

Vilniaus universitetas
Fizikos fakultetas
Lazerinių tyrimų centras

Robertas Lukošius

Keramikinių ir granitinių plytelių pjaustymas ir
ženklimas šviesolaidiniais lazeriais

Magistro baigiamasis darbas

(Studijų programa - Lazerinė technologija)

Studentas	Robertas Lukošius
Leisti ginti	2020-06-16
Darbo vadovas	Prof. Valdas Sirutkaitis
Konsultantas	Dr. Simas Butkus
LTC direktorius	Doc. A. Matijošius

Vilnius 2020

Turinys

Įvadas.....	4
1. Literatūros apžvalga.	6
1.1. Uolienos ir jų skirstymas pagal QAPF diagramą.....	6
1.2. Granitas	7
1.3. Didelės galios šviesolaidiniai lazeriai	7
1.4. Keraminių medžiagų apdirbimo metodų apžvalga.....	9
1.4.1. Pjovimas su deimantiniu disku	10
1.4.2. Pjovimas vandens srove.....	10
1.4.3. Pjovimas su raižymu ir laužimu	11
1.4.4. Žalias pjovimas	12
1.4.5. Lazerinis pjovimas.....	12
1.4.6. Raižymas dėl lazerio indukuotų įtempimų	14
2. Granito ir akmens masės plytelių pjovimas su 400 W galios šviesolaidiniu lazeriu	16
2.1. Eksperimento metodika.....	16
2.2. Granito ir akmens masės plytelių pjovimo eksperimento rezultatai	18
2.2.1. Akmens masės plokščių pjaustymas skenuojant pluoštą apskritimu 1 kartą	18
2.2.2. Akmens masės plokščių pjaustymas skenuojant pluoštą apskritimu 2 kartus	20
2.2.3. Akmens masės plokščių pjaustymas skenuojant pluoštą apskritimu 3 kartus	22
2.2.4. Granito plokščių pjaustymas:	24
2.2.5. Pradinės kiaurymės formavimas įvairaus storio ir įvairių rūšių granituose	25
2.2.6. Skylių pjovimas įvairaus storio ir įvairių rūšių granituose.....	26
3. Granito ir keramikos plokščių paviršiaus ženklėjimas.....	28
3.1. Eksperimento schema	28
3.2. Granito ir keramikos plokščių paviršiaus ženklėjimo rezultatai	29
Pagrindiniai rezultatai ir išvados:	31

Literatūros sąrašas	32
Santrauka	34
Summary	36

Ivadas

Lazerinis pjovimas ir lazerinis ženklimas yra plačiai naudojamos technologijos įvairių medžiagų apdirbime. Tai sąlygota tuo, kad lazerinis apdirbimas yra našesnis, o apdirbimo kokybė yra geresnė už pasiekiamą tradiciniais metodais. Todėl lazerinių sistemų medžiagų apdirbimui pardavimai pastoviai auga ir jos išstumia tradicinius apdirbimo metodus daugelyje pramonės sričių. Tačiau ir lazerinių sistemų rinkoje vyksta pasikeitimai. Yra kuriami nauji, geresnių savybių lazeriai ir jie keičia anksčiau naudotus.

Jau beveik dešimtmetis kai šviesolaidiniai lazeriai tapo plačiausiai industriniams taikymams naudojamu lazeriu tipu. Tai lėmė tokie šviesolaidinių lazerių pranašumai kaip didelė galia ir geras pluošto fokusuojamumas, didelis patikimumas ir mažos eksploatacinės sąnaudos, galimybė patikimai veikti industrinėje aplinkoje ir gana maži matmenys. Šviesolaidinių lazerių bangos ilgis yra ~1070 nm ir tokie lazeriai dalyje taikymų intensyviai išstumia CO₂ lazerius, generuojančius 10600 nm bangos ilgio spinduliuotę. Taigi svarbios tampa žinios kiek šviesolaidiniai lazeriai efektyviai gali pakeisti CO₂ lazerius, apdirbant tokias medžiagas, kurios tradiciškai buvo apdirbamos tik CO₂ lazeriais.

VU Lazerinių tyrimų centre taip pat yra įsigyta hibridinė šviesolaidinė sistema, susidedanti iš nuolatinės veikos šviesolaidinio lazerio skirto pjovimui ir moduluotos kokybės šviesolaidinio lazerio skirto ženklimui. Tokia hibridinė lazerinė sistema su tiksliais Aerotecho poslinkio stalais įgalina išpjauti reikiamos formos gaminius iš metalo ar kitos medžiagos lakštų ir jo paviršiuje padaryti reikiamus užrašus. Iki šiol tokiems gaminiams gaminti pagrindinai buvo naudojami metalo lakštai, tačiau dažnai domimasi ar ši sistema galėtų būti pritaikyta keramikos ir granito apdirbimui ir ženklimui, nors tradiciškai tokios medžiagos būdavo apdirbamos CO₂ lazeriais. Tai ir incijavo šiame darbe vykdytus keramikos ir granito plokščių lazerinio pjovimo ir ženklimo eksperimentus su šviesolaidiniais lazeriais.

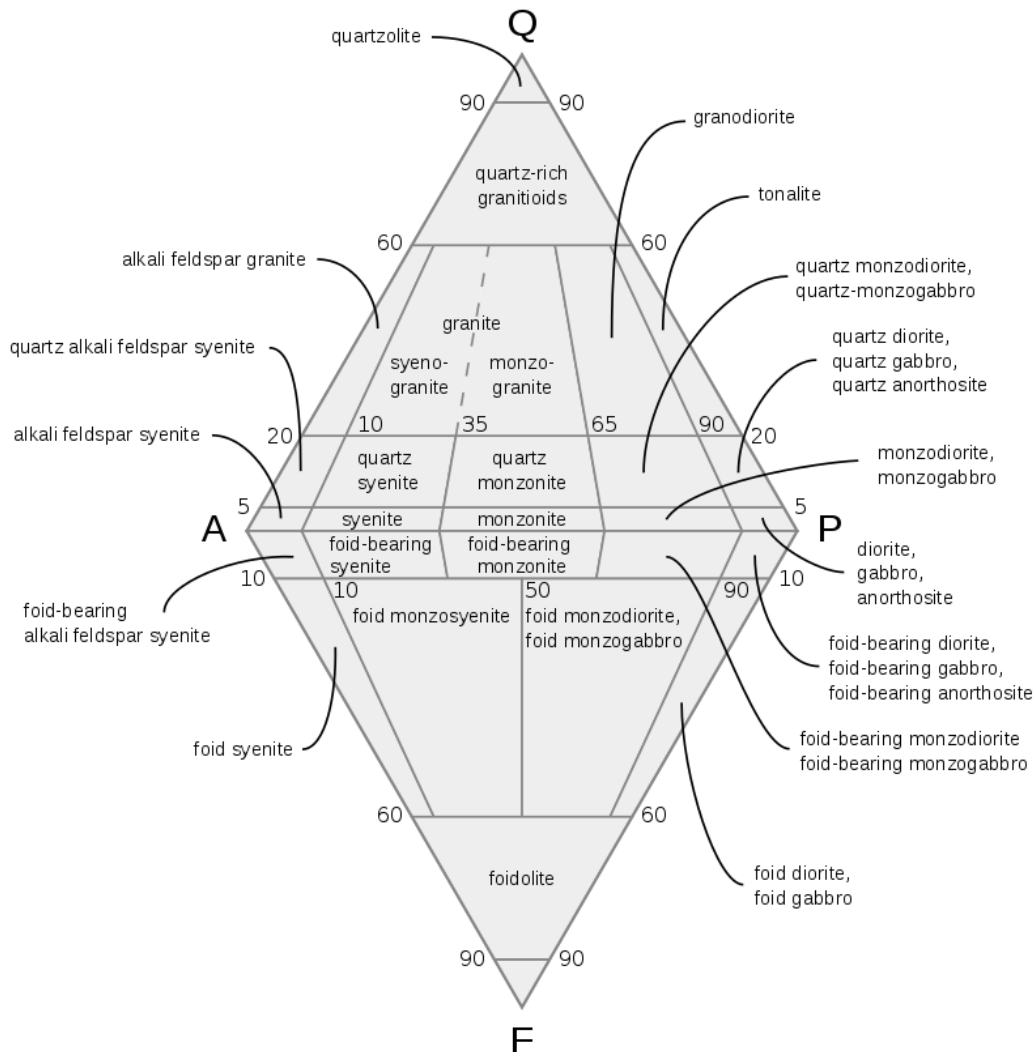
Akmuo, granitas ir keramika palyginti su kitomis medžiagomis pasižymi: dideliu kietumu, lėtu dėvėjimusi, temperatūriniu atsparumu, cheminiu stabilumu [1]. Tai apsprendžia tokių medžiagų tiek technologinį, tiek namudinį naudojimą. Granito technologinio naudojimo pavyzdžiai yra pagrindo plokštės tikslios mechanikos įranginiuose, tokiuose kaip Aerotech poslinkio stalai ir kitur, kur reikalingas didelis mechaninis ir temperatūrinis stabilumas. Akmens masės, keramikinės bei granito plytos ir plytelės kartu plačiai naudojamos vidaus apdailai, pastatams statyti, keliams tiesti, iš jų gaminami paminklai mirusiems atminti.

Šiame darbe vykdyti granito, akmens masės ir keramikinių plytelių lazerinio apdirbimo tyrimai, naudojant 400 W galios nuolatinės veikos iterbio šviesolaidinį lazerį, o lazerinio ženklavimo eksperimentuose pradžioje panaudotas diodinio kaupinimo nanosekundinis Nd:IAG lazeris NL202 (UAB „Ekspla“) su artimu šviesolaidiniam lazeriui bangos ilgiu, dėl moduluotos kokybės šviesolaidinio lazerio valdymo programos trikdžių.

1. Literatūros apžvalga.

1.1. Uolienos ir jų skirstymas pagal QAPF diagramą

QAPF diagrama yra dviejų trikampių diagramų schema, naudojama klasifikuoti vulkaninės kilmės uolienoms, pagrįsta mineralogine jų sudėtimi (1 pav.). Trumpinys QAPF reiškia Q – quartz (kvarcas); A – Alkali feldspar (šarminis lauko špatas); P – Plagioclase ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8 - \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ tipo mineralai); F – Feldspathoid arba Foid (bet kuri uolas formuojanti mineralų grupė, turinti mažiau silicio negu reikia lauko špato formavimui). Tai yra mineralų grupės naudojamos klasifikacijai QAPF diagramoje.



1 pav. QAPF diagrama (adaptuota iš [2]).

QAPF diagrama buvo sukurta tarptautinės geologijos mokslų sąjungos (International Union of Geological Sciences (IUGS)) [2]. Ši diagrama buvo pasiūlyta Albert Streckeisen, todėl ji dar vadinama „Streckeisen“ diagrama. Ši diagrama yra pripažįstama visame pasaulyje ir plačiai naudojama geologų [3].

QAPF diagramoje yra pasirinkti 4 pagrindiniai mineralai ar jų grupės. Q ir F dėl cheminių priedasčių negali egzistuoti kartu vienoje uolienoje. Kitos medžiagos ir mineralai nepriklausantys šioms keturioms grupėms gali ir dažniausiai bus uolienos sudėtyje, tačiau jos neturi įtakos klasifikacijai. Todėl medžiagos sudėtyje esančios QAPF mineralų koncentracijos turi būti perskaičiuojamos taip kad jų suma sudarytu 100% [4].

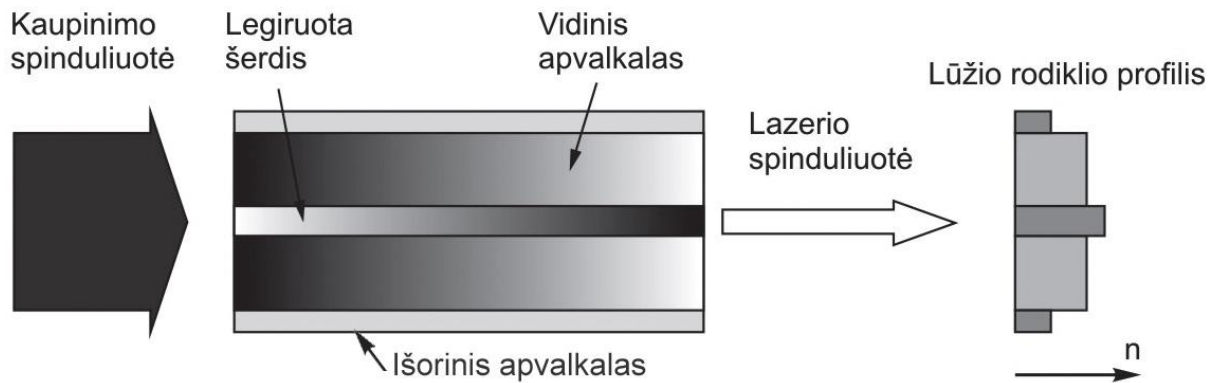
1.2. Granitas

Granitas yra plačiai paplitęs vulkaninės kilmės akmuo sudarytas iš grūdelių. Granitas dažniausiai būna baltos, pilkos, arba rožinės spalvos priklausomai, nuo jo sudėtyje esančių mineralų. Žodis „granite“ yra kilęs iš lotynų kalbos „granum“ (grūdas), jo struktūrą sudaro grūdeliai. Pagal QAPF klasifikaciją granitas yra vulkaninės kilmės akmuo, kurio sudėtyje yra nuo 20 iki 60 procentų kvarco ir bent 35 procentai šarminio lauko špato [5]. Tačiau kartais žodis „granitas“ yra vartojamas ir platesnei mineralinių medžiagų sudarytų iš granulių pavadinimui, kurie turi panašią tekstūrą. Šiuos akmenis daugiausia sudaro šarminis lauko špatas, kvarcas, žėručio mineralai, kurie sudaro atskiras granules tolygiai išsidėsčiusias granito matricoje [6]. Tipinė granito sudėtis yra: SiO_2 – 72,04%; Al_2O_3 -14,42%; K_2O – 4,12%; Na_2O – 3,69%; CaO -1,82%; FeO -1,68%; Fe_2O_3 -1,22%; MgO – 0,71%; TiO_2 - 0.30%; P_2O_5 – 0,12% ; MnO - 0.05%. [7] Sauso granito lydymosi temperatūra 1215 - 1260 °C [8], tačiau su vandeniu granito lydymosi temperatūra labai sumažėja ~ 650 °C esant keletu kbar slėgiui [9].

1.3. Didelės galios šviesolaidiniai lazeriai

Šviesolaidiniai lazeriai, kuriuos sugalvojo E. Snitzer dar 1961 m. [10] labai pažengė ir gali pasiekti kilovatų eilės galią ir yra plačiai naudojami medžiagų apdirbime. Didelis proveržis šviesolaidinių lazerių vystyme įvyko 1988 metais E. Snitzer pasiūlius dvigubo apvaskalo šviesolaidžio sandarą. Kaupinimas buvo įvedamas į vidinį apvaskalą o šerdyje, legiruotoje

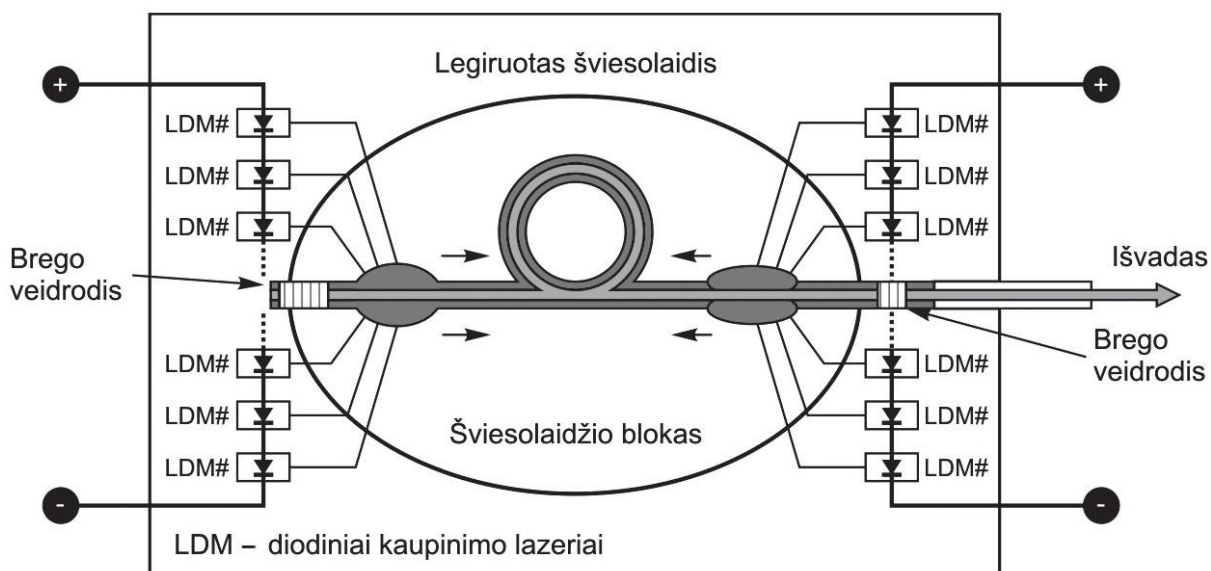
retųjų žemių elementais vyko lazerinė generacija [11]. Šviesolaidiniai lazeriai gali veikti, tiek nuolatinės veikos, tiek impulsinės veikos režimuose. Yterbiu legiruoti šviesolaidiniai lazeriai generuoja spinduliuotę artimame IR ruože ~ 1070 nm. Kaupinimui yra naudojami lazeriniai diodai. Šis bangos ilgis turi keletą privalumų: didelė spinduliuotės sugertis metaluose, spinduliuotės transportavimo galimybės šviesolaidžiais, nedidelis jautrumas lazerio indukuotai plazmai.



2 pav. Dvigubo apvaskalo šviesolaidis, naudojamas šviesolaidiniuose lazeriuose (adaptuota iš [12])

Šiuolaikinis šviesolaidinis lazeris, kuriame naudojamas dvigubo apvaskalo šviesolaidis (2 pav.), verčia diodinių lazerių aukštos skersinės modos (arba labai didelio M^2 skaičiaus) spinduliuotę į TEM_{00} arba žemos skersinės modos spinduliuotę. Palyginti su kitais kietojo kūno lazeriais (diskiniais ar strypiniais), kur naudojamas išorinis kaupinimas, įvedamas diskretiniais komponentais, šviesolaidžiuose lazeriuose lazerinė spinduliuotė yra generuojama šviesolaidyje, o kaupinimas įvedamas per šviesolaidžio skersgalį. Šviesolaidinis lazeris sukonstruotas taip, kad jo visi rezonatoriaus elementai yra šviesolaidyje, todėl jis yra mažiau sudėtingas nei kiti lazeriai. Didžiausios galios šviesolaidiniuose lazeriuose, gaminamuose „IPG Photonics Inc.“ kompanijos, yra naudojama konstrukcija, pateikta 3 pav. [12]. Čia naudojama iki 16 vieno emiterio lazerinių diodų, jų spinduliuotė šviesolaidžiais nukreipiama į lazerio šviesolaidį, kuris legiruotas iterbio (Yb) jonais. Rezonatorius yra uždaromas naudojant lazerines Brego gardeles, įrašytas šviesolaidyje ir atliekančias didelio atspindžio koeficiento veidrodžio ar iš dalies pralaidaus veidrodžio funkcijas. Rezonatorius yra pasyviai šaldomas ir kadangi jame nėra diskretinių optinių elementų niekada nėra jokio lazerio derinimo poreikio.

Visi rezonatoriaus komponentai yra šviesolaidyje, todėl lazeris atsparus šiluminiam smūgiams, vibracijoms ir užterštumui. Sudedant kelis šviesolaidžių modulius šviesolaidinio lazerio galia gali būti padidinta iki keleto ir net kelių dešimčių kilovatų, tuo pat metu išlaikant žemo indekso skersinę modą. Modulinė sistema leidžia didinti šviesolaidinio lazerio galią vėliau pridėdant papildomų modulių. Tai unikali lazerio galios didinimo galimybė, būdinga tik šviesolaidiniams lazeriams.



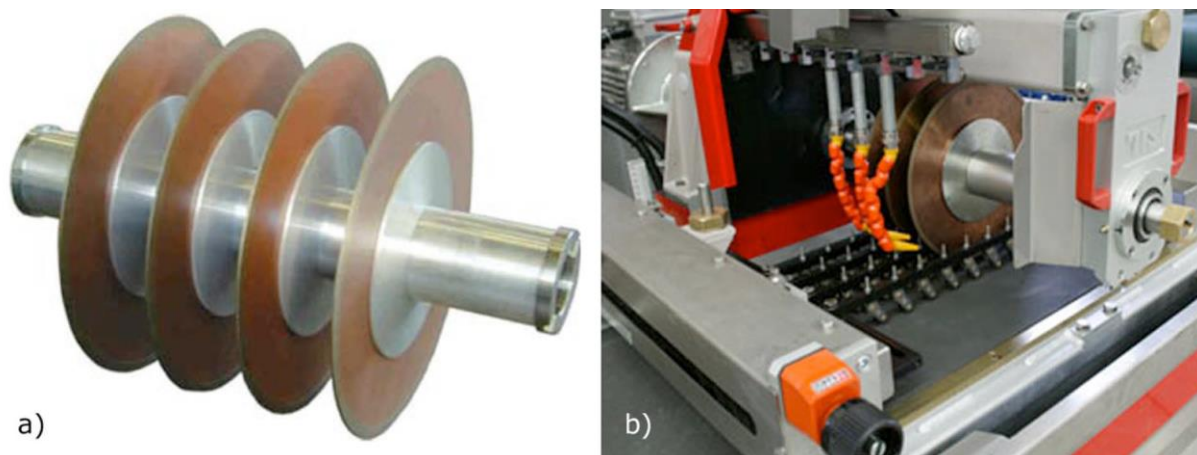
3 pav. Šviesolaidinio lazerio modulių schema (P=800W) (adaptuota iš [12])

1.4. Keraminių medžiagų apdirbimo metodų apžvalga

Žemiau pateikta keraminių medžiagų, kurioms priklauso ir granitai bei gamtiniai akmenys, apžvalga padaryta remiantis [13] publikacija. Keraminių plytelių pjovimas yra kritinis technologinis procesas pramoninėje gamyboje. Keraminės medžiagos pagal vidinę sandarą yra trapios ir nelabai lengvai išlaiko pjovimo procesą, ko pasekmėje stebimi nekontroliuojami įtrūkimai ir sugadinti dirbiniai. Dėl didelio paviršinio ir tūrinio keraminės medžiagos kietumo pjovimo įrankiai greitai dėvisi ir tai sąlygoja didelę pjovimo kainą ir mažą našumą. Per paskutinį dešimtmetį buvo sukurtos ar išvystytos kelios keraminių medžiagų pjovimo technologijos, kurias čia trumpai apžvelgsime.

1.4.1. Pjovimas su deimantiniu disku

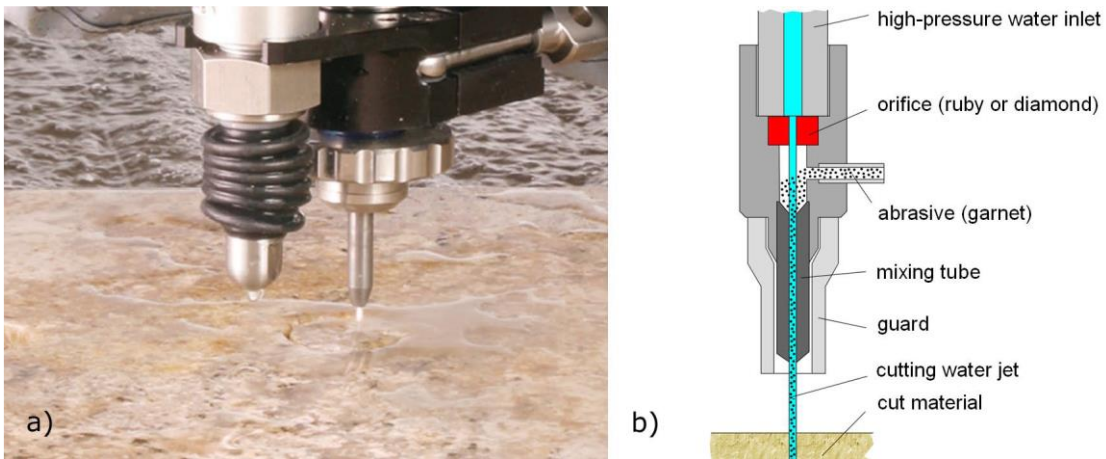
Pjovimas deimantiniu disku yra viena labiausiai paplitusių technologijų keramikos apdirbimo pramonėje. Šioje sistemoje naudojami metaliniai diskai, kurie savo sudėtyje turi įterptų deimanto granuliu. Pjovimo procese diskai yra stipriai šaldomi siekiant užtikrinti pjovimo kokybę ir diskų pjovimo efektyvumą. Pjovimo mašina turi būti tvirta ir stabili, kad apsaugotų diskus nuo pjovimo metu kylančių vibracijų dėl didelio pjovimo greičio. Pjovimas gali būti atliekamas tik tiesioje linijoje. Pjovimo disko storis yra keletu milimetrų. Pjovimo diskai ir pjovimo mašina pavaizduoti 4 pav. Akmens ir keramikos apdirbimas deimantiniais diskais yra brangus ir palyginti lėtas procesas. Pjovimo metu susidaranti atliekos yra kenksmingos aplinkai.



4. pav. Pjovimas su deimantiniu disku: a) pjovimo diskų eilė sumontuota ant pjovimo ašies, b) pjovimo mašina.

1.4.2. Pjovimas vandens srove

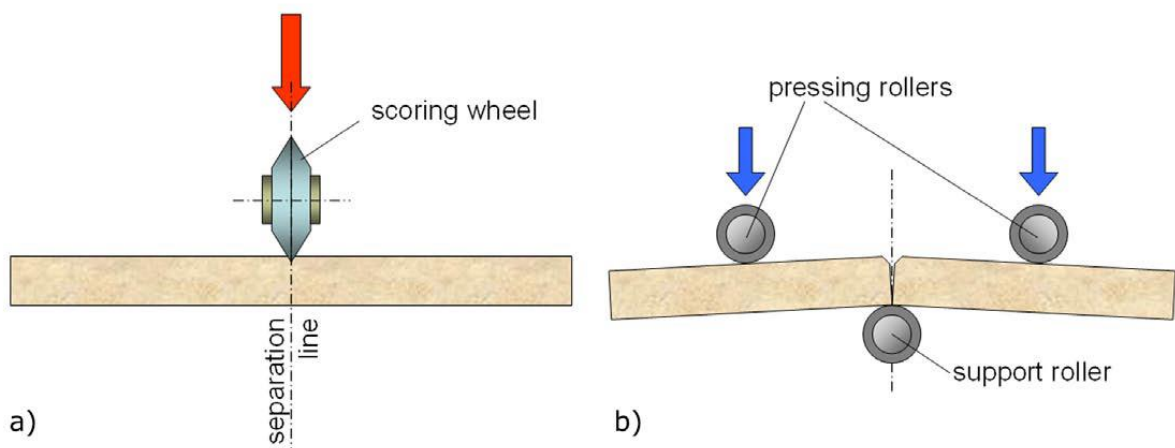
Pjovimas aukšto slėgio (3000 – 6000 bar. per 0,1 -0,2 mm diametro skylę viršgarsiniu greičiu apie 100 m/s) vandens srove yra universalus būdas apdirbti įvairias medžiagas: metalą, keramiką ir akmenį. Ši technologija leidžia atlikti įvairių formų pjūvius, neapsiriboja tik tiesia linija. Pjovimo procesas lėtas (1-2 m/min porceliano plytelėms), taip pat brangus, nes reikalingas abrazyvas, pjovimo atliekoms reikalinga utilizacija. Pjovimo vandens čiurkšle funkcinė schema pavaizduota 5 pav.



5 pav. Pjovimas vandens čiurkšle: a) keraminių medžiagų pjovimas, b) vandens čiurkšlės galvos funkcinė schema.

1.4.3. Pjovimas su raižymu ir laužimu

Pjovimo su raižymu ir laužimu sudaro du etapai. Pirmas: deimantiniu disku pravažiojama pjovimo linija. Antras: keraminė plyta yra įstatoma ant specialių tekinukų kurie atlieka laužimą. Pjovimo su raižymu ir laužimu schema pavaizduota 6 pav. Šio metodo efektyvumas labai priklauso nuo apdirbamos medžiagos, bei jos storio. Pjaustyti šiuo metodu galima tik lygaus paviršiaus plyteles, kai kurių medžiagų lūžio linija gali būti nekontroliuojama todėl šis metodas nėra tinkamas apdirbti visom akmens ir keramikos rūšims. Supjaustytos keraminės plytės reikalauja papildomo šlifavimo, nes lūžio kraštas nėra lygus.



6 pav. Pjovimas su raižymu ir laužimu: a) raižymas deimantiniu disku, b) laužimas

1.4.4. Žalias pjovimas

Žalias pjovimas tai technologija pristatyta SCAMI 2001 m [14]. Ji leidžia supjaustyti keramikos plokštes prieš atliekant iškaitinimo procesą. Žalio pjovimo mobili apdirbimo stotis naudoja plonus deimantinius diskinius pjūklus, jai nereikia aušinimo vandeniui. Įrenginys atlieka fiksuotus išilginius pjūvius kuriuos lengva reguliuoti programiškai. Šis metodas brangus, nes reikalingi deimantiniai pjovimo diskai, abrazyvas, po pjovimo gali atsirasti deformacijų, supjaustytų keramikų kraštus reikia papildomai apdirbti, pjaustyti galima, tik keramiką prieš iškaitinimo procesą. Žalio pjovimo mobili stotis pavaizduota 7 pav.



7 pav. Žalios pjovimo mašinos modelis TPD175

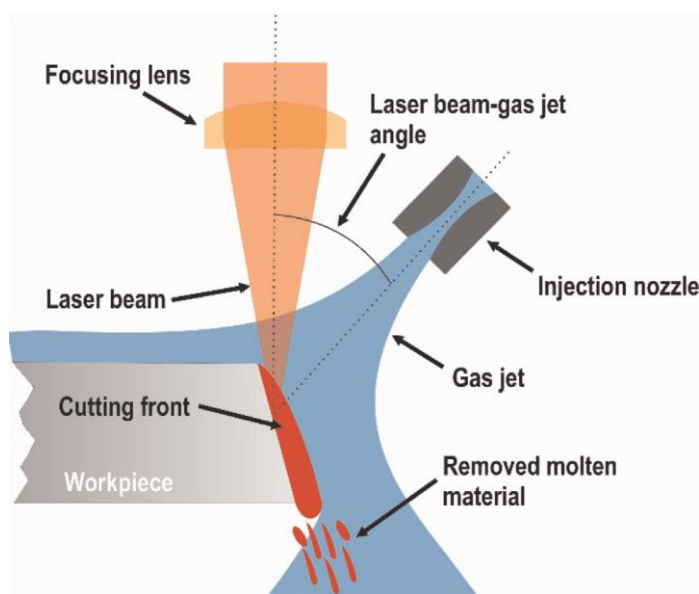
1.4.5. Lazerinis pjovimas

Lazerinis medžiagų pjaustymas yra labiausiai paplitęs medžiagų apdirbimo būdas. Didelės galios lazeriai leidžia išlydyti ir net išgarinti, beveik visas egzistuojančias medžiagas. Pjovimo proceso metu medžiaga sugeria energiją sufokusuotoje lazerio pluošto vietoje, toje medžiagos vietoje staigiai pakyla temperatūra ir medžiaga yra išlydoma arba esant dar didesniems intensyvumams medžiaga pradeda garuoti. Paprastai naudojamas būdas yra medžiagos išlydymas ir jos išpūtimas, kurio schema pateikta 8 pav. Dažniausiai naudojami lazeriai keraminių medžiagų pjaustymui buvo [15]:

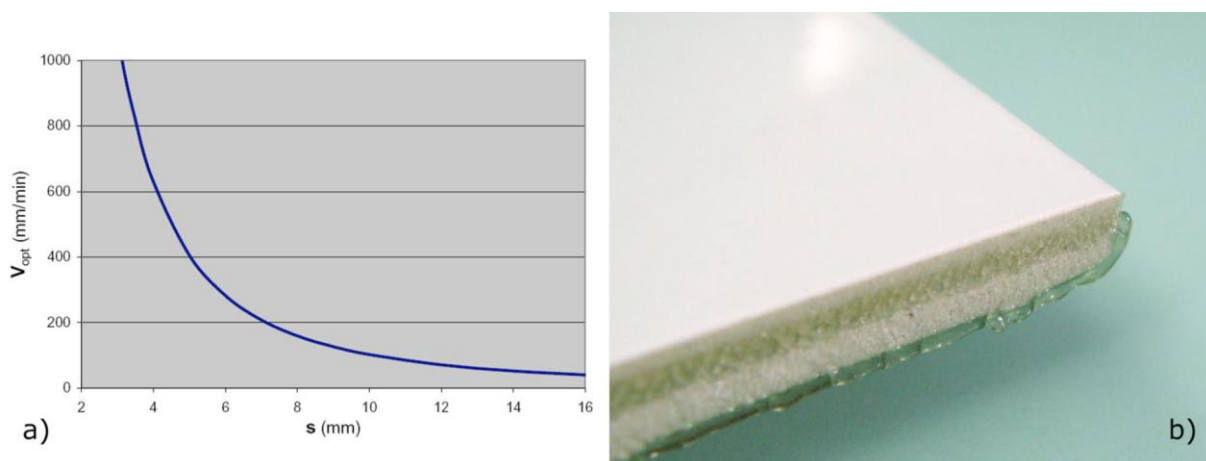
CO₂ lazeriai (aktyvi terpė kurioje generuojama lazerinė spinduliuotė yra anglies dioksido dujos). Bangos ilgis 10,60 μm, o lazeris gali dirbti nuolatine ar impulsine veika. Pluošto nukreipimui naudojami veidrodžiai, o fokusavimui naudojami ZnSe lęšiai arba šaldomi metaliniai veidrodžiai.

Nd:YAG lazeris, kurio aktyvi terpė yra kietojo kūno itrio aliuminio granatas su neodimio priemaišomis. Jis generuoja 1,06 μm spinduliuotė, kuri gali būti perduodama šviesolaidžiu, dirba nuolatinėje ar impulsinėje veikoje. Dabar šis lazeris pagrindinai pakeičiamas nuolatinės veikos šviesolaidiniais lazeriais, kurie gali veikti ir impulsinėje veikoje ir užtikrina geresnį galingos spinduliuotės fokusavimą.

Akmenų ir granito pjovime buvo panaudoti ir didelės galios diodiniai lazeriai, kurie priklausomi nuo naudojamos puslaidininkinė medžiagos gali generuoti 700 - 1200 nm srityje. Paprastai veikia nuolatinė veika, bet gali būti generuojami ir ilgi impulsai.



8 pav. Lazerinio keramikos pjovimo ją išlydant ir išpučiant metodas (adaptuota iš [16])

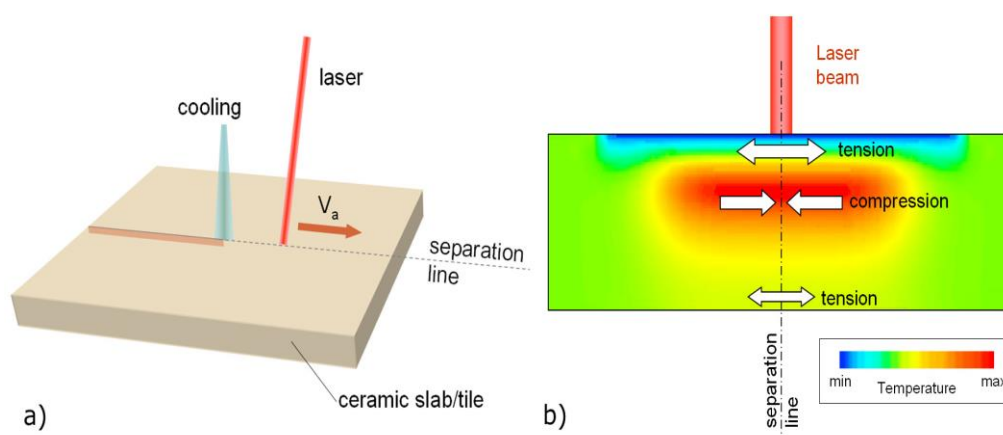


9 pav. Keramikos pjovimo greičio priklausomybė nuo storio (a) ir pjūvio vaizdas (b)

Kaip matosi iš 9 pav. keramikos pjovimo greitis ją išlydant ir išpučiant yra gana mažas. 8-10 mm storio plytelėms jis yra tik 100-200 mm/min. Plonesniems keramikos lakštams pjovimo greitis didėja, bet tam nėra didelio poreikio. Be nedidelio greičio, nupjauti kraštai dažnai yra su išlydytomis ir termiškai pažeistomis sritimis. Tai sąlygojo greitesnių ir industrijai labiau tinkančių metodų paiešką. Buvo perimtas iš stiklo pramonės įtempimų sudarymo ir skaldymo metodas.

1.4.6. Raižymas dėl lazerio indukuotų įtempimų

Šis sprendimas pagrįstas technika, vadinama raižymu dėl lazerio indukuotų įtempimų. Ši metodika įtempimų sudarymui naudoja CO₂ lazerį, kurio spinduliuotė yra sugerama keramikoje. Medžiagos įtempiai sudaromi taip, kad susidarytų įtrūkimai ir jis plintų išilgai norimos atskyrimo linijos, neišlydydamas keramikos medžiagos kaip yra daroma lazerio pjovimo atveju. Ši patentuota technika [3] iš pradžių buvo sukurta pjaustant plokščio stiklo plokštėms, bet vėliau pritaikyta keramikos skaldymui.



10 pav. Raižymo dėl lazerio indukuotų įtempimų darbo principas (a) ir medžiagoje po šaldymo susidarę įtempimai.

10 a paveiksle parodytas darbo principas: lazerio pluoštas šildo paviršių palei reikalaujamą atskyrimo liniją, po kurios eina tinkamas aušinimo įtaisas. Tokia šiluminių gradientų seka sukuria suspaudimo ir įtempimų būseną medžiagoje kol paviršius yra įtemptas. 10 b pav. pavaizduotas temperatūros pasiskirstymas medžiagos skerspjūvyje. Dėl pakaitinio šiluminio poveikio, viršutinis paviršius yra įtemptas, o viršijus kritinę vertę (K_{Ic}), įtrūkimai prasideda ir plinta išilgai tiesios linijos (laikantis režimo I lūžio atidarymo mechanizmo). 11 pav. paveiksle išsamiai parodyta reikalinga įranga. Automatinės valdymo sistemos nebuvo įtrauktos į iliustracijas. Iš lazerio šaltinio sklindantį pluoštą sufokusuoja optinis lęšis ir

nukreipia į skenavimo veidrodį. Nuskaitymo veidrodis, tinkamai valdomas programinės įrangos, nukreipia pluoštą išilgai atskyrimo linijos pagal išdėstytą eilę daugybė kartų (žr. 11 b paveikslą). Lazerinio skenavimo greitis „Vscan“ yra apie 10 ÷ 20 m / s ir juda per tam tikrą ilgį L_{scan} . Ilgis L_{scan} gali būti paderinamas pagal bendrą pjovimo greitį. Tokiu būdu įmanoma visiškai kontroliuoti temperatūros pasiskirstymą keraminės plokštės viduje. Tam tikru atstumu iš lazerio pluošto aušinimo sistema juda lygiagrečiai ir purškia orą ir vandenį ant plokštės, todėl viršutinis paviršius greitai atvėsta. Keraminių plokščių pjaustymo bandymo įrangoje naudojamos vertės yra tokios:

$$P = 800 \text{ W}$$

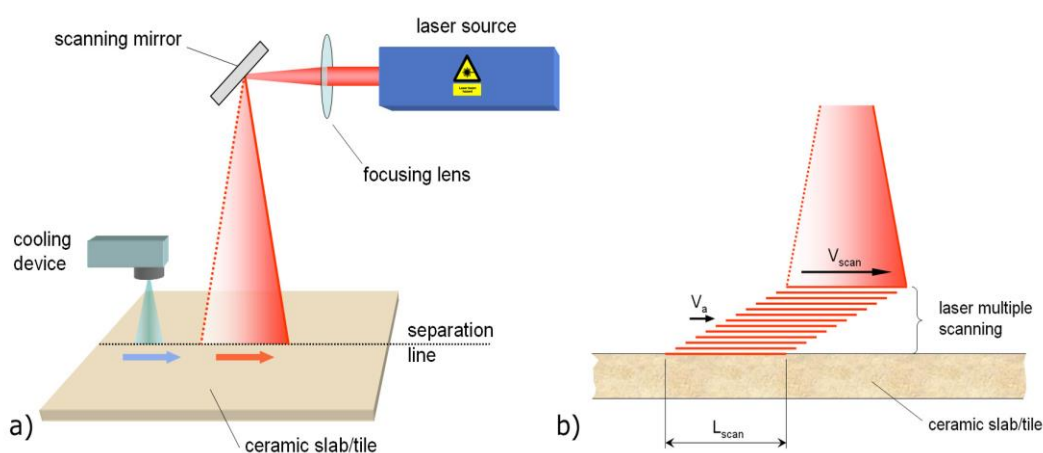
$$d = 4,2 \div 11,5 \text{ mm}$$

$$„Vscan“ = 5 \div 25 \text{ m / s}$$

kurie suteikia:

$$E_{spec} = 0,003 \div 0,038 \text{ J / mm}^2$$

Reikėtų pažymėti, kad LIIR technologija šildymui naudoja lazerio energiją pjovimo zonoje, neišlydant medžiagos. Tiesą sakant, būtina nustatyti tinkamą temperatūros pasiskirstymą srityje šalia pjūvio per tikslų kelių lazerio skenavimų valdymą. Pagal rezultatus geros kokybės gabalai buvo gaunami pjovimo greičiu V_a neviršijant 2 m/min. Jei plokštės storis padidėja, priimtina V_a vertė toliau mažėja. LIIR technologija, taikoma keramikos lauke (net jei laboratorijos lygiu) rodo džiuginantys rezultatai. Tačiau norint jį nustatyti, reikia atlikti papildomus patikrinimus dėl galimybių ir išlaidų pramoniniu lygiu. Jei galutiniai rezultatai, būtų palyginami su kitomis technologijomis ir teigiami juos būtų įmanoma įdiegti automatiniam plytelių pjaustymui.



11 pav. Raižymo dėl lazerio indukuotų įtempimų metodas: a) pjovimo įranga - b) daugybinio skenavimo metodas.

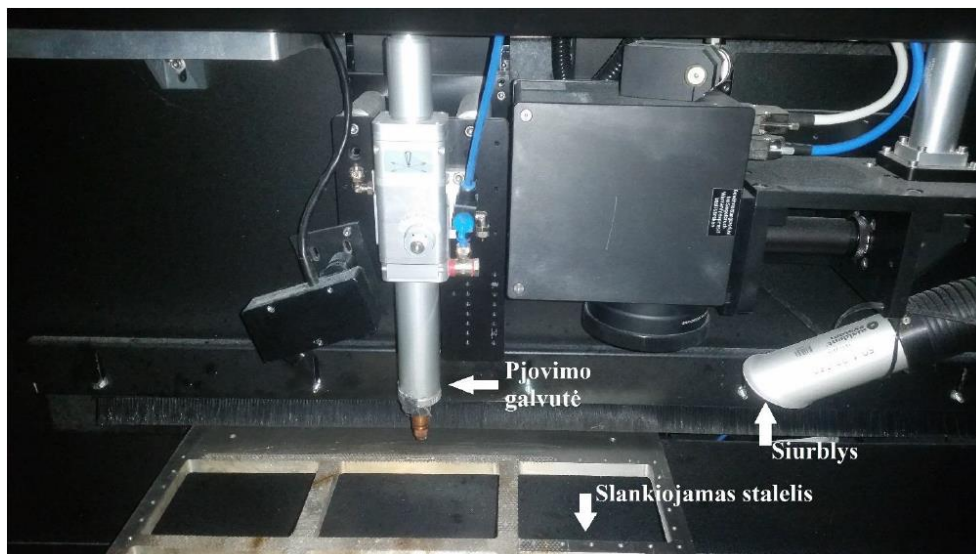
2. Granito ir akmens masės plytelių pjovimas su 400 W galios šviesolaidiniu lazeriu

2.1. Eksperimento metodika

Eksperimentas buvo atliktas su akmens masės (storis 0,9 cm) ir granito (storis 1 cm) plytelėmis. Jose buvo pjaunamos 5 mm spindulio apskritimo formos skylės, tarpas tarp pjaunamų skylių buvo 1,5 cm, naudojant 200, 300 ir 400 W lazerio galią. Pjaunant su kiekviena iš nurodytų galių buvo keičiamas pjovimo greitis ir apvažiavimu apie kiekvienos skylės kontūrą skaičius. Eksperimente buvo naudojama SPI kompanijos R4.3 didelės galios šviesolaidinio lazerio sistema, kuri dirbo nuolatinės veikos režime. Pjovimo sistema susidėjo iš lazerio, pjovimo galvutės, Aerotech stalų užtikrinančių poslinkius x ir y ašyse, pjovimo procese susidariusių dujų išmetimo sistemos. Lazerio spinduliuotės bangos ilgis buvo 1050-1250 nm srityje su centriniu bangos ilgiu 1070 ± 10 nm. Pjovimui kaip pagalbinės dujos buvo naudojamas – 12 bar slėgio oras. Lazerinė sistema pavaizduota 12 ir 13 pav., o pjovimo galvutė buvo pavaizduota 8 pav.



12 pav. R4.3 lazerinė sistema.

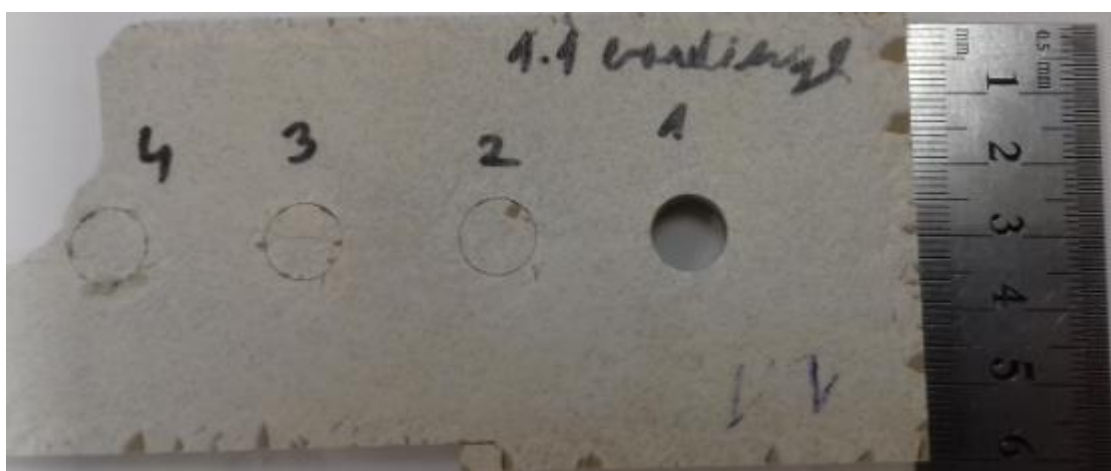


13 pav. Lazerinė sistema.

2.2. Granito ir akmens masės plytelių pjovimo eksperimento rezultatai

2.2.1. Akmens masės plokščių pjaukimas skenuojant pluoštą apskritimu 1 kartą

Eksperimento pradžioje tam, kad rasti tinkamiausią pjaukimo greitį, su kiekviena iš pasirinktų 200, 300, 400 W galių parinkome skirtingus pjaukimo greičius 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 4; 6; 8 mm/s. Naudojant 400W galią ir 6 mm/s pjovimo greitį akmens masės plytelė persipjauna nevisiškai, pjaunant dar greičiau - 8 mm/s akmens masės plytelė nebepersipjauna. Pjaunant su 400 W galia, bet lėtai t.y. 0,5; 0,75; 1 mm/s greičiais visa plytelė skyla. 14 ir 15 pav. parodyta akmens masės plytelė pjauta su 400 W su 1,5; 2; 4; 6 mm/s greičiais su 1 apėjimu.



14 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 400 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s; 4 skylė - 6 mm/s.



15 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės: dešinėje - 1 skylė; kairėje - 4 skylė, kuri nepersipjovė kiaurai.

Pjaunant akmens masės plytelę su 300 W galią ir pjovimo greičiu 6 mm/s ir greičiau plytelė nėra perpjaunama. Pjaunant lėtai - 0,5; 0,75; 1 mm/s greičiais plytelė skyla. 16, 17 pav. parodyta akmens masės plytelė pjauta su 300 W su 1,5; 2; 4; 6 mm/s greičiais su 1 apėjimu.



16 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 300 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s; 4 skylė - 6 mm/s.



17 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės: dešinėje - 1 skylė; kairėje - 4 skylė nepersipjovė kiaurai, todėl jos nematome.

Pjaunant su 200 W galia akmens masės plyteles visais mano naudotais pjovimo greičiais plytelė sutrūkinėjo, dėl šios priežasties eksperimentas nebebuvo tęstas su 2 ir daugiau kartų apvedant skylės kontūrą sufokusuotu pluoštu. Pjaunant didesniu nei 2 mm/s greičiu plytelė nebuvo perpjauta kiaurai. 18, 19 pav. matome akmens masės plytelės nuotraukas, kuriose buvo pjautos skylės 1,5; 2; 4; 6 mm/s greičiais.



18 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 200 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s; 4 skylė - 6 mm/s greitis.



19 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės: dešinėje 1 skylė; kairėje 3 ir 4 skylė nepersipjovė kiaurai, todėl jų nematome. 2 skylė persipjovė dalinai.

2.2.2. Akmens masės plokščių pjaustymas skenuojant pluoštą apskritimu 2 kartus

Eksperimentas buvo atliekamas su akmenų masės 0,9 cm. storio plytelėmis pjovimui buvo naudojama 300 ir 400 W nuolatinės veikos šviesolaidinio lazerio galios. Pjovimo greičiai, naudoti pjaunant tokias pat 5 mm skersmens skylės su tarpais tarp skylių 1,5 cm buvo 1,5; 2; 4; 6 mm/s. Pjovimo rezultatai pavaizduoti 20, 21, 22 pav.



20 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 400 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s; 4 skylė - 6 mm/s; pjovimą pakartojant 2 kartus.



21 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės, dešinėje 1 skylė.



22 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 300 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s; 4 skylė - 6 mm/s, pjovimą pakartojant 2 kartus.



23 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės, dešinėje 1 skylė.

2.2.3. Akmens masės plokščių pjavimas skenuojant pluoštą apskritimu 3 kartus

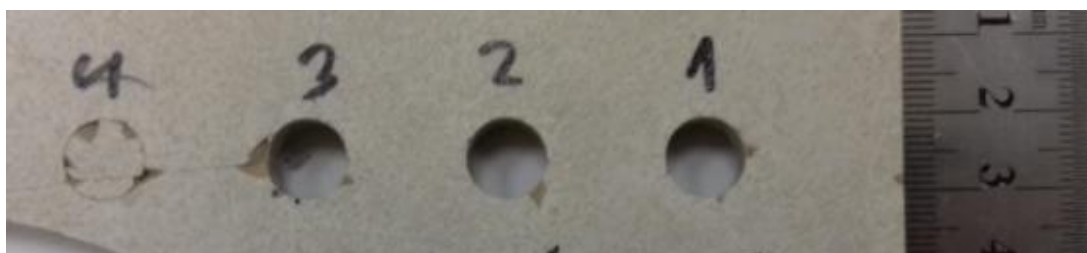
Eksperimentas buvo atliekamas su akmens masės 0,9 cm. storio plytelėmis pjovimui buvo naudojama 300 ir 400 W nuolatinės veikos šviesolaidinio lazerio galios. Pjovimo greičiai, naudoti pjaunant tokias pat 5 mm spindulio skylės su tarpu tarp skylių 1,5 cm buvo 1,5; 2; 4; 6 mm/s. Pakartojama buvo 3 kartus. Pjovimo rezultatai pavaizduoti 24, 25, 26, 27 pav.



24 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 400 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s greitis; 4 skylė - 6 mm/s, pjovimą pakartojant 3 kartus.



25 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės, dešinėje 1 skylė.



26 pav. Akmens masės plytelė pjauta naudojant 300 W nuolatinės veikos šviesolaidinį lazerį. Naudoti pjovimo greičiai: 1 skylė (iš dešinės) - 1,5 mm/s; 2 skylė - 2 mm/s; 3 skylė - 4 mm/s; 4 skylė - 6 mm/s, pjovimą pakartojant 3 kartus.



27 pav. Vaizdas iš kitos plytelės pusės, dešinėje 1 skylė.

2.2.4. Granito plokščių pjaustymas:

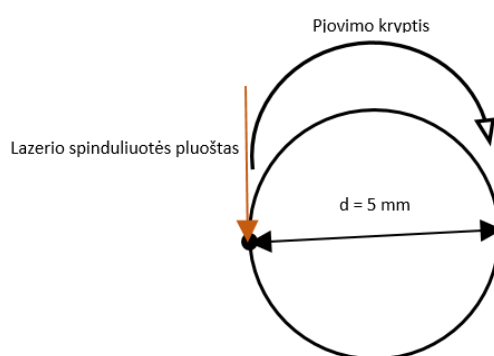
Naudojant tas pats eksperimento sąlygas, buvo bandyta pjauti skylės 1 cm storio granito plokštelėje. Deja naudojant įvairius pjovimo greičius ir įvairias lazerio galias pjovimo procesas baigėsi tik prasidėjęs, nes granito plokštė sutrūkinėjo. Išpjauti pavyko, tik vieną skylę kiaurai naudojant 400 W galią 0,1 mm/s greičiu su 2 pakartojimais (28 pav.), tačiau net ir naudojant tas pačias sąlygas pakartoti rezultato nepavyko.



28 pav. Granito plokštėje išpjauta 5 mm skersmens skylė su 400 W lazerio galia, 0,1 mm/s greičiu, 2 kartus pakartojant pjovimą apskritimu.

2.2.5. Pradinės kiaurymės formavimas įvairaus storio ir įvairių rūšių granituose

Skirtingų granito rūšių pjaustymas buvo vykdomas su 400 W nuolatinės veikos šviesolaidiniu lazeriu. Eksperimentas buvo atliktas su trimis granito rūšimis (Indiškas juodas, Šviesus pilkas ir Wiscount white). Šio tyrimo metu buvo bandoma nustatyti: 1) per kiek laiko pramušama skylė skirtingo storio granito plokštelėse; 2) Buvo pjaunamos 5 mm diametro skylės. Pjovimas buvo atliekamas pirma pramušant skylę plokštelėje kiaurai, tada pjaunamas apskritimas skirtingais greičiais. Pjovimo schema pavaizduota (26 pav.)

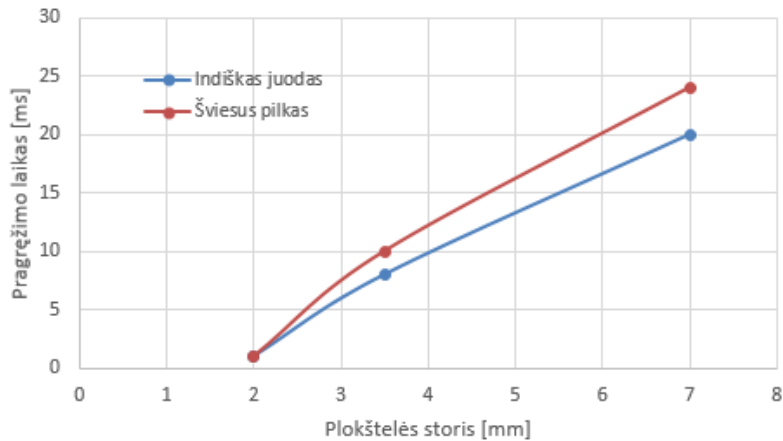


29 pav. Kiaurymės formavimo ir tolimesnio pjovimo schema.

1) Eksperimentas atliktas Indiško juodo ir Šviesaus pilko granito 2; 3,5; 7 mm granito storių plokštelėse keičiant 400W nuolatinės veikos lazerio apšvietimo laiką. Lazeris buvo įjungiamas ir išjungiamas po tam tikro laiko.

Šviesaus pilko granito 2 mm plokštelė skylė buvo išgręžta per 1ms. 3,5 mm storio plokštelėje skylė buvo pragręžta per 10 ms; 7 mm storio plokštelėje skylė buvo pragręžta per 24 ms.

Indiško juodo granito 2 mm plokštelėje skylė buvo išgręžta per 1ms. 3,5 mm storio plokštelėje skylė buvo išgręžta per 8 ms; 7 mm storio plokštelėje skylė buvo pragręžta per 20 ms. Eksperimento rezultatai pateikti (30 pav.) grafike.



30 pav. Pragręžimo trukmės priklausomybė nuo plokštelės storio Indiškam juodame granite ir Šviesiai pilkame granite.

2.2.6. Skylių pjovimas įvairaus storio ir įvairių rūšių granituose

Wiscount white 2; 3,5 mm storio granito plokštelėse buvo bandyta pjauti 5 mm diametro skylės su 400 W nuolatinės veikos šviesolaidiniu lazeriu, 1 apvažiavimu keičiant pjovimo greičius 0,5; 0,8; 1; 1,5 mm/s greičiais. Skylių išpjauti nepavyko, tik pradėjus pjauti Wiscount white granito plokštelės suskildavo.

Šviesaus pilko granito 2; 3,5; 7 mm storio plokštelėse bandyta pjauti 5 mm diametro skylės su 400W nuolatinės veikos šviesolaidiniu lazeriu, 1 apvažiavimu, parenkant pjovimo greičius lygius 0,5; 0,8; 1; 1,5; 2,5 mm/s. Pjaunant visais šiais greičiais šviesus pilkas granitas suskyla ir plokštelė sutrupa.

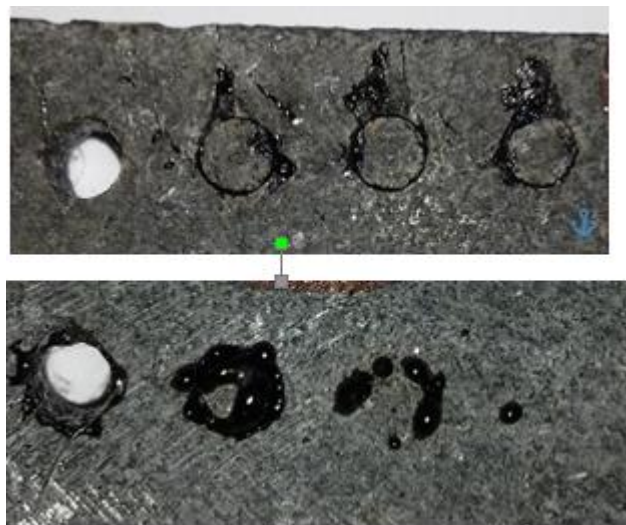
Indiško juodo granito 2; 3,5; 7 mm storio plokštelėse pjauta 5 mm diametro skylės su 400 W nuolatinės veikos šviesolaidiniu lazeriu, 1 apvažiavimu, keičiant pjovimo greičius.

Indiško juodo granito 2 mm storio plokštelė eksperimento metu pjaunant sutrupėjo, išpjauti skylių nepavyko. Pjaunant 3,5 mm Indišką juodą granito plokštelę įvairiais greičiais išpjauti pavyko naudojant 3; 5; 7; 10; 15; 20; 25; 30 mm/s greičius. Pradinei skylei pramušti lazeris buvo laikomas pjovimo pradžios taške 10 ms. Pjaunant lėčiau bandinys skyla. Pjaunant greičiau perpjauti nepavyksta. Pjovimo rezultatai pateikti (31 pav.)



31 pav. 3,5 mm storio Indiško juodo granito plokštelės pjovimas keičiant pjovimo greitį. Iš kairės skylės išpjautos 2; 3; 5; 7; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40 mm/s pjovimo greičiai.

Pjaunant 7 mm storio Indiško juodo granito plokšteles su 400 W nuolatinės veikos šviesolaidiniu lazeriu įvairiais greičiais pradinei skylėi pramušti lazeris buvo laikomas pjovimo pradžios taške 20 ms. Pjovimo greičiai < 10 mm/s netinka nes plokštelė skyla. Pjaunant > 10 mm/s greičiais plokštelė nėra perpjaunama. Rezultatai pateikti (32 pav.)



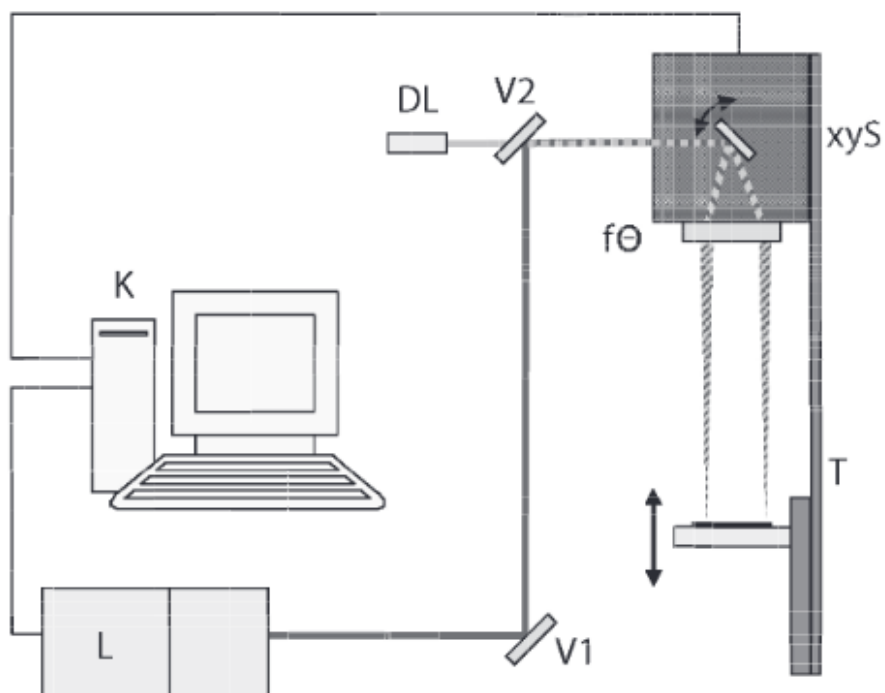
32 pav. 7 mm storio Indiško juodo granito plokštelės pjovimas keičiant pjovimo greitį. Iš kairės skylės išpjautos 10; 12,5; 15; 20 mm/s pjovimo greičiais.

3. Granito ir keramikos plokščių paviršiaus ženklinimas

3.1. Eksperimento schema

Eksperimentas atliktas naudojant metalinių paviršių ženklinimui skirtą sistemą, esančią lazerinių tyrimų centre (33 pav). Ją sudaro:

1. Diodinio kaupinimo nanosekundinis Nd:YAG lazeris NL202 (UAB „Ekspla“).
2. Eksperimentinės schemos derinimui skirtas diodinis lazeris.
3. Nukreipiančių veidrodžių ir pluošto daliklių sistema.
4. Galvanometriniai skeneriai su valdymo bloku.
5. f-Theta objektyvas (AR 1064 nm, EFL = 163 mm).
6. Bandinio pozicionavimo sistema.
7. Bandinys.
8. Kompiuteris.



33. Lazerinio ženklavimo stendo principinė schema: V1, V2 – dielektriniai veidrodžiai, L – lazeris, DL – diodinis derinimo lazeris, xyS – dviejų koordinatinių galvanometrinių skenerių, fθ – f-Theta lęšis, T – transliacinis stalėlis, skirtas bandiniui pozicijuoti ir K – eksperimentą valdantis kompiuteris.

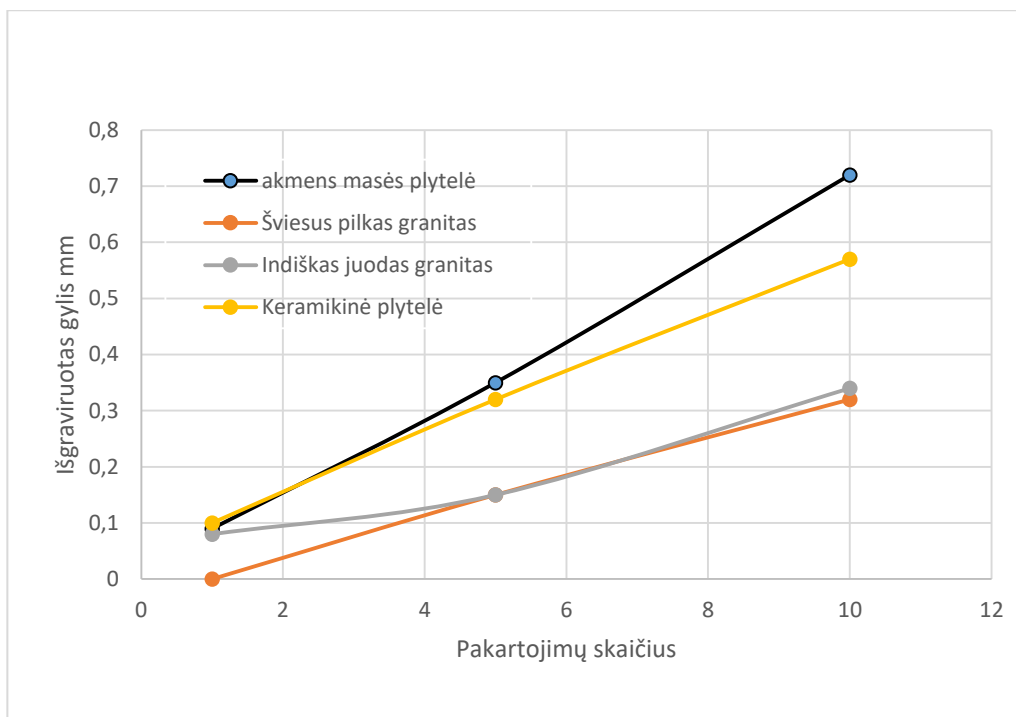
3.2. Granito ir keramikos plokščių paviršiaus ženklavimo rezultatai

Šio tyrimo metu buvo bandoma graviruoti ant Indiško juodo granito bei akmens plytelės. Tyrimuose naudotas nuolatinio kaupinimo moduluotos kokybės lazeris generuojantis ~ 15 ns trukmės impulsus su pasikartojimo dažniu 25 kHz. Eksperimente buvo keičiama graviravimui naudojamų 1064 nm bangos ilgio impulsų vidutinė galia (2, 4, 6 W), lazerinės spinduliuotės pluošto skenavimo greitis (400, 800, 1600 mm/s), skenavimo pakartojimų skaičius (1, 5, 10) bei poslinkis tarp linijų dx (0,005, 0,02, 0,035 mm). Išgraviruoti paviršiai buvo stebimi su optiniu mikroskopu Olympus BX51 su Qimaging CCD kamera microPublisher 5.0 ir kompiuteriu per 10 kartų didinantį objektyvą ir matuojamas išgraviruoto paviršiaus gylis. Rezultatai pateikti 3.1 lentelėje bei 34 pav.

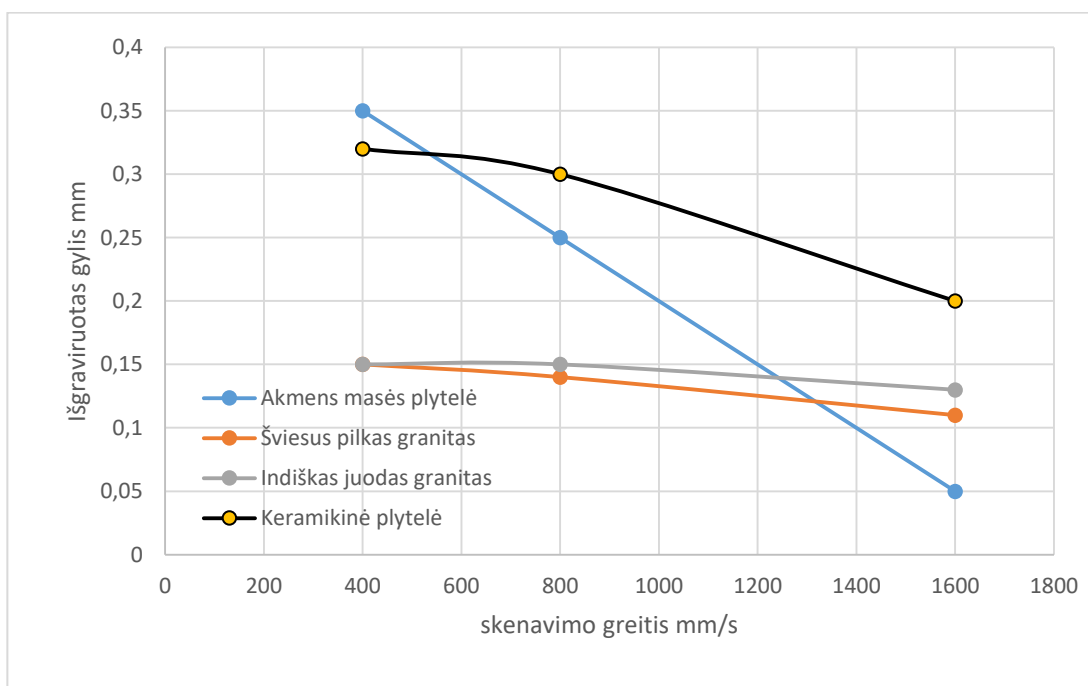
3.1 lentelė. Akmens masės plytelės graviravimo gylyai keičiant naudojamus parametrus. Graviravimui naudota 6 W vidutinė galia				
Lazerio galia (W)	dx (mm)	Skenavimo greitis (mm/s)	Pasikartojimų skaičius	graviravimo gylis mm
6	0,005	400	1	0,09
6	0,005	400	5	0,35
6	0,005	400	10	0,72
6	0,005	800	5	0,25
6	0,005	800	10	0,44
6	0,005	1600	5	0,05
6	0,005	1600	10	0,32
6	0,02	400	5	0,1
6	0,02	400	10	0,267

Graviruojant akmens masės plytelę ir keičiant numatytus parametrus (skenavimo greitį, pasikartojimų skaičių, lazerio vidutinę galią, dx) pastebime, jog graviravimas vyksta tik su 6 W vidutine galia naudojant greičius nuo 400 iki 1600 mm/s su dx 0,005. Sumažinus lazerio vidutinę galią graviravimo slenkstis neperžengiamas ir medžiagos paviršius lieka nepakitęs. Taip pat padidinus dx vertę iki 0,02 su 400 mm/s skenavimo greičiu su daug pakartojimų graviravimas vyksta, bet padidinus skenavimo greitį su daug pakartojimų graviravimo procesas stebimas, bet padidinus skenavimo greičius nebevyksta.

Graviruojant Indiško juodo granito plytelę ir keičiant numatytus parametrus (skenavimo greitį, pasikartojimų skaičių, lazerio vidutinę galią, dx) matome jog graviravimas vyksta geriau. Išgraviruotas paviršius matomas ir naudojant 6 ir 4 W vidutinę galią. Tai vyksta todėl, kad juodos spalvos granitas sugeria geriau lazerinę spinduliuotę lyginant su kitomis granito atmainomis



34 pav. Graviravimo gylio priklausomybė nuo pakartojimų skaičiaus esant pastoviam graviravimo greičiui 400 mm/s ir $dx = 0,005$ mm lazerio vidutinė galia 6 W.



35 pav. Graviravimo gylio priklausomybė nuo skonavimo greičio naudojant 6 W vidutinę lazerio galią $dx = 0,005$ mm pakartojimų skaičius 5.

Pagrindiniai rezultatai ir išvados:

1. Geriausiai perpjauti akmens masės plokštę pavyko naudojant 400 W galią ir 1,5 mm/s pjovimo greitį vienu pluošto skenavimo apskritimu, taip pat su 300 W 1,5 ir 2 mm/s greičiais darant pluošto skenavimą apskritimu 2 ir 3 kartus.
2. Darant daugiau pluošto skenavimų apskritimu su mažesne vidutine galia pjūvio kokybė gerėja.
3. Besikeičiančios struktūros granito plokštės tokios kaip margo granito plokštės nėra tinkamos lazeriniams pjovimui su šviesolaidiniu lazeriu, nes dėl granuluotos struktūros ir skirtingo šiluminio plėtimosi skirtingose pjūvio vietose plokštėje atsiranda trūkiai ir plokštė suskyla arba net sutrupa.
4. Vienalytės granito plokštės tokios kaip juodo Indiško granito plokštės gali būti pjaustomos 400 W galios šviesolaidiniu lazeriu, tačiau plokštelių storis turėtų būti nemažesnis už ~3 mm kad ji neskiltų dėl įtempimų bei nestoresnės nei 6 mm kad galima būtų perpjauti.
5. Ženklinimas moduluotos kokybės lazeriu generuojančiu 1060-1080 spektro srityje efektyviausias yra ant keraminių plokštelių bei vienalyčio juodo granito poliruotų paviršių.
6. Nors keraminių plytelių graviravimo slenkstis panašus į indiško juodo granito eksperimentuose su vidutine 4 W galia, $dx = 0,02\text{mm}$, skenavimo greičiu 400 mm/s ir 10 pakartojimų, tačiau pasiektas gylis buvo daug didesnis t.y 0,25 mm kai indiškame juodame granite graviravimo gylis buvo tik 0,07 mm.

Literatūros sąrašas

[1] H. Jundt, J. Junghans, Microscopic material interactions by laserengraving, Proc. SPIE 744, 147–155 (1987)

[2] Streckeisen, A. L., Classification and Nomenclature of Plutonic Rocks. Recommendations of the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Geologische Rundschau. Internationale Zeitschrift für Geologie. Stuttgart. Vol.63, p. 773-785, (1987).

[3] Streckeisen, A. L., IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Classification and Nomenclature of Volcanic Rocks, Lamprophyres, Carbonatites and Melilite Rocks. Recommendations and Suggestions. Neues Jahrbuch für Mineralogie, Abhandlungen, Vol. 141, 1-14, (1978).

[4] Le Maitre, R.W., Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms : Recommendations of International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. Cambridge University Press, 236pp, (2002)

[5] <https://www.thoughtco.com/what-are-granitoids-1440993> Geology.about.com. 2010-02-06. Retrieved 2010-05-09.

[6] Haldar, S.K.; Tišljarić, J. (2014). Introduction to Mineralogy and Petrology. Elsevier. p. 116. ISBN 978-0-12-408133-8.

[7] Harvey Blatt & Robert J. Tracy (1997). Petrology (2nd ed.). New York: Freeman. p. 66. ISBN 0-7167-2438-3.

[8] Larsen, Esper S. (1929). "The temperatures of magmas". American Mineralogist. 14: 81–94.

[9] Holland, Tim; Powell, Roger (2001). "Calculation of phase relations involving haplogranitic melts using an internally consistent thermodynamic dataset". Journal of Petrology. 42 (4): 673–683. Bibcode:2001JPet...42..673H. doi:10.1093/petrology/42.4.673.

[10] E. Snitzer, Proposed fiber cavities for optical masers. Journal of Applied Physics, Volume 32, Issue 1, p.36-39 (1961).

[11] C. Wandera, Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium (2010). www.doria.fi/handle/10024/63888

[12] Ona Balachninaite, Algirdas Bargelis, Aleksandr Dementjev, Remigijus Jonušas, Gediminas Račiukaitis, Valdas Sirutkaitis, *Lazerinė Technologija*, Vilniaus universiteto leidykla (2008) 9.

[13] Andrea Bresciani, Alessandro Cocquio, Claudio Ricci „Innovative laser cutting process for ceramic slabs“ Qualicer10, SACMI Imola – Italy

[14] A. Bresciani, G.P. Graziani, C. Ricci, “New glazed porcelain tile manufacturing technology: pre-pressing, dry decoration and green cutting”, Qualicer 2002, Vol. 2, P. GI, pp. 255-270.

[15] I. Black, “Determining cutting speeds for the CO2 laser machining of decorative ceramic tile”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Springer London 1998, Vol. 14, No. 9, pp. 651-655.

[16] A.Riveiro, A.Mejías, R.Soto, F.Quintero, J.delVal, M.Boutinguiza, F.Lusquiños, J. Pardo, J.Pou, CO2 laser cutting of natural granite, *Optics & Laser Technology* 76, 19–28 (2016).

[17] Patent US 2007/0151962 A1, “Method for Laser-induced thermal separation of plate glass”, publ. 05/07/2007.

Robertas Lukošius

Keramikinių ir granitinių plytelių pjaustymas ir ženklėjimas šviesolaidiniais lazeriais

Akmuo, granitas ir keramika palyginti su kitomis medžiagomis pasižymi: dideliu kietumu, lėtu dėvėjimusi, temperatūriniu atsparumu, cheminiu stabilumu. Granito technologinio naudojimo pavyzdžiai yra pagrindo plokštės tikslios mechanikos įranginiuose, tokiuose kaip Aerotech poslinkio stalai ir kitur, kur reikalingas didelis mechaninis ir temperatūrinis stabilumas. Akmens masės, keramikinės bei granito plytos ir plytelės kartu plačiai naudojamos vidaus apdailai, pastatams statyti, keliams tiesti, iš jų gaminami paminklai mirusiems atminti.

Šio magistro studijų baigiamojo darbo tikslas buvo išnagrinėti mokslinę literatūrą apie granitinių, keramikinių ir akmens masės plytelių pagrindinius apdirbimo (pjaustymo, graviravimo) metodus, bei ištirti granitinių, keraminių ir akmens masės plytelių pjaustymo galimybes su VU LTC turimu 400 W galios nuolatinės veikos iterbio šviesolaidiniu lazeriu ir ženklėjimo galimybes su diodinio kaupinimo nanosekundiniu Nd:YAG NL202 (UAB „Ekspla“) lazeriu. Šiame darbe atlikti eksperimentai:

Įvairių rūšių granito, akmens masės plytelių ir plokštelių pjaustymas naudojant 400 W galios nuolatinės veikos iterbio šviesolaidinį lazerį. Pjovimo metu buvo keičiama lazerio galia nuo 200 iki 400 W pjovimo greitis nuo 0,5 iki 8 mm/s ir pakartojimų skaičius nuo 1 iki 3 kartų. Daugeliu atvejų plytelė suskildavo dėl terminio plėtimosi.

Įvairių rūšių granito įvairaus (nuo 2 iki 7 mm) storio plytelių ir plokštelių pjaustymas naudojant 400 W nuolatinės veikos iterbio šviesolaidinį lazerį. Eksperimentas buvo atliekamas lazeriu išgręžiant skylę plokštelėje ir po to pjaunamas 5 mm diametro apskritimas. Šio pjovimo metu buvo naudojama 400 W vidutinė lazerio galia, keičiamas pjovimo greitis nuo 2 iki 40 mm/s. Teigiami rezultatai pasiekti, tik Indiško juodo granito plytelėse, kai plytelės storis yra tarp 3 ir 6 mm o pjovimo greitis nuo 10 iki 25 mm/s.

Graviravimas ant Indiško juodo granito, bei akmens plytelių su diodinio kaupinimo nanosekundiniu Nd:YAG NL202 (UAB „Ekspla“) lazeriu. Naudoto lazerio impulsų trukmė ~15 su pasikartojimo dažniu 25 kHz. Eksperimente buvo keičiama graviravimui naudojamų 1064 nm bangos ilgio impulsų vidutinė galia (2, 4, 6 W), lazerinės spinduliuotės pluošto skenavimo

greitis (400, 800, 1600 mm/s), skenavimo pakartojimų skaičius (1, 5, 10) bei poslinkis tarp linijų dx (0,005, 0,02, 0,035 mm). Nors keraminių plytelių graviravimo slenkstis panašus į indiško juodo granito eksperimentuose su vidutine 4 W galia, $dx = 0,02\text{mm}$, skenavimo greičiu 400 mm/s ir 10 pakartojimų, tačiau pasiektas gylis buvo daug didesnis t.y 0,25 mm kai indiškame juodame granite graviravimo gylis buvo tik 0,07 mm.

Summary

Robertas Lukošius

Cutting and marking of ceramic and granite tiles with fiber optic lasers

Stone, granite and ceramics are characterized by high hardness, slow wear, temperature resistance, chemical stability compared to other materials. Examples of granite technological applications are base plates in precision mechanical equipment such as Aerotech translation tables and elsewhere where high mechanical and thermal stability is required. Stone mass, ceramic and granite bricks and tiles are widely used for interior decoration, buildings, roads and monuments.

The main goal of thesis was to examine the scientific literature on the main methods of cutting and engraving used for granite, ceramic and stone mass tiles, and to investigate the possibilities of cutting granite, ceramic and stone mass tiles with continuous wave 400 W power ytterbium fiber laser. Additional possibilities of engraving of granite and ceramic tiles with nanosecond Nd:YAG NL202 (Ekspla Ltd.) laser were investigated. Experiments performed in this work are:

- Cutting of various types of granite, stone tiles and slabs using a 400 W power continuous wave ytterbium fiber laser. The laser power was changed from 200 to 400 W and the velocity of scanning speed from 0.5 to 8 mm /s and the repetitions of scans from 1 to 3 times. In the most cases, the tile cracked due to thermal expansion during cutting process.
- Cutting of granite tiles and slabs with different thickness in the range from 2 to 7 mm using a 400 W power continuous wave ytterbium fiber laser. The experiment was performed at first drilling a hole in the plate and then cutting a 5 mm diameter circle. The cutting speed varied from 2 to 40 mm /s. Positive results were achieved only in Indian black granite tiles with a thickness between 3 and 6 mm and a cutting speed of 10 to 25 mm /s.
- Engraving on Indian black granite and stone tiles with nanosecond Nd:YAG NL202 (Ekspla Ltd.) laser. Used laser pulse duration ~ 15 ns with a repetition rate of 25 kHz. The average power was changed in the range 2 - 6 W for 1064 nm wavelength pulses used for engraving, the scanning speed of the laser beam was fixed at 400, 800, 1600 mm/s, the number of scanning repetitions was fixed at 1, 5, 10 and the offset dx between lines were fixed at 0.005, 0.02, 0.035 mm. Although the engraving threshold of ceramic

tiles is similar to that of Indian black granite in the experiments with an average power of 4 W, $dx = 0.02\text{mm}$, scanning speed of 400 mm/s and 10 repetitions, the achieved depth was much higher in ceramic ~ 0.25 mm in compare with the engraving depth of Indian black granite which was only 0.07 mm.