sub> lazeriu, siekiant ištirti medžiagos pašalinimo kokybę, susijusią su karščio paveikta zona, prapjovos sienelės geometrijos formavimusi ir anglėjimu.

**Tyrimo objektas** – beržinė fanera.

**Tyrimo uždaviniai:**

1. Įvertinti pjūvio kokybę pagal vertinimo kriterijus.
2. Nustatyti apdirbto ruošinio krašto geometrijos pakitimus ir anglėjimo lygį pjovimo zonoje

taikant dujinio CO<sub>2</sub> lazerio spinduliuotės poveikį skirtinga galia ir greičiu, ir palyginti su graviravimo būdu pašalintos mikrostruktūros zonoje prapjovos sienelės kitimais.

3. Nustatyti optimalias medžiagos pašalinimo dujiniu CO<sub>2</sub> lazeriu parametrų rinkinio reikšmes, naudingas našumui ir sąnaudoms.
4. Pasiūlyti produkcijos, apdirbtos graviravimo ir pjovimo būdu, kokybės vertinimo metodą.

**Tyrimo metodai** – mikrostruktūros pašalinimo ir karbonizacijos lygio kokybinis vertinimas pagal kitimų lygių skalę, prapjovos sienelės geometrijos optinė mikroskopija, lazerio spinduliuotės greičio ir galios, faneros drėgmės ir temperatūros nustatymas.

### Tyrimo metodai ir sąlygos

**Tyrimo objektai.** Šiame tyrime naudota specialiai pjaustymui ir graviravimui lazeriu pritaikyta beržinė fanera – 500 × 300 mm lakštas. Lakštas klijuotas atspariais klijais, pagamintais formaldehidinių dervų pagrindu. Bandinio parametrai: 100 proc. beržas, storis – 3 mm, storio tolerancija (+0,3/-0,3), tankis 640–700 kg/m<sup>3</sup>, aukštos kokybės vientisas lakštas viduje ir išorėje, minimalus defektų skaičius visuose sluoksniuose – paviršius švarus be užtaisymų (B rūšis).

**Spinduliuotės greičio ir galios nustatymas – dujinis CO<sub>2</sub> lazeris.** „Adobe Illustrator“ programa buvo paruoštas „Adobe Illustrator“ programa buvo paruoštas vektorinis maketas. Šis maketas importuotas į RD Works V8 kompiuterinę programą, turinčią sąsają su Bodor BCL-MU CO<sub>2</sub> lazeriu, kuriuo ir buvo graviruojami bei pjaunami tiriamieji objektai. Lazerio darbinis laukas atitiko pasirinktų objektų dydžius. Darbui naudotas Bodor BCL-MU CO<sub>2</sub> lazeris, kurio spindulio bangos ilgis buvo 10,6 μm, graviravimo greitis 0–60000 mm/min. Minimalus graviravimo plotas 1 mm × 1 mm. (Bodor User Manual for BCL-MU Series Laser Machine, 2019). Tyrimų atlikimui buvo pasirinkti konkretūs galios ir greičio parametrų derinio paveikti laukeliai. Bandinio tiriamąjį plotą sudarė – 160, 20 × 20 mm dydžio lazerio spinduliuote paveiktų laukelių. Tyrimui pasirinkti 10 proc. – 100 proc. (4–40 W) galios ir 1 mm/s– 40 mm/s greičio deriniai.

**Prapjovos krašto geometriniai pokyčiai (dryžiai) ir karbonizacijos lygis (anglėjimas) – vizualus kokybinis vertinimas pagal optinę mikroskopiją.** Optiniu mikroskopu Motic SMZ-171 užfiksuojant kamera Invenio 5SII buvo įvertinta medienos faneros struktūrinių savybių kokybė. Analizuojamo bandinio paviršiaus vaizdas buvo padidintas 20 kartų, raiška – 2560 × 1922 pikselių. Režime „Live“ vaizdo greitis – iki 48 fps. Taikant kelių sluoksnių sistemą, įvertintas

medienos anglėjimo lygis. Apibrėžtos tikrinamų zonų klasifikacijos.

**Drėgmės ir temperatūros pokytis prieš ir po graviravimo ir (bei) pjovimo.** Oras buvo iš dalies kondicionuojamas, siekiant palaikyti patalpos mikroklimatą. Darbinė aplinka atitinka HN 69:2003 normas. Tyrimo atlikimo metu patalpos temperatūra siekė 20,5 °C, drėgnis – 46,6 proc. Matavimai atlikti su santykinės drėgmės ir temperatūros matuokliu FHT100. Temperatūros tikslumas ±0,5 °C. Patalpos temperatūros ir drėgmės matavimai buvo atlikti prieš graviravimo, pjovimo darbus ir po jų. Temperatūra ir drėgmė kito.

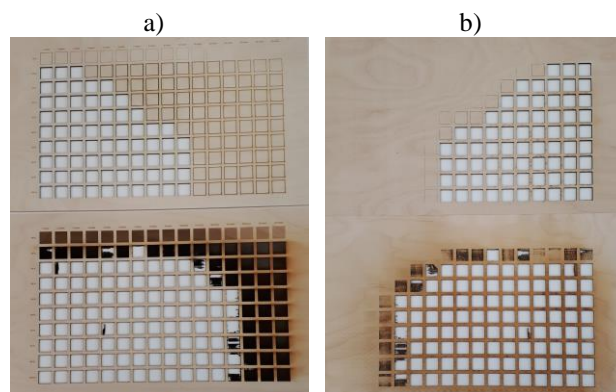
Faneros drėgnis ir temperatūros pokytis buvo matuojamas keliais prietaisais parametrų tikslumui įvertinti ir palyginti.

Elektroniniu drėgmės matuokliu *Hydrometre Compact A* buvo išmatuota drėgmė faneroje prieš ir po graviravimo bei pjovimo darbų. Prietaisas matuoja iki 40 mm storio medienos drėgnį (padalos vertė – 0,1 proc.).

Adatinis matuoklis GMH 3810, Resistive Material Moisture Meter skirtas medienos drėgmei matuoti varžiniu būdu. Matuojama drėgmė nuo 0,0 proc. iki 100,0 proc. medžiagos drėgmės. Tikslumas – ±0,2 proc. drėgno.

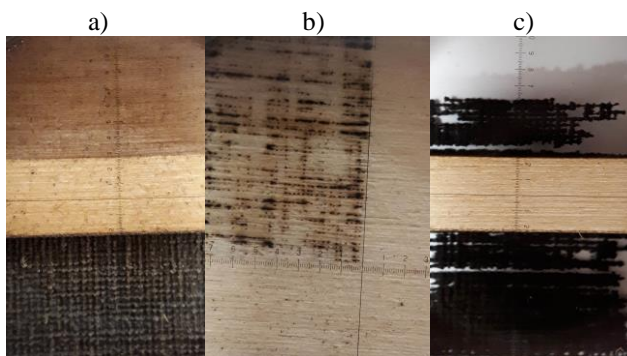
### Tyrimų rezultatai ir jų aptarimas

Beržinė fanera yra lengvai apdirbama palyginus su kitomis inžinerinėmis medžiagomis, bet ji neatspari lokalizuotos lazerio spinduliuotės poveikiui. Graviruojant ir pjaustant medžiagą CO<sub>2</sub> lazerio skirtingais galios ir greičio režimais, įvyksta mikrostruktūros pokyčių. Siekiant įvertinti sluoksniuotos medienos kokybės kitimus, sukurtas bandinių modelis iš 160 tiriamų objektų 20 × 20 mm dydžio ir atliktas poveikis kiekvienam iš jų taikant tuos pačius lazerio spinduliuotės parametrus ir tas pačias aplinkos sąlygas, kad būtų galima palyginti eksperimentinius rezultatus (1 pav.).



**1 pav.** Bandinių modelis, sudarytas iš 160 tiriamų objektų, po graviravimo ir pjovimo lazeriu:  
a) beržinės faneros sąveikos su spinduliuote pusė,  
b) beržinės faneros antra pusė

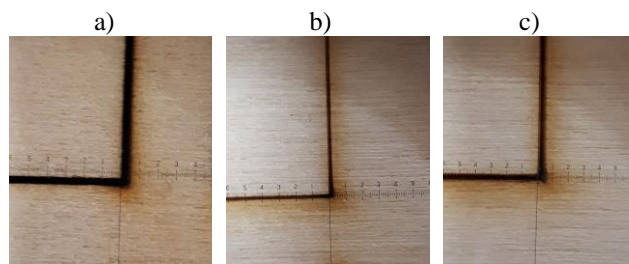
Vizualus **medžiagos pašalinimo** kokybinis vertinimas parodė, kad lokalizuotos šilumos energijos kiekis ir judėjimo greitis darė skirtingą įtaką abliacijos procesui. Atliekant pjovimą ir graviravimą CO<sub>2</sub> lazeriu susiformuoja išėmos faneroje, paveiktoje spinduliuotės skirtingų parametrų rinkinio ribose: reiškinys pastebėtas pjaunant 20–100 proc. (8–40 W) galia ir 1–10 mm/s greičiu, graviruojant – 30–100 proc. (12–40 W) galia ir 1–25 mm/s greičiu. Išanalizavus tiriamus objektus pastebėta, kad vietomis neįvyko visiškasis lazerio spindulio išsiskverbimas į medžiagos storį, bet karščio paveiktoje zonoje susiformavo struktūriniai medžiagos pokyčiai. Graviruojant su 10 proc. (4 W) galia ir 1–40 mm/s greičiu įvyko spalvinis medžiagos pokytis, o pjaunant su ta pačia galia ir lazerio spinduliui judant 15–40 mm/s greičiu susiformavo įpjova. Graviruojant lazeriu bandiniuose, paveiktuose 20 proc. (8 W) galia ir 1–10 mm/s greičiu, medžiaga nebuvo visiškai pašalinta, nes liko plonas mikrostruktūros sluoksnis, o po poveikio 30 proc. (12 W) galia ir 15 mm/s greičiu, 40 proc. galia ir 20 mm/s greičiu, 25 mm/s greičiu ir 80, 90, 100 proc. galia liko suanglėjusi liekana (2 pav.). Rezultatai patvirtina, kad graviruojant pašalinto medžiagos sluoksnio storis didėja didėjant galiai ir mažinant skenavimo greitį.



**2 pav.** Struktūriniai medžiagos pokyčiai karščio paveiktoje zonoje:

- a) spalvinis pokytis, b) karbonizuota tekstūra,
- c) suanglėjusi mikrostruktūros liekana

Technologiniai pjovimo proceso režimai darė poveikį įpjovos pločiui. Pastebėta, kad medžiagos sąveikos su spinduliuote zonoje didėjant greičiui susiformavusios įpjovos plotis mažėja, bet pažeidimo zona didėja kai spindulio galia padidėja (3 pav.). Panaudojus šiuos rezultatus galima daryti tam tikras išvadas apie graviravimo ir pjovimo procesų parametrų įtaką pašalinto medžiagos sluoksnio storiui. Išanalizavus paaiškėjo, kad kuo ilgesnis spinduliuotės sąveikos laikas su medžiaga, tuo sėkmingesnis pjovimo procesas.



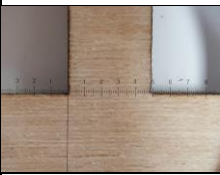




**3 pav.** Medžiagos sąveikos su spinduliuote zonoje susiformavusios įpjovos plotis su parametru rinkiniais: a) 8 W ir 4 mm/s, b) 8 W ir 40 mm/s, c) 40 W ir 40 mm/s

Remiantis gautais eksperimentiniais rezultatais sudaryta medžiagos pašalinimo kitimų lygių skalė, kuria remiantis galima numatyti įvesties technologinius parametrus atliekant grafinių duomenų atvaizdavimą 3 mm storio beržinėje faneroje.

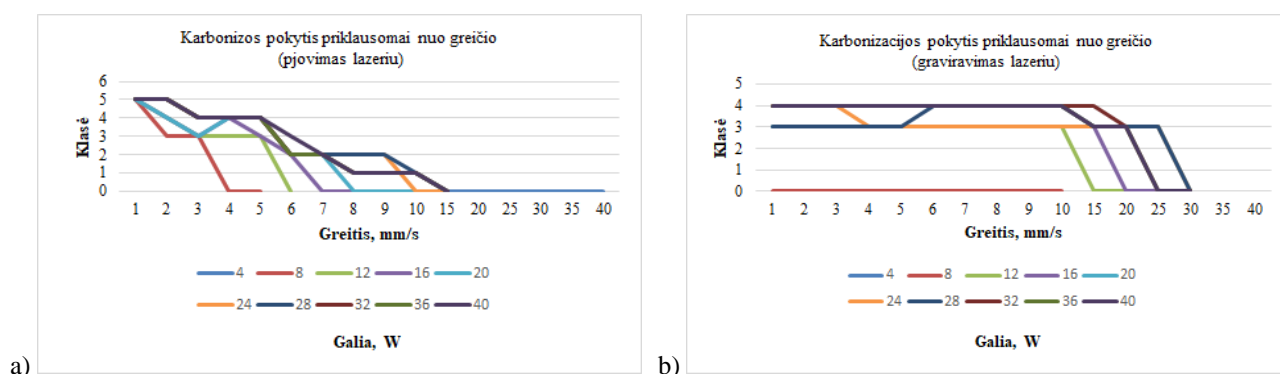
Bandinių modelio vertinimo metodika buvo pagrįsta dviem kokybės rodikliais, kurie padeda palyginti ir išryškinti blogiausius ir geriausius rezultatus turinčius objektus. Abliacijos vertinimas pagrįstas medžiagos pašalinimo lygio kintamais duomenimis (išėma, plonas mikrostruktūros sluoksnis, suanglėjusi liekana, įpjova), o antrasis kokybės vertinimo rodiklis – karbonizacija, pagrįsta ne tik prapjovos sienelės spalvinėmis savybėmis, bet ir geometrijos pobūdžiu.

Analizuojant graviravimo ir pjovimo bandinių modelį pastebėta, kad pjūvio kokybės kitimų pobūdis kartojasi darant poveikį skirtingu lazerio galios ir greičio rinkiniu. Todėl nuspręsta tiriamus objektus suskirstyti pagal panašius požymius į 5 klases, kiekvienai klasei priskiriant briaunos kokybės kitimo lygio kriterijus (1 lentelė).

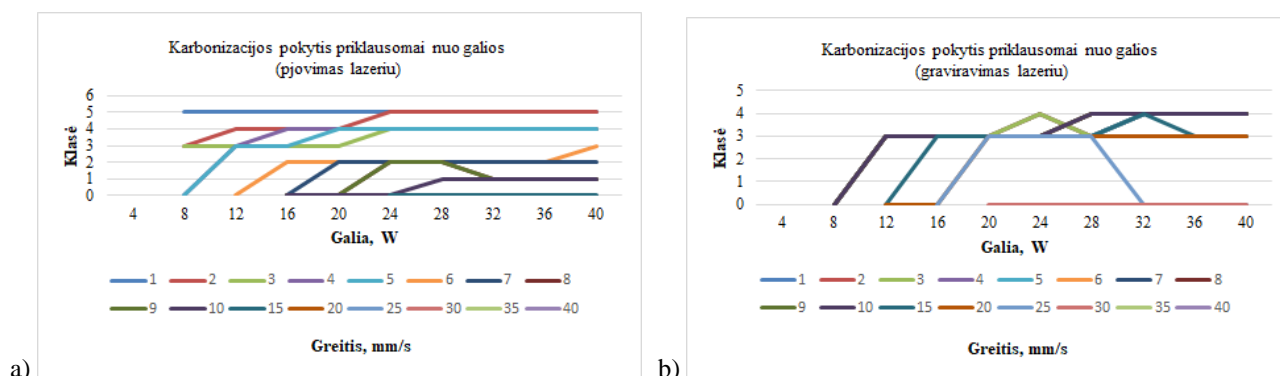
1 lentelė. Pjūvio kokybės kitimų vizualaus vertinimo lygių skalė

Klasė	1	2	3	4	5
Briaunos kokybės kitimo pavyzdys					
Briaunos kokybės kitimo apibūdinimas	Be pakitimų	Be pakitimų, bet yra karbonizuotos dėmės	Suaglėjimas	Suaglėjimas ir suaglėjusios dėmės	Suaglėjimas ir pažeista briaunos geometrija

Pagal pasirinktą metodiką įvertintas tiriamų objektų karbonizacijos lygis (4, 5 pav.).



4 pav. Karbonizacijos lygio kitimas kintant spinduliuotės judėjimo greičiui: a) pjovimas lazeriu, b) graviravimas lazeriu

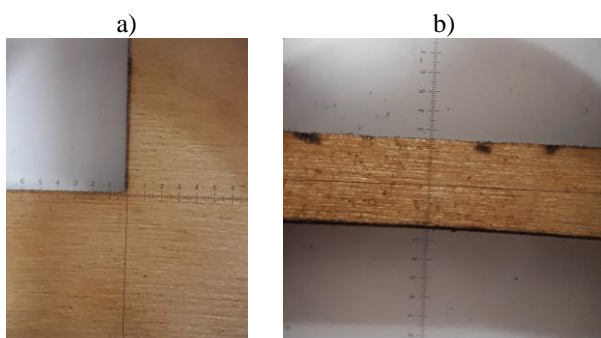


5 pav. Karbonizacijos lygio kitimas kintant spinduliuotės galiai: a) pjovimas lazeriu, b) graviravimas lazeriu

Analizė parodė, kad pjūvis su mažiausiu karbonizacijos lygiu gautas pjaunant su 80–100 proc. (32–40 W) galia ir 8–10 mm/s greičiu, graviruojant visi objektai pateko į suaglėjimo su dėmėmis lygio klasę ir tik minimaliai skyrėsi tarpusavyje, o vizualiai nustatyti tokius kitimus neužtenka. Bandiniuose, kuriuose įvyko dalinis medžiagos pašalinimas, plokštės antroje pusėje pjaunant lazeriu susiformavo karbonizuotas ryškiai ir neryškiai matomas kontūras, o graviruojant – karbonizuota plono sluoksnio mikrostruktūros tekstūra (2 pav.).

Apatinėje beržinės faneros pusėje susiformavo įvairių tonų rudos dėmės. Dėmių kiekis ir vizualiai matomas spalvinis jų skirtumas kinta priklausomai nuo greičio ir galios. Didėjantis karbonizuotų dėmių kiekis rodo blogėjančią kokybę. Graviravimo metu faneros antroje pusėje karščio paveiktoje zonoje ir gretimų zonų plote susidarė vizualiai matomas reiškinys – tolygus medienos plokštės paviršiaus vienatonis spalvinis pokytis. Taip yra dėl to, kad lokalizuotas lazerio spindulys atlieka grįžtamąjį judesį objekto ploto ribose iki tol, kol suformuoja siekiamą rezultatą pagal įvesties geometrinius matmenis, todėl energijos poveikis, tenkantis plotui,

ilgėja. Be to, mediena turi trūkumą – neatspari šilumos poveikiui ir degi. Didėjant galiai, lazerio spinduliuotės prasiskverbimas gilėja, bet pjovimo greičio padidėjimas išlaiko balansą tarp lazerio energijos suvartojimo ir padidinto lazerio prasiskverbimo į medžiagos gilumą. Didėjant medžiagos pašalinimo storiui (abliacijos lygiui), padidėja anglies dulkių kiekis pjovimo zonoje, todėl graviravimo proceso metu susiformavusi nepageidaujama dulksna padengia likusios medžiagos antrą pusę beržinėje faneroje (6 pav.). Tokį reiškinį galima panaikinti naudojant papildomą technologinį procesą – paviršiaus šlifavimą iki vientiso spalvinio tono plokštumos.



**6 pav.** Graviruojant lazeriu karščio paveiktos zonos spinduliuote 40 W galia ir 1 mm/s greičiu beržinės faneros pusių palyginimas:  
a) sąveikos su spinduliuote pusė,  
b) anglies dalelių dulksna

**Klijuotos faneros ruošinio krašto geometrija** – svarbus pjūvio kokybės rodiklis. Graviruojant ir pjaunant lazeriu susiformuoja skirtingo pobūdžio geometrinė prapjovos sienelės konfigūracija. Tai susiję su lazerio technologinio proceso metu lokalizuoto spindulio judėjimo pobūdžiu sąveikos metu su medžiaga ir medžio pluošto krypties padėtimi spindulio judėjimo trajektorijai. Analizuojant sienelės paviršių yra labai sudėtinga jį apibūdinti, bet po pjovimo ir graviravimo matomas akivaizdus terminio apdirbimo pėdsakų (dryžių) modelis apdirbto ruošinio krašte (2 lentelė). Optinio mikroskopo vaizdas, padidintas 20 kartų, parodė reikšmingus geometrinius pokyčius, pagrįstus anizotropinėmis savybėmis, ir kitimus tarp medienos lukšto sluoksnių. Išanalizavus vaizdus, paaiškėjo, kad padidėjus lazerio galiai, kokybė blogėja, bet padidinus pjovimo greitį, kokybė pagerėjo. Palyginimas rodo, kad naudojamų graviravimo ir pjovimo sąlygų ribose, didėjant pjovimo greičiui, dryžių tekstūra tampa lygesnė. Naudojant tą patį spinduliuotės judėjimo greitį, didėjant galiai, dryžių modelis tampa netvarkingas. Lyginant prapjovos sienelę po graviravimo ir pjovimo lazeriu aptikti reikšmingi geometriniai kitimų pobūdžio skirtumai, nuo kurių priklauso bendras gaminio (produkto) vaizdas. Gauti rezultatai patvirtina pjovimo lazeriu pranašumą siekiant užtikrinti nežymų terminio apdirbimo pėdsakų modelį medžiagoje.

**2 lentelė.** Beržinės faneros prapjovos sienelės geometriniai pokyčiai pjūvio zonoje

Bandinys	Lazerio spinduliuotės judėjimo kryptis sutampa su išorinių sluoksnių tekstūros kryptimi (lygiagretus)		Lazerio spinduliuotės judėjimo kryptis statmena išorinių sluoksnių tekstūros kryptčiai (skersinis)	
	Galia, $P_{min}$ ir greitis, $v_{min}$	Galia, $P_{max}$ ir greitis, $v_{max}$	Galia, $P_{min}$ ir greitis, $v_{min}$	Galia, $P_{max}$ ir greitis, $v_{max}$
Beržinė fanera prieš apdirbimą (mechaninis pjūvis)				
Graviruota beržinė fanera				
Pjauta beržinė fanera				

Siekiant užtikrinti pjūvio kokybę, svarbu nustatyti **optimalų lazerio spinduliuotės greičio ir galios** rinkinį. Remiantis analizės kriterijais (medžiagos pašalinimas, prapjovos geometrija, karbonizacijos lygis) nustatyta, kad keliamus tikslus iš 160 tiriamų objektų bandinių modelio atitiko 9 objektai, pjauti lazeriu su parametru rinkiniais: galia 80–100 proc. (32–40 W), greitis 8–10 mm/s. Pjūvio lazeriu kokybei apibūdinti dažnai naudojamas ir paviršiaus šiurkštumas, pjūvio plotis bei karščio paveiktos zonos dydis, kurie tiesiogiai priklauso nuo lazerio spinduliuotės technologinių parametru rinkinio, užtikrinančio optimalias pjovimo ir graviravimo sąlygas, naudingas našumui ir sąnaudoms (pasiekti galutinį rezultatą).

Mediena neatspari aplinkos sąlygų pokyčiams, todėl gaminiai keičia matmenis ir formą, bet klijuotos faneros, kuri pagaminta iš lukšto lakštų ir suklijuota kljais, matmenų kitimas yra minimalus. Beržinės faneros **temperatūros ir drėgmės** kiekis išmatuotas prieš atliekant technologinius procesus ir po jų. Matavimų duomenys parodė, kad sluoksniuotosios medienos temperatūra po graviravimo lazeriu nežymiai didėjo nuo 20,51 °C iki 21,5 °C, o po pjovimo proceso – iki 22,2 °C. Tačiau drėgnio pokyčio medžiagoje rezultatas buvo kitoks: po graviravimo drėgnis sumažėjo nuo 47,90 proc. iki 43,20 proc., o po pjovimo – iki 44,79 proc. Reikšmės rodo, kad šilumos poveikis daro įtaką medienos plokštės savybėms.

Pjovimo lazeriu procese daugelis veiksnių turi įtakos galutinio produkto kokybei. Pagrindinis tikslas buvo rasti pjovimo greitį ir lazerio galią, kad būtų pasiektas stabilus procesas ir geriausia pjūvio kokybė. CO<sub>2</sub> lazeris gali padėti sumažinti išlaidas ir padidinti gamybos spartą (Mushtaq ir kt., 2020), tačiau apie mažo galingumo lazerio technologinių režimų poveikį medienos pjūvio kokybei reikia papildomų duomenų, pagrįstų prapjovos paviršiaus morfologijos ir spektrofotometrijos metodais, faneros struktūros analize. Sudarytas vizualus pjūvio kokybės vertinimas tikslingas objektų perkėlimo ant plonos sluoksniuotosios medienos paviršiaus atskirų gaminių palyginimui tarpusavyje, nors jų apdirbimo procesas skiriasi.

## Išvados

1. Nustatyta, kad graviravimo ir pjovimo technologinių procesų metu pašalinama medžiaga, bet veikiant beržinę fanerą identišku lazerio spinduliuotės parametru rinkiniu (galia ir greitis) daromas skirtingas poveikis prapjovos kokybei. Gauti rezultatai pagal vertinimo kriterijus (mikrostruktūros pašalinimo ir karbonizacijos lygis, prapjovos sienelės geometrijos pokytis)

patvirtina, kad pjovimas užtikrina geresnius kokybės rezultatus.

2. Nustatyta, kad pjovimo zonoje, taikant dujinio CO<sub>2</sub> lazerio spinduliuotės poveikį skirtinga galia ir greičiu, apdirbto ruošinio krašte susidaro geometriniai mikrostruktūros pokyčiai. Lyginant prapjovos sienelės kitimus po graviravimo ir pjovimo lazeriu, pastebėta, kad susiformuoja skirtingas terminio apdirbimo pėdsako modelis lygiagrečiai išorinių faneros sluoksnių medienos pluošto kryptims ir skersine kryptimi. Gauti rezultatai patvirtina pjovimo lazeriu pranašumą siekiant užtikrinti nežymų terminio apdirbimo pėdsako modelį briaunoje.
3. Karbonizacijos lygio kokybės vertinimas optinės mikroskopijos būdu parodė skirtumą, pagrįstą briaunos anglėjimo lygiu ir suanglėjusių dėmių kiekiu pjūvio zonoje tarp sąveikos su spinduliuote ir apatinės plokštės pusiu. Nustatyta, kad pjūvis su mažiausiu karbonizacijos lygiu gautas pjaunant lazeriu su 32–40 W galia ir 8–10 mm/s greičiu, o graviruojant briaunos anglėjimas neatitiko kokybės rodiklių, nes visi objektai pateko į suanglėjimo su dėmėmis lygio klasę ir tik minimaliai skyrėsi tarpusavyje.
4. Tyrimo rezultatai parodė, kad faneros temperatūros pokytis didesnis po lazerinio pjovimo lyginant su graviravimo procesu, tačiau drėgnio pokytis buvo didesnis po lazerinio graviravimo. Po graviravimo bendra ruošinių temperatūra padidėjo 4,7 proc., o po pjovimo – 7,6 proc., drėgnis po graviravimo sumažėjo 9,8 proc., po pjovimo – 6,5 proc.
5. Nustatytos optimalios pjovimo lazeriu parametru reikšmės. Naudojant didelę lazerio galią (32, 36, 40 W) ir mažą greitį (8, 9, 10 mm/s) gauta geriausia pjovimo kokybė, pagrįsta proceso stabilumu.
6. Gauti rezultatai patvirtina, kad beržinės faneros prapjovos, paveiktos lazerio spinduliuote, kokybės charakteristikoms vertinti reikia papildomų duomenų taikant paviršiaus morfologijos nustatymo ir spektrofotometrijos metodus, faneros struktūros analize.
7. Pasiūlytas gaminių kokybės vertinimo metodas priklausomas nuo įvesties parametru, taikant pjūvio kokybės kitimo lygio kriterijus.

## Literatūra

1. Begic-Hajdarevic, D., Pasic, M., Cekic, A., & Mehmedovic, M. (2016). OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS FOR CUT QUALITY IN CO<sub>2</sub> LASER CUTTING USING TAGUCHI METHOD. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 27.
2. Bodor User Manual for BCL-M Series Laser Machine (2019). Jinan Bodor CNC Machine Co.Ltd
3. Bogosanic, M., Al-Anbuky, A., & Emms, G. W. (2012). Microwave nondestructive testing of wood anisotropy and scatter. *IEEE Sensors Journal*, 13(1), 306-313.
4. Caiazzo, F., Curcio, F., Daurelio, G., & Minutolo, F. M. C. (2005). Laser cutting of different polymeric plastics (PE, PP and PC) by a CO<sub>2</sub> laser beam. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(3), 279-285.
5. Choudhury, I. A., & Shirley, S. (2010). Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation. *Optics & Laser Technology*, 42(3), 503-508.
6. Dogaru, V. (1985). Bazele tăierii lemnelui și a materialelor lemnoase. Basics for cutting wood and wood-based.
7. Gurau, L., Petru, A., Varodi, A., & Timar, M. C. (2017). The influence of CO<sub>2</sub> laser beam power output and scanning speed on surface roughness and colour changes of beech (*Fagus sylvatica*). *BioResources*, 12(4), 7395-7412.
8. Irawan, R., Chuan, T. S., Meng, T. C., & Ming, T. K. (2008). Rapid constructions of microstructures for optical fiber sensors using a commercial CO<sub>2</sub> laser system. *The open biomedical engineering journal*, 2, 28.
9. Janković, P., Madić, M., Radovanović, M., Petković, D., & Mladenović, S. (2019). Optimization of surface roughness from different aspects in high-power CO<sub>2</sub> laser cutting of AA5754 aluminum alloy. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(12), 10245-10256.
10. Kang, S., & Shin, J. (2020). Experimental investigation on the CO<sub>2</sub> laser cutting of soda-lime glass. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(8), 3345-3351.
11. Klank, H., Kutter, J. P., & Geschke, O. (2002). CO<sub>2</sub>-laser micromachining and back-end processing for rapid production of PMMA-based microfluidic systems. *Lab on a Chip*, 2(4), 242-246.
12. MADIĆ, M., PETKOVIĆ, D., & RADOVANOVIĆ, M. (2013). PREDICTION MODEL FOR DEPTH OF SEPARATION LINE OBTAINED IN CO<sub>2</sub> LASER CUTTING OF STAINLESS STEEL. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, 11(4).
13. Madić, M. J., & Radovanović, M. R. (2012). Analysis of the heat affected zone in CO<sub>2</sub> laser cutting of stainless steel. *Thermal Science*, 16(suppl. 2), 363-373.
14. Morkevičius, & Papreckis, B. (2004). *Mediena ir jos gaminiai. Senoja.*
15. Mushtaq, R. T., Wang, Y., Rehman, M., Khan, A. M., & Mia, M. (2020). State-of-the-art and trends in CO<sub>2</sub> laser cutting of polymeric materials—a review. *Materials*, 13(17), 3839.
16. Papreckis. (2014). *Aiškinamasis medienos terminų žodynas: 3020 terminų: lietuvių k., anglų k., vokiečių k., prancūzų k., rusų k. (3-ia patais. ir papild. laida).* Technologija.
17. Parthiban, A., Ravikumar, R., Kumar, B. S., & Baskar, N. (2015). Process Performance with Regards to Surface Roughness of the CO<sub>2</sub> Laser Cutting of AA6061-T6 Aluminium Alloy. *Lasers in Engineering (Old City Publishing)*, 32.
18. Petru, A., & Lunguleasa, A. (2014). *Wood Processing By Laser Tools. International Scientific Committee*, 213.
19. Pritam, A. (2016). Experimental investigation of laser deep engraving process for AISI 1045 stainless steel by fibre laser. *International Journal of Information Research and Review*, 3(1), 1730-1734.
20. Rajaram, N., Sheikh-Ahmad, J., & Cheraghi, S. H. (2003). CO<sub>2</sub> laser cut quality of 4130 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(4), 351-358.
21. Rejani, A. R., & Hashemzadeh, M. (2021). CO<sub>2</sub> laser-air cutting of glass-fibre-reinforced unsaturated polyester (GFRUP): an experimental investigation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(9), 2627-2638.
22. Schaaf, P. (Ed.). (2010). *Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments (Vol. 139).* Springer Science & Business Media.
23. Sheng, P. S., & Joshi, V. S. (1995). Analysis of heat-affected zone formation for laser cutting of stainless steel. *Journal of materials processing technology*, 53(3-4), 879-892.
24. Wagnerova, R., Jurek, M., Czebe, J., & Gebauer, J. (2022). A Method for Measuring the Quality of Graphic Transfer to Materials with Variable Dimensions (Wood). *Sensors*, 22(16), 6030.



## EFFECT OF LOW-POWER LASER MODES ON THE QUALITY OF THE WOOD CUT

### Summary

Birch plywood is widely used in the manufacture of decorative products. Their finishing and contouring are carried out with CO<sub>2</sub> gas lasers, the principle of which is based on the effect of a localised laser beam that disrupts the structure of the material. The impact on the material of a set of laser beam parameters (power and speed) is based on the ablation and carbonisation process. Plywood has positive characteristics: natural, environmentally friendly, high strength, and easy to process, but also disadvantages: flammable, anisotropic, structurally flawed, susceptible to changes in humidity and temperature, and low hardness and abrasion resistance. Birch plywood maintains its stability of properties when exposed to different external influences, but engraving and cutting, with various technological parameters for exposure to gaseous CO<sub>2</sub> laser radiation, disrupt the microstructure partially and/or over the entire thickness of the material. The disintegration of the material leaves a void space and a rounded edge to the remaining microstructure. The engraving and cutting processes have different operating principles and may have other effects on the edge quality. The objectives of this study are to determine the variation of the microstructure of the edge in the cutting zone by applying gaseous CO<sub>2</sub> laser radiation at different power and speeds compared with the variation of the edge in the microstructure removed by engraving. In addition, the study aims to assess the quality of the cut according to the evaluation criteria, and to determine the optimal values of the laser cutting parameters for productivity and cost benefits. The quality of the cutting zone is assessed by the following criteria: removal of the entire microstructure, the geometric pattern of changes in the edge, and the charring of the edge and the microstructure remaining in the vicinity of the cutting zone. During the cutting and engraving process, the material undergoes a rapid oxidation reaction generating heat and creating a heat-affected zone. The photothermal ablation mechanism transforms the microstructure exposed to the laser beam into dross which leaves a deep void or etch in the material, when removed. A carbonised edge with different morphological and colorimetric properties is formed at the cut site. To achieve the use of environmentally friendly materials in the manufacture of commercial products and to ensure the stability and cost-effectiveness of the technological process, a method has been developed for the assessment of the quality of the products processed by engraving and cutting

**Keywords:** CO<sub>2</sub> gas laser, birch plywood, ablation, carbonisation, cut quality.

### Informacija apie autorius

**Gitana Ginevičienė.** Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Medijų technologijų katedros lektorė. Mokslinių tyrimų kryptys: medžiagų inžinerija, mechanikos inžinerija.

El. pašto adresas: gitana.gineviciene@go.kauko.lt

**Gytis Baltrušaitis.** Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Medijų technologijų katedros asistentas. Mokslinių tyrimų kryptys: medžiagų inžinerija, mechanikos inžinerija.

El. pašto adresas: gytis.baltrusaitis@go.kauko.lt

**Žygimantas Kujalavičius.** Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Pramonės inžinerijos ir robotikos katedros lektorius. Mokslinių tyrimų kryptys: medžiagų inžinerija, mechanikos inžinerija.

El. pašto adresas: zyгимantas.kujalavicius@go.kauko.lt

**Alma Pocienė.** Kauno kolegijos Technologijų fakulteto Medijų technologijų katedros lektorė. Mokslinių tyrimų kryptys: medžiagų inžinerija, mechanikos inžinerija.

El. pašto adresas: alma.pociene@go.kauko.lt