



ICES
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija

Program: Strojništvo

Modul: Orodjarstvo

UPORABA 3D LASERSKEGA SISTEMA V TEHNIKI GRAVIRANJA

Mentorica: dr. Marija Kisin
Lektorica: Milena Furek, prof. slov.

Kandidat: Matic Boh

Ljubljana, junij 2017

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici dr. Mariji Kisin za vloženo delo in sodelovanje pri pisanju diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi lektorici Mileni Furek, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično uredila.

Posebno zahvalo pa izrekam ženi Taji ter sinovoma Leonu in Julijanu za izjemno podporo pri študiju in pri izdelavi tega diplomskega dela.

IZJAVA

»Študent Matic Boh izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom dr. Marije Kisin.«

»Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.«

Dne 23. 6. 2017

Podpis: _____

POVZETEK

V sklopu diplomskega dela z naslovom »Uporaba 3D laserskega sistema v tehniki graviranja« obravnavamo tehnologijo, ki v Sloveniji študijsko še ni bila predstavljena. Dodana je podrobna predstavitev izdelave graviranih izdelkov, ki je bila razvita v podjetju 3ma, d. o. o. Osnovni problem ni le v tem, da postopek ni temeljito opisan, pač pa, da v literaturi manjka tudi podrobna analiza, kje tičijo konkurenčne prednosti postopka globinskega laserskega graviranja. Na celovit način predstavljamo osnovno terminologijo in tehnologijo preko predstavitve 3D laserskega sistema ter tehnike graviranja in posebnega postopka graviranja, ki oplemeniti željo stranke. V nadaljevanju predstavljamo glavne materiale, ki so uporabljeni pri graviranju, in orišemo praktične primere uporabe globinskega graviranja. Proti koncu bomo zaobjeli nadaljnji razvoj tehnike in nato delo smiselno zaključili. Glede na to, da je pisec besedila družinsko podjetje prevzel v vodenje 3 leta nazaj, menimo, da pozna tehnologijo do te mere, da jo lahko začne tudi teoretično predstavljati. Največjo dodano vrednost naloge vidimo v tem, da po našem vedenju v slovenščini tehnologija še ni predstavljena v okviru študijskih gradiv, prav tako pa še ni predstavljen celovit postopek graviranja. Dodatno bo besedilo prineslo k širjenju znanja na področjih uporabe globinskega laserskega graviranja, saj so takšna znanja v podjetjih močno skrita. Gradivo tako ponuja dober pregled še neraziskane tematike in rešuje problem preko uporabe relevantne terminologije in opisa procesov.

KLJUČNE BESEDE:

- globinsko lasersko graviranje,
- trdni laser,
- steklo,
- oblak točk,
- CNC laserski sistem.

ABSTRACT

In the thesis titled »Usage of 3D laser system in engraving technique« we would like to describe technology, which has still not been scholarly presented. That of course presents main problem of the thesis, which we would like to solve. We would like to implement basic terminology in Slovene language and present this particular technology of engraving completely through following chapters: Presentation of the problem, 3D laser engraving system and engraving technique. We would proceed with presentations of different major kinds of material, which are suitable for usage in in-depth engraving and presentations of practical applications of 3D laser engraving. Towards the end we will try to shape future development of technology and of course try to finish the thesis logically. Based on the fact that the writer of the thesis took over the family business more than 3 years ago we can conclude, that he knows the technology to the point he can present it theoretically. We see biggest added value of the thesis in the fact that this field of engineering is still not properly presented in Slovenian language. In addition to that, the scientific text will contribute to spreading knowledge in the industry of in-depth laser engraving, because the knowledge of the field is still heavily protected inside related companies. This study material therefore provides good overview of unexplored topic and solves the problem through implementing relevant terminology and description of the process.

KEYWORDS:

- sub surface laser engraving (SSLE)
- solid state laser (SSL)
- glass
- point cloud
- CNC laser system.

KAZALO

1	UVOD	1
1.1	Predstavitev problema	1
1.2	Cilji naloge	1
1.3	Predstavitev okolja	1
1.4	Predpostavke in omejitve	3
1.5	Metode dela	3
2	PREDSTAVITEV 3D LASERSKEGA SISTEMA IN TEHNIKE GRAVIRANJA	5
2.1	3D laserki sistem	5
2.1.1	Računalnik	6
2.1.2	Laserska glava	6
2.1.3	Optična glava	7
2.1.4	Optična leča	8
2.1.5	Laserski modul	8
2.1.6	Optični kabel	9
2.1.7	Motorizirane osi	9
2.1.8	Sistem stikal	11
2.1.9	Krmilje motoriziranih osi	12
2.1.10	Krmilje moči in dovoda laserskega sistema	13
2.1.11	Hladilna enota P302 Vitro	14
2.2	Tehnika graviranja	14
2.2.1	Zgodovina 3D laserskega graviranja	15
2.2.2	Diodno črpani laserji	15
2.2.3	Postopek graviranja 3D laserskega sistema	16
2.2.4	Dodajanje vrednosti k procesu	19
3	VRSTA MATERIALA ZA GRAVIRANJE	20
3.1	KRISTALNO steklo	20
3.2	steklo PMMA	22
3.3	medenina	23
4	APLIKACIJE 3D LASERSKEGA GRAVIRANJA	25
4.1	darilni program	25
4.2	industrijske aplikacije	27
4.3	NADALJNI razvoj	29
5	ZAKLJUČEK	30
	LITERATURA IN VIRI	32
	PRILOGA	34

KAZALO SLIK

Slika 1: Stroj Vitro DE Vitrolux C.....	2
Slika 2: Računalniška enota 3D laserskega sistema.....	6
Slika 3: Laserska glava 3D laserskega sistema.....	7
Slika 4: Optična glava 3D laserskega sistema	7
Slika 5: Optična leča 3D laserskega sistema	8
Slika 6: Laserski modul 3D laserskega sistema.....	9
Slika 7: Optični kabel 3D laserskega sistema	9
Slika 8: Motorizirane osi 3D laserskega sistema: X- in Y-os	10
Slika 9: Motorizirane osi 3D laserskega sistema: Z-os.....	11
Slika 10: Sistem stikal 3D laserskega sistema.....	12
Slika 11: Krmilje motoriziranih osi 3D laserskega sistema	13
Slika 12: Krmilje dovoda moči in laserskega sistema.....	13
Slika 13: Hladilna enota 3D laserskega sistema	14
Slika 14: Prikaz nastanka laserskega žarka	16
Slika 15: Predogled oblaka točk	17
Slika 16: Prikaz poteka žarka	18
Slika 17: Brezbarvno steklo	21
Slika 18: Primer kristalnega kvadra	22
Slika 19: Primer PMMA-stekla.....	23
Slika 20: Graviranje na medenino.....	24
Slika 21: 3D laserski sistem v uporabi	25
Slika 22: Primer gravure 3D-modela motorja.....	26
Slika 23: Izdelava 3D modela iz fotografije	27
Slika 24: Vrezane oblike v steklu	28
Slika 25: Primer uporabe SLE tehnologije	29

1 UVOD

1.1 PREDSTAVITEV PROBLEMA

V diplomskem delu z naslovom »Uporaba 3D laserskega sistema v tehniki graviranja« predstavljamo v Sloveniji študijsko še ne predstavljeno tehnologijo. Opisali bomo osnovno terminologijo in celovito predstavili tehnologijo. Glede na to, da je pisec besedila družinsko podjetje prevzel v vodenje 3 leta nazaj, menimo, da pozna tehnologijo do te mere, da jo lahko začne tudi teoretično predstavljati. Največjo dodano vrednost naloge vidimo v tem, da po našem opažanju v slovenščini tehnologija še ni predstavljena v okviru študijskih gradiv, prav tako pa ni podrobneje razdelan proces graviranja in podano, kje se skrivajo glavne konkurenčne prednosti. Temelj pisanja diplomskega dela je poleg teoretičnega in praktičnega znanja na področju globinskega laserskega graviranja oz. vitrografije tudi znanje, pridobljeno v okviru študija na višji šoli ICES pri predmetih tehnologija in materiali ter avtomatizacija in robotika. V nalogi je tehnologija razčlenjena in njeno delovanje dovolj jasno predstavljeno tudi laiku, da lahko razume osnove delovanja. Nadalje delo povezuje znanja, pridobljena na višji šoli, in praktična znanja iz podjetja 3ma, d. o. o. Prav tako naloga odpira vrata nadaljnjim raziskavam na področju globinskega laserskega graviranja.

1.2 CILJI NALOGE

Cilj diplomskega dela je podati celovit pregled tehnologije globinskega laserskega graviranja v slovenščini in predstaviti prepletanje različnih znanj na področju tehnologije in materialov, ki so sploh omogočila nastanek globinskega laserskega graviranja. Poleg končnega cilja opravljene diplomske naloge je pomembno omeniti še željo, da bodo bralcu po branju diplomskega dela jasne vsaj osnove te zelo zanimive in redke tehnologije.

1.3 PREDSTAVITEV OKOLJA

Korenine podjetja 3ma, d. o. o., segajo v leto 2006, ko je podjetje še pod okriljem matičnega podjetja BTS company, d. o. o., uvozilo najkvalitetnejši stroj za lasersko graviranje, ki se ga je takrat dalo kupiti. Stroj je model Vitrolux C, znamke Vitro Laser GmbH, nemškega proizvajalca. Za boljšo predstavbo ga prikazujemo na sliki 1.



Slika 1: Stroj Vitro DE Vitrolux C
(Lastni vir)

Podjetje je bilo prvo, ki je v Slovenijo uvozilo stroj za globinsko 3D lasersko graviranje nemškega proizvajalca, ki je tudi vodilni razvijalec te tehnike v svetu. Podjetje se je zavezalo za izvajanje globinskega laserskega graviranja pod franšizo podjetja Looxis GmbH, podružnice Vitra Laser GmbH. Z razpoznavno blagovno znamko Looxis oranžne barve je podjetje začelo svojo pot pod tekočimi stopnicami v Koloseju, v BTC City v Ljubljani. Tam je podjetje ugodilo željam tisočih strank, poslovanje pa je tako napredovalo, da se je leta 2010 odločilo preseliti v nove prostore pri McDonaldsu, prav tako v Koloseju. Zaradi vse slabšega poslovnega vzdušja se je kasneje podjetje iz Koloseja za kratek čas preselilo v center Ledina v središču Ljubljane. Tudi v letih 2010–2013 je podjetje še vedno poslovalo pod okriljem blagovne znamke Looxis. V letu 2013 pa se je korenito prestrukturiralo in se osredotočilo na potrebe strank in ustanovilo blagovno znamko 3malook. To je bila povsem nova blagovna znamka, ustvarjena za še boljše poslovanje s strankami, tako pravnimi kot fizičnimi osebami.

Podjetje ima v svojem asortimentu (spletna stran podjetja 3ma, d. o. o., 2017) preko 50 različnih kristalnih artiklov, kamor gravira poljubne gravure po izboru in oblikovanju svojih strank. Je mikro podjetje, kjer ena oseba opravlja vse vrste dela. Podjetje bo za izdelavo diplomskega dela ponudilo svoj laserski stroj v pregled in natančen popis.

1.4 PREDPOSTAVKE IN OMEJITVE

Predpostavke in omejitve pojasnjujemo točkovno:

- Glavni problem je, da tehnologija podpovršinskega graviranja v steklo oz. akrilno (v nadaljevanju PMMA) steklo v Sloveniji še ni raziskana. Pojavljajo se vprašanja: Kakšni stroji se uporabljajo pri podpovršinskem graviranju? Kolikšna je uporabna vrednost takšnega stroja? Na kakšen način deluje? Kakšni so uporabljeni materiali? Kako se stroj krmili in kakšna je uporabljena programska oprema? Kako so tehnologijo razvili in zakaj? Na vsa takšna in podobna vprašanja poskuša odgovoriti pisec v okviru naloge. Če ponovimo, je glavni problem ta, da širša javnost verjetno o tehnologiji niti slišala ni. Naša naloga je, da znanje o tehnologiji širimo in dodajamo vrednost, ki ga znanje predstavlja v naši družbi.
- Predpostavka dela oz. izhodišče dela je, da je uporaba 3D laserskega sistema v tehniki graviranja v Sloveniji še popolnoma neraziskano področje, ki bi ga takšno delo poskušalo uokviriti in nastaviti osnovno terminologijo. Možno je, da bo tehnologija v prihodnosti še bolj uveljavljena in bodo takšne osnove dobrodošle.
- Glavna omejitev dela je neobstoječa slovenska terminologija (npr. *Vitrography* je angleški izraz za podpovršinsko graviranje, ki ga v slovenščini nimamo) in morebitni nesporazumi, ki lahko izhajajo iz tega. Pod črto bo morda naloga odpirala še več vprašanj, kot jih bo odgovorila, saj je znanje o tehnologiji zelo težko dostopno. Ščiti jo namreč mnogo patentov, ki se skrivajo pod nemško terminologijo, ki nam po večini ni poznana in jo je zato zelo težko najti. V nalogi je predstavljen le eden izmed strojev, ki morda ni najbolj reprezentativen, saj je to stroj višjega cenovnega razreda, katerega zasnova se počasi ukinja. Spregledati ne smemo tudi, da so zaradi piščevega delovanja v industriji lahko določena znanja izkrivljena in nimajo teoretične, pač pa bolj praktično osnovo.

1.5 METODE DELA

Uporabljene metode dela so naslednje:

V delu se bodo uporabljale tako primarne kot tudi sekundarne metode raziskovanja.

Med primarne metode lahko štejemo direktno korespondenco s proizvajalcem sistemov (Vitro Laser GmbH iz Nemčije – je tudi eno izmed najstarejših podjetij na svetu, ki posluje na tem trgu), pa tudi raziskovanje stroja v samem podjetju ter izdelava različnih slik, ki bodo v delu potrebne za boljšo predstavo tehnologije. Med pomembne sekundarne metode raziskovanja štejemo uporabo različnih predhodnih raziskav (Bossman, 2007), priročnik za uporabo stroja in servisna navodila za stroj Vitro DE Vitrolux C (2005) ter priročnik za operaterje hladilne enote P302 (2005).

Znotraj dela se bodo uporabljale naslednje metode: opisna, primerjalna, metoda združevanja, analitična, sintetična in induktivna metoda.

- V Sloveniji žal ni pomembnih predhodnih raziskav o podpovršinskem graviranju, obstajajo pa raziskave predvsem v okviru Fraunhofer inštituta iz Nemčije (2016), ki predstavlja gonilo znanja o tej tehnologiji na evropskih tleh. V Evropi takšne stroje izdelujejo le v Nemčiji, medtem ko je velika večina drugih proizvajalcev na Kitajskem.

2 PREDSTAVITEV 3D LASERSKEGA SISTEMA IN TEHNIKE GRAVIRANJA

2.1 3D LASERKI SISTEM

Raziskavo začnemo z dejanskim opisom 3D laserskega sistema, ki je še danes v uporabi v podjetju 3ma, d. o. o., in ga lahko vidimo na sliki 1. Laserski sistem je nemške izdelave, narejen je bil leta 2006 v podjetju Vitro Laser GmbH in je imel nabavno ceno več kot 120.000 €. Glede na specifikacije iz priloge 1 lahko ugotovimo naslednje osnovne karakteristike stroja:

- osnovne merske karakteristike: 1200 x 1800 x 1050 milimetrov (v nadaljevanju mm), teža 380 kilogramov (v nadaljevanju kg). Glede na varnostno klasifikacijo razred I. Ima tudi dve dinamični galvanski zrcali, zmogljiv računalnik in 15-inčni delovni zaslon;
- laser: polprevodniški laser s kristalnim aktivnim medijem ND:YVO₄, vodno hlajen, z valovno dolžino 532 nanometrov (v nadaljevanju nm);
- optika: telecentrične leče premera 100 mm;
- programska oprema: stroj krmili programska oprema VitroNC¹, ki je nameščena na osnovni računalnik, ta pa je povezan preko CAN-busa² s krmilnikom laserskega sistema;
- delovna napetost: 230V/50Hz;
- največja vhodna velikost materiala: 500 x 300 x 75 mm ali 500 x 210 x 100 mm (X, Y, Z-koordinate);
- največja velikost graviranja: 448 x 298 x 95 mm (X, Y, Z-koordinate);
- celotna poraba električne energije je okoli 1 kW na uro.

Za namene diplomskega dela smo razčlenili 3D laserski sistem podrobneje na osnovne komponente, ki skrbijo za brezhibno delovanje laserskega sistema (Priročnik za operaterje stroja Vitro DE Vitrolux C, 2005). Lahko jih delimo na naslednje komponente;

- računalnik,
- laserska glava,
- optična glava,
- optična leča,
- laserski modul,
- optični kabel.
- motorizirane osi,

¹ Vitro NC je programska oprema podjetja Vitro Laser GmbH, ki numerično krmili krmilje moči in dovoda laserskega sistema.

² CAN bus je vmesnik, preko katerega teče numerično upravljanje.

- sistem stikal,
- krmilje motoriziranih osi,
- krmilje dovoda moči in laserskega sistema,
- hladilna enota P302 Vitro.

2.1.1 Računalnik

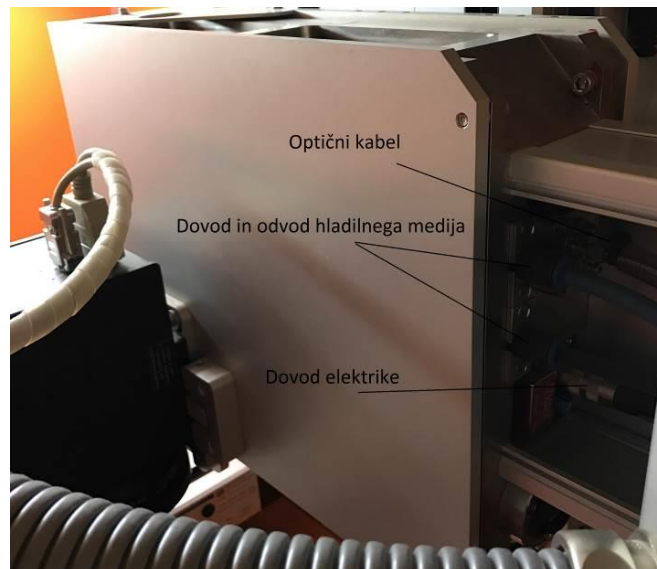
Računalnik (slika 2) je v večini sestavljen iz klasičnih komponent, kot so domači računalniki. Ima matično ploščo, napajalnik, pomnilnik, osrednjo procesorsko enoto, trdi disk in grafično kartico višjega cenovnega razreda. To je pomembno zato, ker so prikazi 3D modelov včasih zelo zahtevni in zahtevajo veliko procesorske moči. Posebni modul skrbi za povezavo računalnika s krmilnikom dovoda moči in laserja ter krmilnikom motoriziranih osi. S svojimi ukazi namreč skrbi za sinhrono premikanje galvanskih zrcal v optični glavi in fokusne optike ter določa moč laserskega žarka in položaj obdelovanca preko krmiljenja mize in optične glave.



Slika 2: Računalniška enota 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.2 Laserska glava

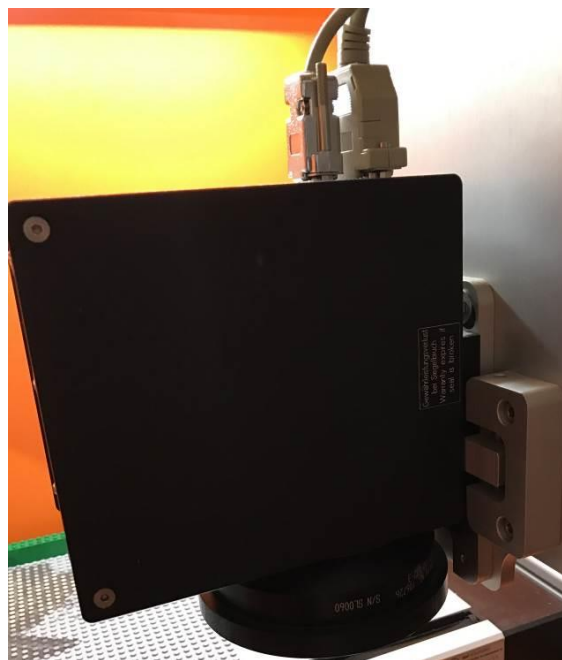
V laserski glavi (slika 3, na strani 7) se nahaja kristal ND:YVO₄, iz katerega emitira laserski žarek ob prehodu v vzbunjeno stanje. Žarek, ki kristal vzburi, je tako imenovani pulzni žarek, ki nastaja v laserskem modulu. Zeleni žarek z valovno dolžino 532 nm izhaja iz laserske glave in se uporabi za samo gravuro preko dveh galvaniziranih zrcal.



Slika 3: Laserska glava 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.3 Optična glava

Optična glava (angl. *scan head*) se uporablja za usmerjanje žarka na natančno določeno pozicijo po X- in Y-osi. Prikazana je na sliki 4. Za premik po Z-osi skrbijo motorizirane osi in do neke mere galvanizirana zrcala. Sestavljena je iz galvaniziranih zrcal in F-theta leče.



Slika 4: Optična glava 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.4 Optična leča

Uporabljena leča je F-theta leča, ki skrbi za fokusiranje laserskega žarka na določeni razdalji od leče (pribl. 15 cm). Ščiti jo zaščitno steklo. Leča je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Optična leča 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.5 Laserski modul

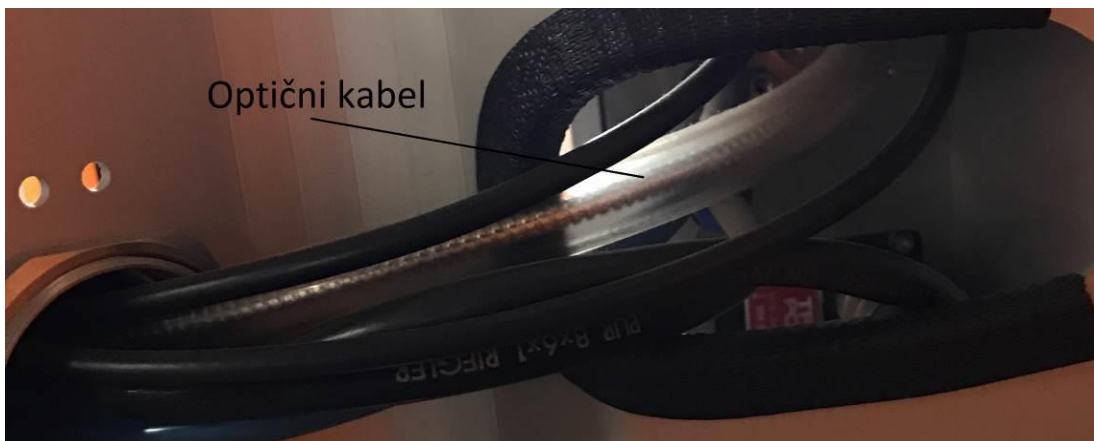
Laserski modul (slika 6, na strani 9) skrbi za izvor optičnega žarka. Modul ima priključke za dva električna dovoda, za dovod in odvod hladilnega medija. Oddaja pa žarek, ki se preko optičnega vodnika prenaša do laserske glave. Žarek emitira iz diod, ki se napajajo iz krmilja dovoda moči in laserja. Laserski modul podjetja 3ma, d. o. o., je utrpel škodo, saj so počila tesnila. Delovanje ni okrnjeno, sistem pa pušča pribl. 1 deciliter hladilnega medija na teden.



Slika 6: Laserski modul 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.6 Optični kabel

Optični kabel (slika 7) skrbi za prenos pulzne infrardeče svetlobe od laserskega modula (kjer nastane) do laserske glave.



Slika 7: Optični kabel 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.7 Motorizirane osi

Motorizirane osi (sliki 8 in 9, na strani 10 in 11) so povezane s krmiljem. Na nosilnih dveh oseh, ki skrbita za premikanje po X in Y osi, stoji gravirna miza, na kateri stoji obdelovanec ali več njih. Na sliki 8 so posebej označene osi, katerih oznake se

ponavljajo tudi v programih in podprogramih CNC-krmilnika. Na nosilcu vertikalne osi oziroma Z-osi se nahajata laserska in optična glava ter seveda optična leča. Motorizirane osi s svojim premikanjem v sodelovanju z galvanskimi zrcali skrbijo za nastanek same gravure. Vertikalne in horizontalne komponente se pomikajo po vijčnih vodilih. Končne pozicije določajo kolesna končna stikala.



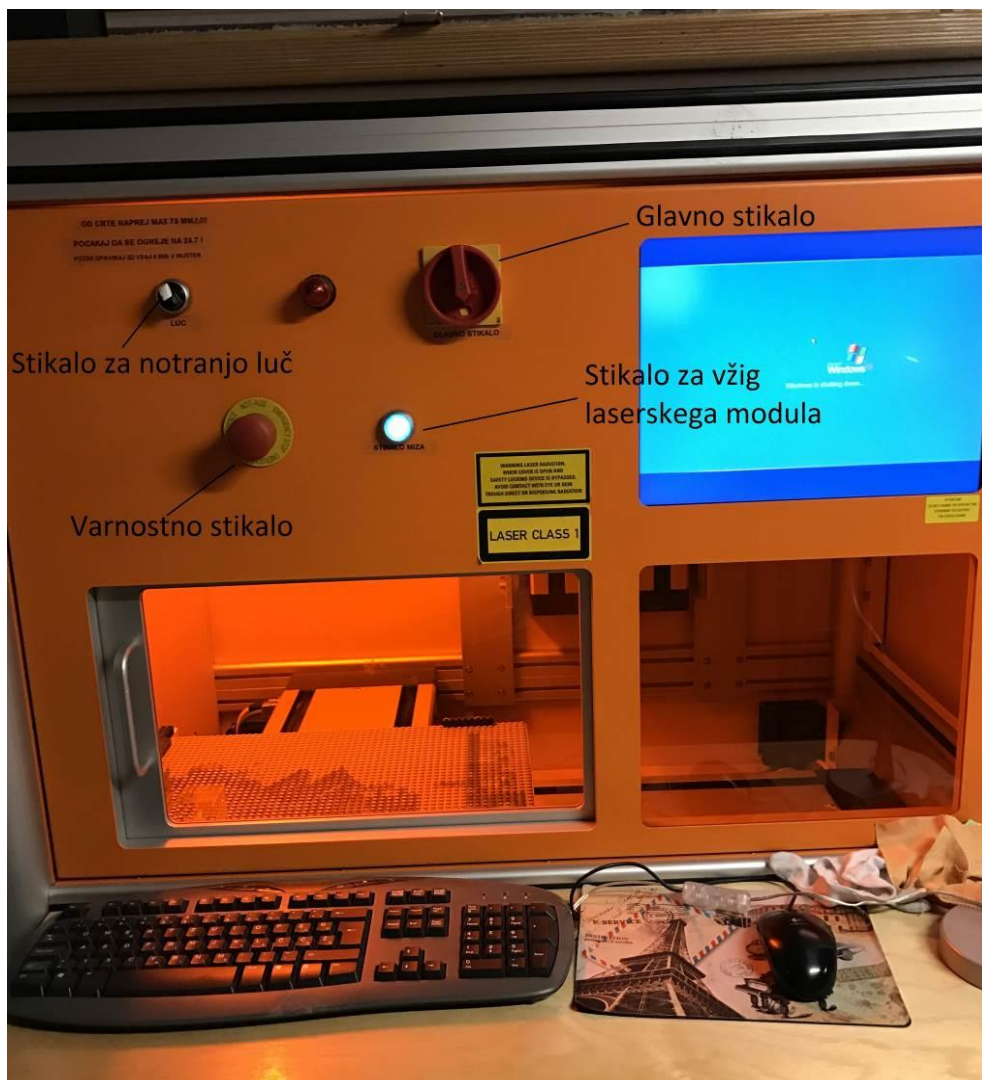
Slika 8: Motorizirane osi 3D laserskega sistema: X- in Y-os
(Lastni vir)



Slika 9: Motorizirane osi 3D laserskega sistema: Z-os
(Lastni vir)

2.1.8 Sistem stikal

Sistem stikal (slika 10, na strani 12) je sestavljen iz glavnega stikala, stikala za vžig laserskega modula, stikala za prižiganje luči znotraj stroja in varnostnega stikala. Varnostno stikalo mora po varnostnih standardih delovati na pritisk, saj je to najhitrejši način za zaustavitev stroja.



Slika 10: Sistem stikal 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.9 Krmilje motoriziranih osi

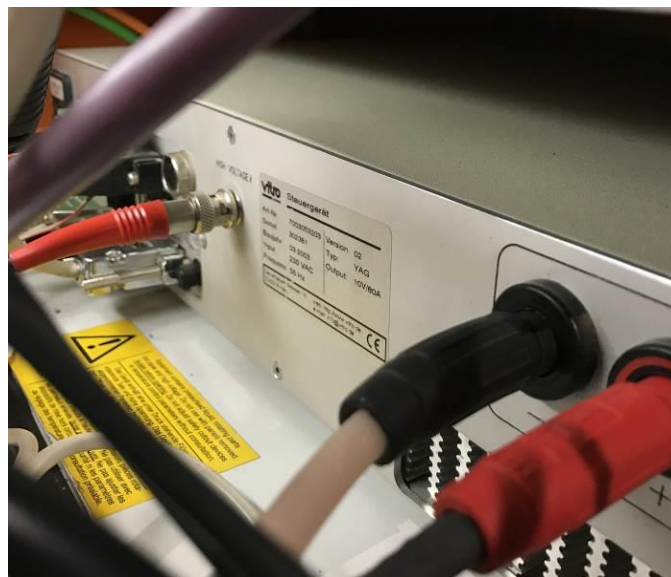
Krmilje motoriziranih osi (slika 11, na strani 13) dovaja moč in določa pozicijo delovne mize in laserskega sestava. Pozicijo določi preko odmerjenega časa vklopa motorja, ki pomika komponente po vodilih. Pred začetkom uporabe je treba določiti začetno točko nalaganja obdelovanca in začetno točko gravurne pozicije.



Slika 11: Krmilje motoriziranih osi 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.10 Krmilje moči in dovoda laserskega sistema

Deluje na principu pretvornika električne energije, saj njegovi transformatorji pretvorijo električni tok iz omrežja v pulzno energijo, ki jo uporablja laserski modul za emitiranje svetlobe iz diod. Krmilnik določa tako moč kot dolžino pulza in je zelo močno hlajena komponenta, ki se rada pregreva. Na sliki 12 lahko vidimo različne razvode v notranjosti sistema, med katerimi sta najpomembnejša dovoda za električne pulze do laserskega modula (na sliki + in -) in krmiljenje galvanskih zrcal (na sliki rdeč kabel).



Slika 12: Krmilje dovoda moči in laserskega sistema
(Lastni vir)

2.1.11 Hladilna enota P302 Vitro

Hladilna enota P302 Vitro (slika 13) skrbi za hlajenje naslednjih komponent:

- laserske glave;
- laserskega modula;
- krmilja dovoda moči in laserja.

Hladilni medij, deionizirana voda, v sistemu se čisti preko dveh filtrov: lovilca ionov in filtra trdih delcev (Priročnik za operaterje Vitro DE, 2005).

Hladilna enota zmore ohlajati 2 litra hladilnega medija v minuti na na desetinko natančno določeno temperaturo. Pritisk v sistemu je 3,5 bara, njegova moč je okoli 200 W. Krmili se ga preko nadzorne plošče in ima mnogo senzorjev (prenizka, previsoka temperatura, prenizek tlak v sistemu, obstrukcija itd.).



Slika 13: Hladilna enota 3D laserskega sistema
(Lastni vir)

2.2 TEHNIKA GRAVIRANJA

V tem podpoglavju želimo podrobneje opisati samo tehniko in proces graviranja, najprej preko razlage kratke zgodovine globinskega laserskega graviranja, nadaljujemo s splošnim opisom delovanja diodno črpanih laserjev, ki deluje na principu trdnega aktivnega medija (kristala), kakršen se uporablja tudi v opisanem sistemu. Podpoglavje zaključimo s celovito razlago postopka oziroma graviranja na samem stroju in prikazu medsebojnega delovanja zgoraj naštetih komponent. Postopek graviranja je glavna konkurenčna prednost, po kateri se razlikujejo

ponudniki. Pisec besedila je razvil poseben postopek, preko katerega lahko stranka sooblikuje svoj izdelek in je tako še bolj vpletena v proces izdelave.

2.2.1 Zgodovina 3D laserskega graviranja

O zgodovini takšne vrste graviranja lahko na žalost govorimo le na kratko. Glede na znana dejstva so za zgodnji razvoj graviranja v globino transparentnega materiala odgovorni Rusi v začetku sedemdesetih let prejšnjega stoletja (Glassinnengravur, 2016). To dodatno potrjujejo tudi pogovori z direktorjem največjega evropskega izdelovalca 3D laserskih sistemov (vpogled Vitro Laser GmbH). Točni razlog za razvoj zaradi takratne zaprtosti Sovjetske zveze ni znan, kot tudi ni spletne dokumentacije o tem. Znano je le, da so bili prvi stroji zelo veliki in počasni, saj so gravirali s hitrostjo 1 Hz (1 točka na sekundo), pri čemer so v naslednjih letih razvoja nekje na koncu osemdesetih let gravirali s hitrostjo 30 Hz. Kasneje so v tehnologijo začeli močno vlagati Nemci (3D-Volumenstrukturierung, 2016) na Fraunhofer inštitutu za optične in laserske znanosti. V sredini devetdesetih let so razvili že dovolj hiter laser (1 kHz), da se je tehnologija lahko začela uporabljati v industrijski proizvodnji. Eden izmed nekdanjih zaposlenih na tem vodilnem inštitutu je bil tudi gospod Renault, ki je leta 1997 ustanovil svoje podjetje in investiral v to tehnologijo. Podjetje Vitro Laser GmbH je zelo pomembno zato, ker so od takrat naprej stalno premikali meje globinske laserske tehnologije. Za primerjavo: danes stroji dosegajo že hitrosti graviranja 5.000 točk na sekundo.

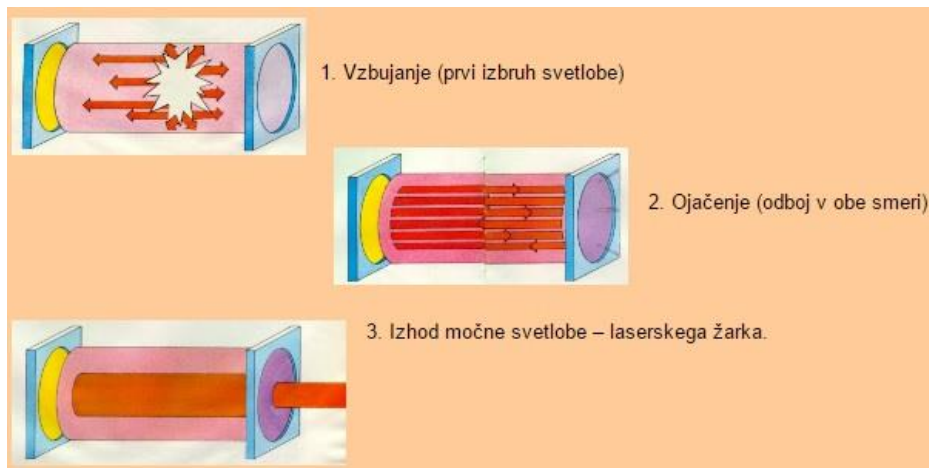
2.2.2 Diodno črpani laserji

V 3D laserskih sistemih se uporabljajo izključno diodno črpani laserji s trdnim aktivnim medijem. Ta medij je kristal, in sicer lahko je Nd:YAG (angl. *yttrium-aluminium-garnet*), rubin, ali pa Nd:YVO₄ (angl. *yttrium-orthovanadate*) kot v primeru opisanega sistema. V kristalih so črpani neodijevi ioni (Čuš, 2009).

Če malce poenostavimo, nastane žarek v laserskem sistemu Vitrolux C tako, da laserski modul (slika 6, na strani 9) s pomočjo diod, ki sevajo IR-svetlobo optično vzburi oz. črpa kristal. Infrardeča svetloba se prenaša preko optičnega kabla (slika 7, na strani 9) do kristala Nd:YVO₄, ki se nahaja v laserski glavi (slika 3, na strani 7). Sistemi, ki delujejo na tak način, so precej redki. Navadno so diode neposredno poleg aktivnega medija (Vrste laserjev 2015), vendar sta v primeru stroja Vitrolux C ti dve komponenti najverjetneje ločeni zaradi teže, ki je Z-os ne bi prenesla. Za črpanje kristala se uporablja infrardeči GaAlAs (galij-aluminij-arsenid) diodni laser.

Ko infrardeča svetloba zadene (Bossman, 2007) ob kristal Nd:YVO₄, se sproščajo fotoni, ki nosijo energijo, potrebno za lokalno zatalitev v notranjosti transparentnega materiala. Fotoni se kot pri ostalih laserskih sistemih zaradi zrcalne konstrukcije najprej vzburi (premikajo v vse smeri), nato se ojačajo (preidejo v sinhrono fazo),

nato pa emitirajo čez izhodno zrcalo (slika 14).



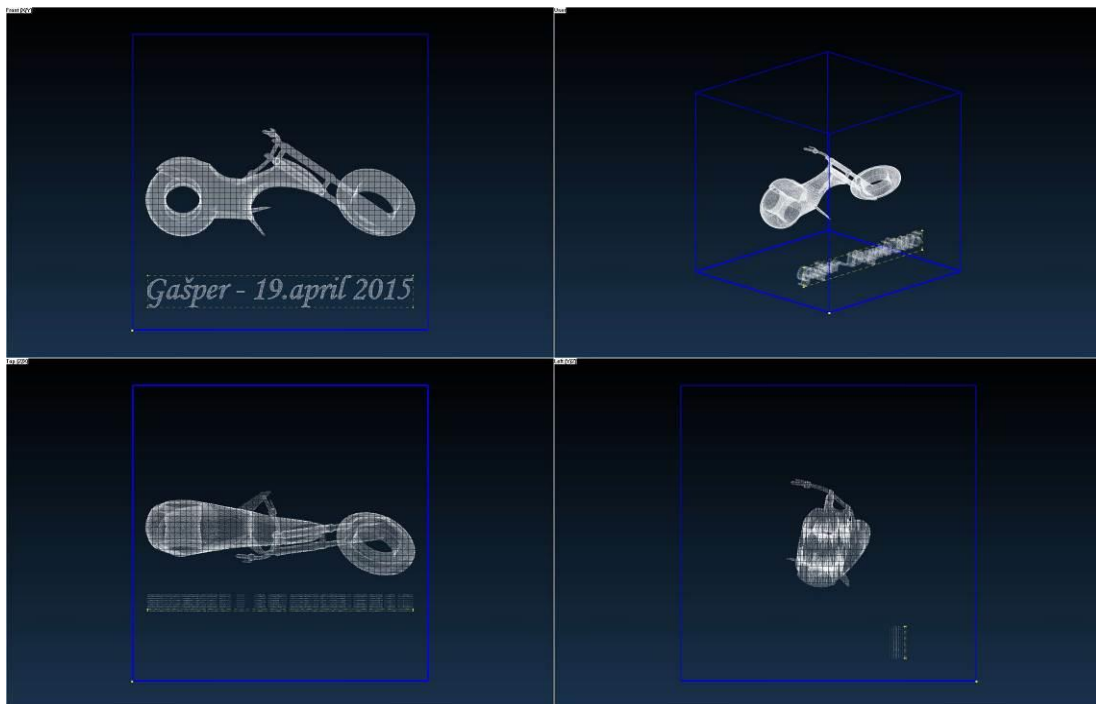
Slika 14: Prikaz nastanka laserskega žarka
(Četković, 1999)

Na tej točki velja opozoriti, da je sam nastanek laserskega žarka precej zapleten elektrokemični ter mehanski proces, namenjen bolj podrobni raziskavi. V sklopu tega dela je predstavljen poenostavljen tekstovni opis delovanja, ki pa zadošča namenu razumevanja delovanja 3D laserskega sistema.

2.2.3 Postopek graviranja 3D laserskega sistema

Postopek graviranja se še vedno pojmuje kot varovana skrivnost za večino podjetij v industriji po svetu. Deli se na računalniško programiranje in fizično graviranje obdelovanca.

Cilj računalniškega programiranja je končna izdelava oblaka točk, ki predstavlja 3D model. Vsaka točka v oblaku točk ima znotraj z merami določenega obdelovanca svojo geometrijsko koordinato, zapisano v milimetrih, npr. 15,465 mm X smer. Zapis pomeni, da je točno ta točka znotraj modela oddaljena od izhodišča koordinatnega sistema (to je spodnji levi rob obdelovanca oziroma delovne mize) v X smeri 15,465 mm. Vsaka točka ima zapisano koordinato v vseh treh oseh (X, Y in Z). Tako je geometrija točke v prostoru na mizi točno določena. Več 100.000 takšnih točk pa skupaj ustvarja oblak točk (angl. *pointcloud*), ki v praksi pomeni 3D-model oz. objekt. Primer 3D-oblaka točk je razviden na sliki 15, na naslednji strani.

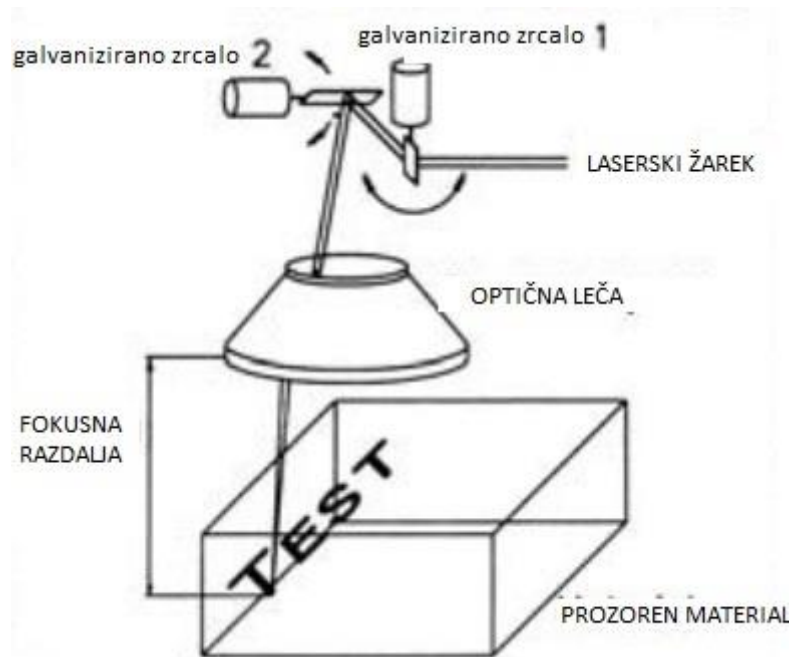


Slika 15: Predogled oblaka točk
(Lastni vir)

Zanimivo je, da je laserskemu stroju dejansko vseeno, kakšen obdelovanec je v stroju, saj v osnovi »strelja« točke tam, kjer mu krmilnik naroči. Zato je nujno večkratno preverjanje oblike obdelovanca in pravilen prikaz območja graviranja na samem prikazovalniku graviranja.

Ko je 3D-model v obliki zapisa oblaka točk narejen, se ta datoteka uvozi na strojni računalnik. Na tem računalniku lahko preko numeričnega krmiljenja ukažemo stroju začetek graviranja. Graviranje bomo prikazali koračno:

1. ob sproženju ukaza za začetek graviranja krmilniško vezje iz računalnika (slika 2, na strani 6) pošlje signal za premik mize in laserskega sestava preko krmiljenja motoriziranih osi (slika 11, na strani 13) do motoriziranih osi z začetnega položaja na položaj za začetek graviranja (slika 8 in 9, na straneh 10 in 11);
2. krmilniško vezje prav tako ukaže krmilniku laserja (slika 12, na strani 13), naj emitira infrardečo svetlobo preko optičnega kabla (slika 7, na strani 9) v obliki pulzov do laserske glave (slika 3, na strani 7), kjer ob črpanju Nd:YVO₄ kristala emitira zelena svetloba z valovno dolžino 532 nm;
3. svetloba se v optični glavi (slika 4, na strani 7) usmerja z galvanskimi zrcali na tisočinko milimetra natančno po X- in Y-osi. To delovanje podrobno prikazuje slika 16 na naslednji strani;



Slika 16: Prikaz poteka žarka
(Downloads, 2016)

4. svetlobni žarek je treba fokusirati na točno določeno točko, kar po usmeritvi opravi optična leča F-theta (slika 5, na strani 8). Fokusna točka je določena s parametri stekla, je konstantna in zagotavlja visoko temperaturo v središču te točke;
5. točke svetlobnega pulza v središču zadenejo molekule transparentnega materiala (npr. stekla) in jih lokalno spremenijo v plazmo. V steklu je ta točka velika le 100 mikronov oz. 0,1 mm (<http://glassprocessing.eu/applications-sub-surface-glass-engraving.htm>);
6. točno med novim pulzom svetlobe galvanska zrcala znotraj optične glave po ukazu krmilnika laserja usmerijo (lahko rečemo, kar »ustrelijo«) nov žarek svetlobe na novo ukazano točko. Ta nova točka je oddaljena od prvotne točke v steklu le 0,06 mm v X- in Y-smeri ter 0,1 mm v Z-smeri. Razlog za neenakomerno razporeditev točk tiči v asimetrični obliki točke v steklu, ki omogoča gostejšo naselitev točk v ravnini XY;
7. ko stroj v eni ravnini zgravira vse ukazane točke, se preko motorizirane Z-osi laserski sestav premakne višje za pribl. 0,1 mm in omogoči graviranje v novi ravnini;
8. ko so vgravirane vse točke modela, računalniški krmilnik odklopi dovod moči laserja in ukaže premik gravirne mize na začetni položaj za izmet obdelovanca.

Sistem vseskozi hladi hladilna enota P302 Vitro (slika 13, na strani 14) na optimalnih

24,7 °C.

Na zgoraj predstavljen in analiziran postopek so bili ustvarjeni vsi izdelki na slikah 19, 20, 21, 23 in 24.

2.2.4 Dodajanje vrednosti k procesu

Pisec besedila je skozi leta delovanja v podjetju 3ma, d. o. o., ugotovil, da največjo težavo strankam predstavlja manko zmožnosti predstavitve globinsko graviranega izdelka. Ker je postopek 3D-oblikovanja kar napreden, si velika večina ljudi ne zna predstavljati, kako bo globinsko graviran izdelek na koncu izgledal. V sodelovanju s proizvajalcem strojev in po predlogu pisca besedila se je v programu Vitro NC GUI dodala funkcija predogledov (angl. *screenshot*) (slika 15, na strani 17). Predlagani proces obdelave stranke je bil naslednji, ob čemer izpostavljam ključnega, ki ga je dodal pisec besedila:

1. Prvi kontakt, povpraševanje stranke.
2. Predstavitev graviranja in izdelkov.
3. Oddaja naročila skupaj s splošnimi napotki za pripravo 3D-sestava.
4. Sprejem naročila in priprava prvega 3D-predogleda.
5. *Pošiljanje 3D-predogleda preko elektronske pošte in opis stanja.*
6. *Sprejem poljubnih predlogov in popravek 3D-sestava in ponovno pošiljanj.*
7. *Korak 6 ponavljamo do dosega zadovoljstva stranke s 3D-sestavom.*
8. Izdelava, graviranje po opisani metodi iz podpoglavja 2.2.5.
9. Predaja izdelka stranki.

Trenutno je v Sloveniji podjetje 3ma, d. o. o., še vedno edino, ki ponuja popolnoma pregledne 3D-predoglede. Predogledi podjetja zajemajo kadre iz treh glavnih smeri: od spredaj, od strani in od zgoraj, prav tako pa omogoča izdelavo ene perspektive, ki jo določi operater stroja. Velika večina strank, ki se vrača po nove izdelke, hvali to posebnost, saj omogoča strankam urejanje svojega personaliziranega izdelka na daljavo. Podjetje pa je s tem zavarovano do vseh mogočih zahtevkov zaradi neizpolnjevanja zahtev kupca.

Na zelo preprost način je pisec besedila razrešil dve težavi naenkrat: odpravil je skrbi tako podjetja kot stranke in oplemenitil sam proces graviranja tudi za druge stranke proizvajalca Vitro Laser GmbH. Prav tukaj tiči glavna dodana vrednost in prispevek pisca besedila k proizvodnji prozornih izdelkov s to tehniko graviranja.

3 VRSTA MATERIALA ZA GRAVIRANJE

Za globinsko lasersko graviranje se uporablja več vrst transparentnega materiala. Ker je osnovni namen globinskega graviranja vidna podpovršinska sprememba strukture, mora biti material prozoren, razen seveda v primeru medenine. Najpogosteje uporabljeni materiali so naslednji:

- kristalno steklo (90 % aplikacij);
- PMMA-steklo (8 % aplikacij);
- medenina (2 % aplikacij).

3.1 KRISTALNO STEKLO

Uporablja se več vrst stekla, ki se med seboj razlikujejo po kemični sestavi. Pri poimenovanju velikokrat pride do zmede, saj se mnogokrat kar vsem vrstam reče kristalno steklo, čeprav nobeno izmed njih v resnici ni po kemični strukturi kristal.

Kristalno steklo (tako svinčevo steklo kot borosilikatno steklo) je neobarvano steklo, kar je dobrodošlo zaradi sivkasto srebrnega odtenka graviranih točk v materialu. Če se gravira v klasično steklo zelenkastega odtenka, se gravura vidi precej slabše.

Kristalno svinčevo steklo vsebuje do 54–65 % kremenčevega peska (SiO_2), 18–38 % svinčenega oksida (PbO), 10–15 % kalijevega oksida (K_2O), do 2 % natrijevega oksida, do 1,5 % cinkovega oksida (ZnO) in do 0,5 % aluminijevega oksida. Svinčevo steklo ima zaradi prisotnosti svinčevih oksidov nekoliko večji lomni količnik in nižjo viskoznost. Zaradi velikega lomnega količnika ima svetleč videz, čeprav po kemijski strukturi ni kristal. Je lahko obdelovalen material.

Kristalno borosilikatno steklo pa po drugi strani vsebuje 70–80 % SiO_2 , 7–13 % borovega oksida (B_2O_3), do 10 % natrijevega oksida in do 2 % aluminijevega oksida Al_2O_3 .

Ker tudi borosilikatno steklo močno lomi svetlobo, je cenjeno kot okrasno steklo in mu trgovci tudi pravijo kristalno steklo. Je težko taljivo, saj ima zelo nizek temperaturni razteznostni koeficient (npr. Pyrex $3,25 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Uporabljajo ga kot optično steklo, "kristalno steklo", npr. za vaze, sklede in kozarce, obarvanega pa za imitacijo dragih kamnov. Zaradi absorpcije močnih energijskih žarkov ga uporabljajo tudi kot zaščitno steklo pred žarčenjem (Kobentar, b.d.).

Nekaj pomembnih lastnosti najbolj znanega Schott BK7 borosilikatnega stekla (BK-7 Optical Glass, 2016):

- je brezbarvno;
- prepušča 92 % svetlobe pri debelini 2 mm;

- popolna odpornost na škodljive učinke UV-svetlobe in vremenske vplive;
- gostota materiala je 2.230 kg/m^3 ;
- natezna trdnost je 40 N/mm^2 ;
- površinska trdota je 580 kg/m^2 , po Vikersu $550 \pm 30 \text{ HV}$;
- energijsko zahtevna termična obdelava;
- dobra odpornost na kemikalije.

Kemična sestava za Schott BK7 boroisilikatno steklo je naslednja: 70 % SiO_2 , 11,5 % B_2O_3 , 9 % natrijevega oksid, 7,5 % K_2O , 1 % barijevega oksida in titanijevi oksidi ter kalcijevi oksidi v sledovih.

Najbolj uporabljeno steklo pri podpovršinskem graviranju je steklo K9, ki je kitajsko optično borosilikatno steklo. Ima zelo malo notranjih napetosti in mehurčkov. Uporablja se za proizvodnjo leč in prizm in ima odlično sposobnost poliranja, podobno kot svinčeno steklo. Pozitivno je tudi, da tehta 15 % manj kot klasično svinčeno kristalno steklo. Patentirani ekvivalent je precej dražje Schott BK7 steklo, ki pa ima podobne lastnosti. Torej, za graviranje se po večini uporablja kitajsko borosilikatno steklo K9, saj je cenovna razlika med produktoma približno 300 %.

Ima relativno nizek indeks odbojnosti (1,52) in ponuja nizko razpršenost svetlobe (Abbovo število okoli 60). Izdelano je iz silikatov z vsebnostjo približno 10 % borijevih oksidov. Takšna kemična sestava omogoča, da je steklo na videz popolnoma brezbarvno, kar prikazuje slika 17.



Slika 17: Brezbarvno steklo
(Pilkington OptiWhite overview, 2015)

Proizvodnja kristalnega stekla za namen 3D laserskega graviranja poteka tako, da se najprej v pečeh pripravijo veliki bloki stekla, ki merijo približno $200 \times 100 \times 10 \text{ cm}$,

te pa naprej razrežejo z vodno hlajenimi krožnimi žagami na manjše kose. Kosi se naprej obdelujejo – režejo, brusijo in polirajo v naslednje oblike:

- kvadri,
- kocke,
- piramide,
- prizme,
- plošče.

Različnih oblik, ki jih podjetje 3ma, d. o. o., ponuja, je več kot 100, največja serijska velikost izdelka pa je 300 x 200 x 100 mm in tehta približno 30 kg. Primer velikega kristalnega kvadra, narejenega iz kitajskega stekla K9, prikazujemo na sliki 18.



Slika 18: Primer kristalnega kvadra
(Lastni vir)

3.2 STEKLO PMMA

Akrilno steklo se uporablja v mnogo manjši meri predvsem iz dveh razlogov. Prvi razlog je, da ima akrilno steklo precej manjšo specifično gostoto od kristalnega stekla in je zato lažje. Stranke dojemajo lažje izdelke za manj žlahtne in tudi manj vredne. Drugi razlog pa je sama gravura, ki je v akrilnem steklu precej manj razločna in svilnata. Zato se za aplikacije akrilnega stekla odločajo bolj poslovni uporabniki v avto industriji, saj je takšno steklo mnogo bolj odporno proti udarcem.

Akrilno steklo (Polymethyl methacrylate (PMMA), 2015) ima kemijsko sestavo $C_5H_8O_2$ in je imenovano tudi PMMA oz. poli metil meta krilat. Material je bil prvič izdelan leta 1930, na njegovi podlagi pa je bil leta 1933 patentiran material »pleksi«

steklo (angl. *plexiglass*), ki ga danes uporabljajo za izredno vzdržljive zunanje panele v gradbeništvu, v letalski industriji in avtomobilski industriji.

Nekaj pomembnih lastnosti (Polymethyl methacrylate (PMMA), 2015):

- je transparentno;
- prepušča 92 % svetlobe pri debelini 2 mm;
- odlična odpornost na UV-svetlobo in vremenske vplive;
- površinska trdota je 20 kg/m² po Vickersu;
- natezna trdnost je 75 N/mm²;
- gostota materiala je 1.200 kg/m³;
- zelo lahka termična obdelava;
- dobra odpornost na kemikalije.

Podjetje 3ma, d. o. o., v svojem prodajnem programu nima PMMA-stekla, lahko pa ga za svoje stranke naroči. V PMMA-steklo so gravirali že kar nekaj kosov in postopek izdelave se praktično ne razlikuje od običajnega ali kristalnega stekla. Kot vidite na sliki 19, je sama gravura drugačnega, bolj robatega videza kot v borosilikatnem steklu s slike 19. Točka je večja, saj je PMMA precej manj odporno na temperaturo kot borosilikatno steklo. PMMA ima tališče pri 160 stopinjah Celzija, borosilikatno steklo pa pri 820 stopinjah Celzija. To pomeni, da temperatura, ki izhaja v sami goriščni točki laserja, prodre precej dlje in bolj spremeni strukturo v materialu PMMA kot v borosilikatnem steklu.



Slika 19: Primer PMMA-stekla
(Lastni vir)

3.3 MEDENINA

Kovine so zadnji in najmanj uporabljen material za globinsko graviranje v 3D laserskem sistemu. Razlog za to je preprost. Glede na nabavno vrednost stroja in tehnologijo, uporabljeno v njem, graviranje na površino kovine ni dobičkonosno. Stroji za graviranje mehkejših kovin (npr. aluminijeve zlitine) so precej cenejši in omogočajo graviranje pod različnimi koti. Stroji za graviranje jekel pa so po drugi

strani precej večji in zmogljivejši, da je takšna tehnologija ekonomsko upravičena. Do danes edina uporabljena aplikacija tehnologije je bilo graviranje na medenino (slika 20), saj s svojo valovno dolžino stroj spremeni strukturo večine kovin tako, da se sveti v srebrnem odtenku. To je seveda neprimerno za vse vrste jekel, aluminija, srebra itd.



Slika 20: Graviranje na medenino
(Lastni vir)

Osnovni postopek graviranja je enak, s to razliko, da se v programu Vitro NC izbere površinsko graviranje (angl. *surface engraving*), ki po nastavitvi goriščne razdalje na samo površino onemogoči premikanje Z-osi, tako da gravira le v eni ploskvi.

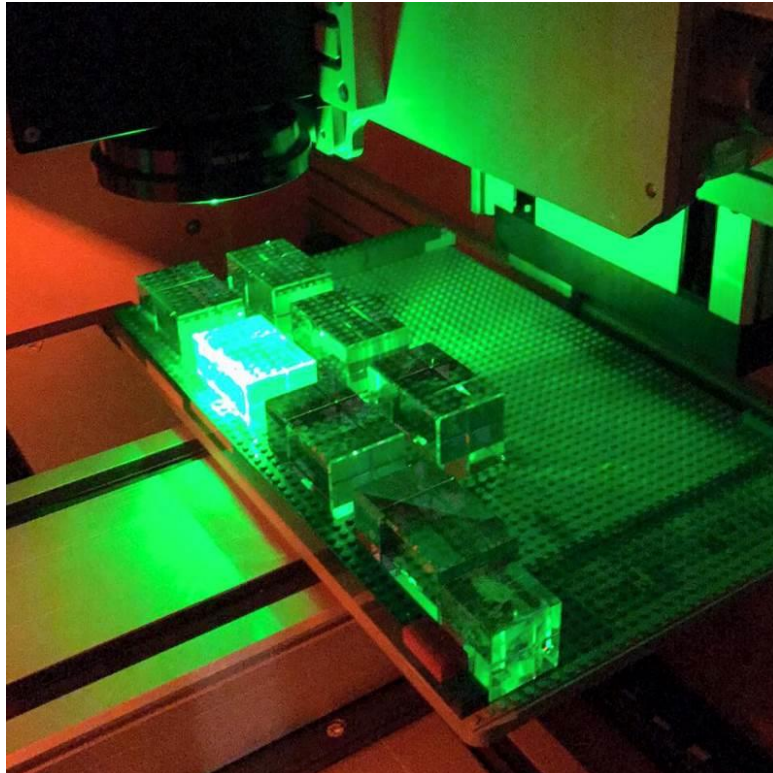
Medenina (<https://www.thebalance.com/metal-profile-brass-2340129>) je zlitina bakra in cinka.

Nekaj lastnosti, ki so pomembne predvsem za nastavitve pravilne amperaže in gostote točk graviranja:

- tališče ima okoli 900 stopinj Celzija in pada z naraščanjem deleža cinka;
- gostota je pribl. 8.400 kg/m³;
- modul prožnosti ima med 78.000 in 123.000 N/mm²;
- natezno trdnost ima od 310 do 460 N/mm².

4 APLIKACIJE 3D LASERSKEGA GRAVIRANJA

3D lasersko graviranje se uporablja za personalizacijo daril, ima pa tudi nemalo industrijskih aplikacij. V tem poglavju bomo predstavili oba zanimiva pola, tako uporabnega kot manj uporabnega in pozornost namenili nadaljnjemu razvoju tehnologije. Med samo izvedbo globinskega graviranja sveti stroj v zanimivi zeleni svetlobi, kar lahko vidimo na sliki 21.



*Slika 21: 3D laserski sistem v uporabi
(Lastni vir)*

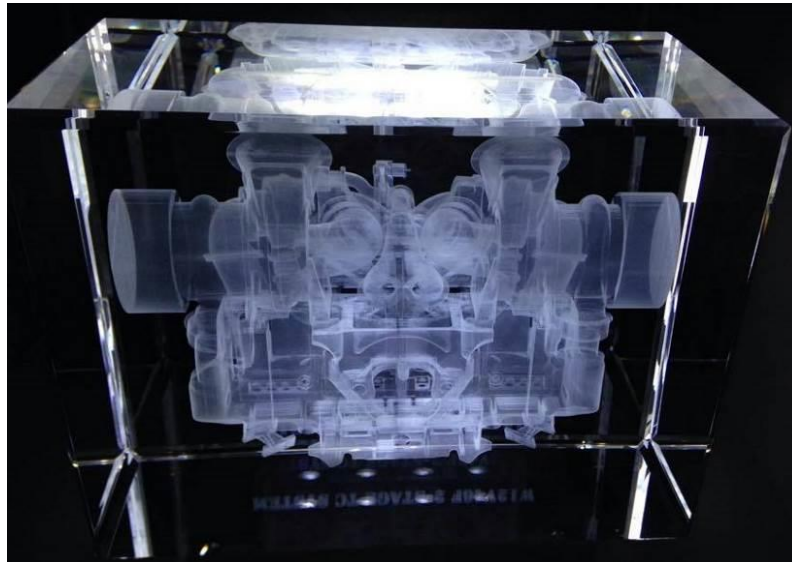
4.1 DARILNI PROGRAM

Darilni program predstavlja manj praktični pol uporabe sistema 3D laserskega graviranja, zaobsega graviranje vseh možnih 2D- in 3D-oblik v kristalno steklo in je namenjeno podaritvi tretji osebi ob posebnih priložnostih. Najbolj uporabljeni izdelki so težki med 500 in 1.500 g (3malook, 2016):

- kvadri,
- kocke,
- kocke z odrezanim robom,
- obeski za ključe,
- pokali,

- plošče.

Stranke, tako pravne kot fizične osebe, lahko svojo gravuro v poljubnem izdelku vidijo na posebnem 3D-predogledu, ki smo ga videli že na sliki 16. V osnovi ločimo dve obliki gravure, 2D-gravuro, ki obsega klasične, poširjene tekste in fotografije, ter 3D-gravuro, pod katero spada graviranje 3D-modelov (slika 22), in posebna pretvorba fotografije v 180-stopinjski 3D-model.



*Slika 22: Primer gravure 3D-modela motorja
(Lastni vir)*

2D–3D-pretvorba je zanimiva, ker lahko programerji osebo iz fotografije pretvorijo v 3D na podlagi tisočih obraznih modelov brez teksture, ki jih imajo shranjene v sistemu. V programu nato oblikovalci prilepijo sliko čez 3D model obraza in telesa ter ga ustrezno korigirajo. Projekt je bil za oblikovalno podjetje iz Nemčije izjemno obsežen, zato ga že leta tržijo po izjemno visokih cenah, do 20 € na predelavo osebe. Primer, kako poljudno poteka pretvarjanje iz slike v 3D, lahko vidite na sliki 23.



Slika 23: Izdelava 3D modela iz fotografije
(Lastni vir)

Pri globinskem graviranju se kar precej srečujemo z različnimi napakami. Napake lahko razvrstimo v dve skupini. Lahko so napake v materialu oziroma napake v samem steklu, ali pa napake pri nastavitvah parametrov graviranja. Napake v materialu se lahko kažejo v tem, da steklo zaradi zaostalih napetosti in neustreznega ohlajanja stekla ob proizvodnji tudi ob predpisanih parametrih lokalno počni. Druga skrajnost, še pogostejša, je, da stroj lokalno zaradi kontaminacij stekla ne more zgravirati točke v notranjosti stekla. Proizvajalec stekla v tem primeru pove, da so se lokalno zgostile določene skupine oksidov, ki zaradi odbojev svetlobe ali pa višje talilne odpornosti ne dovoljujejo žarku, da bi steklo lokalno zatalilo. Pri nastavitvah parametrov graviranja je treba paziti predvsem na dve stvari. Pri programiranju se mora nastaviti razmik med samimi točkami v XY-ravnini na vsaj 0,05 mm narazen, saj se drugače točke »zlijejo« skupaj in se naredi ena velika razpoka. Dodatno je treba paziti še na nastavitve amperaže. Nastavitve amperaže se spreminjajo glede na tip gravure. Tekst oz. 2D-model se lahko gravira pri višjih amperažah (npr. 40 A), medtem ko se 3D-model gravira pri nižji (37 A), ker so točke v Z-ravnini gosteje nasejane, točka pa ima nesimetrično zvezdasto obliko z repom v globino Z-osi in obstaja zopet nevarnost »zlitja« točk. Razmika po Z-osi operater ne določa.

4.2 INDUSTRIJSKE APLIKACIJE

Ker je 3D lasersko graviranje zelo točna in ponovljiva tehnologija, je seveda svoje mesto našla tudi v industrijskih aplikacijah.

Uporablja se v pretežni meri za označevanje izdelkov, saj je takšno gravuro izjemno težko ponarediti. 3D laserski sistem smo že opazili v proizvodni liniji izdelovalca

kozarcev iz Nemčije, kjer so posebne roke dvignile kozarce in s 3D laserskim sistemom pod določenim kotom zgravirale logotip podjetja. Takšna gravura seveda ostane enaka celotno življenjsko dobo izdelka. Sistem se med drugim uporablja tudi v avtomobilski industriji za označevanje stekel z žigom avtentičnosti (<http://www.vitro.de/neu/industrial/industrie.html>).

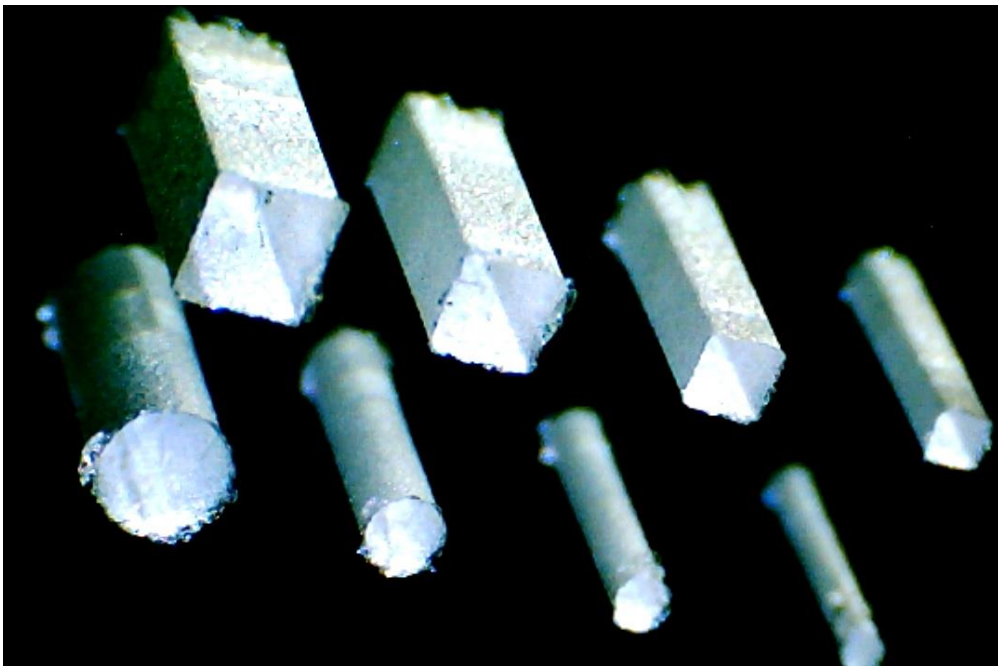
Do nedavnega hitrega razvoja 3D-tiskanja se je tehnologija uporabljala tudi za hitro prototipiranje v arhitekturi. Tudi podjetje 3ma, d. o. o., je pred izvedbo projekta Hotel Plaza izdelalo hitri osnutek hotela v polnem 3D za namen predstavitve stranki. Takrat so bili namreč 3D tiskani prototipi še zelo dragi.

Danes se glede na dostopnost in razširjeno uporabo pa tudi bolj oprijemljivega končnega izdelka na področju izdelave prototipov tehnika globinskega graviranja že umika 3D-tiskalnikom.

Fraunhofer inštitut, oddelek za volumensko strukturiranje, med drugim razvija še številne druge aspekte podpovršinskega graviranja:

- mikro vrtanje;
- graviranje podatkovnih matrik;
- natančno rezanje stekla, tanjšega od 0,25 mm;
- medicinska uporaba v smislu sprememb mikrostruktur določenim tkivom.

Nekaj vrezanih oblik v steklu kaže slika 24.

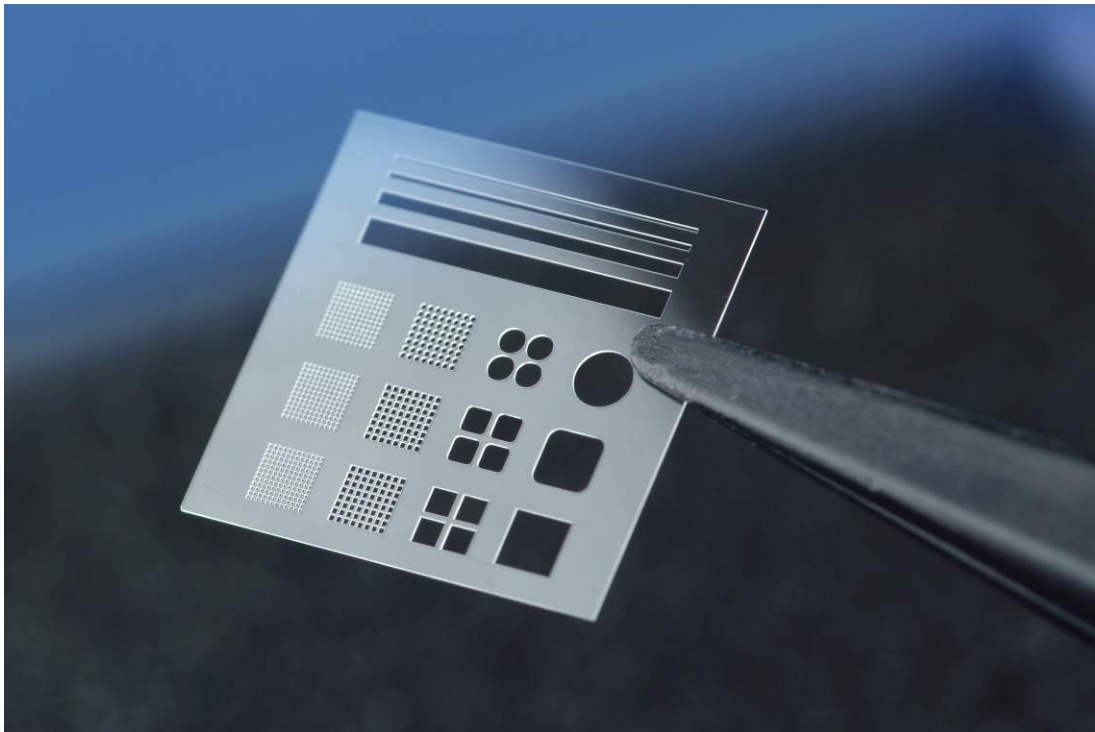


*Slika 24: Vrezane oblike v steklu
(Industrial applications, 2015)*

4.3 NADALJNI RAZVOJ

Danes se tehnologija razvija v smeri razumevanja in vpeljave industrijske uporabe mikro vrtanja in natančnega rezanja tankega stekla.

Projekt, ki ga vodi Fraunhofer inštitut v Nemčiji (Kalupka in Nippgen, 2016), je zelo zahteven in bo trajal vsaj do leta 2019. Današnja oznaka tehnologije je SLE (angl. *selective laser etching*) oziroma selektivno lasersko jedkanje in kaže zelo dobro uporabo v elektro industriji. Ob uporabi 3D laserskega graviranja so namreč opazili, da je steklo, ki je bilo lasersko obdelano s tehnologijo globinskega graviranja, več kot tisočkrat dovezetnejše za jedkanje. Težava vrtanja stekla je, da je površina stekla lokalno poškodovana, saj se pojavijo frakture po obodu luknje. Sedaj pa bo možno vrtati luknje in seveda različne oblike čez tanko steklo najprej z uporabo laserske radiacije območja gravure, nato pa še jedkanje. Prvi prototipi strojev so že prejeli kar nekaj nagrad za odličen razvoj tehnologije. Primer izdelka, ki je bil narejen s takšno tehnologijo, je razviden na sliki 25.



Slika 25: Primer uporabe SLE tehnologije
(Kalupka in Nippgen, 2016)

Tehnologija v smislu klasičnega globinskega laserskega graviranja se razvija predvsem v smeri hitrosti in natančnosti graviranja, hkrati pa se povečuje tudi velikost strojev pri nižji ceni. Najhitrejši gravirni stroj leta 2005 je bil 1 kHz, skoraj 12 let pozneje pa so že 5 kHz.

5 ZAKLJUČEK

Diplomska naloga z naslovom *Uporaba 3D laserskega sistema v tehniki graviranja* je praktično usmerjena naloga. Kot je bilo ugotovljeno na začetku, tak sistem in tehnika graviranja v slovenščini sploh še nista bila študijsko predstavljena. Celovit pregled tako enega izmed strojev kot tudi koračnega opisa delovanja in seveda piščevega dodajanja vrednosti k procesu predstavlja glavno dodano vrednost diplomske naloge.

V nalogi smo kar s primarnim raziskovanjem najprej spoznali stroj nemškega proizvajalca Vitro Laser GmbH. Ugotovili smo, da ga sestavlja 11 ključnih komponent, brez katerih končna gravura v transparenten material ne bi bila mogoča. Ker so komponente zelo pomembne, jih na tem mestu še enkrat ponovimo:

- računalnik,
- laserska glava,
- optična glava,
- optična leča,
- laserski modul,
- optični kabel,
- motorizirane osi,
- sistem stikal,
- krmilje motoriziranih osi,
- krmilje dovoda moči in laserskega sistema,
- hladilna enota P302 Vitro.

V poglavju Tehnika graviranja smo orisali pot razvoja globinskega laserskega graviranja in kolikor se da razumljivo opisali delovanje DPSS (diodno črpanih trdninskih laserjev) laserjev oz. diodno črpane trdninske laserje. Delovanje laserjev je namreč precej zapleteno in vključuje veliko specializiranega znanja na področju fizike, kemije, matematike, elektrotehnike in seveda strojništva, ki vse to znanje smiselno povezuje. Mislimo, da je pri fokusu diplomskega dela že osnovno razumevanje delovanja dovolj šnje za pravilno razumevanje delovanja in uporabe 3D laserskega sistema v tehniki graviranja.

Nadaljnje smo povezali enote v smiselno delovanje v predstavitvi koračnega procesa tehnike graviranja. Koračni zapis se zdi kot najpreprostejši in najbolj pregleden zapis, kjer spremljamo pot žarka od njegovega nastanka v laserskem modulu vse do konca poti v gorišču optične leče. Koračnemu opisu v podpoglavju 2.2.6. dodajamo še glavno dodano vrednost pisca k podjetju in temu postopku. Razvil se je poseben postopek oskrbe želja strank prek izdelave personaliziranih predogledov. Po skrbnem pregledu dela ocenjujemo, da je prav ta del srce naloge in

predstavlja največjo dodano vrednost k slovenski znanosti, saj je ta dodatek skrbno skrita skrivnost proizvajalcev tega trga.

Ugotavljamo, da je tehnologija, ki se uporablja za izdelavo izdelkov v takšni tehniki, že zrela in se sedaj proizvajalci strojev trudijo podaljševati življenjski cikel tehnologije z uvajanjem hitrejših in zmogljivejših strojev, seveda za nižjo ceno. Stroj podjetja 3ma, d. o. o., je že popolnoma amortiziran in nadaljnje vlaganje v stroj glede na nizko nabavno ceno novega ni več smotno. Stroj s svojim delovanjem še vedno dosega prag rentabilnosti približno 1.000 € na mesec, kar v praksi pomeni prbl. 20 graviranih izdelkov. Danes so na voljo približno 4-krat zmogljivejši stroji za vsega 50.000 €, kar je več kot pol manj, kot je bila nova nabavna cena stroja Vitrolux C. Vredno pa je omeniti, da se obdelovalna površina ni bistveno spremenila. Stroj, uporabljen v podjetju 3ma, d. o. o., je stroškovno še vedno učinkovit in dosega precej visoke urne postavke. Zaradi dragega popravila pa popravilo v primeru večje okvare (višje od 5.000 €) ni več smotno.

Zaradi specifičnosti uporabe tehnologije graviranja smo nato predstavili le najbolj uporabljene materiale. Ob tem smo se oprli na podatke o uporabljenem materialu v podjetju 3ma, d. o. o., in smo določili, da je najbolj uporabljen material kristalno steklo, sledi mu PMMA-steklo, najmanj aplikacij je bilo na medenino. Znotraj poglavja so razvidne pomembnejše tehnične lastnosti materialov.

Delo zaključujemo z razlago aplikacije tehnologije. Spoznali smo, da velika večina uporabe odpade na darilni program graviranja v najrazličnejše oblike kristalnega in PMMA-stekla. Industrijske aplikacije pomenijo na kopiranje zelo odporno označevanje izdelkov višjega kakovostnega razreda iz stekla. To je posebno pomembno pri označevanju avtomobilskega in drugega varnostnega stekla, kjer so varnostne zahteve stekla lahko pomemben faktor pri ohranjanju življenja varovanih oseb. Zanimivo je tudi, da je tehnologija odprla vrata novemu področju, imenovanemu SLE, ki bo po vsej verjetnosti še izboljšalo izdelovalne procese in izdelke na področju elektro industrije, npr. pri izdelavi računalniških čipov.

Ob tej priložnosti lahko spomnimo tudi, da pisec besedila dela v podjetju že vrsto let in da je moral za namen te naloge močno razširiti svoja znanja na področju globinskega graviranja. Tehnologijo je uspešno opisal v sklopu tega dela in povezal različna znanja, ki jih je pridobil med študijem na višji strokovni šoli ICES, program Strojništvo. Na koncu pisanja je bil presenečen nad količino prepletajočega znanja, ki ga tehnologija uporablja in upa, da bo delo ponudilo celovit pregled tehnologije in odprlo vrata nadaljnjim raziskavam na tem zanimivem področju.

LITERATURA IN VIRI

1. 3D-Volumenstrukturierung. (2016). *Fraunhofer*. Pridobljeno 5. 2. 2017 z naslova <http://www.ilt.fraunhofer.de/de/technologiefelder/lasermaterialbearbeitung/3d-volumenstrukturierung.html>.
2. 3ma d.o.o. *Priročnik za operaterje: 3D laserski sistem Vitrolux C*, 2005.
3. 3ma d.o.o. *Priročnik za operaterje: Hladilna enota P302*, 2005.
4. 3malook. (2016). Pridobljeno 31. 1. 2017 z naslova <http://www.3malook.si>.
5. Babnik, A. in Jezeršek, M. (2013). *Osnove laserske tehnike* (prosojnice iz predavanj). Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, katedra za optodinamiko in lasersko tehniko.
6. BK-7 Optical Glass. (2016). Pridobljeno 15. 2. 2017 z naslova <http://www.glassdynamicsllc.com/bk7.html>.
7. Bossman, J. (2007). *Processes and strategies for Solid state Q-switch laser marking of polymers*. Magistrska naloga, Twente: Universiteit Twente.
8. Čuš, F. (2009). *Postopki odrezovanja*. Maribor: Fakulteta za strojništvo.
9. Četković, G. (1999). *Laser in njegova uporaba*. Pridobljeno 22. 2. 2017 z naslova <http://www.fizika.si/seminarji/laser/laser.html>
10. Downloads. (2016). Pridobljeno 16. 2. 2017 z naslova <http://www.vitro.de/neu/downloads/downloads.html>.
11. *Everything You Need To Know About Acrylic (PMMA)*. (2015). Pridobljeno 20.3.2017 z naslova <https://www.creativemechanisms.com/blog/injection-mold-3d-print-cnc-acrylic-plastic-pmma>.
12. *Fraunhofer inštitut*. (2016). Pridobljeno 2. 2. 2017 z naslova <http://www.ilt.fraunhofer.de>.
13. *Glassinnengravur*. (2016). Pridobljeno 4. 2. 2017 z naslova <https://de.wikipedia.org/wiki/Glasinnengravur>.
14. *Industrial applications*. (2015). Pridobljeno 16. 2. 2017 z naslova <http://www.vitro.de/neu/industrial/applications/einsatzgebiete.html#!prettyPhoto>.
15. *Industrial laser applications*. (2015). Pridobljeno 16. 2. 2017 z naslova <http://www.vitro.de/neu/industrial/industrie.html>.
16. *Industrial standard systems*. (2016). Pridobljeno 16. 2. 2017 z naslova <http://www.vitro.de/neu/industrial/standard-systems/industrielle-standard-systeme.html>.
17. Kalupka, C. in Nippgen, S. (2016). *Etching microstructures with lasers*. Pridobljeno 18. 2. 2017 z naslova http://www.ilt.fraunhofer.de/en/press/press-releases/press-release-2016/press_release_20161025.html.
18. Kobentar, J. (b.d.). *Tipi in uporaba stekla*. Pridobljeno 14. 2. 2017 z naslova <http://www.kemija.org/index.php/kemija-mainmenu-38/24-kemijacat/57-tipi-in-uporaba-stekla>.

19. *Pilkington OptiWhite overview*. (2015). Pridobljeno 25. 2. 2017 z naslova <https://www.pilkington.com/en-gb/uk/products/product-categories/special-applications/pilkington-optiwhite>.
20. *Polymethyl methacrylate (PMMA)*. (2015). Pridobljeno 9. 2. 2017 z naslova <http://www.plasticseurope.org/what-is-plastic/types-of-plastics-11148/engineering-plastics/pmma.aspx>.
21. *Sub-surface engraving*. (2016). Pridobljeno 7. 2. 2017 z naslova <http://glassprocessing.eu/applications-sub-surface-glass-engraving.htm>.
22. Vpogled Vitro Laser GmbH.
23. *Vrste laserjev*. (2015). Pridobljeno 20. 3. 2017 z naslova http://lab.fs.uni-lj.si/kolt/datoteke/osnove_laserske_tehnike/4_Vrste_laserjev.pdf.

PRILOGA

Priloga 1: Specifikacije laserskega stroja

VITROLUX-C v.3
Laser systems for versatile subsurface engraving

Technical Data:

Laser:	<i>Diode-pumped, water-cooled Nd:YVO₄ laser, wavelength 532 nm</i>
Optics:	<i>High-performance telecentric lens f=100, optional f=160 mm</i>
Machine:	<i>Laser system acc. to safety category I, highly dynamic galvanometer scanner, temperature stabilized, PC according to industrial standards, 15" TFT-flat screen</i>
Software:	<i>System control via VitroNC-software and CAN-bus, Vitro plug-in for Rhino 3D for point cloud creations</i>
Working voltage:	<i>230 V/50 Hz (others on request)</i>
Dimensions:	<i>1200 x 1800 x 1050 mm (WxHxD), weight approx. 380 kg</i>
Material size:	<i>max. 500 x 300 x 100* mm (X-Y-Z) *from 210 mm in Y-direction the height is limited to 75 mm in Z-direction</i>
Size of processing area:	<i>448 x 298 x 95 mm (X-Y-Z)</i>

(Industrial standard systems, 2016)