

Vilniaus universiteto
Fizikos fakulteto
Lazerinių tyrimų centras

Emilija Žutautaitė

LAZERINIŲ OPTINIŲ ELEMENTŲ ATSPARUMO NUOLATINĖS VEIKOS
LAZERIO SPINDULIUOTEI SKAITINIS MODELIAVIMAS

Magistrantūros studijų baigiamasis darbas

Lazerinės technologijos studijų programa

Studentė

Emilija Žutautaitė

Leista ginti

2021-05-21

Darbo vadovas

dr. Andrius Melninkaitis

Lazerių tyrimų centro direktorius

Doc. Aidas Matijošius

Vilnius 2021

Turinys

| | |
|--|----|
| Įvadas | 3 |
| 1. Literatūros apžvalga | 5 |
| 1.1 Šiluminiai reiškiniai lazeriuose: temperatūros ir impulso gaubtinės sąsaja | 5 |
| 1.2 Šilumos sklidimas ir sklidimo mechanizmai | 6 |
| 1.3 Mechaninės pažaidos morfologija stikle | 8 |
| 1.4 Pažaidos kriterijai | 13 |
| 1.5 Medžiagos parametrai ir jų kitimas lokalaus kaitimo atveju | 17 |
| 2. Darbo metodika | 21 |
| 3. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas | 26 |
| 3.1 Lydimosi taško kriterijaus PLSS tyrimas | 26 |
| 3.2 Įtempio kriterijaus PLSS tyrimas | 31 |
| Išvados..... | 39 |
| Literatūros sąrašas | 41 |

Įvadas

Pastaraisiais metais nuolatinės veikos lazeriai smarkiai patobulėjo – išaugo jų galia, pavyzdžiui, CWCOIL lazerio galia pasiekė 1 MW [1], panaudojimo sritys, tad atsirado didelis poreikis užtikrinti jų kokybę. Tokie didelės galios lazeriai buvo pritaikyti lazerinių ginklų sistemoms [1], medicinoje [2] ir medžiagų apdirbime [3]. Tačiau galingos spinduliuotės sukeliama terminiai reiškiniai ir su jais susijusi pažaida optiniuose elementuose yra pagrindiniai jų veiką ribojantys veiksniai.

Nors trumpų impulsų (ns, fs) lazerine spinduliuote indukuoti paviršiaus pažeidimai, jų augimo dėsniai ir pažaidos slenksčio priklausomybė nuo impulsų skaičiaus yra gana gerai ištirti, vis dėl to, literatūroje yra palyginus mažai kalbama apie nuolatinės veikos lazeriais indukuotas pažaidas [4]. Paskutiniai tokie tyrimai daryti 1998 metais, laikant, kad medžiaga yra negrįžtamai pažeidžiama, kai jos temperatūra pasiekia lydymosi temperatūrą [5].

Nuolatinės veikos lazeriu generuojamos spinduliuotės sukelta pažaida yra nulemta pirmiausiai tiesiogine šviesos sugertimi. Padidėjusi temperatūra bandinio paviršiuje ar tūryje sukelia šiluminį plėtimąsi ar lydymąsi. Tačiau lokaliu medžiagos kaitimu nulemtas medžiagos išlydimas yra nevienintelis galimas reiškinys, darantis įtaką medžiagos optiniam atsparumui. Sąveikos metu atsirandantys įtempiai taip pat gali nulemti katastrofinę pažaidą sukeldami lokalius trūkius ir medžiagos mechaninį aižėjimą. Kitas aspektas, gerai žinomas trumpų impulsų srityje, bet mažai ištirtas nuolatinės veikos atveju – optinės dangos ir bandinio paviršiuje gamybos metu susiformavę defektai, atsiradę po jų paviršių apdorojimo cheminiais ir mechaniniais procesais [2]. Žinoma, kad dėl defektų mažėja medžiagos mechaninis stiprumas, padidėja lazerinės spinduliuotės sugertis, taigi tikėtinas ir pažaidos slenksčio mažėjimas [6]. Tačiau, tyrimų, panaudojant skaitinį modeliavimą, literatūroje sutikti nepavyko, tad iškilo poreikis tokius tyrimus inicijuoti.

Šio darbo tikslas: skaitmeniškai modeliuojant medžiagos lydymąsi ir terminius įtempius ištirti optinių elementų (dengtų dangomis ar pasižymintųjų stiklo mechaniniais defektais) atsparumą nuolatinės veikos spinduliuotei.

Pagrindiniai darbo uždaviniai:

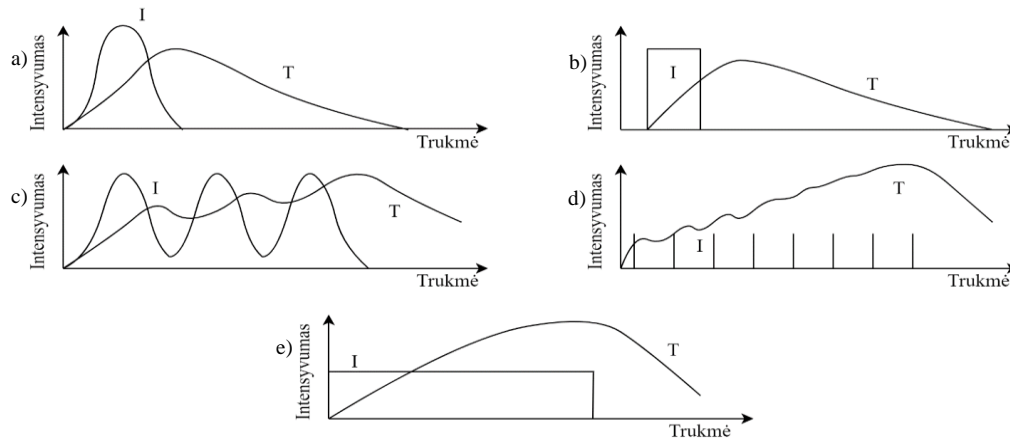
1. Atlikti literatūros apžvalgą apie šilumos sklidimą ir susijusius mechaninius reiškinius optinėse medžiagose bei identifikuoti galimus pažaidos kriterijus teoriniam modeliavimui;
2. Naudojantis programa „COMSOL Multiphysics“, sumodeliuoti nuolatinės veikos lazeriu inicijuotą šilumos perdavimą medžiagai, sklidimą ir susijusių kritinių įtempių formavimąsi bandinyje;

3. Ištirti pažaidos slenksčio vertes pasirinktiems pažaidos kriterijams, keičiant įvairius bandinio parametrus (pagrinduko storį, trūkio poziciją, formą ir gylį pluošto atžvilgiu) bei spinduliuotės parametrus (pluošto diametrą ir impulso trukmę);
4. Ištirti optinį atsparumą bandiniui su metaline danga, palyginti teorinio modelio rezultatus su eksperimentinėmis vertėmis.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Šiluminiai reiškiniai lazeriuose: temperatūros ir impulso gaubtinės sąsaja

Elektromagnetinei bangai sklindant medžiaga, dalis spinduliuotės energijos sunaudojama atomų ir molekulių elektronų virpesiams žadinti. Vienalytėje terpėje periodiškai virpantis dipolis spinduliuoja antrines, to paties dažnio, elektromagnetines bangas, kurios, interferuodamos su pirmine banga, keičia jos fazinį greitį ir gražina aplinkai dalį sugertos energijos. Likusi dalis energijos virsta kitos rūšies energija – šilumine, kuri perduodama medžiagai. Kai, generuojamos lazerinėje sistemoje, spinduliuotės trukmė siekia 10^{-8} s ir ilgiau (iki nuolatinės veikos – *ang.* continuous wave arba CW), dažniausiai spinduliuotės sukelta pažaida yra nulemta tiesiogine šviesos sugertimi. Šią sąveiką lemia spinduliuotės ir medžiagos parametrai (bangos ilgis, impulso trukmė, pluošto diametras, bandinio geometrija, medžiagų optinės, mechaninės ir terminės savybės, o kartais net aplinkos sąlygos). Padidėjusi temperatūra bandinio paviršiuje ar tūryje sukelia šiluminį plėtimąsi, vidinių (atominų) defektų judėjimą, įtrūkimus, lydymąsi. Temperatūros lauko skirstinys medžiagoje ir laikinis jo kitimas priklauso tiek nuo lazerinio impulso gaubtinės (1 pav.) formos, tiek ir nuo pluošto erdvinio skirstinio ar bandinio matmenų.



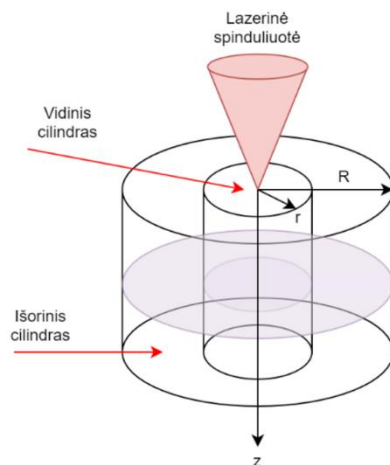
1 pav. Lazerinės spinduliuotės intensyvumo (I) ir bandinio temperatūros (T) priklausomybė nuo ekspozicijos trukmės kai: a) trumpas, b) ilgas impulsas, c) žemo ir d) aukšto pasikartojimo dažnio impulsai, e) nuolatinės veikos spinduliuotė. [7]

Pavieniams impulsams beveik visais lazerio impulso gaubtinės formos atvejais maksimali temperatūra bandinyje pasiekama impulsui pasibaigus. Jei medžiagoje egzistuoja sudėtingesni (daugiapakopiai) sugerties ir energijos pernašos mechanizmai, maksimali gardelės temperatūra gali būti pasiekta ir praėjus tam tikram laiko tarpui po impulso pabaigos. Pasikartojančių impulsų atveju galimi įvairūs scenarijai. Žemo impulsų pasikartojimo dažnio spinduliuotei sąveikaujant su medžiaga,

temperatūra osciliuoja tokiu pačiu dažniu. Osciliacijos atsiranda dėl to, kad, pasibaigus pirmajam impulsui, medžiaga pradeda vėsti, bet pakartotinė apšvieta antru impulsu ir vėl didina temperatūrą. Esant baigtiniam impulsų skaičiui, maksimali temperatūra bus pasiekta po paskutiniojo impulso. Jei fiksuotume vidutinę galią, tai aukšto pasikartojimo dažnio atveju temperatūros osciliavimas būtų dažnesnis, o temperatūros didėjimas dėl pavienio impulso – mažesnis. Nuolatinės veikos spinduliuotei sąveikaujant su medžiaga, temperatūra didėja per visą veikos trukmę ir maksimumas pasiekiamas apšvietai baigiantis.

1.2. Šilumos sklidimas ir sklidimo mechanizmai

Tuo atveju, kai spinduliuotės apšvietos erdvinis skirstinys yra plokščias ir ji sąveikauja su skaidria medžiaga, šviesa yra sugerama cilindro, orientuoto spinduliuotės sklidimo bandinyje kryptimi, tūryje. Storio l bandinyje energija pradiniu laiko momentu yra sugerama vidiniame cilindre, kurio radiusas lygus pluošto radiusui (r) (2 pav.).



2 pav. Bandinio geometrija

Tais atvejais kai spinduliuotės trukmė trumpa, bėgant laikui, dėl sugerties vidiniame cilindre temperatūra didės, o išoriniame – nepakis ir bus lygi temperatūrai sąveikos pradžioje. Dėl sugerties skirtumų bandinio paviršiuje ir tūryje, riboto šilumos sklidimo greičio bei šiluminio plėtimosi reiškinų lokaliai didėjanti temperatūra sąlygoja įtempių atsiradimą tarp bandinio centro ir kraštų. Ši sąveika priklauso ne tik nuo medžiagos parametrų bei sugertos energijos kiekio, bet ir pluošto diametro bei impulso trukmės. Apšvietai pasibaigus šiluma ilgainiui sklis iš vidinio į išorinį cilindrą, temperatūros gradientas pamažu išnyks ir nusistovės šiluminė pusiausvyra su aplinka. Skirtumas tarp vidinio cilindro

radiuso impulsui pasibaigus ir pradiniu laiko momentu vadinamas difuzijos ilgiu ir gali būti apskaičiuojamas pagal lygtį [8]:

$$L^2 = 4tD, \quad (1)$$

kur $D = \frac{k}{\rho C_p}$ – difuzijos koeficientas, t – impulso trukmė, k – šiluminis laidumas, C_p – šiluminė talpa, o ρ – medžiagos tankis. Kai tenkinama sąlyga:

$$\frac{r^2}{t} \ll D \ll \frac{R^2}{t}, \quad (2)$$

t. y. kai pluošto diametras (r) yra labai mažas, impulso trukmė ilga, o bandinio diametras (R) didelis, šiluma atsiradusi dėl sugerties neplinta už vidinio cilindro ribų ir spinduliuotė gali būti laikoma linijiniu šaltiniu. Tokiu atveju, maksimali temperatūra bus pasiekta bandinio paviršiaus centre ir gali būti užrašyta taip:

$$\Delta T_m = \frac{4\pi E}{\rho C_p \pi r^2 l'}, \quad (3)$$

čia E – impulso energija. Kai energija yra sugerama bandinio paviršiuje, tuomet impulsui pasibaigus temperatūra mažės eksponentiškai ir priklausys nuo impulso trukmės ir pluošto radiuso:

$$\Delta T = \frac{E\alpha}{4\rho C_p (\pi D t)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right). \quad (4)$$

Itin ilgoms apšvietos trukmėms (ilgi impulsai ir nuolatinės veikos spinduliuotė) bandinio temperatūros pokytis aprašomas:

$$dT = T_l - T_p = \frac{P\alpha}{2\rho C_p t \pi D}, \quad (5)$$

čia T_l – medžiagos lydymosi temperatūra, T_p – pradinė bandinio temperatūra, P – spinduliuotės galia, α – sugerties koeficientas.

Spinduliuotei sąveikaujant su medžiaga, šiluma joje gali skliti keliais būdais. Vienas iš jų yra šiluminis laidumas – tai savaiminis šiluminės energijos atidavimo procesas per medžiagą (kietaisiais kūnais, rečiau – skysčiais bei dujomis) iš aukštesnės į žemesnės temperatūros sritis. Teoriškai skysčiuose ir dujose jis vyksta per molekulių susidūrimus ir difuziją, metaluose dėl elektronų pernešamos šilumos, o

kituose kietuosiuose kūnuose dėl kristalo gardelės vibracijų – fononų. Vienalytėje medžiagoje, pagal Furjė dėsnį, šilumos srautas proporcingas temperatūros gradientui [8]:

$$q = -k\nabla T, \quad (6)$$

jo vertė bus teigiama kai šiluma keliauja iš karštesnių medžiagos vietų į šaltesnes.

Medžiagoje šiluma taip pat perduodama dėl dalelių terminio judėjimo – elektromagnetinio spinduliavimo. Jis atsiranda bet kurioje aukštesnėje už 0 K temperatūroje, ir todėl yra sklaidžiamas visų kūnų, taip pat ir žmogaus kūno. Dėl šiluminio judėjimo sužadinami medžiagos atomai (molekulės), grįždami į normalų būvį išspinduliuoja energijos perteklių elektromagnetinių bangų pavidalu, t. y. sklaidžia šviesą. Kūno spinduliavimo geba E yra energijos srautas, kurį sklaidžia kūno vienetinis paviršius visomis kryptimis: $E = \frac{d\phi}{dS}$. Kadangi šilumą perneša krūvį turinčios dalelės (protonai ir elektronai) – jų judėjimas sukelia energijos pernašą toliau nuo paviršiaus. Jozefas Štefanas (*ang.* Josef Stefan) tyrė kūnų energinio šviesio priklausomybę nuo temperatūros. Jis nustatė, kad bet kurio kūno energinis šviesis yra proporcingas absoliučios temperatūros ketvirtajam laipsniui, o Liudvigas Eduardas Bolcmanas (*vok.* Ludwig Eduard Boltzmann) parodė, kad tik absoliučiai juodo kūno energinis šviesis proporcingas T^4 :

$$q = \epsilon\sigma T^4, \quad (7)$$

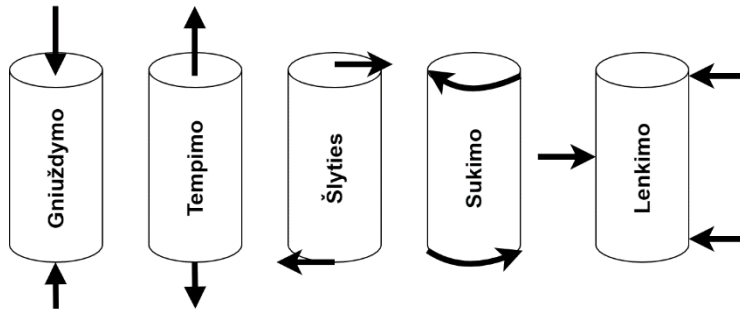
čia σ – Štefano ir Bolcmano konstanta, ϵ – emisijos geba.

1.3 Mechaninės pažaidos morfologija stikle

Didelės galios lazerinei spinduliuotei sąveikaujant su medžiaga dėl sugerties ne tik pakyla bandinio temperatūra, bet ir atsiranda šiluminiu plėtimusi nulemti įtempiai, lemiantys katastrofinius įtrūkimus ir medžiagos aižėjimą. Įtrūkių atsiradimas stebimas kietose ir trapiose terpėse dėl spinduliuotės poveikio ir dažniausiai inicijuojamas lazerio šviesa, kai impulso trukmė yra ilgesnė nei 10 ns [7]. Klasikiniais būdais (šlifuojant ir poliruojant) optinius stiklus būsimų optinių elementų paviršiuje formuojasi defektai – mikro ir nano įtrūkimai [9], kitaip dar vadinami popaviršine pažaida, kurie taip pat daro didelę įtaką medžiagų optiniam atsparumui, tačiau, jei medžiaga pasižymi geromis šiluminėmis savybėmis, atsiradę terminiai įtempiai nebūtinai sukels katastrofinį aižėjimą. Norint tinkamai aprašyti medžiagoje susidarancius įtempius, svarbu suprasti mechaninės pažaidos morfologiją, įtempio kriterijus, bei medžiagos parametrus darančius didžiausią įtaką įtempių atsiradimui.

1.3.1 Susidarantys įtempimų tipai medžiagoje

Išorinei jėgai veikiant medžiagą, deformacijos ir įtempiai (įtempta – deformuoti būseną), kuriuos ji patirs, priklausys nuo jėgos stiprumo ir jos veikimo krypties (3 pav.). Penki pagrindiniai deformacijos tipai pagal jėgos kryptį yra: gniuždymo, tempimo, šlyties, sukimo bei lenkimo.



3 pav. Įtempio tipai pagal jėgos kryptį.

Tempimo jėga (*ang.* tensile stress) – tai kūnui būdinga vidinė jėga atsirandanti dėl išorinės jėgos veikiančios medžiagą taip, kad ji pailgėja [10]. Jei slėgimo jėgos veiktų į l aukščio cilindrinį bandinį, kurio viršutinio ir apatinio paviršiaus plotai lygūs A , tuomet tempimo jėga lygi išorinės jėgos ir ploto santykiui $\sigma = \frac{F}{A}$, čia F – išorinė jėga. Deformacija atsirandanti dėl išorinio tempimo ar slėgio apibūdinama: $\epsilon = \frac{\Delta l}{l}$, kur Δl cilindro aukščio pokytis. Jei medžiaga dėl išorinio slėgio jėgos susitraukia, t. y. jos tūris sumažėja, tokia jėga vadinama gniuždymo jėga (*ang.* compressive stress). Kai slėgimo jėga veikia trapią medžiagą, joje, dėl staigaus vidinės energijos išsiskyrimo, formuojasi įtrūkimai – medžiaga aižėja. Tuo tarpu, jei medžiaga yra plastiška, ji bus suspausta ir jokių pažaidų neatsiras. Pagal susitarimą, tempimo ašiniai įtempiai yra teigiami, o gniuždymo – neigiami.

Kai jėgos kryptis yra lygiagreti cilindro pagrindo paviršiaus plokštumai, deformuojanti jėga bus nukreipta ta pačia kryptimi ir vadinama šlyties jėga (*ang.* shear stress): $\tau = \frac{F}{A}$.

Sukimo deformacija atsiranda dėl išorinių jėgų sukančių skirtingus cilindro galus į skirtingas puses [11]. Sukant cilindą, skersiniame jo pjūvyje veikia tangentiniai įtempiai, kurie didžiausi paviršiniame sluoksnyje. Dėl įtempimų dualumo tokio pat dydžio tangentiniai įtempiai veikia ir išilginiuose pjūviuose tik yra priešingos krypties. Plastiškos medžiagos suyra dėl įtempimų, veikiančių skerspjūvio plokštumoje, o trapių medžiagų suirimą lemia tempimo jėga. Bendru atveju sukimo deformacijos jėgą galima aprašyti:

$$T = \frac{J_T}{l} \tau, \quad (8)$$

čia τ – maksimali kraštinio paviršiaus šlyties jėga, J_T – sukimo konstanta, priklausanti nuo geometrijos, l – statmenas atstumas tarp sukimosi ašies ir tolimiausio atkarpos taško ties išoriniu paviršiumi.

Lenkimo deformacijos jėga susidaro veikiant medžiagą taip, kad vienos kūno dalys yra tempiamos, o kitos gniuždomos [10]. Jei lenkiamas strypas, kurio vienas galas yra įtvirtintas tuomet lenkimo jėga:

$$\sigma_l = \frac{My}{I}, \quad (9)$$

čia M – lenkimo momentas, y – atstumas nuo įtvirtintos ašies ir I – inercijos momentas ties įtvirtinta ašimi. Plastiškų medžiagų lenkimo bandymas neatliekamas, nes jis tikslus tik iki tamprumo ribos. Toliau lenkiant, dėsningas ryšys tarp įtempių ir deformacijų išnyksta, o pasiekus takumo ribą, bandinys nesuirdamas palaipsniui visiškai susilenkia.

1.3.2 Universalusis „von Mises“ įtempis

Kaip jau minėta, medžiagoje įtempius lemiančios jėgos yra neatsiejamos nuo jų pobūdžio ir veikimo krypties, todėl jų nagrinėjimas bendru atveju nėra paprastas. Pavyzdžiui, aižėjimo reiškiniams yra daug svarbesnės tempimo nei gniuždymo deformacijos.

Anksčiau aptartos medžiagos elastingumo ribos yra pagrįstos vienašio įtempio eksperimentais (apkrovos forma, kai 11 ašinių įtempio tenzoriaus komponentų yra nelygūs nuliui, o kiti prilyginami nuliui) [12]. Tačiau buvo pastebėta, jog didžiausi įtempiai atsiranda, kai taikoma neašinė apkrova, o jų vertės yra daug didesnės. Todėl buvo sukurta teorija apimanti visą įtempio tenzorių:

$$16[(\tau_{11} - \tau_{22})^2 + (\tau_{22} - \tau_{33})^2 + (\tau_{33} - \tau_{11})^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)] = k^2, \quad (10)$$

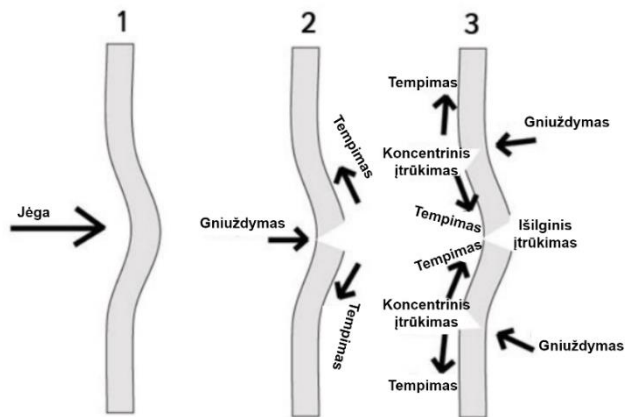
čia τ_{xx} yra įtempio tenzoriaus komponentės, o k eksperimentiškai (taikant ašinę apkrovą) nustatyta konstanta, kurios ieškant (10) lygtis suprastinama į:

$$\begin{aligned} \tau_v^2 &= 3k^2 \\ \tau_v &\geq S_y \end{aligned} \quad (11)$$

Von mises jėga nėra “tikras” įtempis, o tik teorinė vertė, leidžianti palyginti trijų dimensijų įtempius su ašine deformacijos riba. Jis paprastai naudojamas tamprims medžiagoms, teigiant, kad medžiaga deformuosis, kai įtempio komponentų vertės viršys įtempių kriterijų S_y .

1.3.3 Išilginis (Radialinis) ir skersinis (lateralinis) stiklo aižėjimas mechaninio smūgio metu

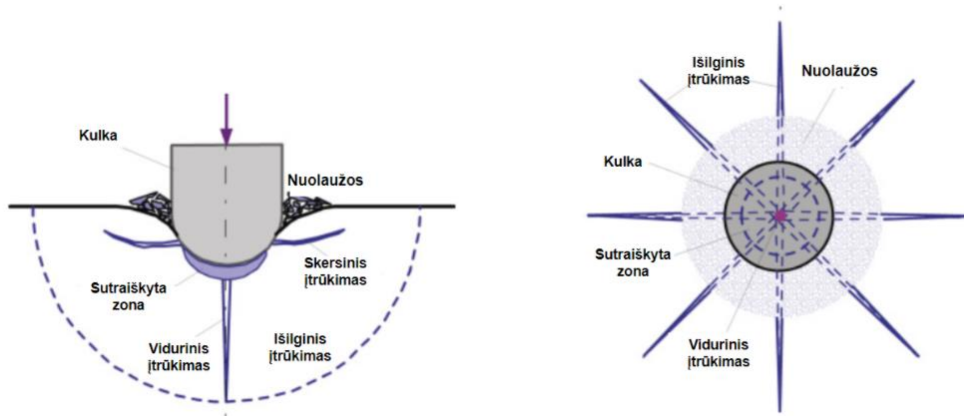
Lazeriu indukuojami terminiai pažeidimai gali būti nulemti ir šiluminio plėtimosi reiškinijų, kurie turi nemažai panašumų su medžiagos aižėjimu dėl mechaninio gniuždymo. Tarkime, kad turime ploną stiklo bandinį (4 pav.). Pradiniu laiko momentu, išorinei jėgai pradėjus veikti stiklą, jis plastiškai deformuojasi. Jėgai didėjant, priekinis paviršius yra gniuždomas, o galinis tempiamas. Dėl to skilimas prasidės centriniame taške galiniame paviršiuje ir bus vadinamas radialiniu įtrūkimu. Kai galinis paviršius patiria tempimą dėl išorinės jėgos, aplinkinė medžiaga yra gniuždoma ir dėl to atsiranda įtempimai priekiniame paviršiuje, kurie sukelia įtrūkimus. Tokie skilimai formuoja apskritimus aplink radialinius įtrūkimus ir vadinami koncentriniais įtrūkimais.



4 pav. Stiklo skilimas dėl išorinės jėgos

Tarkime, kad turime storą stiklo bandinį, kurio paviršiuje yra įstrigusi kulka (5 pav.) [13]. Pradžioje, kai kulka patenka į bandinį, dominuoja elastinga deformacija – medžiagoje susidaro kulkos įspaudas. Didėjant jėgai, įdubimas tampa elastingas – plastinis, o po juo susidaro plastinė zona, kurioje medžiaga sutraiškoma. Šiuo atveju radialiniai įtrūkimai atsiranda įėjimo paviršiuje, nes, dėl kulkos sukurtų įtempimų, vienoje paviršiaus vietose medžiaga yra gniuždoma, o kitose tempiama. Vidurinis įtrūkimas atsiranda deformuotos zonos apačioje ir auga išorinės jėgos kryptimi. Kulkos pašalinimo metu atsiranda lateraliniai įtrūkimai iš plastinės zonos apačios ir sklinda lygiagrečiai paviršiui, o kartais gali pasiekti

paviršių ir susijungti su radialiniais įtrūkimais. Jie susidaro dėl elastinių įtempių, atsirandančių dėl deformuotos medžiagos atsipalaidavimo aplink kontakto sritį.



5 pav. Stiklo skilimas dėl įstrigusios kulkos.

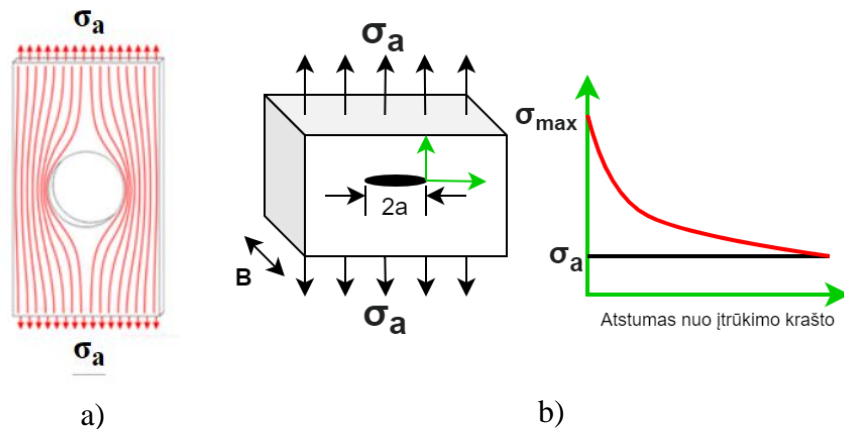
1.3.4 Mechaninių įtempių koncentracija defektuotose vietose

Įtempių koncentravimasis (*ang.* stress raiser) yra žinomas reiškinys, stebimas deformuotų bandinių vietose, kur pažeidžiamas medžiagos kontinuumo vienalytiškumas, t. y. įtempiai tose vietose yra daug didesni nei aplinkinėse vietose. Tokios sritys atsiranda tuomet, kai bandinyje yra defektų, įtrūkimų ar įbrėžimų, kurie sukelia įtempių pasiskirstymo pakitimus (6 pav. a). Lokalus įtempio jėgos padidėjimas yra matuojamas taip vadinamu jėgos koncentracijos faktoriumi, t. y. santykis tarp didžiausio ir vidutinio įtempio bandinyje [14].

Pavyzdžiui, kai bandinyje, kuris iš dviejų pusių yra veikiamas išorinės jėgos, turime $2a$ ilgio įtrūkimą, tai galima atvaizduoti įtempių koncentraciją nuo įtrūkimo krašto iki bandinio krašto (6 pav. b). Įtrūkimo krašte turime maksimalią jėgą (stresą), kuri yra daug didesnė nei išorinė jėga:

$$\sigma_{max} = \sigma_a \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right), \quad (12)$$

čia σ_a – apkrovos įtempiai, ρ – įtrūkimo krašto radiusas. Atstumui nuo įtrūkimo krašto didėjant (t. y. einant link bandinio krašto), maksimali įtempimo jėga mažėja ir artėja link apkrovos įtempių. Kuo aštresnis įtrūkimo radiusas, tuo didesnė bus įtempių koncentracija.



6 pav. Įtempių koncentracija defektuotose vietose.

Minkštomis medžiagoms įtempių koncentracija nėra tokia pavojinga kaip kietoms medžiagoms: jie tolydžiai persiskirsto bandinio tūryje, bei, tokiu būdu, leidžia tęsti bandinio apkrovą ir sukelia tik lokalią plastinę deformaciją. Trapios medžiagos dėl mechaninės jėgos koncentracijos patirs katastrofinius pažeidimus. Vis dėl to pakartotinis mažas apkrovimas net ir minkštose medžiagose gali sukelti nuovargio įtrūkimą, kuris lėtai augs esant pastoviai įtempio koncentracijai. Pvz.: „De Havilland Comet“ lėktuvas patyrė daugybę katastrofiškų gedimų, kurie buvo sukelti nuovargio įtrūkimų, atsiradusių dėl didelės įtampos koncentracijos, kurią sukėlė kiaurymių skylių naudojimas aplink automatinio krypties ieškiklio išpjovas (kartais vadinamas langais). Taip pat nustatyta, kad kvadratinių keleivių langų įtempių koncentracija buvo didesnė, nei tikėtasi, todėl jie buvo pakeisti į ovalius [15].

1.4 Pažaidos kriterijai

Intensyviai lazerio spinduliuotei sąveikaujant su optiniais elementais, jų savybės gali pakisti, sukeliant juose įvairius negrįžtamus pokyčius, dėl kurių elementai pažeidžiami. Tarptautiniame standarte ISO 21254 optinė pažaida apibrėžiama kaip „bet koks negrįžtamas lazerio spinduliuotės sukeltas tiriamo objekto paviršiaus charakteristikų pokytis, kurį galima stebėti Nomarskio tipo interferencinio kontrasto mikroskopu, kai optinės sistemos didinimas ne mažesnis negu 100X“ [16]. Pažaidos slenkstis (PLSS) – tai medžiagų savybė priešintis lazerio spinduliuotės poveikiui. Jis apibrėžiamas taip: „Didžiausias lazerio spinduliuotės energijos ar galios tankis, kuriuo eksponuojant optinį paviršių pažaidos tikimybė yra lygi nuliui“.

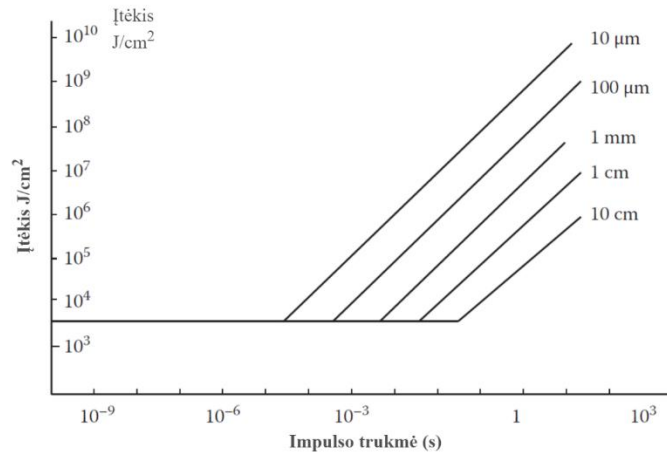
Kiekvienai medžiagai būdingas savitas pažaidos slenkstis, kuris priklauso nuo apšvietos sąlygų ir medžiagos atsparumą ribojančių parametrų [17]. Taip pat pažymėtina ir tai, kad pažaida gali būti nulemta ne vienos fizikinės priežasties, tad, modeliuojant lazerinės spinduliuotės inicijuotas pažaidas, svarbu apibrėžti prasmingus pažaidos kriterijus. Dažniausiai tai vertė, kurią pasiekia pažaidą sukeliantis fizikinis parametras, pavyzdžiui, terminis įtempis viršija medžiagos mechaninio atsparumo ribą arba pasiekiamą kritinę temperatūrą. Toks pažeidimas nebūtinai yra kritinis, tačiau leidžiantis nustatyti saugias lazerinės spinduliuotės intensyvumo ribas.

1.4.1 Lydymosi taško pažaidos kriterijus

Istoriškai medžiagos lydymosi taškas yra pagrindinis optinės pažaidos kriterijus ilgų impulsų atveju [17]. Bendru atveju tai lokaliai kaitinamos (pvz. defektą supančios) medžiagos temperatūros pakilimas iki lydymosi temperatūros. Skaidrios dielektrinės medžiagos atveju, pasiekus lydymosi temperatūrą atsiranda struktūriniai pokyčiai – gardelė suyra, o dėl draustinės juostos sunykimo medžiaga praranda savo skaidrumą. Lazerinės spinduliuotės ekspozicijos kiekiui (ir trukmei) viršijus pažaidos slenkstį, medžiagos temperatūra pasiekia lydymosi tašką, o aplink šviesos paveiktą vietą atsiranda išsilydžiusios medžiagos sritis. Jai vėstant, formuosis kitokia kristalinė struktūra, bei medžiaga homogenizuosis. Tačiau daugeliui medžiagų nebūtina pasiekti lydymosi tašką, kad įvyktų pažaida. Pavyzdžiui, dalis stiklų suminkštėja dar nepasiekus lydymosi temperatūros, chloridai ir sulfidai disocijuojasi, deimantas grafitizuojasi, o puslaidininkiuose atsiranda terminis išbėgimas. Laikoma, kad medžiaga pažeista dėl lydymosi kai:

$$\frac{P}{\tau} = \frac{dT2\rho C_p \pi D}{\alpha}, \quad (13)$$

čia α – medžiagos sugerties koeficientas, $dT = T_l - T_a$, T_l – lydymosi temperatūra, T_a – aplinkos temperatūra. Kai $2r > L$, (L – difuzijos ilgis) tai yra dideliems lazerio pluoštams ir trumpoms trukmėms, šiluma per apšvietos trukmę išplis per visą bandinio tūrį. Tai reiškia, kad, esant trumpoms ekspozicijos trukmėms, pažaidos slenkstis nepriklausys nuo impulso trukmės ir bus konstanta (7 pav.).



7 pav. Pažaidos slenksčio priklausomybė nuo impulso trukmės ir pluošto radiuso ZnSe bandiniui, kai bangos ilgis 10,6 μm .

1.4.2 Grifito pažaidos kriterijus

Didelės galios lazerinei spinduliuotei sąveikaujant su medžiaga, dėl sugerties ne tik pakyla bandinio temperatūra, bet ir atsiranda įtempiai, galimai lemiantys katastrofinius įtrūkimus ir medžiagos aižėjimą. Atsižvelgiant į tai, kad optinių stiklų gamybos metu naudojami apdirbimo (šlifavimo ir poliravimo) procesai gali sukelti itin mažus medžiagos stiklo defektus – mikro įtrūkimus, įbrėžimus, egzistuoja tikimybė, kad mechaniškai apdorotas stiklas yra kur kas mažiau atsparus nei tas, kuris tokių defektų neturi. Gamybos proceso metu atsiradę paviršiniai defektai randami beveik visose medžiagose, bet ne visi tokie įtrūkimai yra nestabilūs (kritiniai) eksploataavimo sąlygomis. Lūžių mechanika (*ang. fracture mechanics*) yra defektų analizė, siekiant atskirti saugius (t. y. neaugančius) ir nesaugius, galinčius sukelti katastrofinį aižėjimą, defektus. Lūžių mechaniką per Pirmąjį pasaulinį karą sukūrė anglų aviacijos inžinierius A. A. Grifitas (*ang. A. A. Griffith*) [18]. Grifito tyrinėjimus paskatino du prieštaringi faktai:

- Eksperimentų metu nustatytas kritinis įtempis, reikalingas stiklo aižėjimui, yra maždaug 100 MPa.
- Teorinis įtempis, reikalingas stiklo atominėms jungtims nutraukti, yra maždaug 10 000 MPa.

Norint suderinti šiuos prieštarigus pastebėjimus, reikėjo teorijos. Be to, eksperimentai su šviesolaidžiais, kuriuos atliko pats Grifitas, parodė, kad lūžio įtempis didėja mažėjant šviesolaidžio skersmeniui.

Tarkime, kad turime *B* storio stiklo bandinį, kurio kraštus veikia išorinė jėga (8 pav.) [19]. Viena iš bandinio paviršių (centre) yra gamybos proceso metu atsiradęs įtrūkimas, kurio ilgis $2a$. Grifitas teigė, kad įtrūkimo augimo priežastis yra sistemos potencinės energijos, kurią sudaro elastinių įtempių jėga ir išoriškai taikomos apkrovos potencinė energija, mažėjimas:

$$\Delta U_m = U_i - U_0 = -\frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E}, \quad (14)$$

čia U_i yra potencinė energija bandiniui su įtrūkimu, o U_0 – be įtrūkimo, E – Jungo modulis. Kuo didesnis įtrūkimo ilgis, tuo didesnis bus potencinės energijos mažėjimas.

Prieš Grifito teoriją niekas neįskaitė paviršinės energijos, atsirandančios dėl dviejų naujų paviršių susikūrimo, kai įtrūkimas atsiranda ir auga:

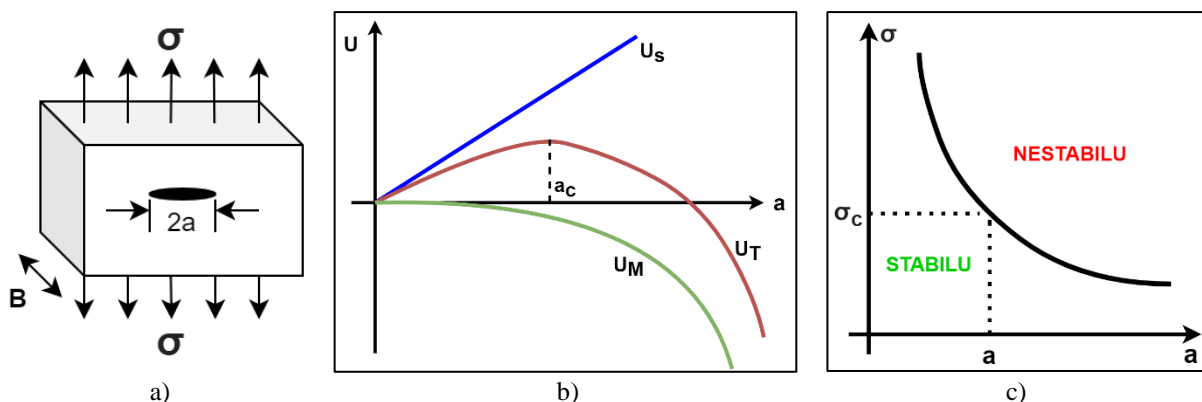
$$\Delta U_s = +2aB\gamma, \quad (15)$$

čia γ yra įtrūkimo paviršinė energija ploto vienetui. Bendras sistemos energijos pokytis dėl įtrūkimo augimo:

$$\Delta U_T = \Delta U_M - U_S = -\frac{\pi\sigma^2 a^2 B}{E} + 2aB\gamma. \quad (16)$$

8 b) pav. pavaizduotos energijų priklausomybės nuo įtrūkimo ilgio. Galima matyti, jog, įtrūkimui augant, paviršinė energija didėja tiesiškai, o potencinė energija mažėja kaip $-a^2$. Bendra sistemos energija pasiekia maksimumą, kai įtrūkimo ilgis yra a_c – kritinis ilgis, išreiškiamas:

$$a_c = \frac{2E\gamma}{\pi\sigma^2}. \quad (17)$$



8 pav. Bandinio geometrija (a), energijų (b) ir išorinio įtempio (c) priklausomybė nuo įtrūkimo ilgio. U_s – naujų paviršių energija, U_M – vidinė potencinė energija, U_T – bendras sistemos energijos pokytis.

Tai reiškia, kad, kai įtrūkimo ilgis yra mažesnis už kritinį, jis bus stabilus – augs, bet nesukels kritinių pažeidimų. Kai įtrūkimo ilgis didesnis už a_c sistemos energija mažėja, medžiaga pradės aižėti. 8 c) pav. pavaizduota išorinio įtempio priklausomybė nuo įtrūkimo ilgio. Plotas po kreive žymi stabilią zoną, o virš kreivės esantis plotas atspindi nestabilią zoną.

Nagrinėjome atvejį, kai pradinis įtrūkimas yra bandinio paviršiuje, tačiau jei jis būtų krašte, tai toks įtrūkimas yra mažiau stabilus. Taip yra todėl, kad ilgio a kraštinis įtrūkimas turi tokią pat lūžio energiją kaip centrinis įtrūkimas su ilgu $2a$.

Bendru atveju Grifito kriterijus, nusakantis išorinio įtempio dydį, kuriam esant medžiagoje esantys prigimtiniai įtrūkimai sukels pažaidą, aprašomas:

$$\sigma_c = \left(\frac{2E\gamma}{a\pi} \right)^{0.5}. \quad (18)$$

1.5 Medžiagos parametrai ir jų kitimas lokalaus kaitimo atveju

Nuolatinės veikos spinduliuotės indukuotos pažaidos atsiranda dėl šilumos sugerties medžiagos paviršiuje ir labai priklauso nuo optinių, mechaninių ir šiluminių jos savybių. Tad modeliuojant tokias sąveikas, svarbu atsižvelgti į šias savybes bei įskaityti jų priklausomybę nuo temperatūros. Lydymosi taško pažaidos kriterijus labiausiai priklauso nuo sugerties koeficiento, šilumos laidumo bei talpos, o įtempių nulemta pažaida priklauso dar ir nuo fotoelastinio tenzoriaus, Jungo modulio bei šiluminio plėtimosi koeficiento.

1.5.1 Fotoelastinis tenzorius.

Fotoelastingumas apibūdina mechaniškai deformuojamos medžiagos optinių parametru pasikeitimus. Tai yra visų dielektrinių terpių savybė ir dažnai naudojama įtempių pasiskirstymo medžiagoje nustatymui, ypač aplink defektuotas vietas. Fotoelastinės medžiagos, veikiamos išorinės jėgos, lūžio rodiklis kiekviename medžiagos taške yra tiesiogiai susijęs su įtempio dydžiu tame taške. Taigi, kai medžiaga yra įtempinama mechaniškai, jos lūžio rodiklis keičiasi ir toks reiškinys vadinamas akustooptiniu arba fotoelastiniu efektu [20]. Kietoms medžiagoms šiuos pokyčius patogiausia aprašyti per atvirkštinio pralaidumo tenzorių $B_j = n^{-2}$, kuris mažiems ir vidutiniams įtempiams kinta tiesiškai su įtempium S . Matricos formoje ir sutrumpinus indeksus, fotoelastinius efektus galima išreikšti taip:

$$\begin{bmatrix} \Delta B_1 \\ \Delta B_2 \\ \Delta B_3 \\ \Delta B_4 \\ \Delta B_5 \\ \Delta B_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} & p_{16} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} & p_{25} & p_{26} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} & p_{35} & p_{36} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} & p_{45} & p_{46} \\ p_{51} & p_{52} & p_{53} & p_{54} & p_{55} & p_{56} \\ p_{61} & p_{62} & p_{63} & p_{64} & p_{65} & p_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

kur ΔB_1 yra B pokytis. B ir S turi po šešis nepriklausomus elementus, atsirandančius iš lūžio rodiklio elipsoido, o fotoelastinis tenzorius – 36. Tiesinei dielektrinei medžiagai atvirkštinio pralaidumo tenzorius gali būti užrašytas:

$$\Delta B_{ij} = P_{ijkl} \partial_k u_l, \quad (20)$$

čia P_{ijkl} – fotoelastinis tenzorius, u_l – tiesinis poslinkis nuo pusiausvyros padėties, ∂_k – žymi diferencijavimą Dekarto koordinatų sistemoje. Daugelis P matricos elementų lygūs nuliui, o nenuliniai yra labai maži. Izotropinėms medžiagoms fotoelastinis tenzorius:

$$P_{ijkl} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{23} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

čia $p_{44} = \frac{p_{11} - p_{12}}{2}$. Skysčiams $p_{11} = p_{12}$, o p_{44} yra nulis.

1.5.2 Jungo modulis

Jungo modulis – medžiagos savybė, nusakanti kietosios medžiagos tempimo standumą. Jis kiekybiškai apibūdina santykį tarp tempimo sąlygotų įtempių ir ašinės deformacijos, o jo vertė kinta keičiant temperatūrą (dėl tarp atominio ryšio pokyčio): $E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$. Esant beveik nuliniam įtempimui, įtempio ir deformacijos kreivė yra tiesinė, o ryšį tarp streso ir įtempio apibūdina Huko dėsnis, kuriame teigiama, kad stresas yra proporcingas įtempimui. Proporcingumo koeficientas yra Jungo modulis. Kuo didesnis modulis, tuo daugiau streso (jėgos) reikia norint sukurti tą patį įtempimo dydį. Pavyzdžiui, idealiai standus kūnas turėtų begalinį Jungo modulį ir atvirkščiai, idealiai minkšta medžiaga, tokia kaip skystis, deformuotųsi be jėgos ir turėtų nulinį modulį.

Jungo modulis leidžia apskaičiuoti juostos, pagamintos iš izotropinės elastingos medžiagos, matmenų pokytį esant tempimo arba gniuždymo apkrovoms. Kituose elastingumo skaičiavimuose paprastai reikia naudoti vieną papildomą tamprumo savybę, pvz.: šlyties modulį, spūdumo modulį ar Puasono konstantą. Bet kurio iš šių dviejų parametrų pakanka, kad būtų galima visiškai apibūdinti elastingumą izotropinėje medžiagoje.

1.5.3 Šiluminio plėtimosi koeficientas

Kintant temperatūrai medžiaga plečiasi arba traukiasi priklausomai nuo medžiagos šiluminio plėtimosi koeficiento. Kol medžiaga gali laisvai judėti, plėstis arba susitraukti, nesusidarant vidiniams įtempiams. Jei medžiaga yra pritvirtinta prie standaus korpuso keliose vietose, geometriškai apribotoje srityje šildant ar šaldant sukuriama terminiai įtempiai. Toks įtempis apskaičiuojamas sudauginant temperatūros pokytį, medžiagos šiluminio plėtimosi koeficientą ir Jungo modulį:

$$\sigma = E\alpha (T_g - T_o) = E\alpha\Delta T,$$

čia T_o yra pirminė temperatūra, o T_g yra galutinė temperatūra. Kai T_g yra didesnis už T_o , medžiagos geometriniai apribojimai ir šiluminis plėtimasis sukelia gniuždymo įtempius, o aušinant atsitinka priešingai – susidaro tempimo įtempiai.

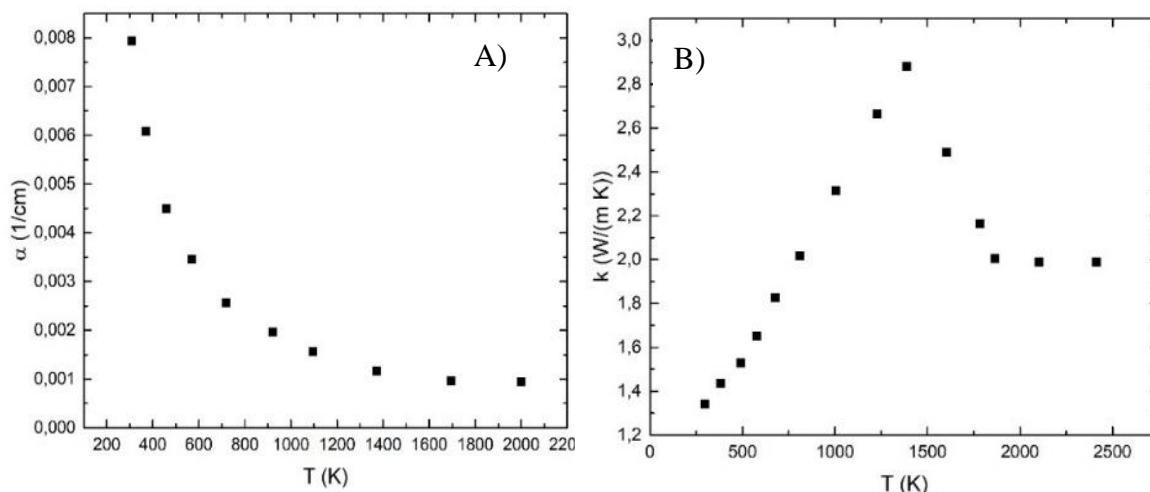
1.5.4 Lydyto kvarco ir aukso parametrai, bei jų priklausomybės nuo temperatūros

Lydytas kvarcas yra vienas populiariausių optinių stiklų lazerinės optikos gamyboje. Lydytas kvarcas pasižymi aukšta lydymosi temperatūra (~1610 °C), mažu šiluminio plėtimosi koeficientu, santykinai plačiu pralaidumo spektru – nuo 200 nm iki ~1400 nm, todėl šios savybės padaro medžiagą atsparią terminiam šokui, tinkamą naudoti plačiame temperatūriniame diapazone. Būtina paminėti, kad lydyto kvarco savybės kinta, keičiant temperatūrą, tad jų dydžiai ir priklausomybė nuo temperatūros aprašyti 1 lentelėje ir 9 pav. Kitas lydyto kvarco privalumas yra santykinai paprastas apdirbimo procesas, jį galima pjaustyti, šlifuoti, poliruoti, frezuoti, tekinti, lieti ir apdirbti kitais klasikiniiais apdirbimo metodais. Visos šios savybės leido lydytam kvarcui įsitvirtinti lazerinės optikos, šviesolaidžių, puslaidininkių, smulkiosios elektronikos ir netgi automobilių rinkose.

1 lentelė. Lydyto kvarco parametrai [4], [17], [21-26].

| Parametras | Vertė | Vienetai |
|---|---|-----------------|
| ρ Tankis | 2210 | kg/m^3 |
| n_i Lūžio rodiklio reali dalis | 2,4 | |
| n_k Lūžio rodiklio menama dalis | $1,82(10^{-2}) + 10,1(10^{-5})(T - 273)$ | |
| ϵ Emisijos geba | 0,75 | |
| C_p Šiluminė talpa | $-120 + 4,56T - 7,38(10^{-3})T^2 + 6,59(10^{-6})T^3 -$ $3,05(10^9)T^4 + 5,72(10^{-13})T^5$ kai $273 K < T < 1500 K$ $678 - 0,142T + 3,45(10^{-4})T^2$ kai $1500 K < T < 1696 K$ 1429 kai $T > 1696 K$ | $J/(kg K)$ |
| H Plėtimosi koeficientas | $5(10^{-7})$ | K^{-1} |
| G Šlyties modulis | 31,3 | GPa |
| E Jungo modulis | $6,9068(10^{10}) + 1,1(10^7)T + 11447T^2 - 25,91T^3$ $+0,01545T^4 - 3,0222(10^{-6})T^5$ | Pa |
| P Puasono konstanta | $0,144+2,2853(10^{-4})T - 9,2535(10^{-7})T^2 +$ $1,8326(10^{-9})T^3 - 1,6351(10^{-12})T^4 + 5,3695(10^{-16})T^5$ kai $170 K < T < 950 K$ $0,04194+4,2305(10^{-4})T-4,739(10^{-7})T^2 +$ $2,3088(10^{-10})T^3 - 4,04(10^{-14})T^4$ kai $T > 950 K$ | |

Kita medžiaga dažnai naudojama optinių stiklų su plonasluoksnėmis dangomis – veidrodžių gamyboje yra auksas. Jis pasižymi dideliu atspindžio koeficientu plačiame bangų ruože nuo 900 nm iki IR. Dėl savo savybių ir sąlyginai paprastos gamybos jis dažnai naudojamas didelės galios lazerinėse sistemose, pavyzdžiui CO₂ lazeriuose. Aukso savybės aprašytos 2 lentelėje.



9 pav. Lydyto kvarco parametrų priklausomybė nuo temperatūros a) sugerties koeficientas (bangos ilgis $10,21 \mu\text{m}$), b) šiluminis laidumas.

2 lentelė. Aukso parametrai [24].

| Parametras | Vertė | Vienetai | |
|------------|--------------------------|--|--------------------------|
| ρ | Tankis | 19300 | kg/m^3 |
| R | Atspindys nuo paviršiaus | 97 % | |
| ϵ | Emisijos geba | 0,35 | |
| C_p | Šiluminė talpa | $44,18 + 0,86T + 0,0035T^2 - 7(10^{-6})T^3$ kai $273 \text{ K} < T < 750 \text{ K}$ $119,56 - 0,022T + 7,56(10^{-6})T^2$ kai $750 \text{ K} < T < 1338 \text{ K}$ 160 kai $T > 1338 \text{ K}$ | $\text{J}/(\text{kg K})$ |
| k | Šiluminis laidumas | $330,6 - 0,02T - 8,19(10^{-5})T^2 + 6,79(10^{-8})T^3$ | $\text{W}/(\text{m K})$ |
| a | Sugerties koeficientas | $6,26(10^5)$ | $1/\text{m}$ |

2. Darbo metodika

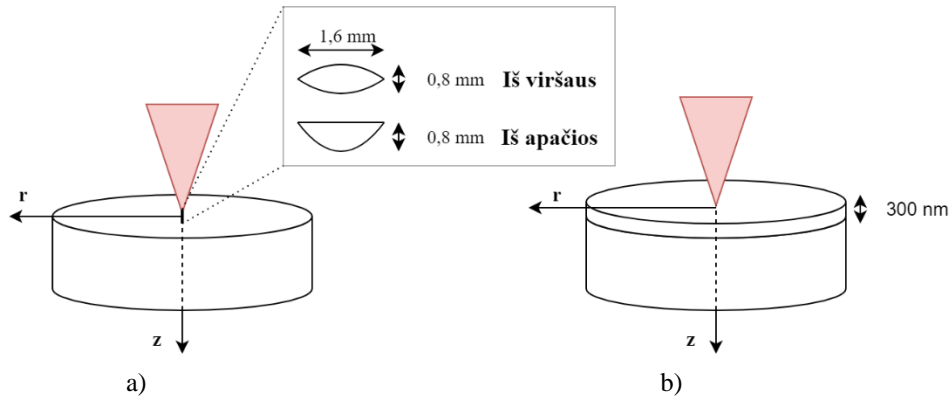
Šis darbas susideda iš dviejų pagrindinių dalių – nuolatinės veikos spinduliuotės ir medžiagos sąveikos modelio sukūrimo ir skaitinių eksperimentų: šios sąveikos analizės, siekiant ištirti medžiagos atsparumą nuolatinės veikos spinduliuotei, pagal pasirinktą pažaidos kriterijų.

2.1. Sąveikos tarp šviesos ir medžiagos modeliavimas

Sąveikai tarp šviesos ir medžiagos įvertinti buvo tiriami trys skirtingi skaitiniai modeliai. Pirmuoju atveju modeliuojamas lydymosi taško pažaidos kriterijus naudojant taisyklingos formos nedengtą stiklą. Tyrimui pasirinktas dažnai praktikoje sutinkamas cilindro formos lydyto kvarco bandinys, kurio diametras 20 mm, o storis 2 mm. Tie patys matmenys buvo taikomi ir visuose kituose skaitmeniniuose eksperimentuose išskyrus atvejus, kai keičiamas bandinio storis ar pridedama danga. Įtempio kriterijaus tyrimui atlikti bandinio centre, paviršiuje buvo modeliuotas įtrūkimas (defektas), kuriame nėra medžiagos. Trūkio forma ir parametrai pavaizduoti paveikslėlyje (10 a) pav.). Trečiasis modelis buvo skirtas 300 nm storio auksinės dangos ant lydyto kvarco pagrindu (10 b) pav.) optiniam atsparumui įvertinti. Visuose modeliuose šviesos (šilumos) šaltiniu laikomas Gauso funkcija aprašomas pluoštas, kurio intensyvumo skirstinys bandinio paviršiaus plokštumoje:

$$I(r) = (1 - R)I_0 e^{-2\left(\frac{r}{w_0}\right)^2} \quad (22)$$

čia I_0 – intensyvumas (apšvieta) pluošto centre, w_0 – pluošto radiusas $1/e^2$ intensyvumo lygyje, R – paviršiaus atspindžio koeficientas. Šviesos pluošto centras sutampa su bandinio centru ir sklinda z kryptimi.



10 pav. Modelio geometrija.

Anksčiau minėtiems eksperimentams atlikti buvo panaudotas „COMSOL Multiphysics“ programinis paketas. Tai kelių platformų baigtinių elementų analizės, sprendimo modeliavimo programinė įranga apimanti įvairias fizikos sritis. Ji vartotojui siūlo sukurti konkrečios sistemos modelį iš paruoštų atskirų modulių. COMSOL turi specialų modulį skirtą spręsti šiluminiams uždaviniams. Šis modulis geba įvertinti laidumą, spinduliavimą, leidžia projektuoti laisvos ir priverstinės konvekcijos procesus, fazių kaitą, taip pat ir visų šių reiškinių kombinaciją.

Nuolatinės veikos lazerinės spinduliuotės poveikis medžiagai pasireiškia tuo, jog pirmiausiai fotonų energija perduodama elektronų posistemei, o vėliau dalis energijos perduodama ir gardelei, dėl ko pakinta bandinio temperatūra. Norėdama išanalizuoti temperatūros kitimą, naudojami COMSOL programos siūlomais šilumos sklidimo, kietų kūnų mechanikos bei dalinių diferencialinių lygčių moduliais. Šilumos sklidimo modulis leidžia aprašyti spinduliuotės šaltinį, bei šilumos sklidimo sąlygas. Šilumos sklidimas programoje aprašomas Bero – Lamberto lygtimi [25]:

$$\begin{aligned} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \cdot \nabla T + \nabla \cdot q &= Q, \\ q &= -k \nabla T, \end{aligned} \quad (23)$$

kur C_p , ρ ir k yra medžiagos parametrai, o Q – lazerinės spinduliuotės šaltinis. Kraštinės ir pradinės sąlygos:

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T}{\partial x} T(r, z, t) = -k \frac{\partial T}{\partial y} T(r, z, t) &= 0, \\ T(x, y, 0) &= T_o, \end{aligned} \quad (24)$$

Laikoma, kad pradiniu laiko momentu bandinio ir aplinkos temperatūra yra $T_o = 293,15$ K, o lazerinės spinduliuotės nėra. Bandinį apšvietus, temperatūra pradeda kilti lokaliai, o šiluma iš bandinio išspinduliuojama į aplinką pagal dėsnį:

$$-n \cdot q = \varepsilon \sigma (T_o^4 - T^4), \quad (25)$$

kur ε – emisijos geba, σ – Stefano ir Bolcmano konstanta, o T_o – aplinkos temperatūra.

Tiesinis elastingumas (*ang. linear elasticity*) yra matematinis modelis, aprašantis kietų kūnų deformaciją ir jų viduje dėl išorinės apkrovos susidarantiems įtempimams. Nepriklausomai nuo koordinatinių sistemos modelis aprašomas:

- judėjimo dėsniu, išreikštu iš antro Niutono dėsnio: $\nabla \cdot \sigma + F = \rho \ddot{u}$. Čia σ – Koši (Cauchy) įtempio tenzorius, F – jėga tūrio vienetui, ρ – tankis;
- deformacijos – poslinkio lygtimi: $\varepsilon = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^T]$. Čia ε – įtempimų tenzorius, u – poslinkio vektorius;

- tamprios medžiagos atsaku į išorinį stresą ar įtempius – Huko (Hooke's) dėsnis : $\sigma = C : \varepsilon$, čia C – ketvirtos eilės standumo tenzorius.

Siekiant įskaityti įvairių parametrų kitimą laike, uždaviniai paprastai aprašomi per dalines diferencialines lygtis. COMSOL DDL modulis siūlo pavyzdinę lygtį:

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = f, \quad (26)$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right],$$

čia e_a – masės koeficientas, d_a – slopimo koeficientas, Γ – srautas ir f – šaltinis. Atliekant skaitinį modeliavimą visi parametrai išskyrus f yra lygūs nuliui, tad sprendžiama lygtis $f = 0$. Spinduliuotės šaltinis aprašomas:

$$f = I_z - \alpha(T) * I, \quad (27)$$

kur I_z – dalinė intensyvumo išvestinė z kryptimi, $\alpha(T)$ – sugerties koeficientas, priklausantis nuo temperatūros.

Tiriant sudėtingas geometrines sistemas, lygtys negali būti išspręstos analitiniu būdu. Egzistuoja skaitinis metodas, leidžiantis rasti apytikšlius dalinių diferencialinių lygčių sprendinius sudėtingoms sistemoms – baigtinių elementų metodas. Programoje COMSOL bandinio tinkleliui apibūdinti naudojami šeši parametrai: mažiausias ir didžiausias elemento dydis, didžiausias augimo greitis, kreivumo koeficientas, skiriamoji geba ir elemento geometrija [24]. Elemento augimo greitis apibūdinama, kaip greitai jis gali pereiti nuo zonos su smulkiaisiais elementais iki zonos su stambiausiais. Jei ši vertė lygi 1,5, tai elemento dydis gali išaugti daugiausia 50 %. Kreivumo koeficientas nusako santykį tarp kraštinių elementų dydžio ir kraštinės kreivumo radiuso. Elemento geometrinės formos pasirinkimas yra vienas iš svarbiausių žingsnių sudėtingos figūros analizavime. Tačiau šiame eksperimente dėl paprastos bandinio geometrijos buvo naudojamas iš trikampių sudarytas tinklelis. Eksperimento metu bandinys r ašyje buvo dalinamas į du cilindrus, taip, kad vidinio cilindro diametras būtų didesnis už pluošto skersmenį. Pvz.: kai pluošto skersmuo 5 mm, vidinio cilindro diametras buvo 6 mm. Toks zonų atskyrimas buvo pasirinktas tam, kad sąveikos zonoje būtų galima sukurti smulkesnį tinklelį, tokiu būdu gaunant tikslus duomenis bei sutrumpinant vieno matavimo trukmę. Vis dėl to tyrimo rezultatų tikslumas priklausė nuo kompiuterio parametrų (RAM 32,0 GB), kurie kartais riboja naudojamo tinklelio dydį. Tinklelio parametrai

kiekvienam bandymui buvo pasirinkti atsižvelgiant į mažiausią naudojamą geometrinį elementą ir mažinami iki tol, kol pokytis nedarė didelės įtakos rezultatui, t. y. buvo pakankamai smulkus, kad įskaičiuotų visus šilumos pokyčius bandinyje.

Siekiant užtikrinti, kad sukurtas modelis veikia tinkamai, jis buvo testuojamas bandant atkartoti literatūros šaltiniuose rastus panašių eksperimentų rezultatus [26].

2.2. Modelių analizė

Šio tyrimo rėmuose buvo pasirinkti keli pažaidos kriterijai. Nedengto lydyto kvarco atveju buvo laikoma, kad medžiaga yra negrižtamai pažeidžiama, kai temperatūra ekspozicijos pabaigoje pasiekia lydymosi temperatūrą t. y. 1610 °C. Eksperimentuose, kuriuose buvo tiriamas bandinys su aukso sluoksniu, pažaidos kriterijus buvo aukso lydymosi taškas – 1064 °C. Įtempių analizei naudojamas apibendrintasis įtempis pagal taip vadinamą „von Mises“ įtempio vertinimą, neišskiriant, ar susikaupęs įtempis yra tempiamasis, šlyties, sukamasis ar gniuždantysis ir teigiant, kad medžiaga pažeidžiama kai įtempio vertė viršija 50MPa, kuris atitinka stiklo tempiamąjį mechaninį atsparumą. Vis dėl to verta paminėti, kad bendru atveju įtempio jėgos kryptis gali sąlygoti skirtingą aižėjimo dinamiką, tad eksperimento metu gauti duomenys turėtų būti interpretuojami kaip preliminarūs.

Remiantis šia prielaida, siekiama iširti pažaidos slenksčio priklausomybę nuo įtempio kriterijaus, atsižvelgiant į bandinio parametrų (storio, įtrūkimo formos, gylio ir pozicijos bandinyje) ir spinduliuotės (impulso trukmės, pluošto diametro) parametrų įtaką, bei palyginti kelis pažaidos kriterijus.

Eksperimento metu nustatomas lazerio indukuotos pažaidos slenkstis (PLSS) gali būti aprašomas keliais dydžiais:

1. Apšvieta (intensyvumu) – lazerio smailinės galios ir efektyvus ploto santykis.

$$\text{Intensyvumas} \left[\frac{W}{cm^2} \right] = \frac{\text{Lazerio smailinė galia} [W]}{\text{Efektyvus plotas} [cm^2]}, \quad (28)$$

2. Įtėkiu, kuris apibūdina energiją, tenkančią ploto vienetui, ir yra dažniausiai naudojamas vienetą PLSS aprašymui. Pagal ISO 21254-1:2011 standartą efektyvus plotas yra apibrėžiamas kaip visos lazerio impulso galios ir smailinio energijos tankio santykis. Gauso pluoštui, kurio radiusas w , efektyvus plotas būtų πw^2 [27].

$$\text{Įtėkis} \left[\frac{J}{cm^2} \right] = \frac{\text{Lazerio impulso energija} [J]}{\text{Efektyvus plotas} [cm^2]}, \quad (29)$$

3. Tiesiniu galios tankiu – smailinės galios ir pluošto diametro santykis.

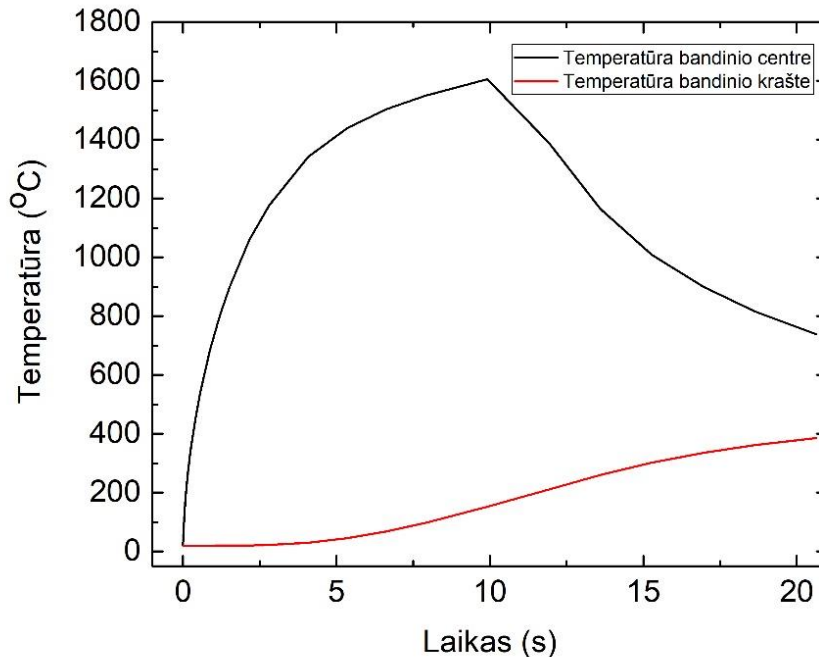
$$\text{Tiesinis galios tankis} \left[\frac{W}{cm} \right] = \frac{\text{Lazerio smailinė galia [W]} }{\text{Efektyvus pluošto diameteras [cm]}}, \quad (30)$$

Čia Gauso pluoštui efektyvus pluošto diameteras (iš to ir efektyvus plotas) yra $\sqrt{2}$ karto mažesnis nei Gauso pluošto diameteras.

Ekspirimentų rezultatai bus pateikiami vienu iš anksčiau aprašytu dydžiu, kurį naudojant geriausiai atsispindi tiriamos priklausomybės.

3. Pagrindiniai rezultatai ir jų aptarimas

3.1 Lydymosi taško PLSS tyrimas



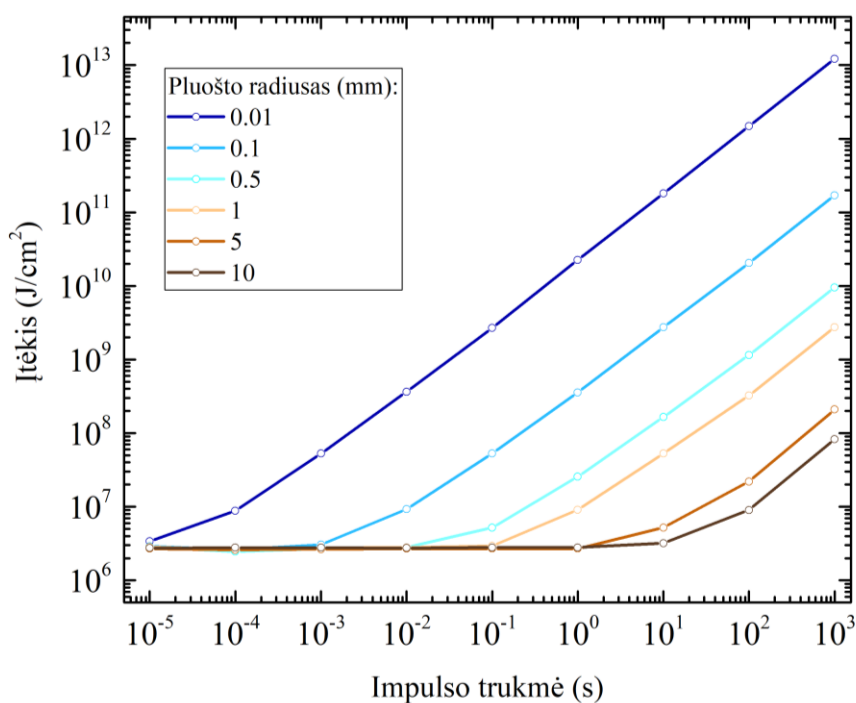
11 pav. Didžiausios (centre) ir mažiausios (krašte) temperatūros bandinyje kitimas. Bandinio ekspozicija tęsėsi nuo 0 iki 10 s.

Skaitmeniniu eksperimentu buvo tiriama lydymosi taško pažaidos kriterijus, keičiant impulso trukmes ir pluošto diameterą. Į bandinį kritusios šviesos smailinis intensyvumas (taip pat įtėkis ir tiesinis galios tankis) kiekvienu atveju parenkamas toks, kad didžiausia temperatūra bandinyje, impulsui pasibaigiant pasiektų lydymosi tašką, pvz. lydytam kvarcui 1610 °C. Skaitmeniniam modeliui patikrinti

buvo tiriama 10 s trukmės ekspozicija 10 mm diametro pluoštui, kurio intensyvumas nustatytas toks, kad impulso pabaigoje didžiausia temperatūra bandinyje pasiektų medžiagos lydymosi temperatūrą. Temperatūros kitimo dinamika pavaizduota 11 pav. Vietą bandinyje, kurioje stebima (matuojama) mažiausia ir didžiausia temperatūra bandinyje parinko pati programa. Matyti, kad maksimali temperatūra pasiekama impulso pabaigoje ir spinduliuotei dingus bandinys aušta – temperatūra iš karto pradeda mažėti. Skaitmeninio modelio rezultatai atitinka 1 pav. pavaizduotą temperatūros kitimo tendenciją.

3.1.1 Pluošto diametro ir impulso trukmės įtakos PLSS tyrimas

Skaitmeniniu eksperimentu buvo tiriamas lydyto kvarco stiklo PLSS taikant lydymosi taško pažaidos kriterijų, keičiant impulso trukmės nuo 0,00001 iki 1000 s ir pluošto diametras nuo 0,02 iki 20 mm (12 pav.).

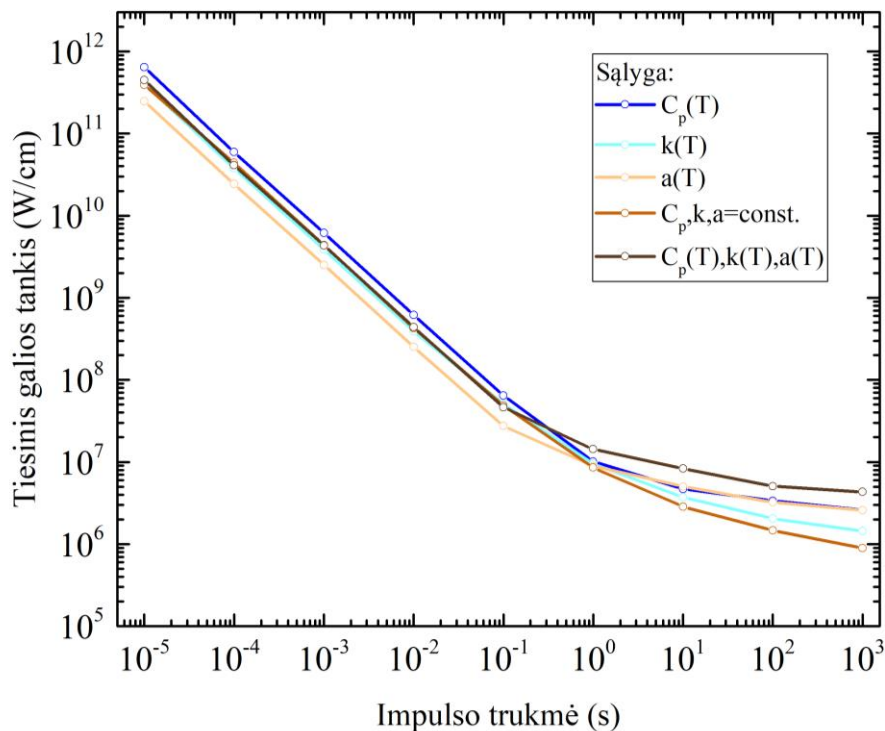


12 pav. Įtėkio priklausomybė nuo impulso trukmės ir pluošto radiuso lydyto kvarco bandiniui tiriant lydymosi taško pažaidos kriterijų.

Gauta, jog ekspozicijos trukmei ilgėjant pažaidai medžiagoje sukelti yra reikalingas vis didesnis įtėkis, o didėjant pluošto radiusui bei mažėjant impulso trukmei mažėja ir pažaidos slenksčio priklausomybė nuo impulso trukmės. Pavyzdžiui, kai impulso skersmuo 0,02 mm nagrinėjamų trukmių

ruože slenkstinis energijos įtėkis kinta nuo $2,9 \cdot 10^6$ iki $69,7 \cdot 10^{12}$ J/cm², o kai pluoštas užpildo visą bandinio apertūrą t. y. 20 mm diametro pluoštui – $2,7 \cdot 10^6$ iki $3 \cdot 10^7$ J/cm². Taip nutinka todėl, kad, mažo diametro pluoštas sukuria šilumos padidėjimą tik mažame bandinio tūryje, o aplinkui esanti medžiaga gali „priimti“ šilumą iš eksponuojamo tūrio, taip sukuriant temperatūrinį gradientą. Didelio diametro pluoštui šilumos sklidimas yra ribojamas bandinio tūriu, o temperatūros gradientas bandinyje – nedidelis: šiluma gali būti atiduota aplinkai tik šiluminio spinduliavimo būdu. Todėl šiuo atveju temperatūra kyla greičiau (centre vėsta lėčiau). Dėl šios priežasties nuolatinės veikos lazeriui pažaidos slenkstis priklauso nuo pluošto diametro – esant tam pačiam smailiniam įtėkiui pažaidos slenkstis mažėja didinant pluošto radiusą. Esant trumpoms ekspozicijos trukmėms mažesnėms nei 10 μs pažaidos slenkstis yra konstanta – nepriklauso nuo trukmės ir pluošto radiuso (nagrinėtiems atvejams).

3.1.2 Medžiagos parametrų ir jų temperatūrinės priklausomybės įtakos PLSS tyrimas



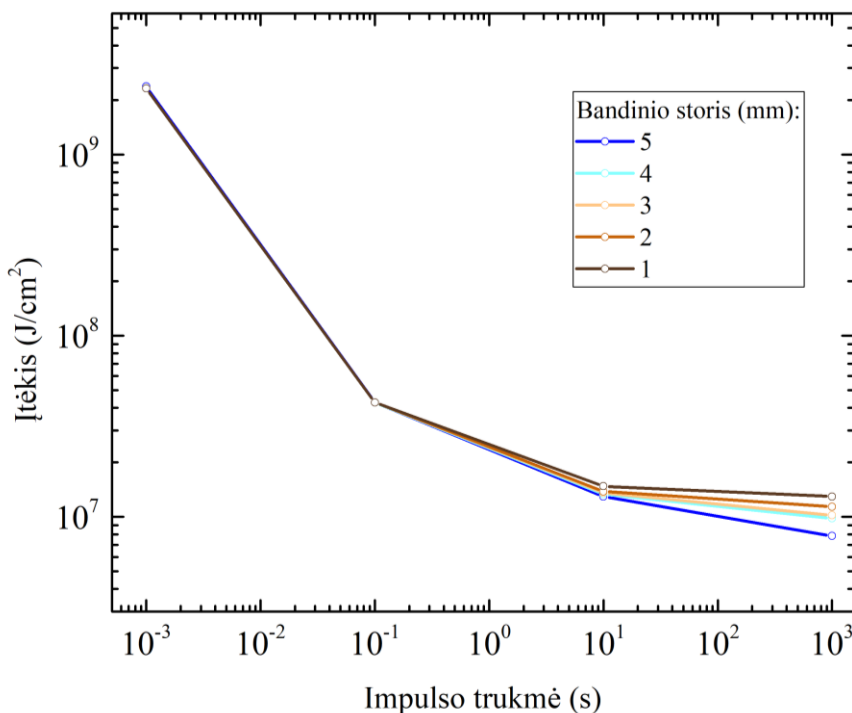
13 pav. Slenkstinio tiesinio galios tankio priklausomybė nuo impulso trukmės ir medžiagos parametrų sąlygos kai pluošto radiusas 1 mm.

Šiuo eksperimentu buvo nagrinėjamas pažaidos slenkstis kai temperatūra bandinyje pasiekia lydymosi tašką atsižvelgiant į medžiagos parametrų priklausomybės nuo temperatūros įtaką. 13 pav.

pavaizduota slenkstinio tiesinio galios tankio lydymosi taške priklausomybė nuo impulso trukmės ir sąlygos: nepastovi šiluminė talpa, nepastovus šiluminis laidumas, sugerties koeficientas priklauso nuo temperatūros, visi anksčiau išvardinti parametrai yra konstantos ir visi parametrai priklauso nuo temperatūros.

Gauta, kad medžiagos parametrų priklausomybių nuo temperatūros įskaitymas daro ženklią įtaką slenkstiniam tiesiniam galios tankiui. Pavyzdžiui, kai impulso trukmė 1000 s gaunamas slenkstis kai visi parametrai yra konstantos yra 0,8 MW/cm, o atsižvelgus į priklausomybes nuo temperatūros – 4,3 MW/cm. Trumpoms impulsų trukmėms šis skirtumas išnyksta ir pažaidos slenkščiu įtakos nebedaro, tačiau išryškėja pavienių parametrų – šiluminio laidumo ir šiluminės talpos daroma įtaka.

3.1.3 Bandinio storio įtakos PLSS tyrimas

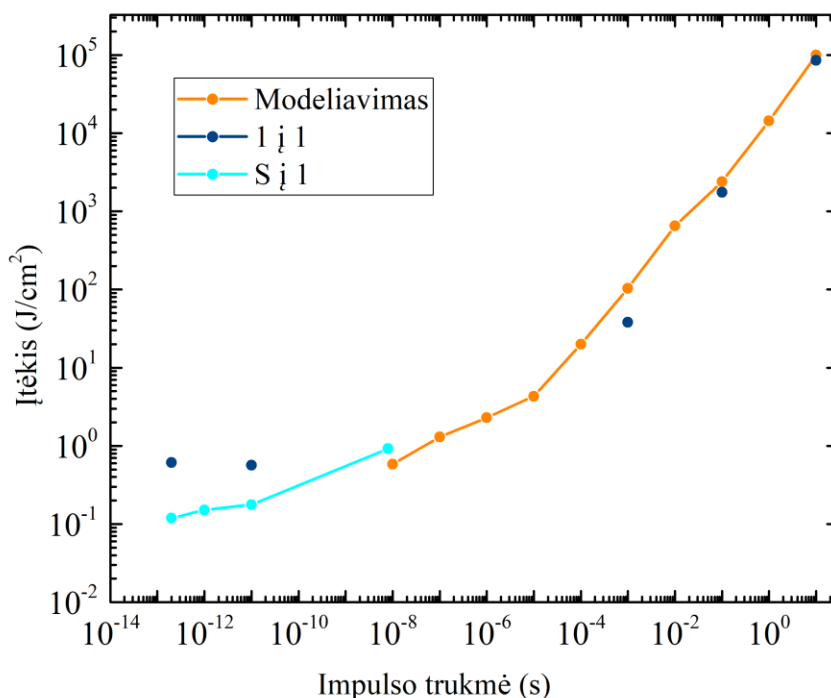


14 pav. Slenkstinio tiesinio galios tankio priklausomybė nuo impulso trukmės su skirtingais bandinio storiais kai pluošto radiusas 0,5 mm.

Kaip buvo minėta, pažaidos slenkščiu įtaką daro ne tik spinduliuotės, bet ir bandinio parametrai, pavyzdžiui bandinio storis. Išmatavus tiesinio galios tankio priklausomybę nuo impulso trukmės skirtingiems bandinio storiams, gauta jog bandinio storio daroma įtaka slenkstiniam itėkiui priklauso nuo

impulso trukmės (14 pav.). Trumpoms ekspozicijos trukmėms medžiagos pažeidimo slenkstis nuo bandinio storio nepriklauso, nes šiluma su medžiaga sąveikauja labai trumpą laiką dėl to sugertis vyksta labai mažame tūryje. Tuo tarpu, ilgoms trukmėms nuo 0.1 s – kai šiluma pasklinda po visą bandinį (šiluma sugeriama didesniame tūryje) atsiranda priklausomybė nuo bandinio storio t. y. kuo plonesnis bandinys tuo aukštesnis jo pažeidimo slenkstis. Pavyzdžiui, kai ekspozicijos trukmė 1000 s, 1 mm storio bandiniui slenkstinis įtėkis buvo 13 MJ/cm², o 5 mm storio bandiniui – 7,8 MJ/cm².

3.1.4 Dangos įtakos PLSS tyrimas



15 pav. Slenkstinio įtėkio priklausomybė nuo impulso trukmės lydyto kvarco bandiniui su auksine danga: skaitinio modeliavimo ir eksperimento palyginimas.

Anksčiau atlikti eksperimentai nagrinėjo šilumos sklidimą skaidraus lydyto kvarcinio stiklo bandinyje, tačiau lazeriniuose prietaisuose dažniau naudojami įvairūs elementai su plonasluoksnėmis dangomis (pvz. veidrodžiai). Taigi šiame eksperimente buvo naudojamas 20 mm radiuso ir 2 mm storio lydyto kvarco pagrindukas, ant kurio buvo užgarinta 300 nm storio auksinė danga. Panašus bandinys buvo tirtas ir eksperimentiškai siekiant palyginti teoriškai gautas vertes su praktika. Taigi, atsižvelgiant į

eksperimentinius duomenis buvo laikoma, kad atspindys nuo dangos siekia 97%, o lazerio pluošto radiusas 0,535 mm. Atitinkamai – neatspindėta šviesos dalis buvo sugerama. Teorinio modeliavimo bei eksperimento duomenys (pasiskolinti iš kolegų palyginimo tikslais (didelė padėka Erikui Atkočaičiui ir Urtei Kimbaraitei)), gauti dviem metodais – 1 į 1 ir S į 1, pavaizduoti 15 pav.

Gauta, jog modeliavimo duomenys gana dideliu tikslumu atitinka eksperimento metu gautus duomenis. Kaip ir ankstesniuose modeliavimo eksperimentuose gauta jog pažaidos slenkstis trumpoms ekspozicijos trukmėms yra daug mažesnis nei su ilgomis, dėl kaitinimo tūrio bandinyje. Kai impulso trukmė 10 s gautas slenkstinis įtempis bandiniui su danga 0,1 MJ/cm², o bandiniui be dangos (pagal anksčiau gautus rezultatus su 0,5 mm spinduliuotės radiusu) – 165 MJ/cm². Tai reiškia, kad danga su didesniu sugerties koeficientu bei žemesne lydymosi temperatūra daro didelę įtaką pažaidos slenksčiui.

Anksčiau buvo ištirta, jog nedengto lydyto kvarco lydymosi taško pažaidos slenkstis nepriklauso nuo ekspozicijos trukmės, kai impulso trukmė < 10⁻³ s (12 pav.). Tačiau, stiklui su plonasluoksne danga, pažaidos slenkstis priklauso nuo impulso trukmės visame tirtame trukmių ruože, priešingai nei teigiama literatūroje [18], bet to paaiškinimui reikalingi tolimesni tyrimai.

3.2 Įtempio kriterijaus PLSS tyrimas.

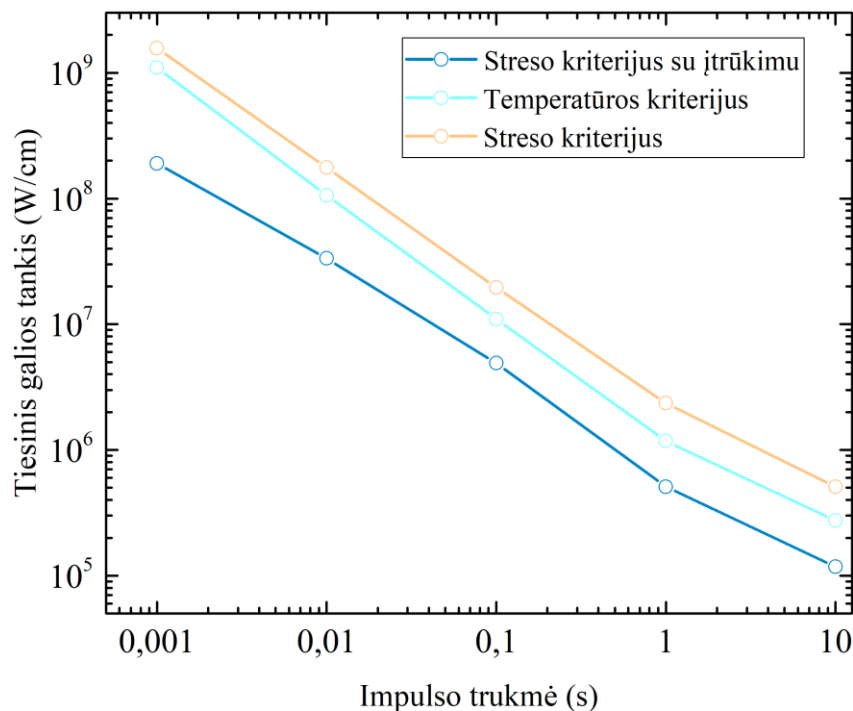
Medžiagai sąveikaujant su nuolatinės veikos lazerine spinduliuote lokalus medžiagos kaitimas yra nevienintelis galimas reiškinys darantis įtaką medžiagos atsparumui. Sąveikos metu atsiranda ir įtempiai, lemiantys katastrofinius įtrūkimus ir medžiagos aižėjimą, o bandinio paviršiuje gamybos metu susiformavę defektai daro itin didelę įtaką medžiagų optiniam atsparumui.

3.2.1 Pažaidos kriterijų palyginimas

Eksperimento metu buvo siekiama palyginti anksčiau gautas lydymosi taško pažaidos slenkščio vertes su medžiagose susidariusių įtempių pažaidos slenkščio vertėmis, kai bandinys idealus ir kai jo centre yra įtrūkimas (16 pav.). Buvo laikoma, kad medžiaga yra pažeidžiama kai von Mises įtempių vertės medžiagoje, ekspozicijos pabaigoje, pasiekia 50 MPa.

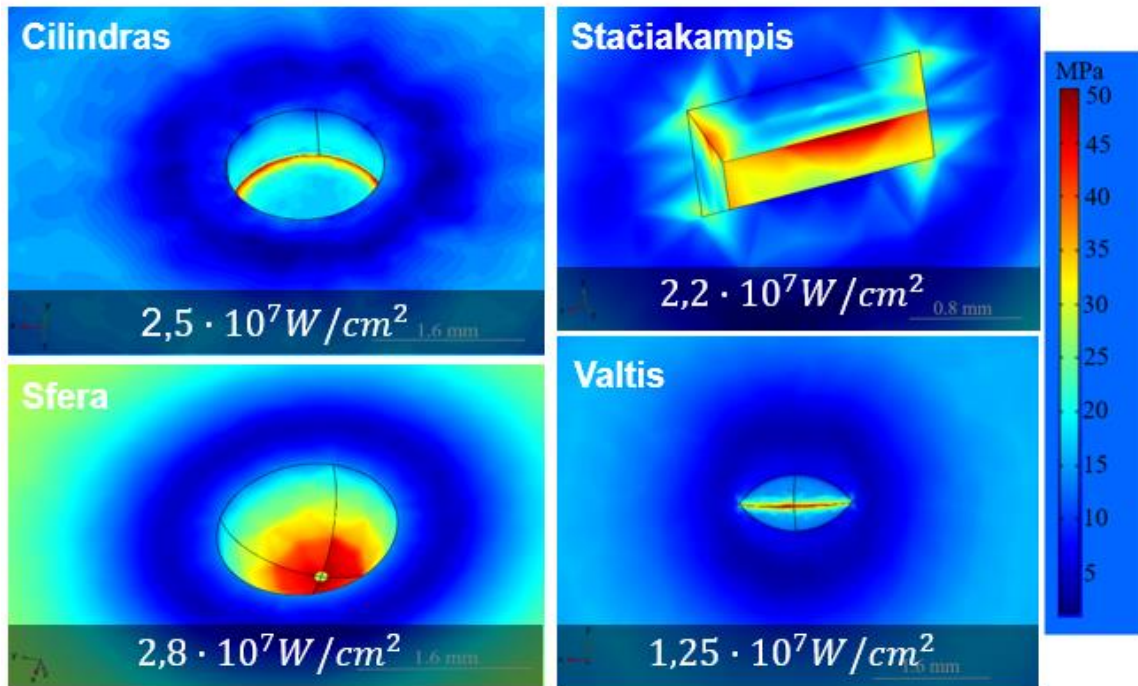
Gauta jog nepriklausomai nuo impulso trukmės medžiagai be defektų sąveikaujant su lazerine spinduliuote pažaidos slenkštį riboja lydymosi taško kriterijus, kuris yra pasiekiamas su mažesniu tiesiniu galios tankiu nei įtempio kriterijus. Tačiau, jei paviršiuje yra įtrūkimas (optinių elementų gamybos metu

visada atsiranda įvairių defektų), tuomet labiau tikėtina, kad medžiaga bus pažeidžiama dėl įtempių viršijančių kritinę vertę. Taip nutinka todėl, kad esant trūkiui įtempiai savaime koncentruojasi aplink jį (ypač aštrių briaunų vietose), todėl jo plitimui reikalingas daug mažesnis tiesinis galios tankis. Tuo įsitikinti nesunku nagrinėjant žemiau pateiktus modeliavimo rezultatus susijusius su įtrūkimo formos įtaka pažaidos slenksčiui (17 pav.). Čia visuose bandymuose buvo naudojama 0,1 s trukmės lazerinė spinduliuotė, kurios radiusas 2,5 mm. Gauti rezultatai patvirtino teorines žinias, kad įtempiai koncentruojasi kampuose vietose ir kuo įtrūkimo kampai mažesni tuo mažesnis bus pažaidos slenkstis. Didžiausią slenkstinį intensyvumą turėjo 0,8 mm radiuso pussferė, kurios dugne sąveikos metu kaupėsi įtempiai. Valties formos įtrūkimas pasižymėjo mažiausiu slenksčiu – beveik dvigubai mažesniu nei pussferės atveju, tad tokia įtrūkimo geometrija buvo pasirinkta tolimesniems eksperimentams.



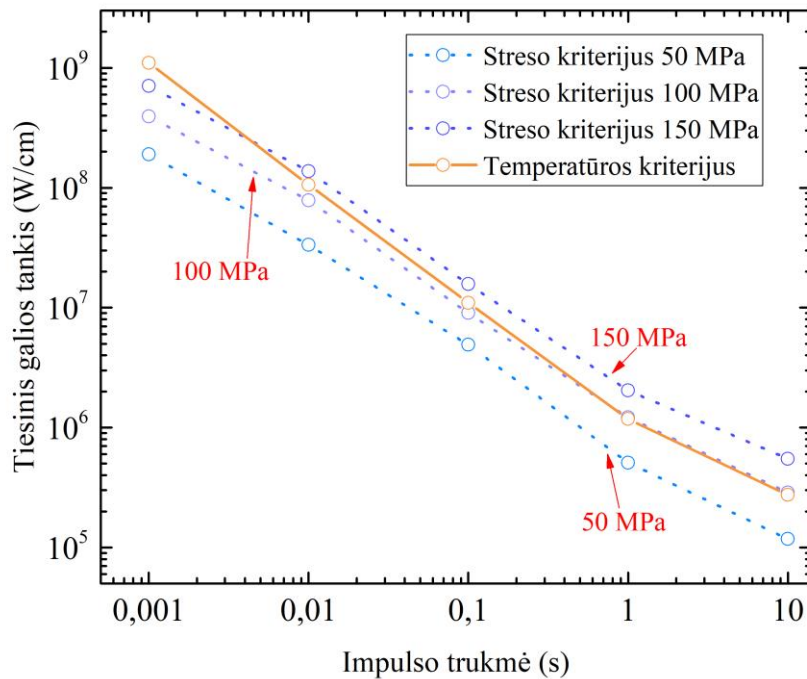
16 pav. Tiesinio galios tankio priklausomybė nuo impulso trukmės ir naudojamo pažaidos kriterijaus.

Kritinio įtempio (streso) kriterijaus vertės pasirinkimas nulemia intensyvumą reikalingą medžiagai pažeisti. Literatūros šaltiniuose kritinio streso vertės lydyto kvarco bandiniams svyruoja nuo 50 – 150 MPa, bei priklauso nuo bandinio diametro ir paviršiaus kokybės (poliravimo) [28]. 9 colių (22, 86 cm) diametro bandinių kritinio įtempio vertės skirtingiems poliravimams svyruoja nuo 43 iki 99 MPa, o 1 colio (2,54 cm) diametro du kartus poliruotų (superpoliruotų) bandinių įtempių vertės yra nuo 160 iki 200 MPa.



17 pav. Įtrūkimo formos įtaka pažaidos slenksčiui.

Ekspimento metu išmatuotos tiesinio galios tankio priklausomybės nuo impulso trukmės esant skirtingiems įtempio kriterijams ir rezultatai sulygtinti su lydymosi taško kriterijumi (18 pav.). Iširta, kad kritinio įtempio vertei didėjant nuo 50 MPa iki 150 MPa pažaidos sukėlimui reikalingas tiesinis galios tankis auga tiesiškai tirtoms impulsų trukmėms. Taip pat gauta jog su tam tikromis trukmėmis kritinio įtempio pažaidos slenkstis viršija temperatūrinį lydymosi taško pažaidos kriterijų. Pavyzdžiui, kai įtempių kriterijus lygus 100 MPa impulso trukmėms trumpesnėms už 0,7 s dominuojantis pažaidos mechanizmas bus medžiagoje susidarantys įtempiai. Tačiau ilgesniems impulsams bandinys bus katastrofiškai pažeidžiamas dėl medžiagos lydymosi. Su didesniu įtempio kriterijumi 150 MPa impulso trukmėms ilgesnėms už 0,005 s medžiagos pažeidimas įvyks dėl lydymosi ir tik vėliau medžiaga pradės aižėti ar esami defektai plisti. Tam, kad įtempiai būtų pažaidą ribojantis efektas trumpoms impulsų trukmėms reikės daug didesnių įtempių nei ilgoms trukmėms, kur daugeliu atveju medžiaga lydysis pirmiau.



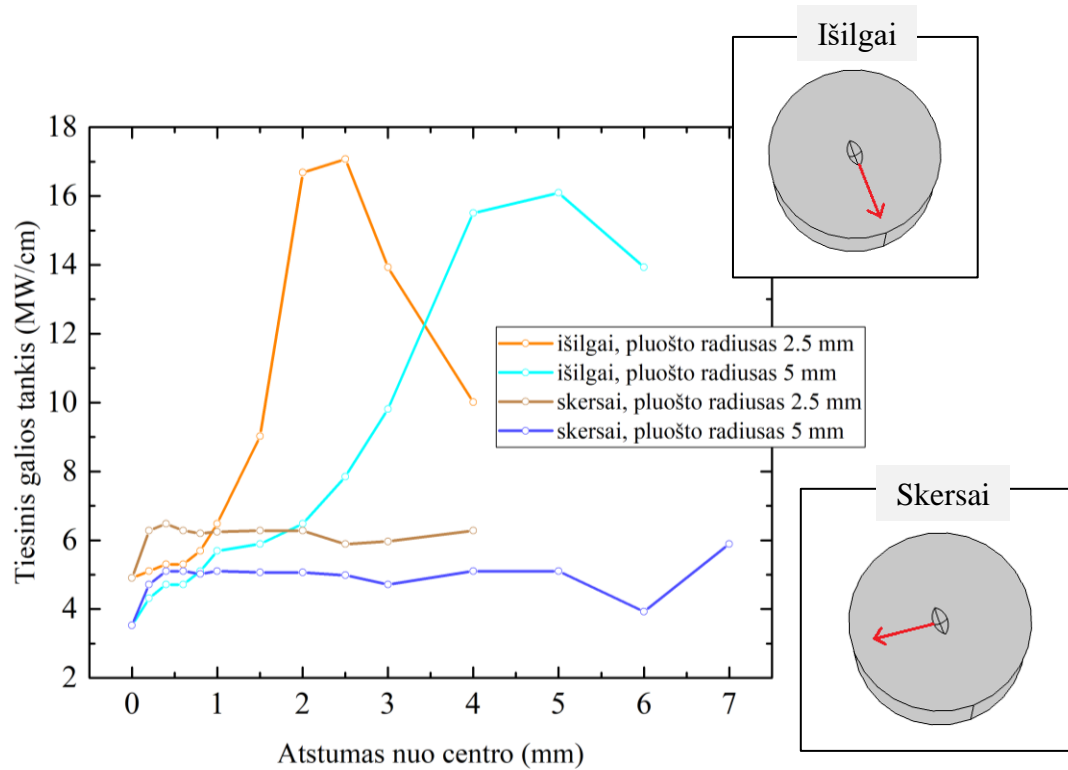
18 pav. Tiesinio galios tankio priklausomybė nuo impulso trukmės bei pažaidos kriterijų, kai pluošto radiusas 2,5 mm.

3.2.2 Įtrūkimo pozicijos įtakos PLSS tyrimas

Visi prieš tai nagrinėti eksperimentai nagrinėjo atvejį kai įtrūkimas yra bandinio centre, tačiau pažaidos slenksčio vertė gali priklausyti nuo defekto pozicijos bandinyje pluošto atžvilgiu. Tarkime, kad turime lazerinį pluoštą, kuris šviečia į bandinio centrą ir nejuda, jo radiusas yra 2,5 arba 5 mm, o impulso trukmė nesikeičia ir yra 0,1 s. Įtempio kriterijus yra 50 MPa ir įtrūkimas yra traukiamas link bandinio krašto skersai arba išilgai kaip parodyta 19 pav. Mažiausia tiesinio galios tankio vertė yra gauta kai įtrūkimas yra bandinio centre. Tai paaiškinama tuo, kad pluošto energijos pasiskirstymas aprašomas Gauso funkcija ir galios pasiskirstymas jame nėra tolydus, dėl to bandinio centras gauna daugiau galios. Todėl pažaidos slenkstis defektui esant centre bus mažesnis nei jam artėjant link krašto.

Įtrūkimą traukiant išilgai tiesinis galios tankis kyla tolstant nuo bandinio centro, o pasiekus lazerinio pluošto ribą pažaidos slenkstis sumažėja. Didžiausia slenksčio vertė pasiekta su 2,5 mm pluoštu buvo 17,2 MW/cm kai atstumas nuo centro 2,5 mm, o su 5 mm radiuso pluoštu – 16,07 MW/cm su 5 cm atitraukimu. Kadangi dalis defekto jau yra už lazerinio pluošto ribų, įtempiai koncentruojasi tik viename įtrūkimo krašte. Įtempių pasiskirstymas ties defektu kai pluošto radiusas 2,5 mm, o atstumas nuo centro

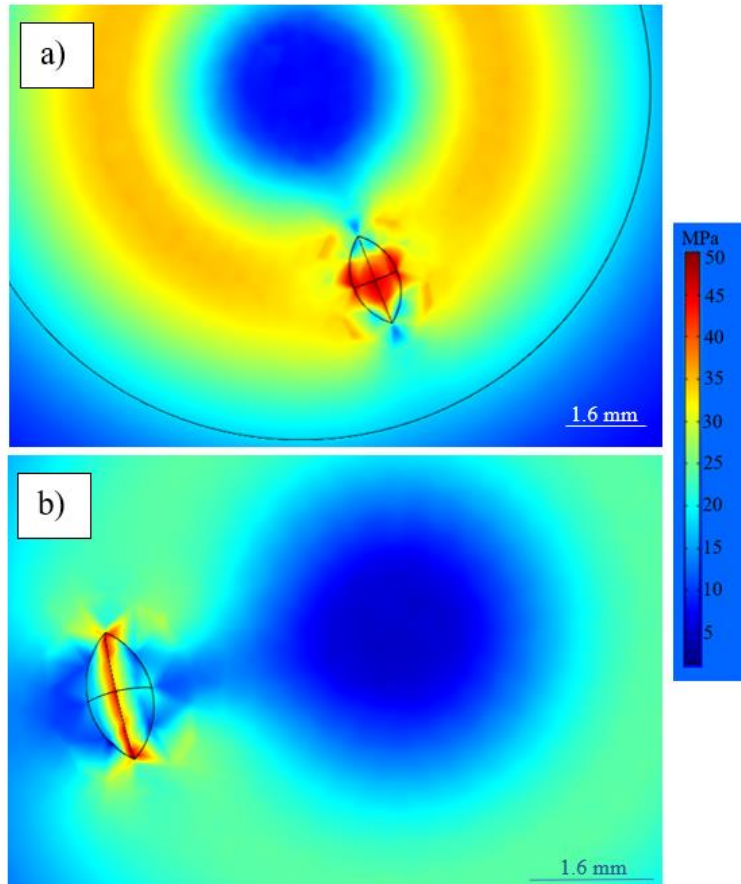
2,5 mm parodytas 20 pav. Galima matyti du labai svarbius įtempių mechanizmus – išilginį skilimą, kuris matomas geltono žiedo pavidalu, bei skersinį skilimą, kuris matomas iš to, kad žiede ties įtrūkimu atsiranda tarpelis, kuriame įtempiai yra mažesni



19 pav. Slenkstinio tiesinio galios tankio priklausomybė nuo įtrūkimo atstumo nuo centro jį traukinat skirtingomis kryptimis, kai impulso trukmė 0,1 s, o pluošto radiusas 2,5 arba 5 mm.

Tuo tarpu įtrūkimui judant skersai pažaidos slenkstis judant link krašto paauga labai nedaug palyginus su išilginiu ir sumažėja ties pluošto riba. Kai pluošto radiusas 2,5 mm pažaidos slenkstis svyruoja ties 6,3 MW/cm riba, o su didesniu radiusu ties 4,5 MW/cm tiesiniu galios tankiu. Toks skirtumas atsiranda būtent dėl defekto formos. Kaip buvo nustatyta anksčiau esant valtės formos įtrūkimui įtempiai kaupiasi jos „dugne“, kur yra aštriausias kampas. Lazerinės spinduliuotės energija sklisdama nuo centro esant išilginiam įtrūkimui pasiskirsto išilgai tam kampui, taip sukurdamą energijos ir įtempių gradientą. Kai defektas yra pasuktas 90 laipsnių kampu, energija pasiskirsto tolygiai per visą defekto gylį, tokiu būdu sukurdamą įtempių koncentraciją jautriausioje bandinio vietoje. Šiuo atveju taip pat galima stebėti

lateralinio skilimo vietą, kur įtrūkimas surenka energiją iš aplinkinių bandinio vietų sukurdamas mažo įtempio sritis.

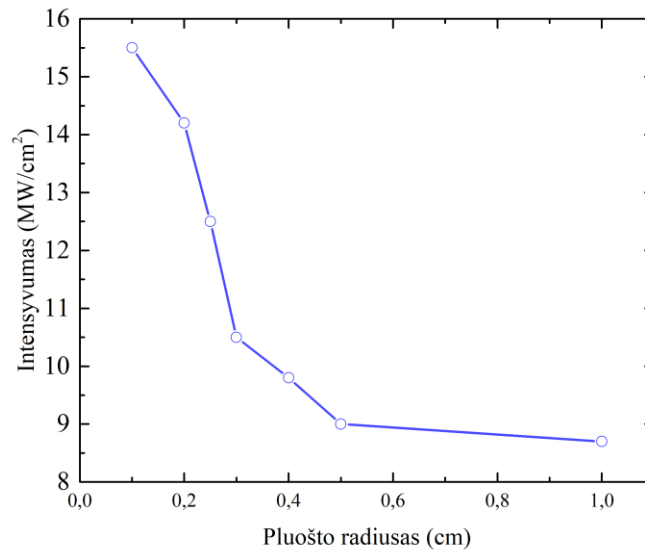


20 pav. Įtempių pasiskirstymas ties defektu bandinyje, kai jis nukreiptas a) išilgai ir b) skersai.

3.2.3 Pluošto diametro įtakos PLSS tyrimas

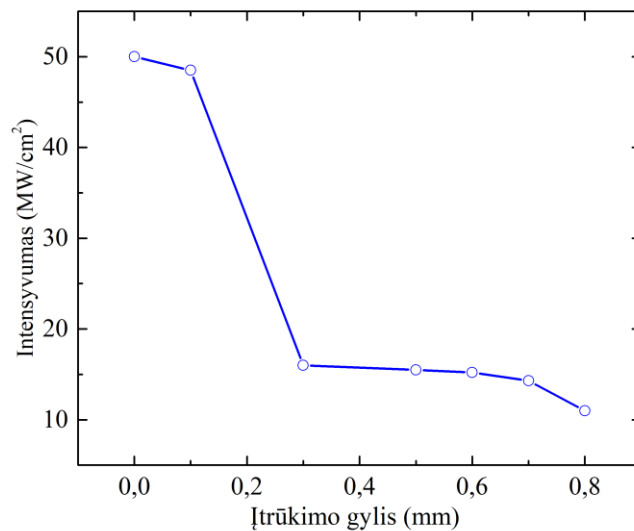
Laikant, kad įtempio kriterijus yra 50 MPa, o impulso trukmė 0,1 s išmatuotos pažaidos slenkščio priklausomybės nuo pluošto radiuso (21 pav.). Gauta, jog kuo mažesnis yra pluošto radiusas tuo didesnis pažaidos slenkstis, o jam didėjant intensyvumas beveik eksponentiškai mažėja. Kai radiusas 1 mm slenkstinis intensyvumas yra $15,5 \text{ MW/cm}^2$, tuo tarpu kai radiusas yra 10 mm intensyvumas nukrenta iki $8,7 \text{ MW/cm}^2$. Taip įvyksta todėl, kad, kai pluošto radiusas 0,1 mm, yra šildomas labai mažas bandinio tūris palyginus su visu bandinio tūriu ir temperatūros gradientas bandinyje yra labai didelis bei medžiagos pailgėjimas vyksta palyginus mažame tūryje todėl, sukuriami įtempiai – nedideli. Dėl to šiluma ir įtempiai lengvai persiskirsto bandinyje, kas nulemia aukštą pažaidos slenkstį. Tuo tarpu, kai radiusas didelis – 10

mm išsiplėtimas vyksta gana dideliame tūryje ir sukuriama gerokai didesni įtempiai, o pažeidimo slenkstis pasiekiamas su mažesniu intensyvumu.



21 pav. Intensyvumo priklausomybė nuo pluošto radiuso, kai impulso trukmė 0,1 s, o pažeidimo kriterijus 50 MPa.

3.2.4 Įtrūkimo gylio įtakos PLSS tyrimas



22 pav. Įtrūkimo gylio įtaka pažeidimo slenkščiui.

Gamybos metu atsiradę defektai paprastai būna popaviršiniai t. y. jų gylis yra labai mažas, tačiau kartais pasitaiko ir gilesnių trūkių. Laikant, kad pluošto radiusas 2,5 mm, tiesinio galios tankio

priklausomybė nuo įtrūkimo gylio, keičiant jį nuo 0 iki 0,8 mm, pavaizduota 22 pav. Didžiausias pažaidos slenkstis bus tuomet, kai įtrūkimo nebus arba jis bus paviršinis t. y. jo gylis neviršys 0,1 mm. Tačiau kuo įtrūkimas labiau skverbiasi į gylį tuo mažesnis yra pažaidos slenkstis ir šis mažėjimas atitinka eksponentinį pasiskirstymą. Pažaidos slenkstis, kai defekto gylis 0,1 mm, yra 48 MW/cm, o, kai gylis 0,8 mm, tiesinis galios tankis yra 12,5 MW/cm. Šis reiškinys iš dalies susijęs su įtempių koncentracija ir su tuo, kad esant gilesniam įtrūkimui padidėja šildomo paviršiaus plotas ir daugiau spinduliuotės yra sugerama pluošto centre. Taip pat nuo defekto gylio priklauso šildomas tūris – kuo jis mažesnis, tuo didesnis temperatūrinis gradientas bandinyje, bei šiluma turi kur sklisti. Dėl to reikalingas didesnis intensyvumas tokio pat dydžio įtempiams sukurti ir pažaidos slenkstis yra aukštesnis.

Išvados:

- Nustatyta, jog bandinį apšviečiant mažo (pvz. 0,01 mm) diametro pluoštu, stebime gerokai stipresnę slenkstinio įtėkio priklausomybę nuo impulso trukmės, nei didelio pluošto (pvz. 5 mm) atveju, kai impulso trukmė keičiama nuo 0,00001 s iki 1000 s, nes mažo įkaitinto tūrio atveju (kai mažas pluoštas) šilumos pernaša vyksta gerokai efektyviau dėl didesnio temperatūrinio gradiento bandinyje ir taip ženkli dalis sugertos energijos pasklinda į aplinką. Didelio pluošto atveju šilumos sklaidymas ne toks spartus, nes jį apriboja bandinio matmenys, o energija atiduodama aplinkai tik spinduliniu būdu.
- Atlikus lydyto kvarco su auksine danga skaitmeninį modeliavimą, nustatyta, jog lydymosi taško pažaidos slenkstis priklauso nuo ekspozicijos trukmės ir mažėja jai trumpėjant, visame tirtame trukmių ruože, priešingai nei teigiama literatūroje.
- Atlikus įtempių skaitinį modeliavimą lydyto kvarco atveju, nustatyta, kad gamybos metu susiformavę makroskopiniai defektai (tūriniai įtrūkimai), apšvietus juos lazeriu, veikia kaip mechaninių įtempių koncentracijos centrai, o jų forma bei pozicija erdvėje, spinduliuotės atžvilgiu, daro didelę įtaką medžiagos pažaidos slenkščiui: slenkstis dėl defektų gali sumažėti iki dešimt kartų lyginant su medžiaga be defektų. Nustatyta, jog mažiausias tiesinis galios tankis, reikalingas medžiagai pažeisti, gaunamas, kai įtrūkimas yra bandinio centre ir didėja defektui judant link bandinio kraštų.
- Darant prielaidą, kad apibendrintasis (von Mises) įtempis yra tinkamas kritinio įtempio kriterijus (pvz. 150 MPa), nustatyta, kad, keičiant apšvietos impulso trukmę, gali dominuoti skirtingi pažaidos mechanizmai. Lydyto kvarco atveju ilgoms impulsų trukmėms ($> 0,7$ s) turėtų dominuoti medžiagos lydymu nulemta pažaida, o esant trumpoms impulsų trukmėms ($< 0,005$ s) turėtų dominuoti pažaida dėl terminio plėtimosi sukkelto katastrofinio aižėjimo.

Mokslinio tiriamojo darbo aprobacija:

Dalis mokslinio tiriamojo darbo metu gautų rezultatų bus publikuojami ir pristatyti mokslinėje konferencijoje:

1. M. Jupé, K. Kiedrowski, M. Steinecke, L. Herrero, L. Jensen, E. Atkočaitis, E. Žutautaitė, U. Kimbaraitė, M. Ščiuka, A. Melninkaitis, Experimental study of LIDT scaling laws for metallic coatings: effect of pulse duration within fifteen orders of magnitude.
2. M. Jupé, K. Kiedrowski, M. Steinecke, L. Herrero, L. Jensen, E. Atkočaitis, E. Žutautaitė, U. Kimbaraitė, M. Ščiuka, A. Melninkaitis, Experimental study of LIDT scaling laws for metallic coatings: effect of pulse duration within fifteen orders of magnitude, SPIE laser damage Symposium 17 – 20 October 2021, Hilton Garden Inn Rochester, New York, United States.

Literatūra:

- [1] G. P. Perram, M. A. Marciniak, and M. Goda, High energy laser weapons: Technology overview, Proc. SPIE **5414**, 1 – 25 (2004).
- [2] S. K. Vartapetov, D. V Khudyakov, K. E. Lapshin, A. Z. Obidin, and I. A. Shcherbakov, Femtosecond lasers for microsurgery of cornea, Quantum Electron. **42(3)**, 262 – 268 (2012).
- [3] B. Jaeggi, B. Neuenschwander, M. Schmid, M. Mural, J. Zuercher, and U. Hunziker, Influence of the pulse duration in the ps-regime on the ablation efficiency of metals, Phys. Procedia **12**, 164 – 171 (2011).
- [4] F. Dahmani, J. C. Lambropoulos, S. J. Burns, S. Papernov, and A. W. Schmid, How small stresses affect 351-nm damage onset in fused silica, Proc. SPIE **3578**, 431 – 435 (1999).
- [5] R. M. Wood, Laser induced damage thresholds and laser safety levels. Do the units of measurement matter?, Opt. Laser Technol. **29**, 517 – 522 (1998).
- [6] K. Ross, High powerpulsed and CW laser damage: Understanding the differences in Pulsed and CW damage, (2020).
- [7] R. M. Wood, *Laser damage in optical materials* (A. Hilger, Bristol, 1986).
- [8] H. S. Carslaw and J. C. Jaeger, *Conduction of Heat in Solids*, second edition (Oxford University Press, Oxford, 1959)
- [9] H. Gong, C. F. Li, and Z. Y. Li, CW-laser-induced thermal and mechanical damage in optical materials, Proc. SPIE **3578**, 576 – 583 (1999).
- [10] J. W. A. Fetter, *Theoretical Mechanics of Particles and Continua* ((Dover Publ., New York, 2003).
- [11] C. Seaburg and P. Carter, *Torsional Analysis of Structural Steel Members* (2nd Edition, Oxford University Press, London, 1959).
- [12] A. E. Armenàkas, *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity* (CRC press, Florida, 2005).
- [13] Z. X. Zhang, *Rock Fracture and Blasting Theory and Applications* (Butterworth - Heinemann, USA, 2016).
- [14] C. E. Inglis, Stresses in Plates Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners, Trans. Inst. Nav. Archit., **55**, 219 – 241 (1913).
- [15] P. A. Withey, Fatigue failure of the de Havilland comet I, Engineering Failure Analysis, **4**, 147 – 154 (2001).

- [16] ISO Standard 21254-2, International Organization for Standardization, 2011.
- [17] D. Ristau, *Laser-Induced Damage in Optical Materials* (CRC press, Taylor & Francis Group, Florida, 2014).
- [18] A. A. Griffiths, The phenomena of rupture and flow in solids, *Masinovedenie*, **1**, 9–14 (1995).
- [19] L.B. Freund and S. Suresh, *Thin Film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).
- [20] J. F. Nye, *Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices* (Clarendon Press, Oxford, 1957).
- [21] T. Doualle, L. Gallais, P. Cormont, D. Hébert, P. Combis, and J. L. Rullier, Thermo-mechanical simulations of CO₂ laser-fused silica interactions, *J. Appl. Phys.*, **119**, 1 – 10 (2016).
- [22] K. M. Nowak, H. J. Baker, and D. R. Hall, Analytical model for CO₂ laser ablation of fused quartz, *Appl. Opt.*, **54**, 8653–8663 (2015).
- [23] R. Brückner, Properties and structure of vitreous silica, *J. Non. Cryst. Solids*, **5**, 123 – 175 (1970).
- [24] COMSOL Multiphysics, <https://www.comsol.com>.
- [25] Y. Pan, Z. Shen, J. Lu, and X. Ni, Analysis of temperature and thermal stress fields of K9 glass damaged by 1064nm nanosecond pulse laser, *Proc. SPIE*, **8603**, 8603-7 (2013).
- [26] S. Choi and K. Y. Jhang, Initiation time of near-infrared laser-induced slip on the surface of silicon wafers, *Appl. Phys. Lett.*, **104**(25), 251604-251604.4 (2014).
- [27] A. Stratan, A. Zorila, L. Rusen, and G. Nemes, Measuring effective area of spots from pulsed laser beams, *Opt. Eng.*, **53**(12), 122513 (2014).
- [28] C. A. Klein, Characteristic strength, Weibull modulus, and failure probability of fused silica glass, *Opt. Eng.*, **48**(11), 113401 (2009).

LAZERINIŲ OPTINIŲ ELEMENTŲ ATSPARUMO NUOLATINĖS VEIKOS LAZERIO SPINDULIUOTEI SKAITINIS MODELIAVIMAS

Emilija Žutautaitė

Tobulėjant nuolatinės veikos lazeriams, atsirado poreikis užtikrinti jų kokybę. Paskutiniai optinių elementų atsparumo nuolatinės veikos lazerio spinduliuotei tyrimai daryti 1998 metais, laikant, kad medžiaga yra negrižtamai pažeidžiama, kai jos temperatūra pasiekia lydymosi temperatūrą. Kita vertus, iš tyrimų trumpų impulsų srityje žinoma, kad didelę įtaką pažaidos slenksčiui gali daryti optinės dangos ir bandinio paviršiuje gamybos metu susiformavę defektai, tačiau tai dar nėra įrodyta nuolatinės veikos spinduliuotei.

Šio darbo tikslas: skaitmeniškai modeliuojant medžiagos lydymąsi ir terminius įtempius, iširti optinių elementų (dengtų dangomis ar pasižyminčių stiklo mechaniniais defektais) atsparumą nuolatinės veikos spinduliuotei.

Nustatyta, jog, bandinį apšviečiant mažo diametro pluoštu, stebime gerokai stipresnę slenkstinio įtėkio priklausomybę nuo impulso trukmės, nei didelio pluošto atveju nagrinėjamų ekspozicijos trukmių ruože. Atlikus įtempių skaitinį modeliavimą lydyto kvarco atveju, nustatyta, kad gamybos metu susiformavę makroskopiniai defektai (tūriniai įtrūkimai), apšvietus juos lazeriu, veikia kaip mechaninių įtempių koncentracijos centrai, o jų forma bei pozicija erdvėje, spinduliuotės atžvilgiu, daro didelę įtaką medžiagos pažaidos slenksčiui. Darant prielaidą, kad apibendrintasis (von Mises) įtempis yra tinkamas kritinio įtempio kriterijus, nustatyta, kad, keičiant apšvietos impulso trukmę, gali dominuoti skirtingi pažaidos mechanizmai. Atlikus lydyto kvarco bandinio su auksine danga skaitmeninį modeliavimą, nustatyta, jog lydymosi taško pažaidos slenkstis priklauso nuo ekspozicijos trukmės net ir trumpų impulsų srityje.

Summary

NUMERICAL MODELLING OF CONTINUOUS WAVE LASER – INDUCED DAMAGE THRESHOLD IN LASER OPTICS

Emilija Žutautaitė

As continuous wave (CW) lasers are improved and used in a broader spectrum of applications there has arisen a need to assure their quality. The latest research regarding continuous wave laser induced damage threshold was done in 1998, with the assumption that the material is damaged irreversibly once it reaches melting point. On the other hand, research in short pulse lasers has shown that optical coatings and subsurface defects of the substrate glass also have a significant impact on the damage threshold, but this has not yet been confirmed for CW lasers.

The goal of this work is to estimate thermally induced stress and melting point, of coated or defected optical components, under CW irradiation, using numerical modelling software.

It was observed that using a smaller beam diameter displays a stronger threshold fluence dependence on irradiation duration (within tested variable limits), than in the case of a larger beam diameter. Numerical modelling of UVFS samples has shown that subsurface defects under irradiation act as stress raiser, in addition their shape and position have a significant impact on the damage threshold. Under the assumption that generalized (von Mises) stress is an adequate stress criterion, it was determined that different damage phenomena become the most prominent under different irradiation duration. Investigation of gold coated UVFS substrate has shown that melting point damage threshold depends on irradiation duration and decreases with it even at short pulse range.