VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
LAZERINIŲ TYRIMŲ CENTRAS

METALŲ APDIRBIMO FEMTOSEKUNDINIŲ LAZERIO IMPULSŲ VOROMIS TYRIMAI

Bakalauro studijų baigiamasis darbas

Moderniųjų technologijų fizikos ir vadybos
studijų programa

Studentas Laurynas Eičas

Leista ginti
Darbo vadovas Doc. Dr. Ona Balachninaitė

LTC direktorius Doc. Dr. Aidas Matijošius

Vilnius 2020

TURINYS

ĮVADAS ... 3
1. TEORIJOS APŽVALGA ... 4
1.1 Metalų ir lazerinės spinduliuotės sąveika ... 4
1.1.1 Dviejų temperatūrų modelis ... 4
1.1.2 Sąveika femtosekundinių impulsų atveju ... 5
1.2 Lazerinės abliacijos mechanizmai ... 6
1.2.1 Modeliai ... 6
1.2.2 Parametrai apibūdinantys abliacijos kokybę ... 7
1.2.3 Papildomi veiksniai gerinantys abliaciją ... 8
1.3 Lazerinės abliacijos impulsų voromis dėsniai ... 9
1.3.1 Impulsų generacija ... 9
1.3.2 Inkubacinis efektas ... 10
1.3.3 MHz abliacija ar GHz abliacija? ... 11
2. MOKSLINIŲ STRAIPSNIŲ FEMTOSEKUNDINIŲ LAZERIO IMPULSŲ ABLIACIJOS VOROMIS TEMA APŽVALGA ... 12
3. EKSPERIMENTO METODIKA ... 14
3.1 Eksperimentinė įranga ... 14
3.2 Tyrimo schema ... 16
4. EKSPERIMENTŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS ... 17
4.1.Abliacijos slenksčio eksperimentinis nustatymas ... 18
4.2. Suformuotų kanalų vizualinis įvertinimas ... 20
4.3. Specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio ir kanalų aukščio bei pločio santykio įvertinimas 25
IŠVADOS ... 31
LITERATŪROS SĄRAŠAS ... 33
SANTRAUKA ... 36
SUMMARY ... 37

ĮVADAS

Pastaraisiais dešimtmečiais didėjant kokybiškų medžiagų apdirbimo metodų gausai vis daugiau pramonės ir mokslininkų akių krypsta į lazerinių technologijų taikymą šioje srityje. Ypač geri rezultatai pastebimi naudojant impulsinius lazerius, kurių impulsų trukmė siekia piko- ar net femto- sekundžių eiles[1]. Naudojant tokius lazerinius prietaisus įmanoma apšvietus medžiagą vykdyti lazerinę abliaciją. Taip iš įvairių bandinių, nenaudojant didelių galios resursų, galime dideliu tikslumu išgarinti medžiagas su mažomis pažaidomis aplink norimą taikinį.

Nors šiais laikais medžiagų apdirbimo sistemų įvairovė yra plati, siekiant tikslumo, lazerinės apdirbimo sistemos turi nemažai pranašumų lyginant su kitomis tokio tipo sistemomis. Tai, kad tokios sistemos pasižymi aukštu spinduliuotės intensyvumu, žemu abliacijos slenksčiu ir koncentruotu šilumos pasiskirstymu, sukuria galimybes be jokio sąlyčio su medžiaga vykdyti jos tikslų apdirbimą kelių mikronų riboje. Ir tai stebime su įvairiomis medžiagomis[2]. Būtent dėl šių ypatybių lazerinis mikroapdirbimas yra pritaikytas šūsnyje pramonės sričių: biomedicinoje, fotonikoje, karinėje pramonėje, mikroelektronikoje ir kitose[3].

Šiame darbe didžiausią dėmesį skirsime jau esamų metodų praplėtimui ir geriausių sąlygų paieškai pasitelkiant naujausius mokslinių darbų pasiekimus. Šiuo metu daug žadantis metalų ar kitų kompozitų lazerinio apdirbimo metodas yra ultratrumpųjų impulsų vorų naudojimas, taip pagerinant šių impulsų savybes[4,5,6]. Tačiau dėl labai didelės eksperimentinių rezultatų įvairovės moksliniuose darbuose, vis dar negalime užtikrintai teigti, kad būtent šis būdas pagerina metalų apdirbimą.

Taigi, šio darbo pagrindinis tikslas yra palyginti įvairių metalų apdirbimą, išskirtinai plieno ir vario bandiniuose, naudojant moksliniuose eksperimentuose rečiau sutinkamas laisvojoje erdvėje generuojamas femtosekundinių lazerio impulsų voras ir pavienius impulsus. Kad tai pasiektume pasitelksime gautų rezultatų vizualiniu įvertinimu ir išabliuotos medžiagos pašalinimo laipsnio įvertinimu.

1. TEORIJOS APŽVALGA

1.1 Metalų ir lazerinės spinduliuotės sąveika

Lazerinės spinduliuotės sąveika su medžiaga yra kompleksinis vyksmas dėl įvairių efektų, vykstančių medžiagoje, per labai trumpus laiko momentus. Pagrindinis šios sąveikos procesas yra šviesos sugertis kietoje medžiagoje. Kaip žinome, krentanti elektromagnetinė šviesos banga dalinai atsispindi ir dalinai būna sugeriama. Būtina paminėti, kad, priklausomai nuo temperatūros, medžiagų atspindys gali kisti [7]. Metalų atveju vyksta tiesinė sugertis, kurios metu fotonai yra sugeriami elektronų ir šis sužadinimas trunka apie 100 fs. Tuomet karštieji elektronai, turėdami didesnę temperatūrą už gardelę, perduoda energiją gardelei, vyksta elektronų-fononų sąveika ir yra pasiekiama šiluminė pusiausvyra. Teigdami, kad visa sugerta energija virsta į medžiagos apdirbimo energiją, šilumos balanso lygtį galime aprašyti taip:

$$Q_a = \rho V\left(c_p \Delta T_m + L_m + c_p \Delta T_v + L_v\right) \quad (1)$$

Čia Qa – sugerta energija, ρ – medžiagos tankis, c_p – savitoji šiluma, T_m ir T_v – lydymosi ir garavimo temperatūros, L_m ir L_v – savitosios lydymosi ir garavimo šilumos.

Šiai sąveikai, ultratrumpųjų impulsų atveju, aprašyti yra naudojamas dviejų temperatūrų modelis arba išplėstinis dviejų temperatūrų modelis. Kai impulso trukmė viršija keletą pikosekundžių, galime teigti, kad pusiausvyra vyrauja viso impulso momentu ir tai priskiriame šiluminiams efektams. Tuo tarpu mūsų darbe naudojant fs trukmės impulsus laikome, kad vyksta tokie nešiluminiai efektai, kaip fotojonizacija ar daugiafotoninė sugertis [8].

1.1.1 Dviejų temperatūrų modelis

Esant lazerinės spinduliuotės sąveikai su medžiaga, ultratrumpųjų impulsų metu vyksta greita termalizacija, t.y. atsiranda skirtumas tarp gardelės T_i ir elektronų T_e temperatūrų, taigi tokį procesą galime aprašyti dviejų temperatūrų modeliu (DTM)[9]:

$$C_e \frac{dT_e}{dt} = -\frac{\partial Q(x)}{\partial x} - \gamma(T_e - T_i) + S - P_e \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2)$$

$$C_i \frac{dT_i}{di} = \gamma(T_e - T_i) - (P_i + P_c)\frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x}(P_c + P_e + P_i) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

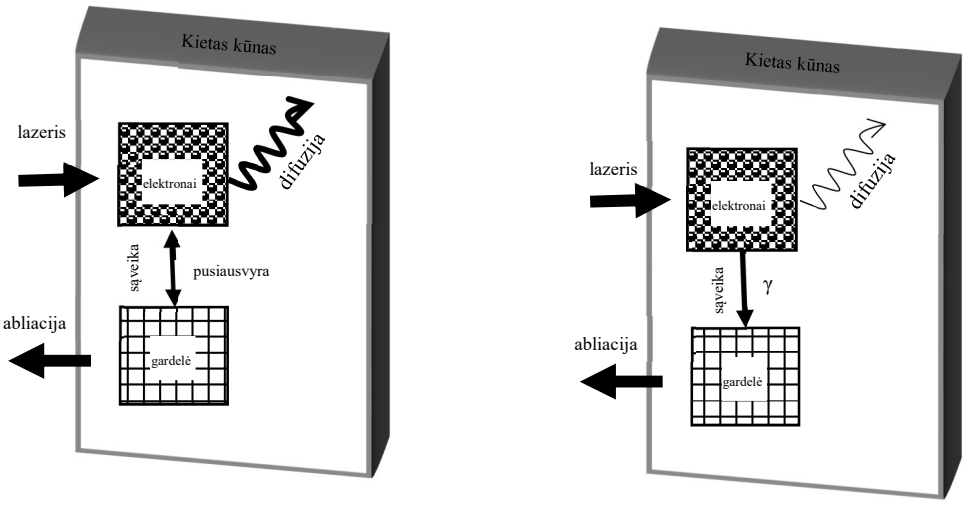
$$S = I(t) A\alpha\, e^{-\alpha x} \quad (6)$$

$$Q(x) = -k_e\left(\frac{\partial T_e}{\partial x}\right) \quad (7)$$

Čia $Q(x)$ – šilumos pernaša statmenai bandinio plokštumai, C_e – elektronų šiluminė talpa tūrio vienetui, P_e – karštų elektronų slėgis, S – lazerinio šaltinio šildymo sąlyga $I(t)$ – lazerio spinduliuotės intensyvumo laikinė funkcija, A – medžiagos pralaidumas ($A = 1 - R$), R – atspindys, α – sugerties koeficientas, C_i – gardelės šiluminė talpa tūrio vienetui, γ – parametras, charakterizuojantis elektroninę-fononinę sąveiką, k_e – elektronų šiluminis laidumas, P_i – karštų jonų slėgis, P_c – šaltų jonų slėgis, ρ – išgaravusios medžiagos tankis, u – išgaravusios medžiagos greitis. Pirmosios dvi diferencialinės lygtys aprašo energijos tvermės dėsnį, o trečia ir ketvirta - išmetamos medžiagos charakteristikas. Dažnai šis modelis yra suprastinamas, atsisakant medžiagos plėtimosi, dėl slėgių apskaičiavimo sudėtingumo ir tuomet DTM modelis yra aprašomas (2) ir (3) formulėmis be $\delta u/\delta x$ [9].

1.1.2 Sąveika femtosekundinių impulsų atveju

Femtosekundinių impulsų sąveika su medžiaga supaprastintai yra atvaizduota 1 pav. Lazerinė spinduliuotė sužadina metalų laidumo juostoje esančius elektronus, kurie įkaista dėl atvirkštinės stabdomosios spinduliuotės (angl. Inverse Bremstrahlung). Tai vyksta, kai elektronai, patekę į lazerinės spinduliuotės magnetinį lauką pradeda judėti su pagreičiu ir tuomet susidūrimų su gardelės atomais metu kinetinę energiją paverčia į šiluminę, įvyksta termalizacija. Šis elektronų įkaitimas įvyksta labai greitai, lazerio impulso momentu gardelė išlieka šalta, taigi šilumos perdavimas prasideda tik pasibaigus impulsui (ps laiko skalėje).



1 pav. Kietų kūnų sąveikos su lazerine spinduliuote schema: (a) ilgų impulsų veikoje, (b) ultra-trumpųjų impulsų veikoje[9].

Ilgųjų impulsų metu elektronų ir atomų sistemos išlieka pusiausvyroje, nes išlaiko sąlygą $T_e = T_i$, ir elektronų relaksacijos laikas tampa artimas elektronų – fononų sąveikos laikui $\tau \approx \tau_{e\text{-}f}$. Tuo tarpu,

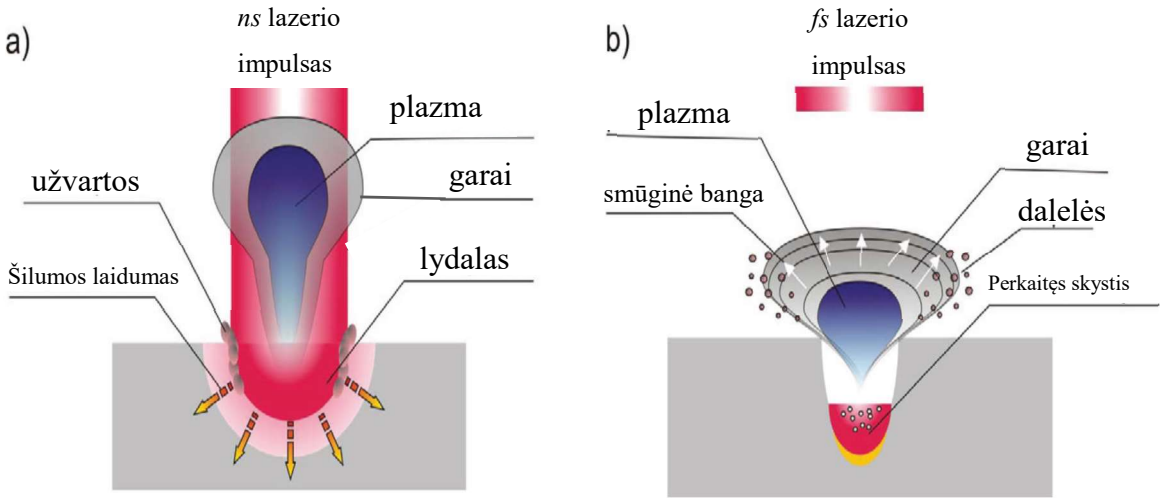
kaip minėjome, ultratrumpųjų impulsų metu elektronų sistema perkaista ($T_e >> T_i$), tuomet sąveika tarp elektronų jų subsistemoje apsprendžia elektronų relaksacijos laiką $\tau \approx \tau_{e-e} \sim T_e^{-2}$. Iš to seka, kad elektronų šiluminio laidumo ($k_e \sim T_e^{-1}$) ir šiluminės difuzijos ($D = \frac{k_e}{C_e} \sim T_e^{-2}$) lygtys pilnai aprašo šilumos mažėjimą didėjant šviesos srautui [9].

1.2 Lazerinės abliacijos mechanizmai

1.2.1 Modeliai

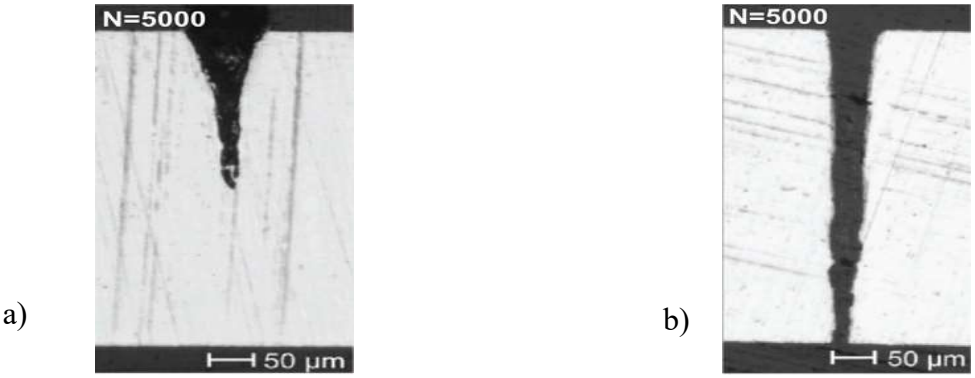
Lazerinė abliacija – tai medžiagos pašalinimas iš bandinio, jam sugėrus lazerinę spinduliuotę. Šis procesas įmanomas tiek su nuolatinės veikos lazeriu, tiek su impulsiniu, tačiau šiame darbe apsiribosime tik pastarosios veikos metodais. Kaip teigėme anksčiau, medžiagų sąveika su spinduliuote priklauso nuo impulso trukmės. Ilgųjų impulsų atveju, abliacijoje dominuoja tokie mechanizmai, kaip šilumos laidumas, lydymasis, garavimas ir plazmos formavimasis. Nors ir nuo medžiagoje pasiekiamos temperatūros priklauso, kuris mechanizmas dominuos labiausiai, svarbiausi išlieka: lydalo išstūmimas ir išgarinimas.

Tuo tarpu, trumpųjų impulsų metu, kaip ir anksčiau užsiminėme, dėl trumpų laiko tarpų, spinduliuotės ir medžiagos sąveikos procesai skiriasi. Dėl pasireiškiančios daugiafotoninės sugerties, svarbiausias tampa pirmajame skyriuje minėtas DTM modelis aprašyti spinduliuotės sąveiką su medžiaga. Vienas iš svarbiausių šiluminių procesų trumpųjų impulsų abliacijoje – lydymasis, naudojant femtosekundinius impulsus tampa mažiau ryškus. Šiame abliacijos procese, dėl aukštos temperatūros, slėgio ir tankio sankaupos, jonizuotos dalelės pasiekia didelį greitį. Tačiau dėl itin trumpo sąveikos laiko, medžiaga nesugeba išgaruoti pastoviu greičiu ir pereina į perkaitinto skysčio būseną. Taip šis suslėgtas mišinys smūgine banga greitai palieka taikinį. Šis mechanizmas dar vadinamas faziniu sprogimu, jis pasireiškia, kai šviesos srautas yra didesnis už slenkstinį. Tuo tarpu energijos vertėms, artimoms slenkstinei, medžiagoje pasireiškia Kulono sprogimas[10]. Šis skirtingų impulso trukmių mechanizmų skirtumas yra pavaizduotas 2 paveikslėlyje.



2 pav. Abliacijos mechanizmai ilgųjų impulsų (ns) ir trumpų impulsų (fs) metodais[11]

Nors prie trumpųjų impulsų priskiriami pikosekundiniai ir femtosekundiniai impulsai, mūsų darbe buvo naudojami išskirtinai femtosekundiniai impulsai, kurių metu galima pasiekti preciziškesnius, siauresnius ir gilesnius kanalus metale, lyginant su kitų trukmių impulsais 3 pav.



3 pav. Išabliuoti krateriai a) pikosekundiniu lazeriu, b) femtosekundiniu lazeriu [11]

1.2.2 Parametrai apibūdinantys abliacijos kokybę

Specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis

Remiantis DTM, kuriame abliacijos gylis logaritmiškai priklauso nuo spinduliuotės srauto, specifinį medžiagos pašalinimo laipsnį *dV/dE* (tariant, kad lazerio pluoštas Gausinio profilio) galime paskaičiuoti pagal šią formulę [4]:

$$\frac{dV}{dE} = \frac{dV}{dt \cdot P_{vid}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\delta}{\varphi_0} \cdot ln^2\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{sl}}\right) \tag{8}$$

Kur δ - energijos prasiskverbimo gylis, φ_{sl} – slenkstinė lazerinio srauto vertė (abliacijos slenkstis), P_{vid} – vidutinė lazerinės sistemos išvadinė galia, φ_0 – maksimalus lazerinės spinduliuotės srautas(atitinkantis Gausinio pluošto centrą). Jo vertę galime rasti pagal formulę[12]:

$$\varphi_0 = \frac{2 \cdot E_{imp}}{\pi \cdot \omega_0^2} \tag{9}$$

Čia E_{imp} – impulso energija, ω_0 – lazerio pluošto spindulys $1/e^2$ pluošto aukštyje. Tačiau pasirinkus abliacijos profilį eksperimentiškai, formulę (8) galime perrašyti į tokią formą[4]:

$$\frac{dV}{dE} = \frac{\Delta V}{E_{imp}} = \frac{h \cdot p^2}{N_{sken}} \cdot \frac{f_p}{P_{vid}} = \frac{h \cdot p^2}{N_{sken}} \cdot \frac{1}{E_{imp}} \tag{10}$$

Čia N_{sken} – lazerio praėjimų skaičius, h ir p išabliuotos formos gylio ir pločio dėmenys.

Eksperimentinis abliacijos slenksčio nustatymas

Eksperimentiškai slenkstinis energijos tankis gali būti nustatytas pasinaudojant Liu ir kt.[13] pristatytu metodu. Laikant, kad lazerio spinduliuotės energijos skirstinys atitinka Gausinį pasiskirstymą erdvėje, galime atitinkamai rasti slenkstinę pluošto spindulio vertę. Taigi, dėl eksperimentinių matavimų paprastumo, pakeitus spindulį į diametrą, gauname tokią lygtį:

$$D^2 = 2\omega_0^2 \ln\left(\frac{\varphi_0}{\varphi_{sl}}\right) \tag{11}$$

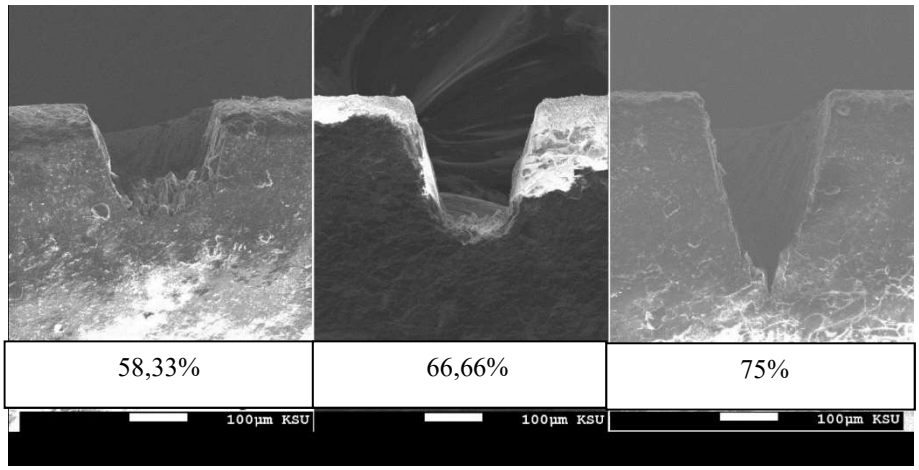
Čia D – medžiagoje išabliuoto kraterio diametras. Tuomet apšviečiame medžiagą skirtingos energijos impulsais ir, išmatavę susidariusių kraterių diametrus, atidedame priklausomybę $D^2(E_{imp})$ ir parenkame logaritminę skalę. Gautus duomenis aproksimavus tiese, iš jos polinkio vertės lygios $2\omega_0^2$, pasinaudodami formule (9), randame abliacijos slenksčio vertę.

1.2.3 Papildomi veiksniai gerinantys abliaciją

Siekdami pagerinti abliacijos kokybę, galime reguliuoti lazerinės sistemos parametrus ar fizikinius metodus taip, kad jie anuliuotų arba sumažintų abliacijos metodų sukeliamus trūkumus. Kaip buvo pastebėta M. K. Mohammed ir kt.[14] tyrimuose, ėsdinamų kraterių kokybei įtakos turi praėjimų skaičius, kuris turėtų būti parinktas pagal mažiausią gylio vertę vienam praėjimui ir derinant tai su kuo didesniu praėjimų skaičiumi. Tame pačiame darbe buvo pastebėta, kad lazerio impulsų persiklojimo procentas taip pat yra svarbus faktorius. Jis išreiškiamas:

$$Impulsų\ persiklojimas = \left(1 - \frac{v}{f \cdot D}\right) \times 100 \tag{12}$$

Čia v – skenavimo greitis, f – impulsų pasikartojimo dažnis, D – lazerio pluošto diametras. Naudojant tos pačios energijos impulsus, nuo jų persiklojimo parinkimo gali kisti abliuojamo kraterio profilis (4 pav.).



4 pav. Išabliuotų kraterių profiliai esant skirtingiems impulsų persiklojimams. Šviesos srautas 169,76J/cm^2[14].

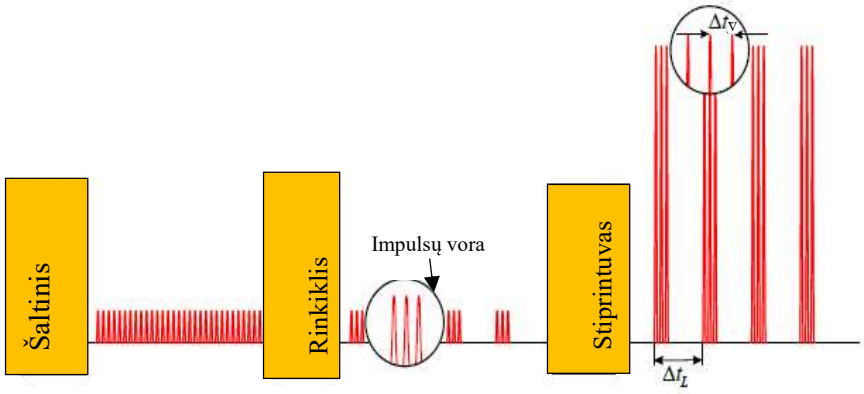
Dažna problema, su kuria susiduriama abliuojant medžiagas lazeriniais impulsais yra išmetamos medžiagos dalelės. Šios neišsilydžiusios medžiagos dalys keičia taikinio sugerties ir sklaidos koeficientus ir taip tiesiogiai mažina lazerinio apdirbimo kokybę. Vienas iš metodų jų pašalinimui nuo bandinio yra naudojant oro siurblį. Kitas būdas yra bandinio patalpinimas į kalio hidroksido ar vandenilio fluorido tirpalą, taip išvengiant išmetamų dalelių sukeliamų defektų[15].

1.3 Lazerinės abliacijos impulsų voromis dėsniai

1.3.1 Impulsų generacija

Siekiant padidinti lazerinės abliacijos našumą yra naudojamas impulsų vorų metodas. Šiuo metodu generuojamos 2 ar daugiau atskirų impulsų sekos, atsikartojančios laike kas Δt_L, o periodas tarp atskirų impulsų voroje yra Δt_v, kuris yra (ns-ps) riboje. Norint pasiekti šitokią vorų generaciją, įmanomos įvairios lazerinės sistemos konfigūracijos. Siekiant sukurti voras, galima naudoti įvairias sistemas bei optines konfigūracijas, tokias kaip: AOM (angl. acousto-optic modulator), MOPA (angl. master oscillator power amplifier), Mikelsono interferometras ir k.t.

Plačiausiai naudojami femtosekundiniai lazeriai yra parengti pagal MOPA principinę schemą (6 pav.), todėl šį būdą galime taikyti kaip pavyzdinį. Kaip pavaizduota paveikslėlyje, impulsų rinkiklis sumažina šaltinio osciliatoriaus pasikartojimų dažnį *fš* iki lazerinėje sistemoje pasirenkamo f_L dažnio. Ir nors dažniau rinkiklis yra sukonfigūruojamas praleisti tik pavienius impulsus, jis taip pat turi parinktį praleisti *N* impulsų paketą, kuris tolesniame etape yra stiprinimas. Taip išsprendžiama ultratrumpųjų impulsų mažos energijos problema[16].



5 pav. Impulsų vorų generavimo principinė schema[4]

Tačiau jeigu lazerinė sistema neturi vorų generavimo parinkties, jas galime suformuoti pasinaudodami optinio vėlinimo linija (angl. optical delay line). Jos veikimo principas yra paremtas šviesos sklidimu ore. Optiniu šviesos dalikliu padalintas šviesos impulsas praeiną papildomą kelią, tuo būdu sukurdamas laikinį vėlinimą tarp pavienių impulsų. Taigi šiuo būdu keisdami šviesos nueitą kelią galime sukurti skirtingų vėlinimų voras nuo *ns* iki *ps* trukmės.

1.3.2 Inkubacinis efektas

Tobulėjant ultratrumpųjų impulsų lazerių galimybėms – vidutinei galiai siekiant 100W ar pasikartojimo dažniui viršijant MHz ribą[17] – atsiranda vis daugiau terminių pažeidimų dėl šilumos akumuliacijos. Tai ypač dažnas reiškinys naudojant aukštus dažnius [>100kHz]. Dėl sumažėjusio laiko tarpo tarp pasikartojančių impulsų, jų sugeriama energija šilumos pavidalu, medžiagoje nebeturi laiko difunduoti iš veikiamo taško ir taip abliacijos regionas patiria negrįžtamus pažeidimus[18]. Šis aplinkinės medžiagos lydymasis ir skilinėjimas mažina efektyvumą ir apdirbimo kokybę.

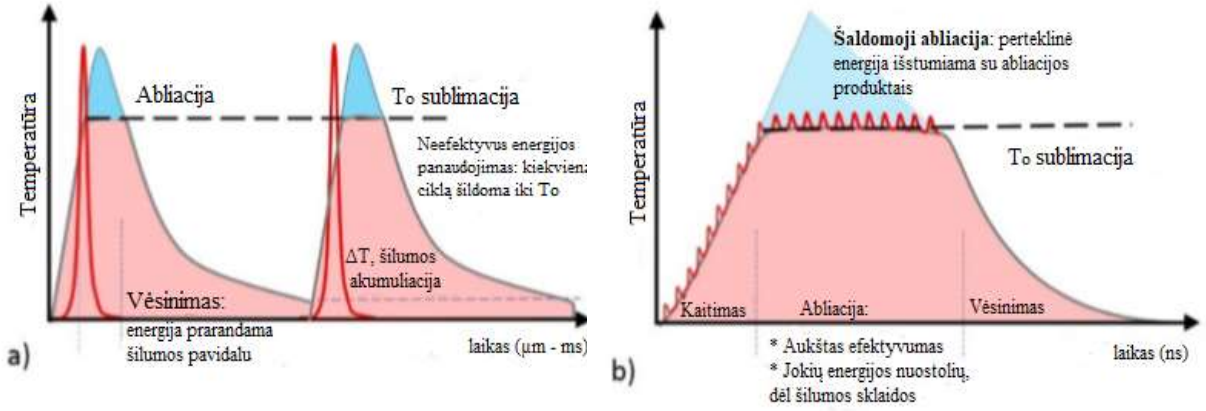
Siekiant išspręsti šią problemą, pasitelkiamas jau anksčiau minėtas impulsų vorų metodas. Šiuo būdu pasiekiamas mažesnis šilumos pernešimas, ko sekoje abliacijos metu sumažėja terminių akumuliacijos pažeidimų. Nors šis būdas teikia daug vilčių, visi fiziniai procesai, vykstantys tarp lazerio ir medžiagos, dar nėra išsiaiškinti. Vienas iš tokių reiškinių yra mažėjantis abliacijos slenkstis dėl „inkubacinio efekto“[2].

Šis efektas stebimai mažina abliacijos slenkstį didėjant *N* impulsų skaičiui voroje. Taip pat, vykdant modeliavimą buvo pastebėta, kad, didėjant impulsų kiekiui, kartu mažėja temperatūra, kurios reikia metalo gardelei pasiekti lydymosi temperatūrą, taip padidinant inkubacinį efektą. Visa tai eksperimentiškai buvo patvirtinta *ns* ir *ps* trukmės vėlinimams, o tiriant *ps* vėlinimus buvo stebima, kad inkubacija yra mažesnė 1,5 *ps* vėlinime nei 3 *ps* [19].

Ir, nors fizikinis šio efekto principas nėra išsiaiškintas, mokslininkai jį priskiria prie kitų lazerinės spinduliuotės sukeliamų paviršinių pažeidimų akumuliacijos kategorijos. Sun ir kt.[20] mano, kad šis reiškinys vyksta dėl lazerinės spinduliuotės sugerties medžiagose pokyčio keičiantis šviesos srautui.

1.3.3 MHz abliacija ar GHz abliacija?

Kitas svarbus vorų metodo privalumas yra galimybė generuoti impulsus su gigaherciniu pasikartojimo dažniu, taip pasiekiant visiškai naują abliacijos tipą, vadinamąją šaldomą abliaciją (angl. ablation cooling) [6]. Šis tipas, manoma, padidina efektyvumą lyginant su abliacija, pasiekiama naudojant mažesnio dažnio impulsus (6 pav.).



6 pav. Medžiagos temperatūros kitimas ją paveikus ultratrumpųjų impulsų lazeriu, esant skirtingiems impulsų pasikartojimo dažniams: a) MHz, b)GHz.[21]

Kaip matome iš paveikslėlio naudojant mažesnio pasikartojimo dažnio impulsus, norint pasiekti abliaciją užtenka tiek energijos, kad sublimacinė temperatūra T_o būtų pasiekta atitinkamai. Visa perteklinė energija tuo tarpu virsta išmetamų dalelių kinetine energija. Todėl turime tik ganėtinai artimą slenkstinei energijai ribą, kai abliacija tampa optimaliausia. Svarbiausi skirtumai atsiranda po abliacijos su likusia taikinyje šiluma, kHz atveju ji išsisklaido iki kito impulso, tuo tarpu MHz atveju dėl šilumos akumuliacijos taikinyje atsiranda įvairių terminių pažeidimų. Kad to išvengtume, kaip matome (6 pav. b), galime pasinaudoti GHz impulsais, taip išvengdami šilumos sklaidos sukeliamų problemų. Be visa to, dėl abliacijos jau su karšta medžiaga, dirbame energijai esant žemiau slenkstinės energijos[19].

2. MOKSLINIŲ STRAIPSNIŲ FEMTOSEKUNDINIŲ LAZERIO IMPULSŲ ABLIACIJOS VOROMIS TEMA APŽVALGA

Pastarąjį dešimtmetį lazerinės abliacijos specialistai, ieškodami geresnių sąlygų, didelį dėmesį kreipia į naujus metodus, iš kurių vienas yra abliacija impulsų voromis. Stebėtini rezultatai matomi jais paveikiant dielektrines medžiagas ar jų kompozitus[22], tačiau nemažai bandymų yra atlikta ir su metalais siekiant pagerinti jų apdirbimo kokybę, nors juose ne visada pagerėja abliacijos kokybė ir efektyvumas.

C. Emmelmann ir kt.[5] ieškojo, kokie parametrai turi įtakos norint pagerinti abliacijos laipsnį ir sumažinti medžiagos šiurkštumą. Tam jie pasitelkė Ishikawa diagramą ir Shainin analizės metodą, siekdami atrasti kurių parametrų konfigūracija yra svarbiausia abliacijoje. Šiame eksperimente jie naudojo pikosekundinį lazerį ir pastebėjo, kad lazerio išvadinė galia ir voros su 800 kHz pasikartojimo dažniu, kaip abliacijos būdo, parinkimas labiausiai keitė abliacijos laipsnį. Kitas svarbus, bet mažiau įtakos turėjęs parametras buvo skenavimo greitis. Galime teigti, jog radus geriausias galios ir voroje esančių impulsų skaičiaus kombinacijas galime tikėtis pagerinti metalų apdirbimo efektyvumą.

Kita mokslininkų grupė, vadovaujama Y. Ren ir kt.[23], pasitelkė teorinius modelius, paremtus DTM bei papildytus abliacijos mechanizmų paklaidomis, siekdami patikrinti ar impulsų voros keičia abliacijos gylį. Sulyginus sukurto modelio pavienių impulsų metu gautas vertes su eksperimentinėmis reikšmėmis, buvo gauta ryški koreliacija, todėl modelis buvo naudojamas ir impulsų vorų simuliacijai. Ši simuliacija atskleidė, kad naudojant 120 *fs* lazerio impulsus ir parinkus impulsų pasikartojimo periodą didesnį už 50 *ps*, stebimas ryškus abliacijos gylio padidėjimas naudojant impulsų voras.

Vienus iš pirmųjų svaresnių eksperimentinių bandymų galime priskirti C. Kerse ir kt.[6]. Jo komanda pasitelkė jau anksčiau minėtą „šaldomosios abliacijos“ reiškinį tirti abliacijos efektyvumą varyje ir silicyje. Jie išsiskyrė tuo, kad pirmieji naudojo femtosekundinį, 800 *fs* impulsų trukmės lazerį, ir voroje esančių impulsų vėlinimą rinkosi 1,7 GHz. Taip pat jie teigė, kad pasiekė net 2000 kartų didesnį apdirbimo efektyvumą lyginant su pavieniais impulsais. Tačiau šie rezultatai kelia klausimą, nes pavieniais impulsais atlikti matavimai buvo su skirtingais lazeriniais parametrais nei naudojant voras. Be visa to, abliacija buvo vykdoma tik išabliuojant duobutes, tai vadinama „punching“ technika. Kuri, kaip vėliau buvo teigiama H. Matsumoto ir kt.[12] bandymuose, vienintelė pasižymi padidėjusiu abliacijos efektyvumu. Tuo tarpu tokie abliacijos metodai, kaip raižymas (angl.: scribing) ar frezavimas (angl.: milling), pasiekia tik mažesnį abliacijos efektyvumą, dėl skirtingų lydalo srauto mechanizmų.

Vis dėlto ryškiausių pasiekimų šioje srityje pasiekė B. Neuenschwander ir kt. [4], eksperimentiškai tikrinę kaip abliacijos impulsų voromis metodas keičia specifinį pašalinimo laipsnį, paviršiaus kokybę ir šilumos sankaupos mechanizmus plieno ir vario bandiniuose. Eksperimentas buvo atliekamas su 1064nm bangos ilgio ir 10ps trukmės impulsais bei su 1030nm bangos ilgio ir 350fs trukmės impulsais. Impulsų voroje skaičius buvo keičiamas nuo 1 iki 10, o pasikartojimo trukmės siekė 12ns pikosekundinių bandymų metu ir 20ns femtosekundinių metu, kas nesiekia anksčiau minėto „šaldomosios abliacijos“ dažnio. Plieno atveju specifinis pašalinimo laipsnis naudojant voras visada būdavo mažesnis negu pavieniais impulsais. Esant aukštoms šviesos srauto vertėms jis padidėdavo, bet tuo pačiu sumažindavo paviršiaus kokybę dėl terminių pažeidimų. Išskirtinai varyje buvo stebimas net 20% padidėjimas 3 impulsų voroje lyginant su pavieniais impulsais. T. Kramer ir kt. [24] tęsė B. Neuenschwanderio tyrimus su variu ir patvirtintino ankstesnius pastebėjimus, kad dviejų impulsų vora su 24ns pasikartojimu tarp impulsų sumažina efektyvumą apie 50%. Kita vertus, buvo pastebėta, kad varyje, varijuojant centrinio impulso voroje amplitudę tik konfigūracijoje, kai jo energija siekia tarp 100% ir 75% pavienio impulso energijos, abliacijos efektyvumas 3 impulsų voroje viršija pavienių impulsų efektyvumą apie 20%.

Tolesniuose jų tyrimuose [25] eksperimentams buvo panaudoti ir kiti metalų bandiniai: aukso ir sidabro. Tačiau efektyvumas ir juose buvo žemesnis lyginant su pavieniais impulsais. Mokslininkams pavyko išsiaiškinti, kad mokslo straipsniuose minimas abliacijos efektyvumo pagerėjimas priklauso tik nuo to impulso voroje, kurio šviesos srautas artimiausias optimaliam šviesos srautui. Bendru atveju impulsų voros mažina abliacijos efektyvumą. Tik varyje naudojant trijų impulsų vorą, buvo patikslintas jau anksčiau gautas efektyvumo pagerėjimas iki 16%. Viename iš naujausių publikuotų darbų mokslininkai išbandė ir žalvarį, tačiau ir jame buvo stebimas ir kitose medžiagose stebėtas ryškus abliacijos efektyvumo sumažėjimas [26]. O pačiame naujausiame šios komandos darbe [27] jau buvo atsiribota nuo metalo bandinių – buvo atlikti tyrimai su amorfinės anglies dangomis, kuriose specifinis pašalinimo laipsnio padidėjimas buvo stebimas naudojant impulsų voras. Taip svarbus pastebėjimas buvo padarytas atliekant paviršiaus kokybės analizę, kai buvo pastebėtos platesnės medžiagos sankaupos aplink taikinį naudojant voras dėl pasiekiamos aukštesnės temperatūros.

Tuo tarpu M. Domke ir kt.[28], atlikę bandymus su voromis, kurių pasikartojimo dažnis 154 MHz, taip pat užtikrintai teigė, kad silicis pasižymėjo padidėjusiu abliacijos efektyvumu, o varis ir plienas – ne. Įdomu tai, kad mokslininkai pastebėjo, jog naudojant femtosekundinių impulsų voras, susidarančios medžiagos sankaupos primena sankaupas atsirandančias naudojant nanosekundinius impulsus. Kitą svarbų paviršiaus kokybės faktorių pastebėjo Giannuzzi ir kt.[29]. Naudodami 238 *fs* ir 200 kHz lazerinę sistemą jie nustatė, jog naudojant impulsų voras ir parinkus impulsų vėlinimą nuo

1,5 ps iki 20 ps, paviršiuje visada susidaro raibuliai, o jų dydis ir periodiškumas tiesiogiai priklauso nuo impulsų skaičiaus ir vėlinimo voroje.

Kita vertus, nei viename iš publikuotų darbų nebuvo naudojamos begalybėje nykstančios impulsų voros, kurių generavimo metodas gali būti pasirenkamas kaip pigesnė alternatyva už voras generuojantį lazerį. Taip pat tik keletas darbų išnaudoja vėlinimą, siekiantį <1 *ns*, kuris lengvai pasiekiamas naudojant mūsų schemą. Tai leidžia mums patikrinti ar įmanoma tokia optimali energijų pasiskirstymo voroje konfigūracija, panaudojant skirtingus daliklius, kurioje efektyvumas būtų pasiekiamas aukštesnis nei pavieniais impulsais.

3. EKSPERIMENTO METODIKA

3.1 Eksperimentinė įranga

Lazeris

Šiame darbe buvo naudojamas femtosekundinis lazeris CARBIDE CB5 („Šviesos konversija“), aušinamas oru (7 pav.). Maksimali naudoto modelio išvadinė galia siekia 5W, tačiau dėl aplinkos sąlygų ir sistemos nukrypimų, šiame darbe išvadinė galia buvo mažesnė. Taip pat šis lazeris gali būti konfigūruojamas pagal galimybes leidžiamas naudojamos programinės įrangos. Tai yra, impulso trukmė gali būti keičiama 290fs – 10ps ruože, pasikartojamo dažnis iki 1 MHz, taip pat galimas pasirinkimas tarp 4 generuojamų harmonikų (1 harmonikos centrinis bangos ilgis 1030nm). Be visa to, šis lazeris turi įrengtą išvadinės spinduliuotės slopintuvą. Šis lazeris patogus lazerinei abliacijai, nes lazerio pluoštas yra TEM_{00} skersinės modos ir pasižymi aukštu pluošto kokybės parametru (M^2<1.2).



7 pav. CARBIDE CB5 lazeris su harmonikų generavimo moduliu[30].

Galvanoskeneris

Lazerio pluoštui ant bandinio nukreipti buvo naudojamas dviašis galvanoskeneris intelliSCAN 10 („Scanlab“), pateiktas 8 paveikslėlyje. Jame esančių motorizuotų dviejų dielektrine danga padengtų veidrodžių pagalba, pasinaudojant programine įranga SCA, galima tiksliai (standartinis nuokrypis <2µrad) suformuoti norimus vaizdus. Aukšta skenavimo kokybė išlieka

skenavimo greičiui esant <1 m/s. Galvanoskeneris taip pat turi keičiamą fokusavimo lęšį, šiame darbe naudotas buvo f - theta 110 mm židinio nuotolio lęšis.



8 pav. intelliSCAN 10 galvanoskeneris[31].

Optinis profilometras

Eksperimento metu suformuoti grioveliai metalo bandiniuose buvo tiriami profilometru PLμ 2300 („Sensofar“). Prietaisas turi platų funkcijų pasirinkimą bandiniams tirti, tokių kaip: topografinis paviršių vaizdas, 2D – 3D profilių įvertinimas ir kt. Taip pat šis profilometras pasižymi aukštais preciziško matavimo parametrais: 800 μm/s vertikaliu skenavimo greičiu, 0,1 nm vertikalia skyra, 5 skirtingais fokusuojančiais objektyvais bei motorizuota pozicionavimo sistema. Darbe teko atsižvelgti į šio prietaiso skenavimo trūkumą didėjant išabliuotų struktūrų gyliui – profilometras nesugeba tiksliai išmatuoti gylio, nes kameros šviesos šaltinis nesugeba pasiekti griovelių dugno dėl šviesos sklaidos. Todėl apsiribojome iki 35 – 40 μm gylio griovelių matavimais.



9 pav. PLμ 2300 profilometras [32].

Optinis - fluorescencinis mikroskopas

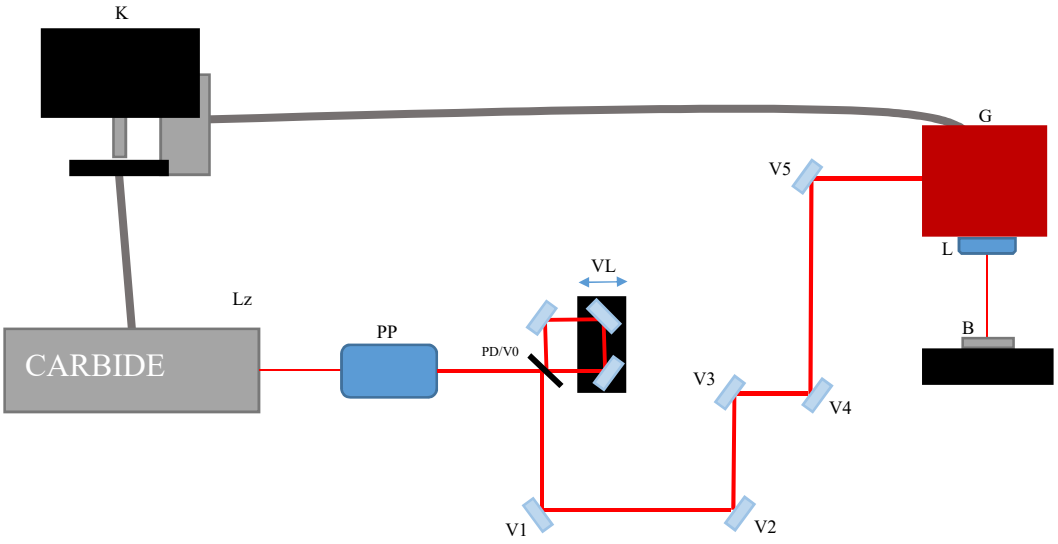
Taip pat šiame darbe griovelių tyrimams ir jų nuotraukoms gauti buvo naudojamas optinis - fluorescencinis mikroskopas BX51 („Olympus“) su integruota CCD kamera („Qimaging“), pavaizduotas 10 paveikslėlyje. Mikroskopas turi trijų objektyvų pasirenkamą didinimą, kurių pagalba objektų vaizdai gali būti padidinti 10, 20 ar 40 kartų.



10 pav. Optinis – fluorescencinis mikroskopas Olympus BX51.[33]

3.2 Tyrimo schema

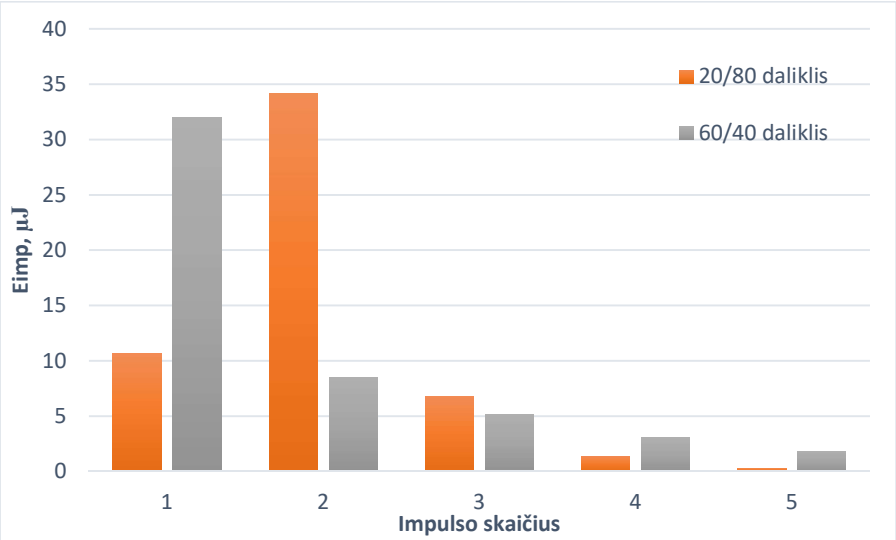
Eksperimento schema yra pavaizduota žemiau esančiame 11 paveikslėlyje. Šioje schemoje įmanomas dviejų schemų pasirinkimas pagal tyrimo metodą: pavienių impulsų metodas, impulsų voromis metodas. Pirmuoju metodu lazerinė spinduliuotė, žymima raudona linija, iš CARBIDE lazerio (Lz) sklinda pro pluošto plėstuvą (PP) ir pasiekia veidrodį (Vo). Tuomet pluoštas, atsispindėjęs nuo kitų toliau išdėstytų veidrodžių (veidrodžiai pakreipti 45^{o} laipsniu kampu) , pasiekia galvanoskenerį (G). Jame įtaisytų dviejų kompiuteriu valdomų veidrodėlių pagalba lazerio šviesa nukreipiama į objektyvą (f – theta lęšis, židinio nuotolis 110mm)(L), kuris sufokusuoja lazerio pluoštą į bandinį (B), padėtą ant mechaniškai reguliuojamo padėklo. Padėklo aukštis bei padėtis yra reguliuojama rankiniu būdu, keičiant aukštį ieškoma padėtis ties kuria sufokusuotas pluoštas pradeda abliaciją. Lazerio parametrai ir galvanoskenerio padėtis yra valdoma kompiuteriu (K).



11 pav. Eksperimento schema. K – kompiuteris, valdantis lazerio ir galvanometro parametrus, LZ – lazeris, PP – pluošto plėstuvas, PD – pluošto daliklis (pavienių impulsų režimu pakeičiamas

veidrodžiu V0), VL – vėlinimo linija (retroreflektorius), V1, V2, V3, V4 ir V5 – veidrodžiai, G – galvanoskeneris, L – f – theta lęšis, B – tiriamasis bandinys.

Antruoju metodu veidrodis (Vo) yra pakeičiamas pluošto dalikliu (PD), tuo būdu lazerio pluoštas yra padalijamas į dvi dalis, viena dalis yra nukreipiama į optinio vėlinimo liniją (VL), kurioje retroreflektoriaus veidrodžių pagalba spindulys nueina papildomą kelią ir vėl krenta į pluošto daliklį, nuo kurio vėl dalis spinduliuotės atsispindi ir grįžta į vėlinimo liniją, o dalis patenka toliau į optinę sistemą. Šis ciklinis veikimas ir sukuria anksčiau aptartą begalybėje nykstančią impulsų vorą. Kadangi vėlinimo linijoje esančio retroreflektoriaus padėtį erdvėje galima keisti, taip galime parinkti impulsų voroje vėlinimą pikosekundžių ar nanosekundžių riboje. Šis impulsų energijų pasiskirstymas voroje naudojant skirtingus daliklius yra pavaizduotas 12 pav.



12 pav. Impulsų voroje generuojamų begalybėje nykstančių impulsų energijų skirstiniai, naudojant skirtingus pluošto daliklius.

4. EKSPERIMENTŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

Atlikto eksperimento metu tyrėme pavieniais femtosekundiniais lazerio impulsais ir jų voromis abliuotų metalų – plieno ir vario – kokybę ir apdirbimą gerinančius faktorius. Pirmiausia kiekvienam bandiniui buvo atlikti jų abliacijos slenksčio matavimai bei kartu rastos pluošto spindulio vertės. Nustačius šias vertes buvo formuojami kanalai mūsų pasirinktuose metaluose.

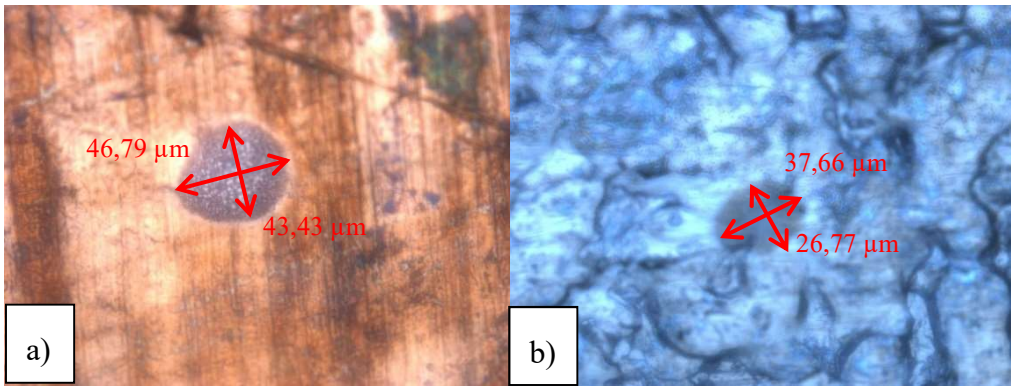
Šie mūsų bandymai buvo atliekami laboratorijoje esant įprastoms sąlygoms, kambario temperatūroje ir esant normaliam atmosferos slėgiui. Lazerinės spinduliuotės židinys bandiniuose buvo reguliuojamas rankiniu būdu, pasitelkiant mechaninį poslinkio stalelį. Lazerio pluoštu, galvanoskenerio pagalba, jį valdant programine įranga SCA, buvo suformuojami 3mm ilgio kanalai su 0,5mm tarpu tarp jų. Šie grioveliai buvo abliuojami esant skirtingiems skenavimo greičiams, lazerio spinduliuotės dažniui esant 60kHz, bangos ilgiui lygiam 1030nm. Skenavimo greičio vertės: 300 mm/s, 400 mm/s, 500 mm/s, 800 mm/s, 900 mm/s, 1000 mm/s.

Matavimai buvo kartojami palaipsniui keičiant lazerio išvadinę galią nuo 0,4W iki 3,2W. Visa tai buvo pakartojama su pavieniais impulsais ir su jų begalybėje nykstančiomis voromis naudojant 60/40% ir 20/80% daliklius. Impulsų voroje vėlinimas buvo apie 1 *ns*. Siekiant įvertinti griovelių vizualinę kokybę skenuojančio elektroninio mikroskopo (SEM) pagalba buvo stebimas jų dugno ir paviršiaus reljefas.

4.1.Abliacijos slenksčio eksperimentinis nustatymas

Darbe siekiant nustatyti metalų abliacijos slenksčio vertes φ_{sl} ir lazerio pluošto spindulį ω_o, kiekvieno metalo apdirbimo metu naudojome jau anksčiau minėtą Liu ir kt.[10] metodą. Šiuo metodu pirmiausia turėjome metalų paviršiuose suformuoti kraterius pavieniais impulsais ir išmatuoti jų diametrus. Kadangi mūsų naudotas CARBIDE lazeris turi impulsų parinkimo funkciją, mes galėjome metalus apšaudyti vienetiniais impulsais, sumažindami lazerio dažnį iki 1Hz.

Taigi, suformavę kraterius esant skirtingoms impulso energijoms, išmatavome jų diametrus. Šį procesą atlikome optiniu - fluorescenciniu mikroskopu. Skirtingose medžiagose suformuoti kraterių pavyzdžiai pateikti 13 pav. Kaip matome iš paveikslėliuose pavaizduotų kraterių, jų forma yra deformuota ir nėra taisyklingas apskritimas, kaip turėtų būti naudoto Gausinio pluošto atveju. Ši kraterio elipsinė forma, tikėtina, susidarė dėl darbe naudoto f-theta lęšio sukeliamo pluošto astigmatizmo ar šiluminių efektų pačiame lazeriniame bloke. Dėl šios priežasties abliacijos slenksčio matavimo modelį teko pakoreguoti R. Ledesma ir kt. [34] pasiūlytu skaičiavimo metodu.

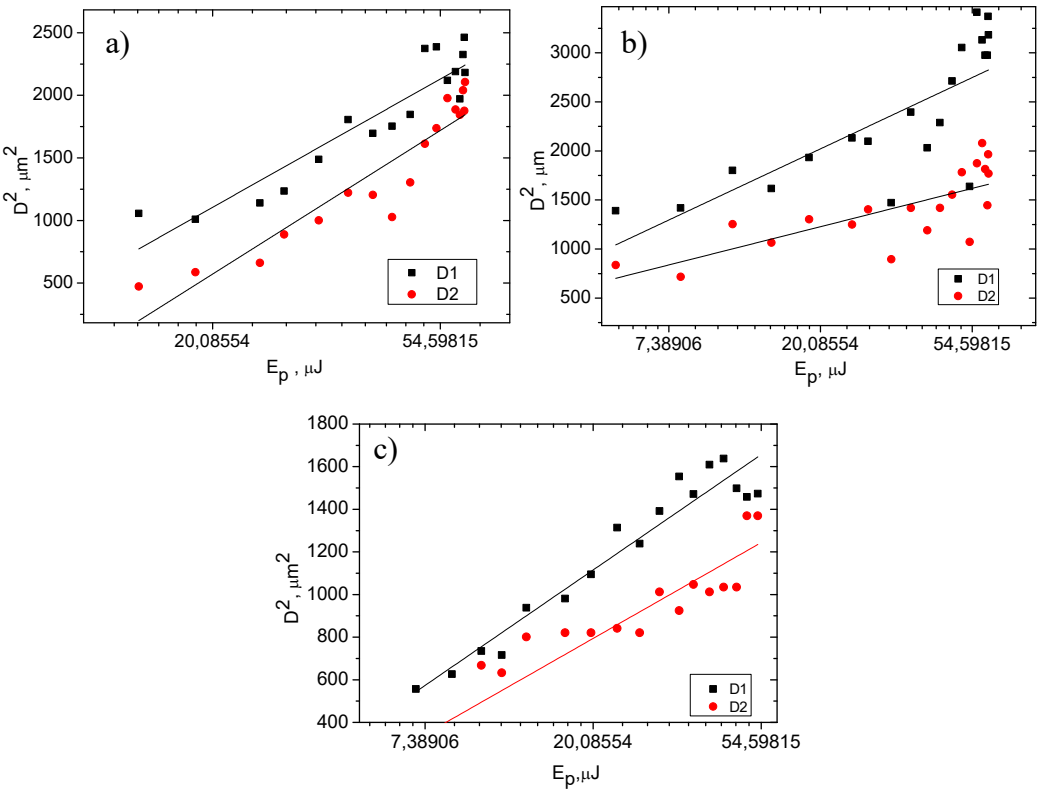


13 pav. Metaluose išabliuoti krateriai: a) varis E_{imp}=58,3 µJ, b) plienas E_{imp}=7,92 µJ.

Naudojant papildytą metodą, matavome ilgosios ašies(D_1) ir trumposios ašies(D_2) ilgius bei juos atidėjome pagal impulso energijas. Skirtumas nuo mūsų anksčiau minėto slenksčio skaičiavimo būdo buvo tai, kad medžiagos abliacijos slenksčiui apskaičiuoti parinkome tą tiesinę aproksimaciją, kurios slenkstinė energija buvo mažesnė. Rinkomės mažiausią vertę, nes ji parodo

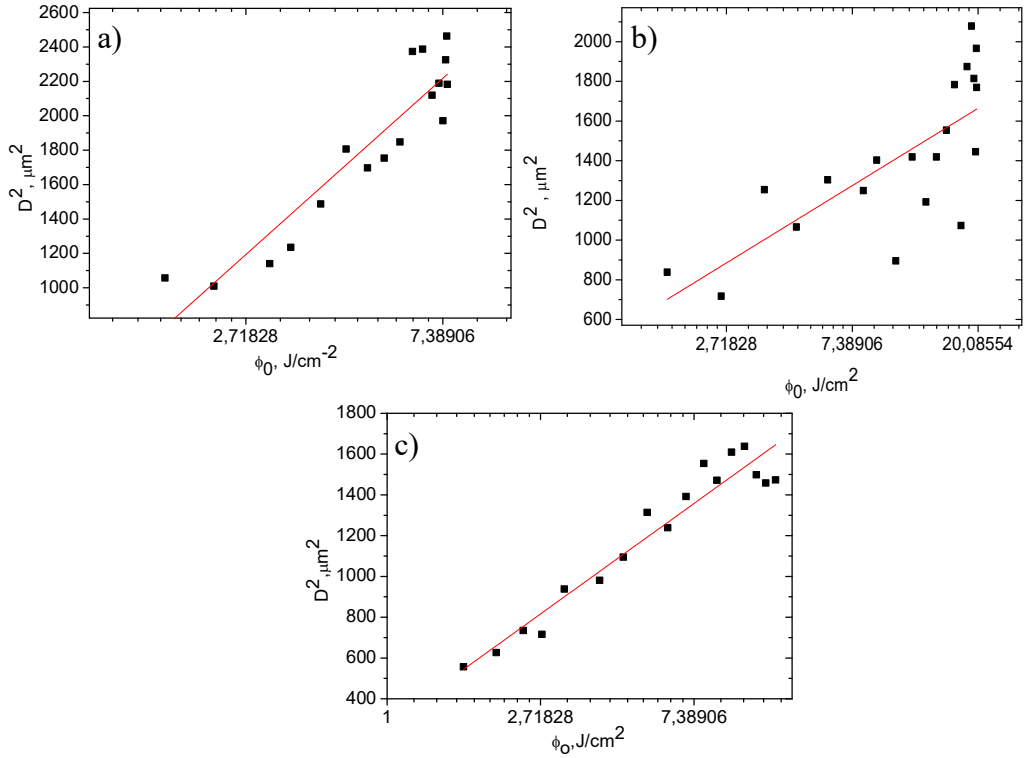
kur prasideda abliacija. Taip pat šie matavimai buvo iš naujo pakartoti pakeitus daliklį su variu, tuo tarpu plieno atveju atsižvelgėme tik į vieną matavimą.

Žemiau pateiktame 14 paveikslėlyje pavaizduoti šie atlikti matavimai. Plieno atveju Esl,1 = 1,2 ± 0,9 µJ, o Esl,2 = 0,9 ± 0,6 µJ tai ir pasirinkome pluošto spinduliui skaičiuoti trumpąją ašį ir iš jos aproksimacijos polinkio gavome ω_o = 13,9 ± 1,4 µm. Pirmųjų vario skaičiavimų metu energijos buvo $E_{sl,1}$ = 6,8 ± 1,3 µJ, o $E_{sl,2}$ = 12,6 ± 1,4 µJ, tad šiuo atveju pasirinkome ilgąją ašį pluošto spinduliui skaičiuoti ir gavome ω_o = 22,6 ± 1,1 µm. Tuo tarpu, atlikus bandymus su kitu dalikliu, vario matavimai buvo atlikti prie kito fokusavimo ir ten energijos vertes gavome atitinkamai $E_{sl,1}$ = 2,6 ± 0,4 µJ, o $E_{sl,2}$ = 3,4 ± 0,7 µJ, taigi pasirinkome pirmąją ašį ir pluošto spindulį apskaičiavome lygų ω_o = 16,5 ± 0,6 µm.



14 pav. Metaluose išabliuotų kraterių diametro kvadratų priklausomybė nuo impulso energijos: a) vario(I), b) plieno, c) vario(II).

Toliau, žinodami pluošto spindulį, pagal (9) formulę apskaičiavome lazerinės spinduliuotės vertes, ir ekstrapoliavę tiesę į D^2=0, gavome abiejų metalų slenkstines abliacijos energijos vertes mūsų naudotiems pluošto spinduliams. Šie skaičiavimai matomi 15 pav. Iš grafikų tiesių gavome, kad vario φ_{sl} = 0,16 ± 0,1 J/cm^2, pluošto spinduliui esant ω_o = 22,64 µm, o kai pluošto spindulys ω_o = 16,46 µm, slenkstinis energijos tankis φ_{sl} = 0,51 ± 0,08 J/cm^2. Plieno φ_{sl} = 0,28 ± 0,05 J/cm^2.



15 pav. Metaluose išabliuotų kraterių diametro kvadratų priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio: a) vario(ω_o = 22,64 µm), b) plieno c) vario(ω_o = 16,46 µm).

Taip pat abliacijos efektyvumui palyginti, remdamiesi Kramer ir kt.[24] tyrimais, paskaičiavome optimalią šviesos srauto vertę, ties kuria abliacijos procesas tampa efektyvesnis pagal formulę:

$$\varphi_{o,opt} = \varphi_{sl} \cdot e^2 \qquad (13)$$

Pliene ši vertė buvo $\varphi_{o,opt}$ = 2,07 ± 0.37 J/cm^2, varyje prie pirmojo pluošto spindulio optimali vertė siekė $\varphi_{o,opt}$ = 1,2 ± 0,4 J/cm^2, o su antruoju spinduliu $\varphi_{o,opt}$ = 3,8 ± 0,6 J/cm^2.

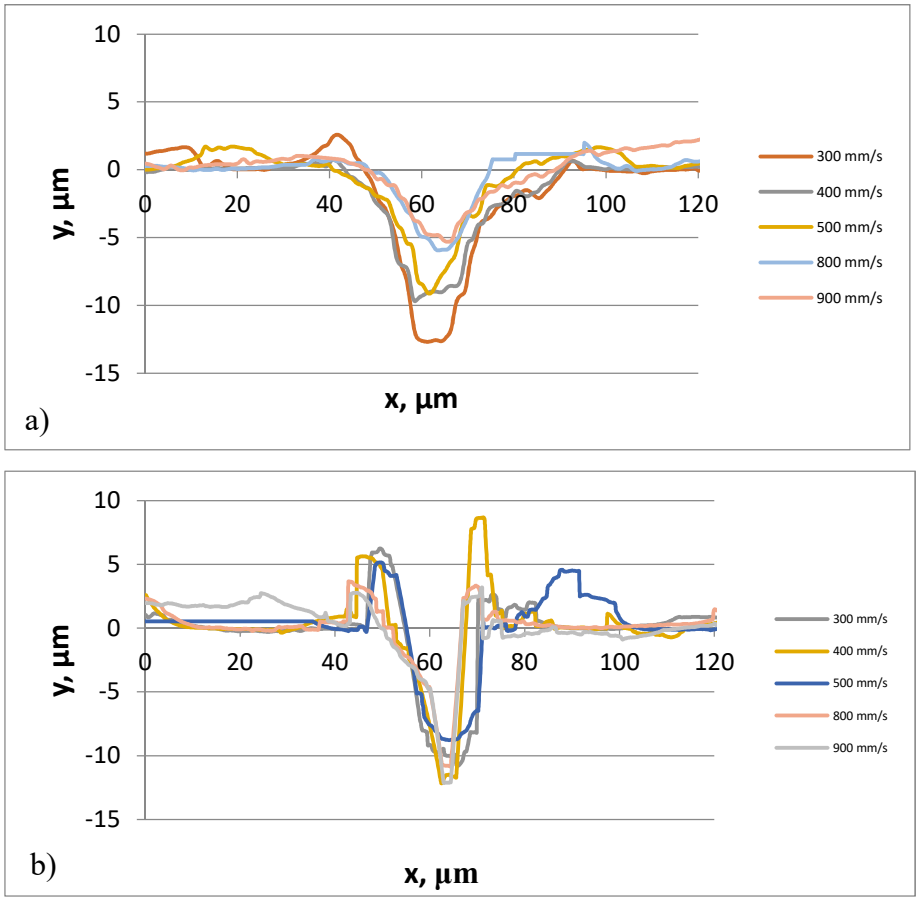
4.2. Suformuotų kanalų vizualinis įvertinimas

Siekdami įvertinti pliene ir varyje išabliuotų griovelių kokybę, naudosimės tik vizualiniu įvertinimu, pagal šiuos parametrus: kanalų formą, medžiagos sankaupų dydį ir griovelio paviršiaus reljefą. Atskirai vertinome kiekvienos medžiagos skirtumus tarp naudoto abliacijos pavieniais impulsais metodo ir metodo impulsų voromis su 60/40% dalikliu, taip pat pakartodami šį tyrimą ir su 20/80% dalikliu.

Plienas

Mūsų suformuotų griovelių tyrimą išskyrėme į 2 dalis, pagal impulsų energijos pasiskirstymą voroje, panaudojant lazerio pluošto daliklį.

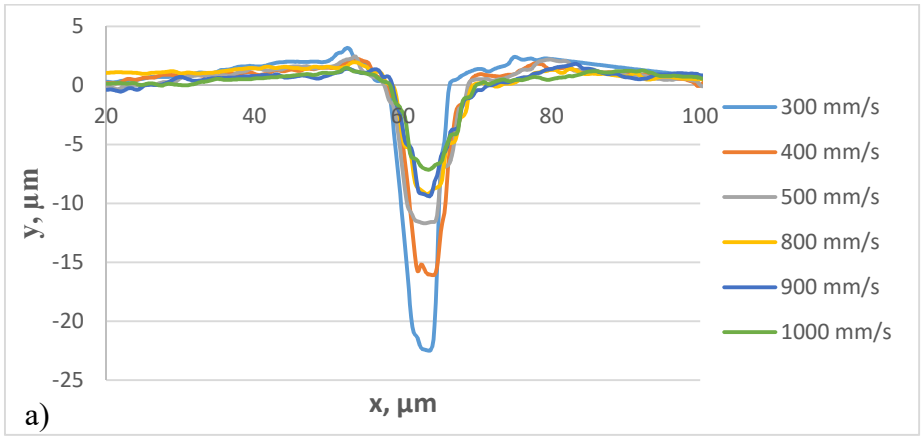
60/40% daliklis

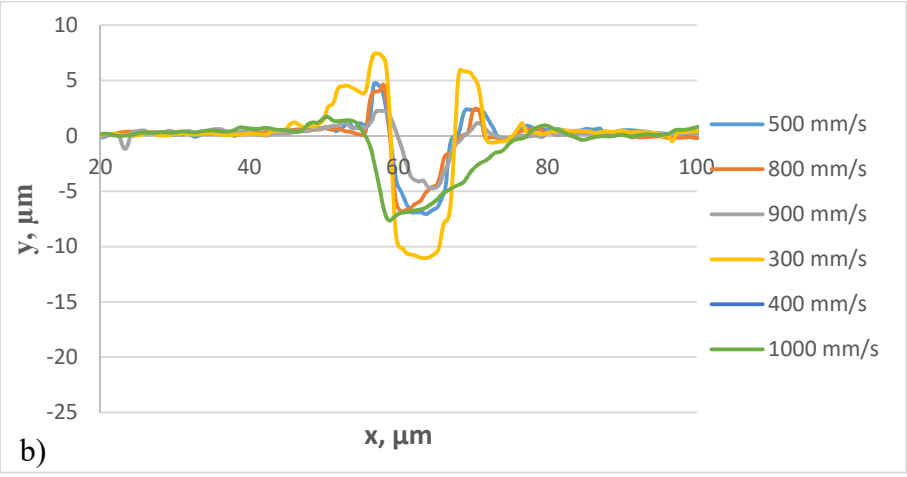


16 pav. Pliene išabliuotų kanalų profilių priklausomybė nuo skenavimo greičio: a) pavieniais impulsais, b) impulsų voromis, kai suminė impulsų energija Ep = 36,6 µJ.

Taigi, kaip matome iš 16 pav., suformuotų kanalų profiliai, esant pavieniams impulsams ir jų voroms, išsiskiria savo forma. Grioveliai formuoti voromis pasižymi smailumu ir šalia griovelių susidariusiomis iki 10µm aukščio medžiagos sankaupomis. Taip pat išsiskiria ir jų gylis: pavieniais impulsais formuoti grioveliai yra gilesni ir didėjant greičiui gylis mažėja. Šis gylio mažėjimas didėjant skenavimo greičiui yra stebimas ir naudojant voras, tik yra santykinai mažesnis.

20/80% daliklis





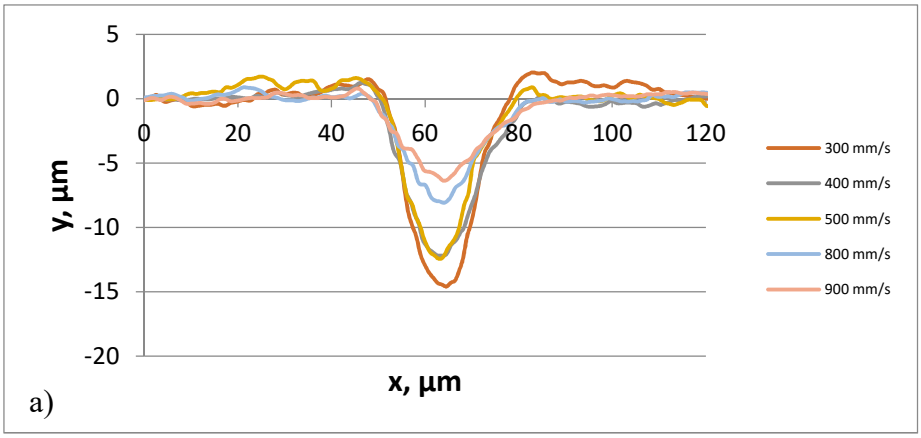
17 pav. Pliene išabliuotų kanalų profilių priklausomybė nuo skenavimo greičio: a) pavieniais impulsais, b) impulsų voromis, kai suminė impulsų energija Ep = 53,3 µJ.

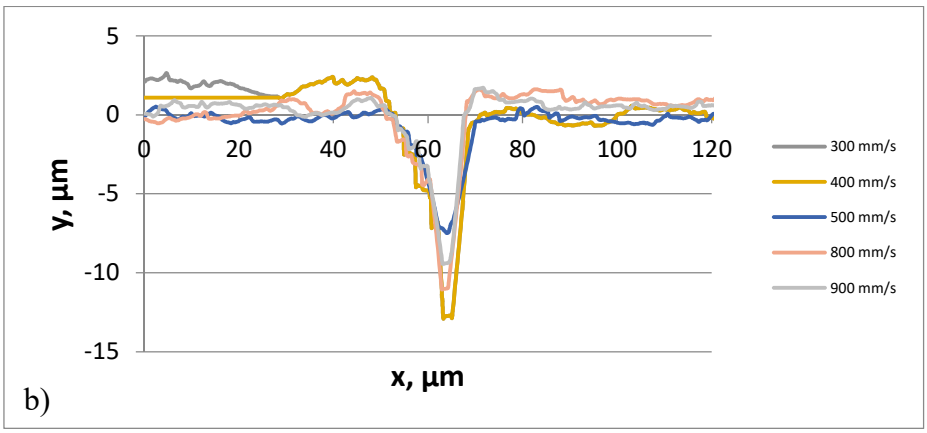
Panašumų abliacijoje randame ir naudojant 20/80 daliklį, kaip matome iš 17 pav. Taip pat stebime iki 10µm aukščio išabliuotos medžiagos sankaupas, susidarančias aplink griovelį. Kaip jau minėjome, šis reiškinys buvo stebimas ir kituose moksliniuose darbuose ir jį galime priskirti šilumos akumuliacijos reiškinių grupei[27,28]. Pasikartoja ir gylio mažėjimas didėjant skenavimo greičiui dėl mažėjančio impulsų persiklojimo ir eksponavimo trukmės. Vis tik dėl tų pačių šiluminių efektų matome, kad naudojant impulsų voras griovelių forma tampa mažiau taisyklingos formos.

Varis

Suformuotus griovelius varyje taip pat tyrėme atskirai, pagal impulsų energijos pasiskirstymą voroje, panaudojant lazerio pluošto daliklį. Šis padalijimas svarbus, nes skyrėsi matavimuose naudotas lazerio pluošto spindulys. Su 60/40% dalikliu jis siekė ω_o = 22,64 µm, o su 20/80% dalikliu ω_o = 16,46 µm.

60/40% daliklis

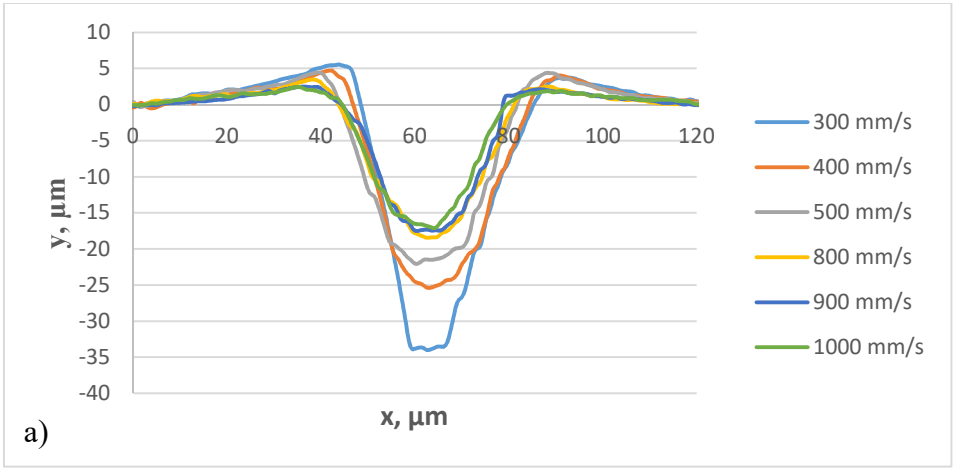


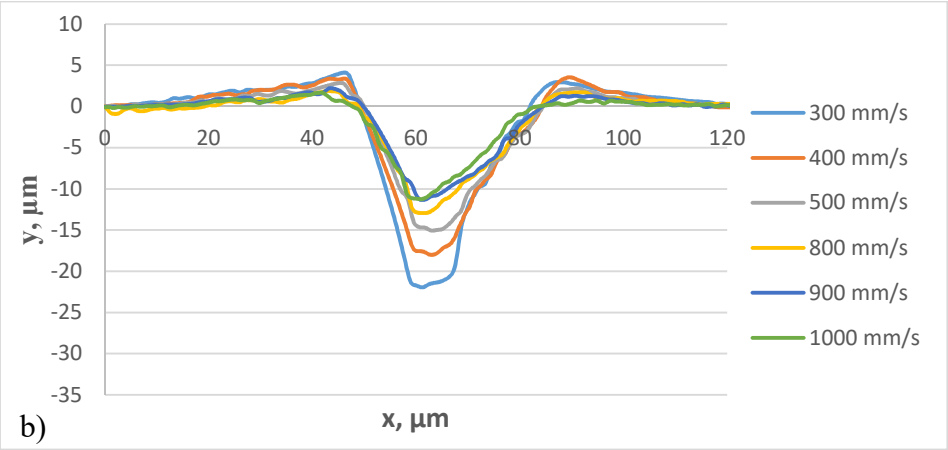


18 pav. Varyje išabliuotų kanalų profilių priklausomybė nuo skenavimo greičio: a) pavieniais impulsais, b) impulsų voromis, kai suminė impulsų energija Ep = 18,3 µJ.

Vario atveju, kaip ir pliene, naudojant voras stebimas griovelių susiaurėjimas ir smailumas, žiūrėti 18 pav. Tačiau naudojant impulsų voras, nematome tokių medžiagos sankaupų formavimosi, kaip pliene. Tai gali lemti žemesnė vario lydymosi temperatūra, tai reiškia abliacija vyksta mažesnėje temperatūroje. Taip pat ir varyje stebimas gylio mažėjimas didėjant skenavimo greičiui, jis ne toks ryškus naudojant voras. Tai gali sąlygoti sumažėjęs abliacijos slenkstis dėl inkubacijos efekto esant mažoms energijos vertėms.

20/80% daliklis

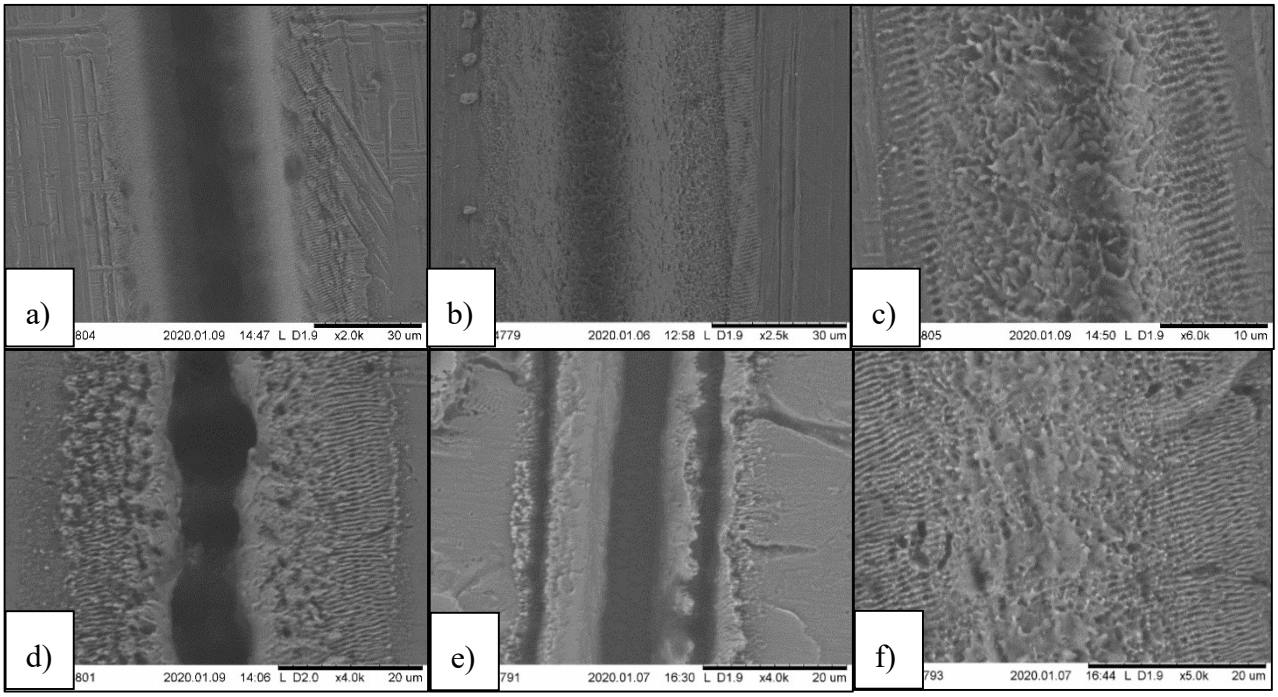




19 pav. Varyje išabliuotų kanalų profilių priklausomybė nuo skenavimo greičio: a) pavieniais impulsais, b) impulsų voromis, kai suminė impulsų energija Ep = 53,3 µJ.

Naudojant 20/80 daliklį, pasireiškia tie patys požymiai kaip ir su 60/40 dalikliu. Nepastebime ryškių medžiagos sankaupų, griovelių gylis mažėja didėjant greičiui, t.y. kartu mažėjant impulsų persiklojimui. Matome, kad šis gylio mažėjimas tampa ne toks ryškus greičiams virš >800 mm/s. Be to, pastebėjome, jog varyje esant didesnei suminei impulsų energijai, grioveliai suformuoti pasitelkiant voras yra mažesni pločiu tik iki 2-4 µm, už suformuotus pavieniais impulsais.

Skenuojančiu elektroniniu mikroskopu atliktos griovelių nuotraukos



20 pav. Suformuotų kanalų SEM nuotraukos. Vario (a-c), kur v = 100 mm/s, Ep=53,33 µJ, (a) pavieniais impulsais, (b) impulsų voromis, (c) dugno nuotrauka esant Ep=8,33 µJ. Pliene (d-f), kur v = 100 mm/s, Ep=50µJ, (d) pavieniais impulsais, (e) impulsų voromis, (f) dugno nuotrauka, esant Ep=5,33 µJ.

Artimesniam griovelių įvertinimui pasitelkėme skenuojančiu elektroniniu mikroskopu atliktomis nuotraukomis (20 pav.). Pirmiausia iš (a-b) ir (d-e) nuotraukų matome, kad griovelių profiliai, nustatyti profilometru, atitinka mikroskopu darytas nuotraukas. Pliene (e) matome išilgai griovelio susidarančias medžiagos sankaupas naudojant impulsų voras, kai tuo tarpu varyje (b) jos nepasireiškia. Svarbiausią pastebėjimą įžvelgėme (d, c ir f) nuotraukose. Juose stebėjome Giannuzzi ir kt.[29] darbe minėtą LIPSS (angl. laser induced periodic surface structures) susidarymą. Taip pat šių raibulių susidarymą stebėjome ir kursiniame darbe naudotuose aliuminio ir žalvario bandiniuose. Šie raibuliai atitinka literatūroje minimą orientaciją, kuri yra statmena lazerio spinduliuotės poliarizacijos krypčiai. Šis efektas vyksta dėl krentančios lazerio šviesos ir medžiagoje išsklaidytos šviesos interferencijos [35]. Šios savybės panaudojimas kuriant super – hidrofobiškus ar mažesnio trinties koeficiento paviršius gali praversti įvairiose pramonės srityse. Dėl to ateities tyrimuose būtų galima apsiriboti tik šiais bandymais.

4.3. Specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio ir kanalų aukščio bei pločio santykio įvertinimas

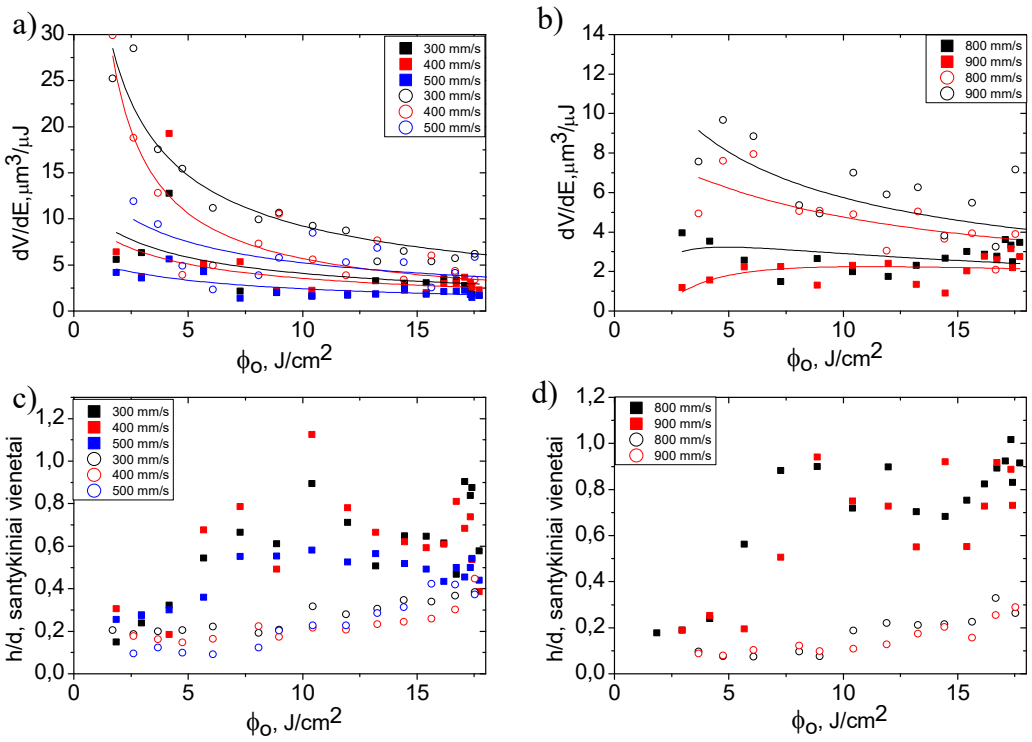
Kita mūsų tyrimo dalis buvo abliacijos efektyvumo įvertinimas, pagal naudotas medžiagas ir impulsų energijų pasiskirtymą vorose. Tai atlikti pasirinkome griovelių aukščio ir pločio santykio bei apdirbamos medžiagos specifinio pašalinimo laipsnio priklausomybės nuo šviesos srauto įvertinimą. Griovelių plotis ir aukštis buvo nustatyti pasinaudojant „OriginPro“ programine įranga. Pavienio impulso išabliuoto tūrio skaičiavimui pasitelkėme paraboloido tūrio formule ($V = \frac{\pi}{2} * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * h$), kuri kaip aproksimacija atitinka medžiagoje išabliuotą formą. Ekstremalios vertės ir taškų trūkumai galėjo susidaryti dėl profilometro matavimų paklaidų ir netikslumų.

Plienas

60/40% daliklis

Tiriant plieną, lyginome plieno apdirbimo efektyvumą pagal tai, kiek sumažėja arba padidėja specifinis pašalinimo laipsnis apdirbant voromis lyginant su apdirbimu pavieniais impulsais (21 pav. a-b). Specifinis pašalinimo laipsnis mažėdavo didėjant lazerio spinduliuotės energijos tankio vertėms bei didėjant skenavimo greičiui. Naudojant impulsų voras šiam mažėjimui įtakos turėjo užvartų formavimasis, kuris prasidėdavo energijos tankiui 2 kartus viršijus optimalią abliacijos vertę, kaip pavyzdys 25 pav. Tuo tarpu apdirbimo efektyvumas skirdavosi priklausomai nuo skenavimo greičio ir energijos tankio kombinacijų. Ties optimaliam apdirbimui tinkamu energijos tankiu (2 J/cm^2) abliacijos efektyvumas naudojant impulsų voras sumažėdavo daugiausiai ir buvo 65 – 75% mažesnis už pavieniais impulsais apdirbtų griovelių specifinį pašalinimo laipsnį. Tuo tarpu energijos tankiui didėjant pavieniais impulsais išabliuotų kraterių specifinis pašalinimo laipsnio buvo 40 – 50%

didesnis nei abliuojant griovelius voromis. Tai galima būtų paaiškinti tuo, kad po pirmo impulso susiformavusių dalelių ir plazmos debesis virš griovelio pradeda ekranuoti tolesnių impulsų apdirbimą, taigi jie neprisideda prie abliacijos. Lyginant gylio ir pločio santykį (21 pav. c-d) pastebėjome, kad naudojant pavienius impulsus šis santykis yra mažesnis iki 2 - 4 kartų negu naudojant jų voras. Šis santykis sumažėdavo artėjant prie abliacijos slenksčio, tačiau energijos tankiui viršijus >5 J/cm^2 jis padidėdavo ir nusistovėdavo didėjant energijos tankiui. Šio efekto privalumas, kad naudojant impulsų voras, net ir didelio energijos tankio verčių riboje galima sukurti gilesnius ir siauresnius griovelius. Tačiau, kaip matome iš skenavimo greičio verčių <500 mm/s, energijos tankiams >18 J/cm^2, santykis sumažėdavo dėl didesnės pirmųjų impulsų voroje energijos.

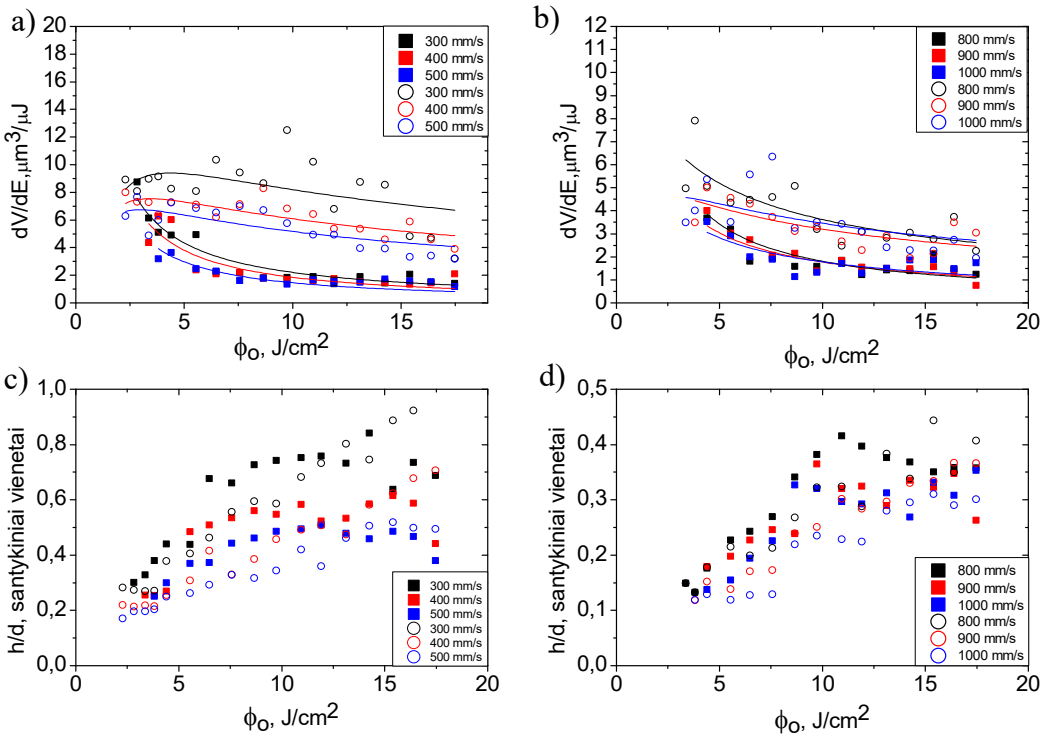


21 pav. Plieno specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio (a-b) ir kanalų gylio/pločio santykio (c-d) priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio esant skirtingoms skenavimo greičio vertėms. Impulsų voros-■, pavieniai impulsai -○.

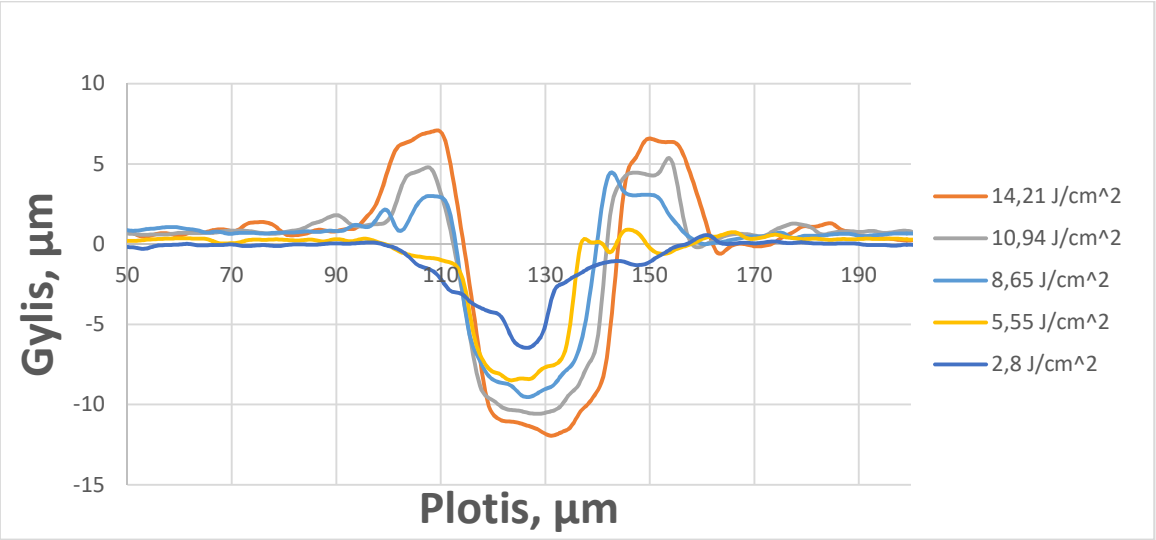
20/80% daliklis

Naudojant šį daliklį, taip pat stebėjome apdirbimo efektyvumo mažėjimą, didėjant energijos srauto vertėms (22 pav. a-b). Todėl galime teigti, kad šis apdirbimo efektyvumo mažėjimas nepriklauso nuo impulsų energijos pasiskirstymo voroje kaip matome ir kituose darbuose [24,25]. Šiam efektyvumo mažėjimui įtakos turėjo užvartų formavimasis (žr. 23 pav.). Iš šio paveikslėlio matome, kaip užvartos pradeda formuotis energijos tankiui pasiekus 2 kartus didesnę vertę už

optimalią - 5,5 J/cm^2. Kaip matome iš grafikų funkcijos aukščiausios vertės, optimali abliacijos vertė turėtų būtų 2 – 4 J/cm^2, kas iš dalies atitinką mūsų nustatytą 2 J/cm^2 optimalią energiją 4.1 dalyje. Šioje energijos tankio riboje pavieniais impulsais suformuotų griovelių medžiagos specifinio pašalinimo laipsnio vertė yra 25 – 35% didesnė negu griovelių suformuotų impulsų voromis. Išskirti galime 300 mm/s skenavimo greitį, kuriame šis skirtumas yra tik 15 %. Didėjant energijos tankiui šis skirtumas padidėja greičių riboje <500 mm/s iki 80%, o greičių riboje >800 mm/s iki 50%. Tai galime paaiškinti tuo, kad kai energijos tankis yra mažas, pirmas impulsas voroje nesukelia stipraus plazmos ekranavimo antrajam impulsui, tuo būdu antras impulsas prisideda prie efektyvesnio apdirbimo su jau įkaitusia medžiaga. O kai energija yra didelė, pirmasis impulsas sukelia didesnį ekranavimą, iš to seka, kad antro ir tolimesnių impulsų abliacijos efektyvumas sumažėja. Toliau įvertinome aukščio/pločio santykį (22 pav. c-d). Čia taip pat stebimas santykis buvo didesnis naudojant impulsų voras, tik kiek mažiau – iki 15%. Ir šis skirtumas tapdavo nepastebimas, energijos tankiui viršijus 15 J/cm^2, dėl padidėjusios impulsų voroje energijos.



22 pav. Plieno specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio (a-b) ir kanalų gylio/pločio santykio (c-d) priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio esant skirtingoms skenavimo greičio vertėms. Impulsų voros-■, pavieniai impulsai -○.

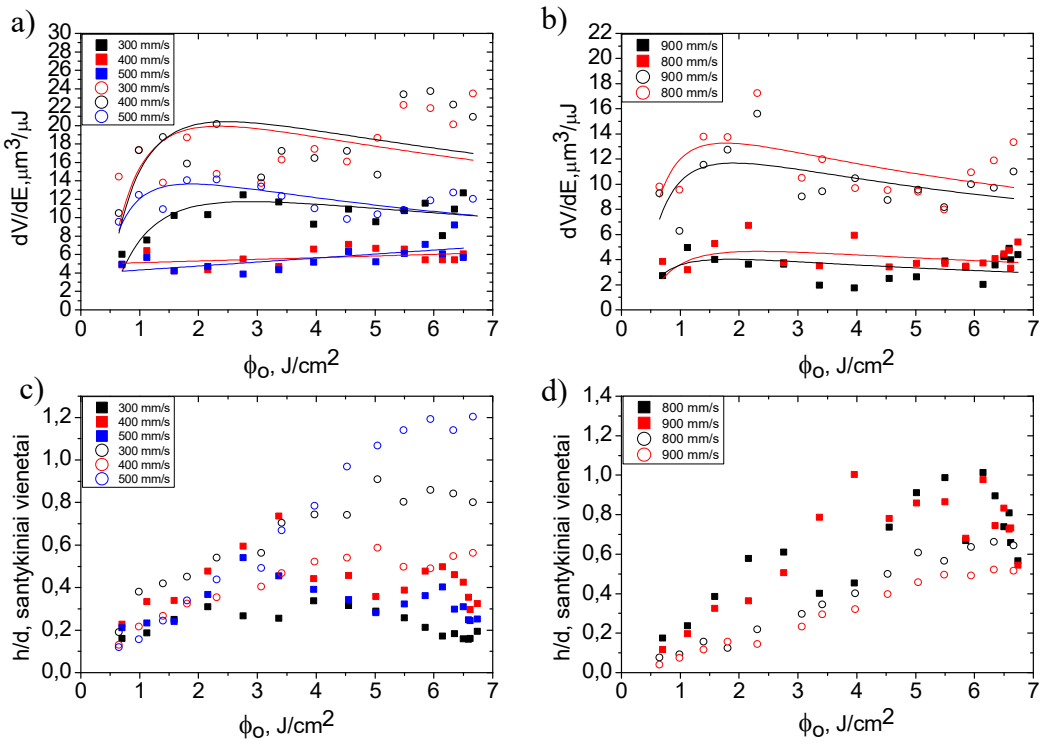


23 pav. Pliene suformuotų kanalų profilių priklausomybė nuo energijos tankio. Impulsų energijos skirstinys 1:3,5:1. Skenavimo greitis 300 mm/s.

Varis

60/40% daliklis

Varyje medžiagos pašalinimo laipsnio priklausomybė, kaip ir pliene, buvo mažėjanti didėjant spinduliuotės srautui ir skenavimo greičiui (24 pav. a-b). Kaip matome iš šių grafikų didžiausias specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis buvo pasiekiamas energijos tankio 1 – 2,5 J/cm^2 srityje, kas paklaidų ribose atitinka mūsų nustatytą 2,03 J/cm^2 optimalią abliacijos vertę. Efektyvumą vertindami pagal tai, kaip skiriasi specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis naudojant impulsų voras nuo jo naudojant tik pavienius impulsus, pastebėjome, kad ties jau minėta optimalia abliacijos verte, šis efektyvumas yra apie 65-70% didesnis naudojant pavienius impulsus. Tik naudojant didelį skenavimo greitį (300 mm/s) šis santykis sumažėdavo iki 50%. Tokį didelį skirtumą gali sukelti pirmo impulso voroje sukeliamos plazmos ekranavimas tolesniems impulsams, kai šių impulsų energija išsidėsto - 1 : 0,33 : 0,16 (12 pav.). Didėjant impulsų energijai specifinio pašalinimo laipsnis sumažėdavo 10%, nepriklausomai nuo skenavimo greičio. Energijos tankiui mažėjant < 2 J/cm^2, tik skenavimo greičių (400 – 500 mm/s) srityje stebėjome efektyvumo pasikeitimą, kuris atsirado, dėl voromis išabliuotų griovelių išmatavimo netikslumo. Nors ir didesnio efektyvumo nepasiekiame formuodami griovelius naudojant tokio energijos išsidėstymo voras, iš šių griovelių aukščio/pločio santykio (24 pav. c-d) matome, kad naudodami didelį skenavimo greitį (>800 mm/s) visada pasieksime atitinkamai siauresnius ir gilesnius griovelius nei naudojant pavienius impulsus.

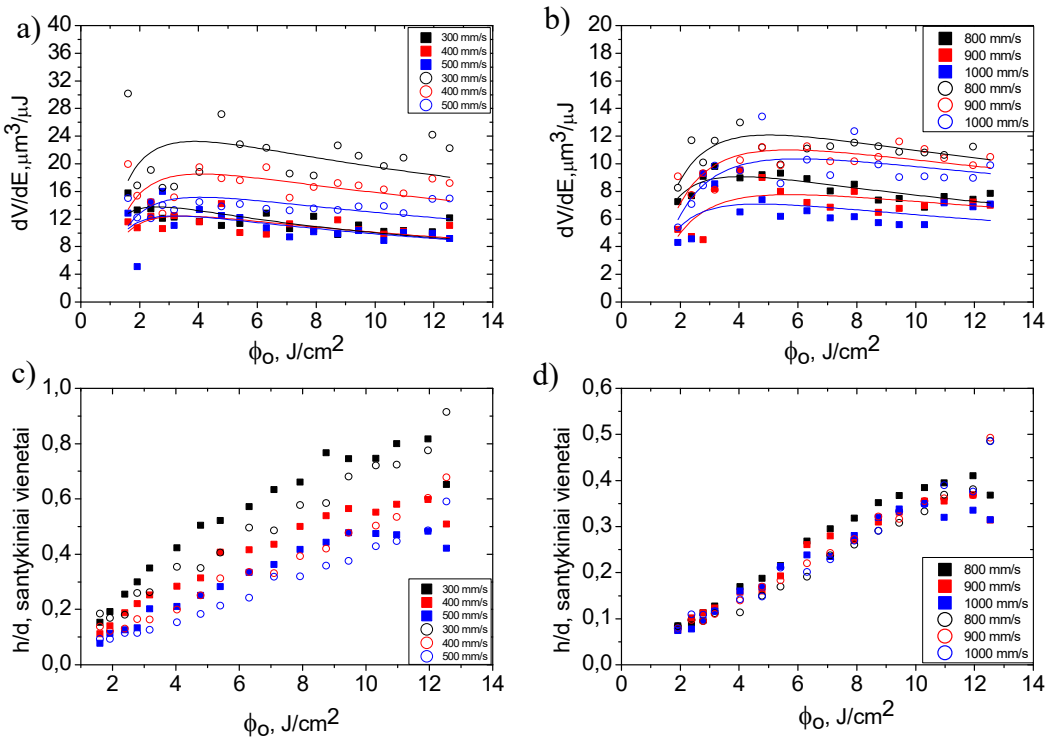


24 pav. Vario specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio (a-b) ir kanalų gylio/pločio santykio (c-d) priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio esant skirtingoms skenavimo greičio vertėms. Impulsų voros-■, pavieniai impulsai -○.

20/80% daliklis

Naudojant impulsų voras su jų energijos išsidėstymu - 1 : 3,5 : 1 (20/80 % daliklis), taip pat kaip ir su plienu bei 60/40% dalikliu aiškiai stebėjome medžiagos pašalinimo laipsnio mažėjimą didėjant energijos tankiui ir skenavimo greičiui (25 pav. a-b). Taigi galime teigti, jog impulsų voros kaip ir ultratrumpieji pavieniai impulsai seka iš to paties modelio aprašomo (8) lygtimi. Didžiausios specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio vertės naudojant pavienius lazerio impulsus buvo pasiekiamos arti mūsų eksperimentiškai 1 dalyje nustatytos optimalios abliacijos vertės ~ 4 J/cm^2. Tuo tarpu naudojant impulsų voras ši vertė buvo pasislinkusi link nulio, dėl inkubacinio efekto. Optimaliausio apdirbimo sąlygomis prie visų skenavimo greičio verčių specifinis pašalinimo laipsnis pavieniais impulsais lenkdavo voromis suformuotų griovelių medžiagos pašalinimo laipsnį 30 – 40%, kuris didėjant energijos tankiui padidėdavo 5%. Šis skirtumas su voromis gali atsirasti, dėl 4 kartus mažesnio pirmojo ir trečiojo impulso energijos lyginant su pavienio impulso energija (žr. 12 pav.). Išskirti galime griovelius suformuotus 500 mm/s skenavimo greičiu, nes energijos tankiui esant ~ 4 J/cm^2, naudojant voras efektyvumas buvo tik 18% mažesnis. O energijos tankiui artėjant prie

abliacijos slenksčio <2 J/cm^2 stebėjome mažiausią santykinį specifinio pašalinimo laipsnio sumažėjimą naudojant voras - 5% skirtumą. Nors ir ši kombinacija, kaip A. Žemaičio [36] grupės darbe, kuriame jie rado lazerinio apdirbimo parametrų kombinaciją, varyje padidinančią specifinį abliacijos laipsnį 20% naudojant voras, neteikia tokio pat rezultato, bet parodo, kad esame arti panašios konfigūracijos ir su skirtingais naudotais parametrais savo darbe. Gylio/pločio matavimai (25 pav. c-d) patvirtina ir kitose dalyse minėtą santykinį vorų pranašumą, norint suformuoti siauresnius nei pavieniais impulsais suformuotus griovelius. Nors ir energijos tankiui padidėjus apie 2-3 kartus šis santykinis gylio/pločio pranašumas naudojant voras tampa neryškus, tam įtakos gali turėti didesnė pirmųjų impulsų voroje energija.



25 pav. Vario specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio (a-b) ir kanalų gylio/pločio santykio (c-d) priklausomybė nuo lazerio spinduliuotės energijos tankio esant skirtingoms skenavimo greičio vertėms. Impulsų voros-■, pavieniai impulsai -○.

PAGRINDINIAI REZULTATAI IR IŠVADOS

1. Abliuojant plieno bandinius femtosekundinių impulsų 1 GHz pasikartojimo dažnio voromis, skirtingai nei pavieniais impulsais, bandinyje susiformuoja iki 10μm aukščio medžiagos užvartos. Tuo tarpu vario bandiniuose šio šilumos akumuliacijos reiškinio nestebime dėl žemesnės šios medžiagos lydymosi temperatūros ir mažesnės spinduliuotės sugerties 1030 nm bangos ilgio diapazone nei pliene.
2. Apdirbant metalus femtosekundinio lazerio impulsų voromis stebimas lazeriu indukuotų periodinių paviršinių darinių (angl.: LIPPS -laser induced periodic surface structures), arba kitaip raibulių, susidarymas medžiagos paviršiuje. Šie stebimi statmeni lazerio poliarizacijai raibuliai susidaro dėl lazerio spinduliuotės sąveikos su paviršiaus plazmonais. O didėjantis impulsų kiekis, didina šių raibulių periodą, todėl juos galime ryškiau matyti voromis abliuotuose grioveliuose. Šis reiškinys atsikartojo su plieno ir vario bandiniais.
3. Nustatytas griovelių gylio ir pločio santykis bei specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis mažėja didėjant skenavimo greičiui, nepriklausomai nuo naudojamo abliacijos režimo, dėl mažėjančio impulsų persiklojimo.
4. Naudojant impulsų vorą, kurioje suminė impulsų energija lygi pavienio impulso energijai, ir išlaikant sąlyginai mažą energijos tankį (iki 2-3 kartų virš optimalaus abliacijos energijos tankio, kuris pliene yra ~2,1 J/cm^2, o varyje ~1,2 J/cm^2(w_o=22,6 μm) arba 3,8 J/cm^2(w_o=16,5 μm) tiek pliene, tiek varyje suformuojami santykinai gilesni ir siauresni grioveliai, negu naudojant pavienius impulsus.
5. Esant pirmųjų trijų impulsų voroje pasiskirstymui 1:0,26:0,16:0,096:... (60/40% daliklis), specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis, esant optimaliam abliacijos energijos tankiui, varyje ir pliene yra 65 - 75% mažesnis nei pavieniais impulsais suformuotų griovelių specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis. Tikėtina, kad šis sumažėjimas naudojant voras atsiranda dėl pirmo impulso sukeliamo ekranavimo tolesniems impulsams ir 40% mažesnės nei pavienio impulso energijos (žr. 12 pav.). Energijos tankiui didėjant šis skirtumas naudojant voras sumažėdavo 10 – 20% buvusios vertės.
6. Esant impulsų voroje energijos pasiskirstymui 1:3,2:0,64:0,128:... (20/80% pluošto daliklis), specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis, ties optimalaus abliacijos energijos tankio verte, atitinkamai yra 25 – 40 % mažesnis nei pavieniais impulsais suformuotų griovelių specifinis pašalinimo laipsnis tiek varyje, tiek pliene. Šis skirtumas padvigubėja didėjant energijos

tankiui, nes pirmo impulso voroje sukeliamas plazmos ekranavimas ir šilumos akumuliacijos padariniai sumažina apdirbimo efektyvumą.

7. Geriausi rezultatai naudojant femtosekundinių lazerio impulsų voras buvo pasiekti, kai energijos pasiskirstymas voroje yra 1:3,2:0,64:0,128:... (20/80% daliklis). Plieno atveju, kai skenavimo greitis 300 mm/s ir energijos tankis <2 J/cm^2, specifinis pašalinimo laipsnis buvo 15% mažesnis naudojant voras, negu pavienius impulsus. O varyje, skenavimo greitį pasirinkus 500 mm/s ir esant energijos tankiui < 2 J/cm^2 - tik 5% mažesnis.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

[1] E. Mottay, X. Liu, H. Zhang, E. Mazur, R. Sanatinia, and W. Pfleging, Industrial applications of ultrafast laser processing, MRS Bull. **41**, 984 – 992 (2016),

[2] C. S. R. Nathala, A. Ajami, W. Husinsky, B. Farooq, S. I. Kudryashov, A. Daskalova, I. Bliznakova, and A. Assion, Ultrashort laser pulse ablation of copper, silicon and gelatin: effect of the pulse duration on the ablation thresholds and the incubation coefficients, Appl. Phys. A Mater. Sci. Process. **122**(107), 9625–9631 (2016),

[3] M. C. Gower, Industrial applications of laser micromachining, Opt. Express. **67**, 22795 (2000),

[4] B. Neuenschwander, T. Kramer, B. Lauer, and B. Jaeggi, Burst mode with ps- and fs-pulses: Influence on the removal rate, surface quality and heat accumulation, Proc. SPIE. **9350**, 93500U (2015),

[5] C. Emmelmann and J. P. C. Urbina, Analysis of the influence of burst-mode laser ablation by modern quality tools, Phys. Procedia. 1**2**, 172-281 (2011),

[6] C. Kerse, H. Kalycoglu, P. Elahi, B. Cetin, D. K. Kesim, O.Akcaalan, S. Yavas, M. D. Asik, B. Oktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, and F. O. Ilday, Ablation – colled material removal with ultrafast bursts of pulses, Nature. **537**, 84-89 (2016),

[7] J. Heller, J. W. Bartha, C. C. Poon, and A.C. Tam, Temperature dependence of the reflectivity of silicon with surface oxide at wavelengths of 633 and 1047 nm, Appl. Phys. Lett. **75**(1), 43 (1999),

[8] W. Staudt, S. Borneis, and K. D. Pippert, Phys. Status Solidi A Appl. Res. **166**(2), 743 (1998),

[9] M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, *Ultrafast lasers. Technology and applications*, (Basel, New York, 2003) pp. 360-370,

[10] A. H. Hamad, Effects of different Laser pulse regimes (Nanosecond, Picosecond and Femtosecond) on the ablation of materials for production of nanoparticles in liquid solution, IntechOpen **12**, (2016),

[11] K. H. Leitz, B. Redlingshofer, Y. Reg, A. Otto, and M. Schmidt, Metal Ablation with Ultrashort Laser Pulses, Phys. Procedia. **12**, 230-238 (2011),

[12] H. Matsumoto, Z. Lin, and J. Kleinert, Ultrafast laser ablation of copper with ~GHz bursts, Proc. SPIE. **10519**, 1051902 (2018),

[13] J. M. Liu, Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes, Opt. Lett. **7**(5), 196–198 (1982),

[14] M. K. Mohammed, U. Umer, O. Abdulhameed, and H. Alkhalefah, Effects of laser fluence and pulse overlap on machining microchaneels in alumina ceramics using an Nd:YaG laser, Appl. Sci, **9**, 3962 (2019),

[15] X. W. Cao, Q. D. Chen, H. Fan, L. Zhang, S. Juodkazis, and H. B. Sun, Liquid-assisted femtosecond laser precision-machining of silica, Nanomaterials, **8**, 287 (2018),

[16] https://www.rp-photonics.com/femtosecond_lasers.html [žiūrėta 2020-05-14],

[17] B. Dromey, M. Zepf, M. Landreman, K. O'keeffe, T. Robinson, and S. M. Hooker, Generation of a train of ultrashort pulses from a compact birefringent crystal array, Appl. Opt. **46**(22), 5142–5146 (2007),

[18] F. Bauer, A. Michalowski, T. Kiedrowski, and S. Nolte, Heat accumulation in ultra-short pulsed scanning laser ablation of metals, Opt. Express. **23**(2), 1035–1043 (2015),

[19] C. Gaudiuso, G. Giannuzzi, A.Volpe, P.M. Lugara, I. Choquet, and A. Ancona, Incubation during laser ablation with bursts of femtosecond pulses with picosecond delays, Opt. Express. **26**(4), 3801-3813 (2018),

[20] Z. Sun, M. Lenzner, and W. Rudolph, Generic incubation law for laser damage and ablation threshold, J. Appl. Phys. **117**(7), 073102 (2015).

[21] G. Bonamis, K. Mishchick, E. Audouard, C. Honninger, E. Mottay, J. Lopez, and I. M. Honniger, High efficiency femtosecond laser ablation with gigahertz level bursts, J. Laser Appl. **31**, 022205 (2019),

[22] K. Mishchik, G. Bonamis, J. Qiao, J. Lopez, E. Audouard, E. Mottay, C. Hönninger, and I. Manek-Hönninger, High-efficiency femtosecond ablation of silicon with GHz repetition rate laser source, Opt. Lett. **44**(9), 2193-2196 (2019),

[23] Y. Ren, C. W. Cheng, J. K. Chen, Y. Zhang, and D. Y. Tzou, Thermal ablation of metal films by femtosecond laser bursts, Int. J. Therm. Sci. **70**, 32-40 (2013),

[24] T. Kramer, B. Neuenschwander, B. Jaggi, S. Remund, U. Hunziker, and J. Zurcher, Influence of pulse bursts on the specific removal rate for ultra-fast pulsed laser micromachining of copper, Phys. Procedia. **83**, 123-134 (2016),

[25] T. Kramer, Y. Zhang, S. Remund, B. Jaeggi, A. Michalowski, L. Grad, B. Neuenschwander, Increasing the specific removal rate for ultra short pulsed laser-micromachining by using pulse bursts, J. Laser Micro Nanoeng. **12**, 2 (2017),

[26] B. Jaeggi, L. Cangueiro, D. Bruneel, J. A. Ramos de Campos, C. Hairaye, and B. Neuenschwander, Micromachining using pulse bursts: influence of the pulse duration and the number of pulses in the burst on the specific removal rate, Proc. SPIE **10519**, 1051905 (2018),

[27] B. Neuenschwander, B. Jaeggi, E. V. Zavedeev, N. R. Arutyunyan, and S. M. Pimenov, Heat accumulation effects in laser processing of diamond-like nanocomposite films with bursts of femtosecond pulses, J. Appl. Phys., **126**, 115301 (2019),

[28] M. Domke, V.Matylitsky, and S. Stroj, Surface ablation efficiency and quality of fs lasers in single-pulse mode, fs lasers in burst mode, and ns lasers, Appl. Surf. Sci. **505**, 144594 (2020),

[29] G. Giannuzzi, C. Gaudiuso, C. D. Franco, G. Scamarcio, P. M. Lugara, A. Ancona, Large area laser-induced periodic surface structures on steel by bursts of femtosecond pulses with picosecond delays, Opt Lasers Eng. **114**, 15-21 (2019),

[30] http://lightcon.com/Product/CARBIDE.html?tab=4 [žiūrėta 2020-05-14],

[31] https://www.scanlab.de/en/products/scan-systeme/intelliscan/intelliscan-10 [žiūrėta 2020-05-14],

[32] https://www.sensofar.com/launch-plu-2300/ [žiūrėta 2020-05-14],

[33] https://www.spachoptics.com/BX51-FLOURESCENCE-p/olympus-bx51-fluorescence.html [žiūrėta 2020-05-14],

[34] R. Ledesma, J. Fitz-Gerald, F. Palmieri, and J. Connell, Determination of cross-sectional area of focused picosecond gaussian laser beam, NASA, (2018),

[35] P. T. Mannion, J. Magee, E. Coyne, G. M. O'Conner, and T. J. Glynn, The effect of damage accumulation behaviour on ablation thresholds and damage morphology in ultrafast laser micro-machining of common metals in air, Appl. Surf. Sci. **233**, 275-287 (2004),

[36] A. Žemaitis, P. Gečys, M. Barkauskas, G. Račiukaitis, and M. Gedvilas, Highly-efficient laser ablation of copper by burst of ultrashort tuneable (fs-ps) pulses, Nature. Sci. Rep. **9**, 12280 (2019).

SANTRAUKA

Lazerinis medžiagų mikroapdirbimas naudojant ultratrumpųjų lazerio impulsų voras yra daug žadanti tyrimų sritis. Šiame darbe siekėme palyginti kaip plieno ir vario apdirbimas šiuo metodu skiriasi nuo plačiau naudojamo pavieniais femtosekundiniais impulsais atliekamo metalų apdirbimo. Pirmiausia apžvelgėme svarbiausią teoriją susijusią su tiriamąją sritimi: metalų ir lazerinės spinduliuotės sąveiką naudojant femtosekundinius lazerio impulsus bei ją aprašantį dviejų temperatūrų modelį; abliacijos modelius, juos apibūdinančius parametrus ir pagerinančius veiksnius; lazerinių impulsų vorų generaciją, su tuo susijusį inkubacinį dėsnį bei vėlinimo laiko įtaką abliacijai. Be visa to, kaip gerą praktiką, pateikėme plačią su mūsų tema susijusių kitų mokslinių darbų apžvalgą. Eksperimente naudojome 1030 nm lazerį su 60 kHz pasikartojimo dažniu bei 3,2 W išvadine galia. Vorų generacijai sukonstravome retroreflektorinę laisvosios erdvės vėlinimo liniją, su keičiamu šviesą dalinai praleidžiančiu pluošto dalikliu. Išlaikydami 1 ns vėlinimą tarp impulsų voroje (kas atitinka 1 GHz pasikartojimo dažnį tarp impulsų voroje), naudojome du skirtingus daliklius. Išlaikydami vienodą impulsų suminę energiją, lyginant su pavieniais impulsais, formavome dvi begalybėje nykstančių vorų sekas. Pirmosios voros impulsų energijos skirstiniai atitinkamai pasiskirstė į 1:0,26:0,16:0,096:..., o antrosios į 1:3,2:0,64:0,128:... . Pirmiausia naudotuose bandiniuose nustatėme abliacijos slenkstį, optimalų energijos tankį ir pluošto spindulį. Antrojoje eksperimento dalyje metaluose abliavome griovelius, keisdami skenavimo greitį nuo 300 mm/s iki 1000 mm/s. Vizualiai įvertinome šių griovelių formą, plotį, gylį, paviršiaus struktūrą ir medžiagos sankaupas. Išsamesnei paviršiaus patikrai skenuojančiu elektroniniu mikroskopu atlikome tų griovelių nuotraukas. Galiausiai siekdami įvertinti abliacijos femtosekundinių impulsų voromis efektyvumą, lyginome šiuo metodu suformuotų griovelių specifinį medžiagos pašalinimo laipsnį ir gylio/pločio santykį su pavieniais impulsais sugeneruotų griovelių tais pačiais parametrais. Iš gylio/pločio matavimų pastebėjome, kad grioveliai esant mažoms energijos tankio vertėms naudojant impulsų voras yra santykinai gilesni už abliuotus pavieniais impulsais. Taip pat mums pavyko nustatyti, kad specifinis medžiagos pašalinimo laipsnio priklausomybė nuo energijos tankio yra aprašoma ta pačia funkcija tiek naudojant pavienius impulsus, tiek jų voras. Taip pat nustatėme, kad naudojant 1:3,2:0,64:0,128:... daliklį, galime pasiekti aukštesnių specifinio medžiagos pašalinimo laipsnio parametro verčių naudojant voras nei su 1:0,26:0,16:0,096:... dalikliu. Nors naudojant impulsų voras nepasiekėme aukštesnio medžiagos pašalinimo laipsnio negu naudojant pavienius impulsus, tačiau nustatėme keletą eksperimentinių parametrų, kuriuos pasirinkus šis skirtumas yra mažas. Didžiausias efektyvumas buvo pasiektas naudojant 1:3,2:0,64:0,128:... daliklį, kai energijos tankis <2 J/cm^2, tuomet specifinis medžiagos pašalinimo laipsnis plieno atveju buvo 15%, o vario atveju tik 5% mažesnis nei pavieniais impulsais suformuoto griovelio medžiagos pašalinimo laipsnį.

SUMMARY

MICROFABRICATION OF METALS WITH BURSTS OF FEMTOSECOND LASER PULSES

Ultrafast laser microfabrication of different materials using laser pulse bursts is a promising area of research, as long as this method can increase the throughput. In our paper, we sought to compare how micromachining of copper and steel using bursts differs from widely adopted metal processing using only single femtosecond pulses. In our first step, we analyzed the theoretical parts in our field of study, such as: ultra-short laser – metal interaction and two-temperature model describing it; dynamics of laser ablation, it characteristic parameters and quality increasing factors; pulse burst generation methods, incubation effect and pulse delay influence on ablation. Supplementary, we prepared an extensive review of other scientific papers related to our topic. In the experiment, a 1030 nm wavelength laser source with a repetition rate of 60 kHz and 3.2 W output power was used. For burst generation, using a retroreflector, we set up a free-space optical delay line, with two interchangeable beam splitters. The pulse delay was 1 ns, which corresponds to a 1 GHz repetition rate between pulses. By maintaining the same total energy as a single pulse, we created two bursts with corresponding energy distribution of 1:0.26:0.16:0.096:... and 1:3.2:0.64:0.128:... Firstly, in our experiments we determined the ablation threshold, optimum laser fluence, and beam widths for our used samples. In the second part, by varying the scanning speed from 300 mm/s to 1000 mm/s we inscribed grooves and visually assessed their form, width, depth, and surface structures around them. For a closer look, a scanning electron microscope was used. Finally, evaluation of ablation efficiency was made by comparing the specific removal rate and the depth-to-width ratio of the grooves generated by bursts and single pulses. Depth-to-width ratio measurements showed us that grooves processed with burst at low energy densities are relatively deeper, than their single pulse counterparts. As for the specific removal rate, it follows the same function for bursts and single pulses. We also found out that by using 1:3.2:0.64:0.128:... pulse sequence, we can achieve a higher specific removal, then using 1:0.26:0.16:0.096:... . Although, a higher specific removal rate was not achieved using bursts, compared to single pulses, we managed to observe few configurations where the margins are modest. The highest efficiency using 1:3.2:0.64:0.128:... sequence and <2 J/cm2 energy density was obtained, therefore for steel the removal rate was 15% and for copper only 5% lower compared to grooves ablated with single pulses.