

**OGLEKĻA DIOKSĪDA (CO₂) LĀZERA MARKĒŠANAS PROCESA
PARAMETRU IETEKME UZ POLIVINILHLORĪDA (PVC)
MATERIĀLU LĀZERMARKĒJUMA KVALITĀTI
CARBON DIOXIDE (CO₂) LASER MARKING PROCESS PARAMETER
IMPACT ON MARK QUALITY OF POLIVINYLCHLORIDE (PVC) MATERIAL**

Autori: **Jānis Riekstiņš, Artūrs Sivenkovs**, e-pasts: janis.riekstins@mail.md,
artur41k@inbox.lv

Zinātniskā darba vadītāji: **Ļubomirs Lazovs Dr.-Ing, Prof.**, e-pasts: Lyubomir.Lazov@rta.lv,
Pāvels Narica, Dr.phys. docents., e-pasts: Paveks.Narica@rta.lv
Rēzeknes Tehnoloģiju Akadēmija, Atbrīvošanas aleja 115, Rēzekne, Latvija

Abstract. *Laser technologies nowadays are widely used in material processing. CO₂ laser systems in most cases are used in metallic material manufacturing and processing, taking not so big part in processing of plastic materials. This research is dedicated to find advantages or disadvantages and ways to use CO₂ laser systems in plastic material processing, by taking PVC material as sample for experiments. PVC plastics is widely used in manufacturing of electrical installation details and devices, it is durable, relatively light, and cheap material. To provide application of various symbols, on the surface of plastic materials, can be used laser systems, which in long term can be more efficient than conventional marking methods.*

The aim of this work is to find if CO₂ laser is appropriate for marking PVC material and to relate the mark quality parameters and the marking process parameters. The research was conducted in the period of time from March 2017 till April 2017, in the Rēzekne Academy of Technology, Physical process and laser technology research center.

Keywords: CO₂, Laser marking, Power, Speed, PVC, Plastic, RTA

Ievads

Lāzers ir elektroniski optiska ierīce, kura izstaro koherentu starojumu. Termins "Lāzers" ir akronīms no angļu valodas, (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) ko latviešu valodā var tulkot kā "gaismas pastiprināšana, izmantojot inducēto starojumu". Tipisks lāzera starojums ir gaismas kūlis ar mazu izkliedi un ar monohromatisku viļņa garumu. [2]

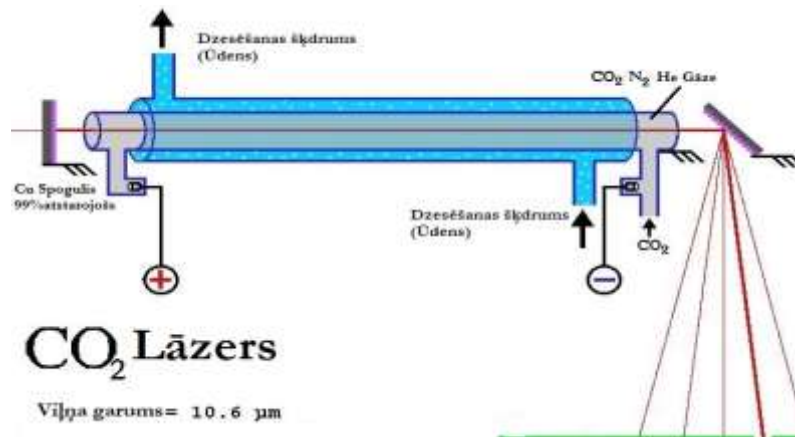
Līdz ar lāzertehnoloģiju attīstību palielinās arī to izmantošana dažādās tautsaimniecības nozarēs. Lāzers ir stabili ieņēmis vietu metālapstrādē, medicīnā un metroloģijā. Tomēr krietni mazāks ir lāzeru pielietojums plastmasu apstrādē.

Plastmasu attīstību, no to izgatavoto materiālu un detaļu klāsts nemitīgi pieaug. Dažādu grafisku simbolu uznešanai uz plastmasas materiāliem visbiežāk tiek izmantotas tradicionālās, krāsu marķēšanas sistēmas un gravieri. Šī darba mērķis ir izpētīt metālapstrādē plaši pielietoto CO₂ lāzera sistēmu pielietošanas iespējas plastmasu marķēšanā. Galvenie kritēriji pēc kā tiek vērtēta lāzera piemērotība konkrētā materiāla marķēšanā ir eksperimentā izmantotie lāzermarķēšanas parametri un iegūtā rezultāta kvalitāte uz pētāmā objekta. Šis pētījums ļauj identificēt CO₂ lāzeru sistēmas priekšrocības, trūkumus un veidus, kā to izmantot plastmasas materiālu apstrādē.

PVC plastmasas tiek plaši izmantota dažādu elektroinstalāciju detaļu un ierīču, kā arī dažādu plastmasas cauruļu, apdares materiālu, kredītkaršu u.c ražošana. PVC plastmasas materiāli ir izturīgi, salīdzinoši viegli un lēti. Lāzeru izmantošana grafiskas informācijas uznešanā uz plastmasas materiāliem un ilgtermiņā var būt efektīvāka, nekā konvencionālās (tradicionālās) marķēšanas metodes.

Šī darba mērķis ir noskaidrot vai CO₂ lāzers ir piemērots PVC materiālu marķēšanai izvērtējot marķēšanas rezultātus un saistību starp zīmju kvalitātes parametriem un marķēšanas procesa parametriem.

Oglekļa dioksīda (CO₂) lāzers un lāzermarķēšana



1.attēls CO₂ Lāzera stara ģenerēšanas principiālā shēma [9]

CO₂ jeb oglekļa dioksīda lāzers ir gāzes tipa lāzers. Tas nozīmē, ka elektroenerģija plūst cauri gāzi, lai iegūtu gaismas kvantu – fotonu emisiju. CO₂ lāzera uzbūve un darbības principa pamatā ir caurule, kas piepildīta ar gāzi, kurai ir puscaurlaidīgs spogulis vienā pusē, pilnībā atstarojošs vara spogulis otrā pusē, kas atstaro 99% no 10,6 (μm) viļņa garuma (skat. 1.att). Šāda sistēma nodrošina vairākkārtēju fotonu emisijas paātrināšanos.[6] Oglekļa dioksīda lāzeros izmanto gāzu maisījumu, kas parasti sastāv no oglekļa dioksīda (CO₂), slāpekļa (N₂), un hēlija (He) ar attiecību (1 : 1 : 3). Šī tipa lāzeri ir visplašāk izplatītie rūpnieciskie lāzeri, ko visbiežāk izmanto tērauda apstrādei. [4]

Lāzera stara izejā izmanto Zn Se lēcas jo tās neabsorbē infrasarkanā starojumu ar viļņa garumu 10,6 (μm) šādi tiek palielināta lāzera iekārtas lietderība un energoefektivitāte. Lāzera viļņa garums 10,6 (μm) kas ir infrasarkanais gaismas staru spektrs. Lietderīgās iedarbes koeficients 10 – 20%. [5]

Lāzers ir bīstams acīm un ādai. Pēc **EN 60825-1** šim lāzeriem ir visaugstākā 4. bīstamības klase [10]

Lāzera marķēšana nozīmē termisku iedarbošanos uz materiālu, kas sakarā ar ķīmiskām, molekulām izmaiņām materiālā izraisa pārogļošanu, putošanu, kušanu, ablāciju, krāsu maiņu un daudz ko citu.[3] Galvenās priekšrocības lāzera marķēšanas procesiem ir liels ātrums, augsta atkārtojamība, bez kontakta darbība, apstrādājama platība ir pielīdzināma ar lāzera izmēriem, automatizācija augsta un elastība. Turklāt ļauj izmantot īsus viļņa garumus, ko spēj labāk absorbēt daudz plašāks spektrs materiālu. tas ļauj. Tā kā, izmantojot īsākus impulsus, samazinās siltuma skartās zonas, tas paver jaunus ceļus apstrādāt materiālus ar maziem izmēriem līdz pat nanometriskai precizitātei. [4]

Pārāk liels marķēšanas ātrums, var izveidot zemas kvalitātes marķējumu, kas ir slikti redzams vai ātri izzūdīs. Tas pats var notikt, arī, ja tiek izmantota pārāk maza jauda. Pie lielas jaudas un maza ātruma, materiāls var tikt sabojāts, tajā var izkust caurumi. Virsma nebūs gluda, vai pat priekšmets zaudēs savu formu un izturību. [5]

Pētījuma objekts

Pētījuma objekts ir CO₂ lāzera sistēmas marķējuma kvalitāte uz Polivinilhlorīda (PVC) plastmasas materiāla, kas ir iegūta ar CO₂ lāzeri. Lai iegūtu labu marķējuma kvalitāti un noturību uz plastmasu virsmām, vienlaikus saglabājot marķējamā objekta formu, struktūru un virsmas gludumu, ir nepieciešams atrast piemērotākos lāzermarķēšanas procesa parametrus.

Izmantojot CO₂ lāzeru PVC plastmasu marķēšanā, ir svarīgi atrast optimālākos parametrus, lai tiktu saglabāta augsta marķēto simbolu kvalitāte un veiktspējas ātrums,

Vienlaikus saglabājot materiāla formu ar tām piemītošajām fizikālajām un ķīmiskajām īpašībām.

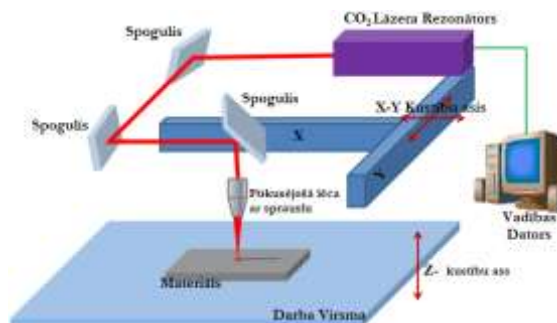
Materiāli un metodes

Veicot pētījumam nepieciešamos PVC marķēšanas eksperimentus, tika izmantota, balta 2 mm bieza (200 x 300 (mm)) polivinilhlorīda (PVC plastmasas) loksne.

Tīra polivinilhlorīda materiāla krāsa ir balta, gan sadzīvē gan rūpniecībā, visizplatītākie ir baltas krāsas PVC materiāli. [11]

Polivinilhlorīds ($C_2H_3Cl)_n$ - saīsinājumā PVC, ir trešais visizplatītākais un vairāk ražotais sintētiskais plastmasas polimērs.[1] Polivinilhlorīds ir termoplastisks plastmasas materiāls ar amorfu struktūru. Šis materiāls ir ļoti ciets un tam ir augsts elastības modulis. [12] Polivinilhlorīds ir ķīmiski izturīgs un tam ir izcila ugunsizturība (tas ir pašnodziestošs). Tā izmantošanas temperatūra ir $-10^{\circ}C$ līdz $+60^{\circ}C$. PVC pielieto

mašīnbūvē, ķīmijas rūpniecībā un elektrotehnikā – dažādu tvertņu izgatavošanai, pārsegi, skrāpji, u.c. detaļas [13]



2.attēls Eksperimenta principiālā shēma [9]

Pētījumā, lāzermarķēšanai uz PVC materiāla, tika oglekļa dioksīda gāzu lāzers (*Carbon Dioxide (CO₂) laser*) CHANXAN CW -1325 ar maksimālo jaudu 150 (W), nepārtraukta viļņa režīma, un viļņa garumu 10600 (nm). Lāzera stara iedarbības zonas diametrs 100 (μ m). Maksimālais apstrādes laukums 2500 (mm) x 1300 (mm). Dzesēšanas sistēma – ūdensdzese. Lāzera drošības klase -4.

Šis lāzera iekārta kā to paredz tās izgatavotājs galvenokārt ir paredzēta griešanai, gravēšanai un marķēšanai uz papīra, kartona, koka, stikla, auduma, stikla, gumijas, alumīnija un citu metālu materiāliem. [3]

Lāzera galvenās sastāvdaļas, ir vadības dators un elektriskais skapis, rezonators un fokusējošā lēca ar sprauslu kuras pārvietošanos un lāzera stara vadību pa apstrādājamo virsmu 3 dimensijās (X, Y, Z asīs), nodrošina atklāta tipa elektromehāniskā piedziņas sistēma, kas sastāv no 3 soļu motoriem ar siksnas pārvadu, kas piedzen siksnas pārvada skriemeļus, nodrošinot lāzeriekārtas CHANXAN CW-1325 kustīgo segmentu pārvietošanos pa taisnstūrprofila sliedēm (skat. 2.att.)

Vadības dators kalpo kā lietotāja-iekārtas interfeiss. Izmantojot datoru tiek izveidots marķējuma 2D modelis, tad šim modelim un atsevišķiem tā segmentiem tiek piešķirts noteikta jauda un ātrums, ar kādu tie tiks uzmarķēti uz materiāla.

Pētījuma lāzermarķēšanas eksperimenti uz PVC materiāla, tika veikti Rēzeknes Tehnoloģiju Akadēmijas, Inženieru fakultātes, Fizikālo procesu un lāzertechnoloģiju pētnieciskajā centrā esošo CO₂ lāzeri CHANXAN CW -1325. To laikā, tika mainīts lāzermarķēšanas ātrums un jauda. Vispirms lāzeriekārtas programmā, tika izveidota parametru matrica, kas paredz 5 mm rādiusa laukumiņu marķēšanu, minot marķēšanas ātrumu un jaudu.

Veicot plastmasu marķēšanu ar doto iekārtu, ir jāievēro visas drošības prasības un instrukcijas, darbā ar 4 klases lāzera iekārtu. Papildus ir jāņem vērā, ka apstrādājot organiskās

vielas, lāzera iedarbes procesā, var notikt to un atsevišķu to daļu kušana, degšana un iztvaikošana. Marķēšanas procesā no PVC materiāla izgarojošie dūmi un tvaiki var saturēt (HCl gāzes un $C_{12}H_4Cl_4O_2$, $C_2H_4Cl_2$, C_2H_3Cl daļiņas, kas var būt kaitīgas iekārtas, iekārtas operatora un apkārtējās vides veselībai. Tāpēc eksperimenta, laikā tika nodrošināta izgarojumu un dūmu atsūkšana no marķēšanas virsmas, tos izlaižot caur atbilstošiem oglekļa filtriem, lai nepieļautu iespējamu kaitīgu daļiņu nokļūšanu apkārtējā vidē. [7] Tā kā HCl gāze veicina metālu oksidāciju, un izmantojamajam lāzeram ir atklāta tipa mehāniskā piedziņa, lai novērstu piedziņas detaļu bojājumus, ir nepieciešams veikt gāzu nosūci un regulāru piedziņas elementu tīrīšanu un pretkorozijas apstrādi. [14]

Rezultāti un to izvērtējums

Eksperiments, tika veikta balta PVC materiāla lāzermarķēšana, mainot marķēšanas jaudu un ātrumu, attiecīgi 90, 100, 200, 300 (mm/s) Mainot jaudu mainās lāzera stara iedarbes intensitāte un uz marķējamo virsmu un rezultātā iedarbojošās enerģija. Mainot ātrumu, mainās laiks, ar kādu lāzera stars un tā enerģija iedarbojas uz marķējamo virsmu. Eksperimenta laikā iegūtos rezultātus var apskatīt 3. attēlā.



3.attēls Lāzermarķēšanas eksperimenta rezultāti uz PVC materiāla paraugiem

Veicot eksperimentu tika apstrādāti 5(mm) rādiusa PVC plastmasas materiāla virsmas laukumi, apstrādāti ar citu jaudu, intervālā no 8 – 12 (W) un ātrumu, intervālā no 90 – 300 (mm/s). Jauda kas pārsniedz 12 (W) izraisa materiāla iztvaikošanu, veidojot tajā robus.

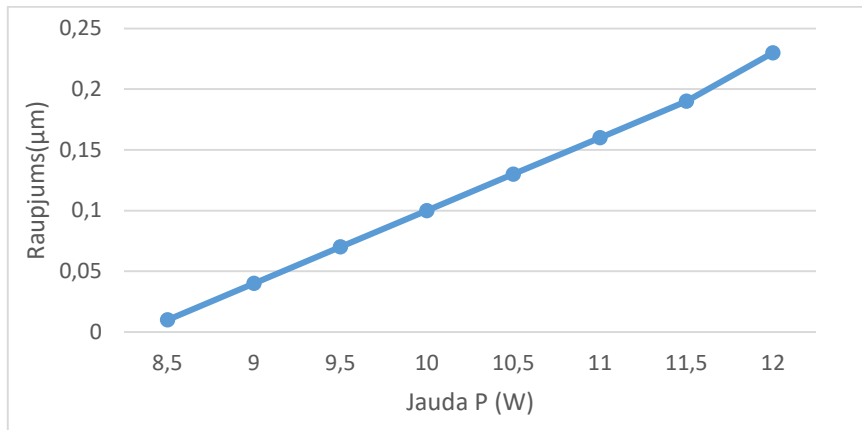
Lai noteiktu un novērtētu lāzera stara iedarbības rezultātu uz apstrādāto materiālu, ir nepieciešams novērtēt rezultāta īpašības un to apjomu. Viens no marķējuma kvalitāti raksturojošajiem lielumiem ir marķētās virsmas raupjums.

Raupjums, lāzera stara iedarbības vietas, laukumā, tika mērīts ar virsmas raupjuma mērītāju MarSurf PS1(Skat. 4.attēlu).



4.attēls Virsmas raupjuma mērīšanas ierīci MarSurf PS1

Raupjums tika izmērīts katram parauga matricas 5 (mm) rādiusa virsmas laukumam. Raupjuma vērtība mainās atkarībā no jaudas ar kādu lāzera stars iedarbojas uz virsmu un laika, cik ilgi lāzera stars iedarbojas uz virsmu. Iegūtie ar lāzeru apstrādātās virsmas raupjuma rezultāti atkarībā no jaudas izmaiņas, pie konstanta ātruma – 1600 (mm/s) un frekvences 200(kHz), ir parādīti grafikā (Skat 5. attēlu)

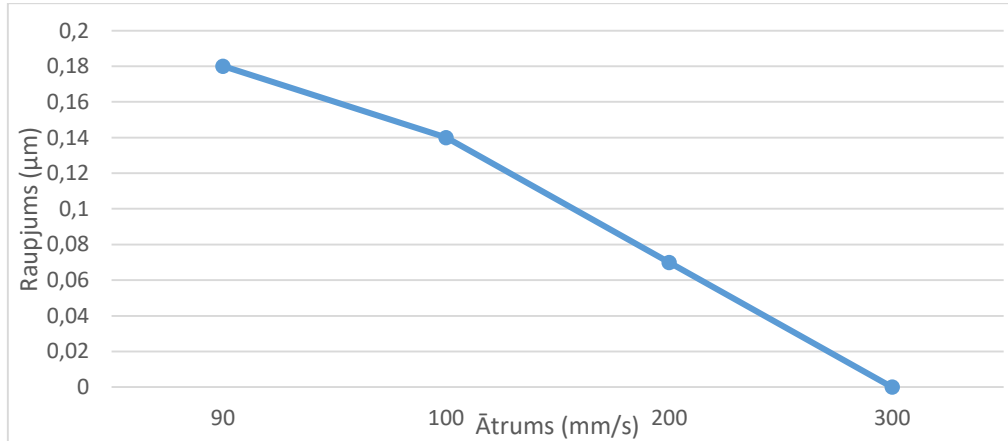


5.attēls Apstrādātās virsmas raupjuma izmaiņa atkarībā no lāzera jaudas

Grafikā ir redzams, ka pieaugot marķēšanas lāzera stara jaudai, vidējais virsmas raupjums palielinās. Tas ir notiek tādēļ, ka palielinot lāzera jaudu, pieaug uz materiālu iedarbojošās enerģijas daudzums, kas palielina materiāla kušanas un iztvaikošanas apjomu, kā rezultātā virsma kļūst nelīdzena. Kā ir redzams no eksperimentā iegūtajiem rezultātiem, zema marķēšanas jauda, neatstāj pietiekami labi saskatāmu un izmērāmu ietekmi uz materiālu. Turklāt liela jauda izraisa pārlietu lielu materiāla destrukciju un iztvaikošanu, padarot virsmu pārlietu raupju.

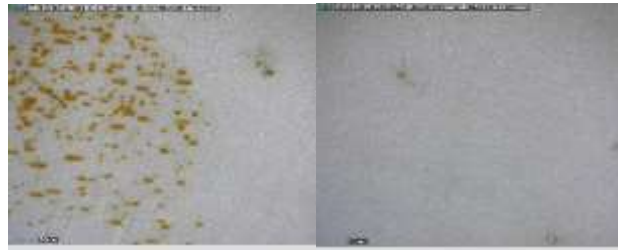
Ar lāzeru iegūtais marķējums, ir atkarīgs, ne tikai no lāzera jaudas, ar kādu tas bet arī no šis iedarbības laika - marķēšanas ātrumu (mm/s).

Ar CO₂ lāzeru iegūtie apstrādātās virsmas raupjuma rezultāti atkarībā no marķēšanas ātruma pie nemainīgas jaudas – 9 (W) ir parādīti grafikā (skat 6.attēlu).



6.attēls Apstrādātās virsmas raupjuma izmaiņa atkarībā no lāzermarķēšanas ātruma

Aplūkojot grafiku 7.attēlā ir redzams, ka pieaugot marķēšanas ātrumam, vidējā virsmas raupjuma vērtība samazinās. Pie maksimālā marķēšanas ātruma, tā ir tuva nullei (0.00(μm)). Tas nozīmē, ka marķēšana ar lielu ātrumu, neizraisa kušanas procesus, jo lāzera stars uz virsmu iedarbojas īsu laiku, kas nav pietiekams lai to sasildītu. Savukārt zems marķēšanas ātrums izraisa pārāk liela raupjuma rašanos un materiāla būtisku destrukciju, jo lāzera stars iedarbojas pārāk ilgu laiku, kas izraisa materiāla sabojāšanu.



7.attēls Nepietiekamas kvalitātes (nevienmērīgs) marķējums pie zemas jaudas un liela ātruma (8 (W) 300 (mm/s))

Attēlā ir redzams marķēšanas rezultāts PVC materiālu apstrādājot ar jaudu kas nepārsniedz 8 (W) un ātrumu 300 (mm/s). Marķējums 10x palielinājumā izskatās nevienmērīgs, vājā iedarbe ir lokāla, tas ir skaidrojams ar materiāla neviendabīgumu un nepietiekamo pievadītās lāzera jaudas blīvumu.



8.attēls Materiāla sabrukšana ko izraisa marķēšana pie jaudas kas pārsniedz 12 (W) un ātruma kas ir zemāks par 200 (mm/s)

Marķējums 10x palielinājumā, ir skaidri redzama materiālā izdedzināta bedre, tas ir skaidrojams ar pārāk lielu pievadītās lāzera jaudas blīvumu.



9.attēls Marķējuma rezultāts ar jaudu 9 (W) un ātrumu 200 (mm/s) (10x palielinājumā)

Attēlā redzams vienmērīgs labas kvalitātes marķējums ar zemu vidējo raupjumu 0.05 (μm). Marķējums ir ar zemu raupjumu un vienā līmenī ar materiāla virsmu, tas nozīmē ka tas neizceļas ne augstāks ne zemāk par materiāla virsmu. No tā var secināt, ka šis marķējums ir iegūts pie optimālākajiem marķēšanas parametriem ar CO_2 lāzeri, jo izmaiņas ir notikušas, tikai materiālā kristāliskajā režģī, ar nelielu molekulu pāroģošanas materiāla virsmas slānī. Iegūstot gaiši brūnu nokrāsu, kas pietiekoši abi kontrastē (izceļas) ar balto materiāla virsmas toni.

Secinājumi

Veicot polivinilhlorīda materiāla marķēšanu ar CO_2 lāzeri, marķēšanas procesa parametri - jauda un ātrums, ietekme uz iegūtā marķējuma un materiāla kvalitāti un izskatu.

1. Marķējot ar zemu jaudu – 8 (W) lāzera stars, neatstāj nekādu redzamu ietekmi uz PVC materiālu.

2. Ar jaudu sākot no 12 (W) un ātrumu zemāku par 100 (mm/s) notiek strauja materiāla kušana un intensīva vielas iztvaikošana, kā rezultātā materiāla virsmā tiek degradēta

3. Optimālie parametri balta polivinilhlorīda (PVC) detaļu lāzermarķēšana ar CO₂ lāzeri, ir jauda intervālā no 8,5(W) līdz 10 (W) un marķēšanas ātrums no 170(mm/s) līdz 210 (mm/s).
4. Veicot marķēšanas mēģinājums ar CO₂ lāzeri uz PVC materiāla, izdevās iegūt tikai vienveidīgu toņa krāsu marķējumu (no gaiši dzeltena līdz brūnam)
5. Marķējot ar jaudu kas pārsniedz 9 (W) marķēšanas process pāriet gravēšanā. Tas nozīmē, ka notiek materiāla iztvaikošana.
6. Nav vēlams pieļaut materiāla iztvaikošanu, jo PVC sadaloties iztvaiko dažādas bīstamas vielas – kā HCl un dažādi dioksīni, kas ir bīstami apkārtējai videi. Lai nesāktos materiāla iztvaikošana, apstrādes jauda nedrīkst pārsniegt 9 (W) un ātrums nedrīkst būt zemāks par 170 (mm/s).
7. Veicot PVC materiāla apstrādi ar lāzeru, ir obligāti jānodrošina gāzu atsūci no marķēšanas vietas un šo gāzu filtrēšana ar atbilstošiem oglekļa filtriem
8. Tā kā marķēšanas procesā no PVC materiāla var iztvaikot HCl gāze, kas negatīvi ietekmē metāla konstrukcijas un piedziņas elementus, nav ieticams lietot lāzeriekārtas ar atklātu (vaļēju) mehāniskās piedziņas sistēmu, vai arī tām jāveic regulāras papildus apkopes.

Pateicība

Izsaku pateicību par sniegto atbalstu un materiāliem šī pētnieciskā darba tapšanā: Rēzeknes Tehnoloģiju Akadēmijai. Rēzeknes Tehnoloģiju Akadēmijas, Inženieru Fakultātes, Fizikālo procesu un lāzertehnoloģiju pētnieciskajam centram.

Literatūra

1. A.Zicmanis, *Organiskā Ķīmija, Latvijas Universitāte*, 2007, Rīga, Latvija
2. E.Šilters, V.Reguts, A.Cābelis, I.Vilks *Fizika, 6.Nodaļa Gaismas kvanti, lāzeri*, Lielvārds 2008. Lielvārde (68.lpp)
3. M.Chen, Y.Chen , W.Hsiao, *Correction of field distortion of laser marking systems using surface compensation function*, National Changhua University of Education, 2008, Changhua, Taiwan (108.lpp)
4. Z. Jianxun, S. Xu, Z. Li *Investigation into plastic damage behavior of the CO₂ laser deep penetration welded joint for Ti-6Al-4V alloy*, Xian Jiaotong University, Xian, China (29.lpp)
5. A. Riveiro, F. Quintero, F. Lusquiños, *Experimental study on the CO₂ laser cutting of carbon fiber reinforced plastic composite*, Centro Universitario de la Defensa, Escuela Naval Militar, Plaza de España, Marín, Spain (38.lpp)
6. Y. Riekstinsh, *Carbon – dioxide laser, cutting process parameter impact on kerf quality of plywood materials*, Rēzekne Higher Education Institution, 2014, Rēzekne, Latvia
7. A.Igavens, J.Riekstiņš, A.Sivenks *Diožu iterbija (Yb) šķiedras lāzermarķēšanas procesa parametru ietekme uz polivinilhlorīda (PVC) materiālu lāzermarķējuma kvalitāti*.Rēzeknes Tehnoloģiju akadēmija, 2016, Rēzekne, Latvia
8. T.Matayoshi, Y.Kurosaki, *PENETRATION WELDING OF PLASTICS USING A TUNABLE CO₂ LASER WITH A TRANSPARENT HEAT SINK*, The University of Electro Communications, Chofu, Tokyo, Japan
9. CO₂ Lāzeru uzbūve. *Pieejams*:23.03.2017 <https://www.linkedin.com/pulse/brief-analysis-working-principles-categories-co2-laser-apple-he>
10. Lāzeru bīstamības klases. *Pieejams*:15.02.2017 <http://www.smartray.de/glossary/laser-protection-class/>
11. Industriālās plastmasas –PVC. *Pieejams*; 10.04.2017 <http://www.industriplasts.lv/materiali/materiali-rupniecibai/vispareja-pielietojuma-plastmasas/polivinilhlorids-pvc/>
12. Polivinilhlorīds. *Pieejams*:09.03.2017 <http://supplier.lv/lv/Products/engineering-plastics/Polyvinyl-chloride-pvc/>
13. Polivinilhlorīda tehniskie dati. *Pieejams*: 10.04.2016 http://www.industriplasts.lv/fileadmin/uploads/PVC/PVC_materiala_tehnisko_datu_lapa.pdf
14. Lāzermarķēšanas ietekme uz veselību. *Pieejams*: 12.01.2017 <https://electrocorpapurification.wordpress.com/2011/07/05/health-and-safety-concerns-laser-engraving-hazards/>
15. Lāzermarķēšanas ietekme uz vidi. *Pieejams*: 12.01.2017 https://www.vodex.co.uk/uploads/media_items/pdf-download-laser-advice-and-information.original.pdf