

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Peter MAČEK

LASERSKO REZANJE VLAKNENE PLOŠČE

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

FIBER BOARD CUTTING USING LASER

GRADUATION THESIS

Higher professional studies

Ljubljana, 2006

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega študija lesarstva. Opravljeno je bilo na Katedri za optodinamiko in lasersko tehniko na Fakulteti za strojništvo Univerze v Ljubljani in v podjetju Elektro servis Hribar, kjer smo izvedli poskuse z laserjem.

Študijska komisija je za mentorja diplomskega dela imenovala prof. dr. Janeza Možina, za somentorja doc. dr. Bojana Bučarja, za recenzenta pa doc. dr. Marijana Mediča.

Mentor: prof. dr. Janez Možina

Somentor: doc. dr. Bojan Bučar

Recenzent: doc. dr. Marijan Medič

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela.

Peter Maček

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 621.9.048:630*862.3
KG	vlaknena plošča/lasersko rezanje/širina reza/poševnost/ukrivljenost/hrapavost
AV	MAČEK, Peter
SA	MOŽINA, Janez (mentor)/BUČAR, Bojan (somentor)/MEDIČ, Marijan (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2006
IN	LASERSKO REZANJE VLAKNENE PLOŠČE
TD	Diplomsko delo (visokošolski študij)
OP	XI, 61 str., 4 pregl., 53 sl., 3 pril., 16 vir.
IJ	sl
JJ	sl/en
AI	V industriji se pogosto pojavlja vprašanje, kako bi lahko proizvedli več, v krajšem času, z boljšim izkoristkom časa in materiala, bolj kvalitetno, in če bi lahko to dosegli že z zamenjavo tehnološke opreme. Skušali smo ugotoviti, če je laserska tehnika, že uporabljana na mnogih zelo različnih področjih, primerna tudi za rezanje vlaknenih plošč. S CO ₂ laserskim sistemom smo razrezali 9 preskušancev 3 debelin, po metodi lameliranja z različnimi laserskimi parametri. Analizo širine in površine laserskih rezov smo opravili po metodi laserske triangulacije. Opazovali smo vpliv rezalne hitrosti, debeline plošč, pomožnega laserskega plina in položaja fokusne razdalje na širino reza, na katerega sta najbolj vplivali rezalna hitrost in položaj fokusne razdalje. Z naraščajočo rezalno hitrostjo in s pomikom fokusne razdalje bolj proti sredici plošče se je širina reza manjšala. Z analizo površin laserskih rezov smo ugotovili hrapavost, ukrivljenost in poševnost rezanih površin. Največji vpliv na te parametre sta imeli rezalna hitrost in debelina materiala, z njunim naraščanjem se je povečevala hrapavost in poševnost površin, radij ukrivljenosti pa zmanjševal.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Vs
DC UDC 621.9.048:630*862.3
CX fiber board/laser cutting/cut width/obliqueness/curvature/roughness
AU MAČEK, Peter
AA MOŽINA, Janez (supervisor)/BUČAR, Bojan (co-advisor)/MEDIČ, Marijan (reviewer)
PP SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY 2006
TI FIBER BOARD CUTTING USING LASER
DT Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO XI, 61 p., 4 tab., 53 fig., 3 ann., 16 ref.
LA sl
AL sl/en
AB The never ending question asked in our industry is how to produce more, better, using less time and material, and if all these can be done by changing the technological equipment. Therefore, we tried to find out if the laser technology used in many different areas, could also serve for cutting of fiber boards. To do it the CO₂ laser system was used. Using a method of lameling with various laser parameters, 9 testers of different thickness were cut. The analysis of width and surface of laser cuts was performed by a laser triangulation method. The influence of cutting speed, board thickness, additional laser gas, and position of focus distance on width of the cut were observed. The main factors influencing the width of cut were cutting speed and the position of focus distance. Rising the cutting speed and moving the focus distance towards the middle of board thickness, the cutting width diminishes. The roughness, curvature and obliquity of cut surfaces were assessed by an analysis of laser cut surfaces. The cutting speed and thickness of material have the main influence on these parameters. Increasing the cutting speeds and material thickness the roughness and obliqueness of surfaces rise, but the curving radius reduces.

KAZALO VSEBINE

	str.
Ključna dokumentacijska informacija	II
Key words documentation	IV
Kazalo vsebine	V
Kazalo preglednic	VII
Kazalo slik	VIII
Kazalo prilog	X
Okrajšave in simboli	XI
Slovarček	XI
1 UVOD	1
1.1 UVODNA OBRAZLOŽITEV	1
1.2 OPREDELITEV PROBLEMA	1
1.3 DELOVNE HIPOTEZE	2
1.4 CILJI DIPLOMSKE NALOGE	2
2 SPLOŠNI DEL	3
2.1 PREGLED OBJAV	3
2.2 VLAKNENE PLOŠČE	7
2.2.1 Delitev vlaknenih plošč	7
2.2.2 Posebne oblike vlaknenih plošč	8
2.3 LASERSKO REZANJE	9
2.3.1 Laser	9
2.3.2 Lastnosti laserske svetlobe	10
2.3.3 Interakcija laserske svetlobe s snovjo	12
2.3.4 Vrste laserjev	14
2.3.4.1 Plinski laserji	15
2.3.4.1.1 CO ₂ laser	15
2.3.4.2 Polprevodniški laserji	17
2.3.4.2.1 Injekcijski laser	17
2.3.5 Primeri laserskega rezanja nekovin	18
2.3.6 Obratovalni stroški	19
2.3.7 Varnost pri delu	19
3 MATERIALI IN METODE	21
3.1 ZASNOVA EKSPERIMENTA	21
3.2 MATERIALI	21
3.2.1 Vlaknena plošča	21
3.2.2 Laserski sistem	21
3.3 METODE DELA	22
3.3.1 Metoda spiralnega reza	22
3.3.2 Metoda razrezovanja v lamele	23
3.4 LASERSKI MERILNIK OBLIKE TELES	24
3.4.1 Merjenje širine reza	24
3.4.2 Analiza površine reza	25
4 REZULTATI	29
4.1 ŠIRINA REZA	29
4.2 POVRŠINA REZA	41

5	RAZPRAVA IN SKLEPI	56
5.1	VPLIVI NA ŠIRINO LASERSKEGA REZA	56
5.2	VPLIVI NA POŠEVNOST , UKRIVLJENOST IN HRAPAVOST POVRŠIN REZA	56
5.3	SKLEPI	57
6	POVZETEK	59
7	VIRI	61
7.1	CITIRANI VIRI	61
7.2	DRUGI VIRI	61
	PRILOGE	
	ZAHVALA	

KAZALO PREGLEDNIC

	str.
Preglednica 1: Vrednosti divergenčnih kotov za posamezne vrste laserjev (Ready, 1997, str. 7)	10
Preglednica 2: Podatki o optimalnih parametrih za rezanje lesa in lesnih kompozitov s CO ₂ laserskim sistemom (Powell, 1993, str. 110)	18
Preglednica 3: Podatki o uporabljenem laserju	21
Preglednica 4: Pregled uporabljenih parametrov za lasersko rezanje	23

KAZALO SLIK

	str.
Slika 1: Hitrost rezanja kot funkcija gostote lesa na primeru 10 mm debele deske z 12 % vlage (Powell, 1993)	4
Slika 2: Resonator (Steen, 2003, str. 12)	9
Slika 3: Redovi laserskega žarka (Ready, 1997, str. 10)	10
Slika 4: Časovna razporeditev laserske moči v primeru kontinuiranega (a) ali pulznega delovanja (b), (Chryssolouris, 1991, str. 41)	11
Slika 5: Grafični prikaz nekoherentne svetlobe (a) in koherentne svetlobe (b), (Chryssolouris, 1991, str. 25)	11
Slika 6: Prikaz fizikalnih procesov, ki spremljajo interakcijo laserske svetlobe s snovjo (Ready, 1997, str. 14)	12
Slika 7 : Shematski prikaz laserskega rezanja (Powell, 1993, str. 32)	13
Slika 8: Shematski prikaz CO ₂ laserja (Chryssolouris, 1991, str. 28)	15
Slika 9: Načini nihanja atomov pri CO ₂ laserjih (Ready, 1997, str. 9)	16
Slika 10: Shematski prikaz injekcijskega laserja (Steen, 2003, str. 32)	17
Slika 11: Izvedba laserskega reza na preskušancu debeline 16 mm	23
Slika 12: Laserski merilnik oblike in ostala oprema	24
Slika 13: Shematski prikaz ukrivljenosti roba	25
Slika 14: Razdelitev dolžine lamele pri merjenju poševnosti in ukrivljenosti površine rezanja	26
Slika 15: Shematski prikaz poševnosti roba	26
Slika 16: Profil površine (Medič, 2001, str. 301)	27
Slika 17: Razdelitev debeline lamele pri merjenju hrapavosti površine rezanja	28
Slika 18: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 1	30
Slika 19: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 2	31
Slika 20: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 3	32
Slika 21: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 4	34
Slika 22: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 5	36
Slika 23: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 6	37
Slika 24: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 7	38
Slika 25: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 8	39
Slika 26: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 9	40
Slika 27: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 1	41
Slika 28: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 1	41
Slika 29: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 1	42
Slika 30: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 2	43
Slika 31: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 2	43
Slika 32: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 2	44
Slika 33: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 3	44
Slika 34: Grafični prikaz radija ukrivljenosti na plošči št. 3	45
Slika 35: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 3	45
Slika 36: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 4	46
Slika 37: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 4	46
Slika 38: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 4	47
Slika 39: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 5	47
Slika 40: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 5	48

Slika 41: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 5	48
Slika 42: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 6	49
Slika 43: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 6	49
Slika 44: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 6	50
Slika 45: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 7	51
Slika 46: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 7	51
Slika 47: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 7	52
Slika 48: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 8	52
Slika 49: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 8	53
Slika 50: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 8	53
Slika 51: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 9	54
Slika 52: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 9	54
Slika 53: Grafični prikaz hrapavost robov na plošči št. 9	55

KAZALO PRILOG

Priloga 1: Širine rezov na ploščah pri različnih rezalnih hitrostih	45
Priloga 2: Parametri površine rezov na ploščah	50
Priloga 3: Primeri nastalih površin po laserskem rezu	68

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ind.	industrija
npr.	na primer
pogl.	poglavje
str.	stran
v	obodna hitrost
ω	kotna hitrost
n	število vrtljajev

SLOVARČEK

laser	laser
debelina	thickness
plin	vapor
zrak	air
dušik	nitrogen
tlak	pressure
površina	surface
širina	width
rez	cut
vlaknena plošča	fiber board

1 UVOD

1.1 UVODNA OBRAZLOŽITEV

Največji del lesarske proizvodnje poteka na različnih lesnoobdelovalnih strojih. Stroj in tehnologija sta soodvisna. To pomeni, da je določena tehnologija mogoča, če jo je mogoče izpeljati na ustreznem nivoju in obratno, da tehnologija narekuje, kakšna naj bo izvedba stroja. Stroji praviloma predstavljajo v vsaki tehnologiji tudi velik finančni vložek. Obdelava lesa s prirejenimi orodji, napravami in stroji ima zelo dolgo tradicijo. Les je pač že skozi vso zgodovino eden tistih materialov, ki je bil vedno dosegljiv, njegove lastnosti so primerne za mnoge namene in tudi obdelati ga je mogoče relativno na lažji način kot mnoge druge materiale.

Tehnološki postopki, na osnovi katerih so zgrajeni sodobni lesnoobdelovalni stroji, so stari več stoletij. Zaradi splošnega razvoja tehnologije, so se njihove izvedbe skozi čas močno spreminjale in se tudi še danes intenzivno spreminjajo. Za sedanjí trenutek je značilno računalniško vodenje tehnologije. Druga značilnost pa je prilagodljivost, saj je mogoče stroj v veliki meri prilagoditi specifičnim zahtevam.

V lesarstvu mora obdelovanec skozi več faz obdelave in predelave, da dobimo končni izdelek. Kot primarna obdelava lesa ali lesnih tvoriv se vedno pojavlja razžagovanje elementov na ustrezne dimenzije. Za ta namen lesna industrija že vrsto let uporablja klasične metode kot so rezanje s krožnimi žagami in podobno. Razvoj je prinesel tudi velike obdelovalne linije, ki vključujejo več operacij in se element v enem prehodu skozi linijo popolnoma obdela.

Lesna industrija po svetu proizvaja veliko proizvodov, katerih osnova je lesna surovina v različnih oblikah. Kot v ostalih industrijah se tudi v lesni industriji ne moremo oziroma nočemo izogniti razvoju in iskanju alternativnih novejših metod, ki bi povečale izkoristek materiala, časa in izboljšale kakovost obdelave.

1.2 OPREDELITEV PROBLEMA

V industriji se pogosto pojavi vprašanje, kako bi lahko proizvedli več, v krajšem času, z boljšim izkoristkom časa in materiala, bolj kvalitetno in ali bi lahko to dosegli že z zamenjavo tehnološke opreme. Namen te naloge je ugotoviti, ali je laserska tehnika, ki je že uporabna na veliko zelo različnih področjih, uporabna za rezanje vlaknenih plošč. Vlaknene plošče so še posebej zanimive za obdelavo z lasersko tehniko, saj te plošče zahtevajo zahtevnejše obdelave kot druga lesna tvoriva. Dosedanje raziskave laserske obdelave vlaknenih plošč so bile omejene predvsem na določevanje parametrov laserskega rezanja, neraziskane pa ostajajo nekatere temeljne značilnosti interakcije med lasersko svetlobo in obdelovanci.

Zadali smo si nalogo, da ugotovimo kvaliteto laserskega reza glede na vrsto pomožnega laserskega plina, kako debelina plošče vpliva na kvaliteto rezanja in skušali ugotoviti

maksimalno hitrost laserske glave, pri kateri bo kvaliteta reza še zadovoljiva za nadaljnjo obdelavo.

1.3 DELOVNE HIPOTEZE

Predvidevamo, da bo:

- kakovost laserskega reza zadovoljila zahtevam nadaljnje obdelave,
- površinska struktura vlaknene plošče dopuščala kvalitetno površinsko obdelavo,
- izkoristek rezanja z laserjem boljši.

1.4 CILJI DIPLOMSKE NALOGE

Cilj diplomske naloge je ugotoviti:

- optimalne parametre za lasersko rezanje vlaknenih plošč,
- kako debelina vlaknene plošče vpliva na kvaliteto rezanja,
- maksimalno hitrost pomika laserske glave pri kateri bo kvaliteta rezanja še zadovoljiva in
- vpliv pomožnega laserskega plina na kvaliteto laserskega reza.

2 SPLOŠNI DEL

2.1 PREGLED OBJAV

Objav na temo laserskega rezanja vlaknene plošče ni veliko. Nekateri avtorji se bolj posvečajo rezanju masivnega lesa. Ready (1997) trdi, da številne nekovine kamor spada tudi les, režemo neposredno z uparjanjem snovi. Za tovrstno rezanje je najpogosteje uporabljen CO₂ laser. Pri rezanju organskih snovi je ugodno uporabiti laser z zveznim delovanjem. Ready ugotavlja, da ima večina organskih snovi nizko specifično izparilno toploto in je zato možno doseganje visokih rezalnih hitrosti. Pri rezanju gorljivih snovi zaradi ožiga nastanejo zaobljeni robovi. Če želimo doseči čist in nepooglenel rob, uporabimo laserski žarek obdan s curkom inertnega plina. Kot prednosti laserskega rezanja navaja majhno širino reza, kar pomeni manj izgub materiala, možnost rezanja pravokotnih rezov ali pa rezov poljubnih oblik, dobro kvaliteto nastalih robov, možnost avtomatizacije, manjši hrup, manj oziroma nič prahu in lažje vodenje procesa rezanja, zaradi računalniške podpore. Kot slabosti laserskega rezanja pa navaja omejeno globino rezanja, zoglenelo oziroma ožgano površino reza in izpostavitvev lesa visokim temperaturam. Ugotavlja tudi, da na strukturo površine laserskega reza vlaknene plošče vplivajo: vsebnost smole, velikost osnovnih gradnikov oziroma vlaken, temperatura stiskanja, tlak stiskanja in čas stiskanja.

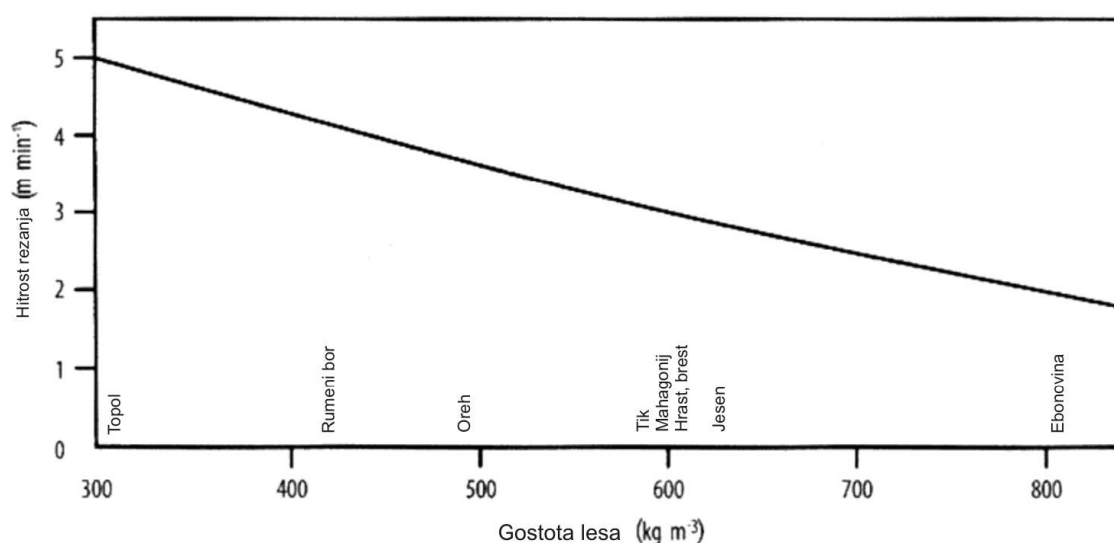
Steen (2003) trdi, da je možno brez težav lasersko rezati les do debeline 40 mm. Omenja tudi zelo velik prihranek materiala v primerjavi s klasičnimi metodami rezanja. Ugotavlja tudi, da je rezalna hitrost obratno sorazmerna z gostoto lesa. Omenja tudi enostavnost in uporabnost laserjev za graviranje oz. vrisovanje podob ali poljubnih oblik na površino lesa., s čimer lahko dobimo umetniške izdelke. Kot slabosti navaja predvsem ožgano površino na mestu laserskega reza. Črna oziroma potemnjena plast je posledica ostanka ogljika, do katerega pride zaradi kemijskega razpada celuloze v lesu. Stopnja potemnitve je odvisna od gostote celuloze masivnega lesa. Meni pa tudi, da je možno temno plast odstraniti z brušenjem, kar izboljša kakovost in možnosti za nadaljno uporabo.

Migliore (1996) ugotavlja, da so organski materiali, kamor uvrščamo tudi les, z vidika laserskega rezanja enostavnejši za obdelavo kot materiali iz kovine. Trdi, da se za lasersko rezanje lesa uporabljajo večje rezalne hitrosti in manjše moči laserja. Ugotavlja tudi, da se zaradi večje prostornine razgradnega materiala, ki nastane pri laserskem rezanju, lahko pojavijo težave pri izhodu tega materiala iz reže, kar lahko pomeni slabšo kvaliteto reza. Opozarja tudi na škodljive toksične snovi, ki nastanejo pri rezanju organskih snovi z laserjem. S temi snovmi moramo ravnati tako, da izključimo možnost vpliva na okolje in ljudi.

Powell (1993) navaja, da je bilo že večkrat omenjeno, da je bila uporaba laserjev za rezanje vezanega lesa, ki se je uporabljal v industriji za pakiranje, ena izmed prvih uporab laserja za komercialno uporabo. Nadalje navaja, da se laserji v industriji pohištva najpogosteje uporabljajo za rezanje elementov debelin do 40 mm in več. Trdi, da se z uporabo laserja izdelavni časi zmanjšajo za 10 do 50 % ter da so prihranki materiala zelo veliki v primerjavi s klasičnimi metodami razrezovanja. Primerja tudi rezanje masivnega lesa in pa rezanje tako imenovanih lesnih tvoriv (vlaknene plošče, iverne plošče, vezan les). Kot glavno prednost pri razrezovanju lesnih tvoriv navaja, da so lesna tvoriva bolj homogena

kot masivni les, da vsebujejo manj notranjih napetosti, ki bi pri rezanju povzročale težave in da je kvaliteta rezanja boljša tudi pri večjih rezalnih hitrosti. Ob tem pa opozarja, da to velja le v primeru, če so lesna tvoriva pravilno in ustrezno skladiščena.

Hitrosti rezanja so odvisne od gostote lesa kot prikazuje slika 1. To je pričakovano, saj je hitrost rezanja obratno sorazmerna z gostoto. Ožgane površine (ne pretirano) je moč med seboj lepiti. Kot drugo možnost uporabe omenja strojno lasersko graviranje zelo podrobnih vzorcev v les. To poteka s hitrim prehodom fokusiranega laserskega žarka preko odbojne maske, na primer bakrene. Maske za izkapane vzorce so narejene s kemičnim jedkanjem tankih bakrenih oblog. Nekaj natančnih umetniških del je bilo narejeno na ta način, večinoma za arabski trg.



Slika 1: Hitrost rezanja kot funkcija gostote lesa na primeru 10 mm debele deske z 12 % vlage (Powell, 1993)

V članku (Powell 2002) opisuje rezanje lesa in lesnih tvoriv s pomočjo CO_2 laserskega sistema. Trdi, da je primeru rezanja vlaknenih plošč možno optimalno rezalno hitrost določiti že z nekaj poizkusi. To je možno zato, ker je pri vlaknenih plošč gostota zelo enakomerno razporejena po celotni plošči, kar ne velja za masivni les. V nadaljevanju trdi, da so za rezanje vlažnih elementov potrebne nekoliko manjše rezalne hitrosti in da se pri rezanju lesa z laserjem ne moremo izogniti potemljeni rezalni površini, temveč da lahko ta pojav zgolj omilimo tako, da namesto kisika kot pomožni plin uporabimo dušik. Ostale prednosti dušika so: da ga je možno uporabljati pri višjih tlakih in da običajno ne vsebuje vode in olja. V nadaljevanju članka Powell navaja, da pri procesu rezanja nastaja dim, ki je po sestavi zelo podoben dimu, ki nastaja pri gorenju lesa. Dim lahko povzroča težave pri dihanju zato ga je potrebno sproti odsesavati iz cone rezanja. Filtriranje dima in vračanje zraka v prostor nista priporočljiva zato, ker dim vsebuje veliko lepljivih delcev, ki bi filter uničile. Poleg tega lahko dim vsebuje snovi, ki jih ni možno uspešno filtrirati. Zaradi vsega naštetega priporoča, da se iz odsesovalne sistema odstranijo filtri in, da se dim odvaža v ozračje.

Lum in Black (2000) sta se v članku posvetila predvsem rezanju vlaknenih plošč s CO_2 laserskim sistemom. V uvodu poudarita, da se vlaknene plošče tako kot masiven les reže

po mehanizmu termomehanske razgradnje. Energija žarka cepi kemijske vezi in tako oslabi integriteto materiala. Pri rezanju vlaknenih plošč ima ta proces razgradnje vpliv na velike celulozne molekule, ki zaradi tega razpadejo na osnovne gradnike. V nadaljevanju navajata, da je proces termomehanskega razkroja počasen in da omogoča ravne in gladke površine reza, ki so prekrite s tanko plastjo ogljikovega prahu. Kot večina avtorjev tudi onadva kot glavne parametre laserskega rezanja navajata moč laserja, rezalno hitrost, vrsto pomožnega laserskega plina in položaj goriščne razdalje žarka. Poleg tega trdita, da je velikega pomena konstrukcija šobe in hitrost pomožnega plina preko šobe laserske glave. Po opravljenih raziskavah trdita, da za določeno debelino materiala obstaja maksimalna in minimalna rezalna hitrost, med njima pa je območje sprejemljivih hitrosti, vključno z optimalno vrednostjo glede na kvaliteto rezanja. Rezalno hitrost predstavljata tudi kot pomembno ekonomsko spremenljivko. Večja rezalna hitrost namreč pomeni krajši čas cikla in s tem se zmanjšajo stroški izdelave. Kot osnovno funkcijo pomožnega laserskega plina navajata odstranjevanje materiala iz cone rezanja oz. reže kar ščiti leče pred nastalim dimom. Za rezanje vlaknenih plošč priporočata, da se kot pomožni plin uporablja stisnjen zrak in dušik, pod tlakom 0,5 do 2,5 bara. Tlak je odvisen tudi od premera šobe skozi katero izhaja plin. Večji premer pomeni manjši tlak plina. Pri uporabi dušika pa je tlak plina odvisen še od količine plina v zbirnem cilindru. Kot tretji pomemben dejavnik pa poudarjata položaj goriščne razdalje žarka. Če je goriščna razdalja nad delovno površino, se gostota energije zmanjša, širina reza se poveča in zgornja površina elementa bo pooglenela. Če je gorišča razdalja točno na površini elementa bo tam tudi maksimalna gostota energije, ampak se bo močno zmanjševala z debelino elementa. Če pa bo goriščna razdalja žarka nekoliko pod sredino debeline elementa, bomo zagotovili bolj enakomerno porazdelitev energije žarka skozi celotno debelino elementa, širina reza se bo zmanjšala, površina reza bo manj pooglenela in bo bolj gladka. Poizkuse sta izvajala s pomočjo laserskega sistema z izhodno močjo 520 – 530W. Kot pomožni plin sta uporabila dušik pod različnimi tlaki, od 0,5 do 2,5 bara. Najprej sta poizkusila z rezanjem vlaknene plošče debeline 6mm, da sta ugotovila območje optimalnih rezalnih hitrosti pri katerih je laserski žarek lahko prodril skozi celotno debelino plošče. Poizkus sta izvajala po metodi razrezovanja v lamele. Prvi rez sta opravila pri rezalni hitrosti 1000 mm/min, za vsak naslednji rez pa sta hitrost povečala za 500 mm/min. Hitrost sta stopnjevala do 9000 mm/min. Žarek je skozi celotno debelino plošče debeline 6 mm, prodiral do hitrosti 6500 mm/min. Celoten eksperiment je bil izveden pri več različnih debelinah vlaknenih plošč, vrstah in tlakih pomožnega plina in pri različnih načinih delovanja laserskega sistema (pulzno in kontinuirano). Izvedla sta tudi nekaj preizkusov rezanja po določenim kotom. Na vsakem preskušancu sta izvedla tri meritve in nato izračunala povprečno vrednost. Hrapavost površin rezov sta merila na sredini debeline plošče in jo izrazila z Ra – srednje odstopanje profila od srednje vrednosti. Po opravljeni analizi ugotavljata, da je možno debelejšje plošče enako uspešno rezati kot tanke, pod pogojem, da uporabimo manjšo rezalno hitrost ob ostalih nespremenjenih parametrih. Če povečamo moč laserja pa lahko uporabimo tudi večje rezalne hitrosti. Tako sta ugotovila, da je možno vlakneno ploščo debeline 6 mm, možno rezati max. s hitrostjo 5800 mm/min. Avtorja pa nista uspela ugotoviti vpliva pomožnega laserskega plina in tlaka na max. rezalno hitrost, zato trdita, da je bolj smiselna uporaba stisnjenega zraka predvsem iz ekonomskega vidika. Opazila pa sta, da sta z uporabo dušika zmanjšala stopnjo zoglenelosti površine reza. Hrapavost površin rezov je naraščala s povečevanjem rezalne hitrosti, pri vseh debelinah plošč. Zaradi večje rezalne hitrosti namreč žarek ni uspel popolnoma odstraniti materiala. Širina reza je

variirala predvsem z močjo laserja, sestavo plošč in različnimi šobami. Največji vpliv je bil opažen z večanjem rezalne hitrosti. Širina reza se je namreč z naraščajočo hitrostjo rezanja manjšala. Avtorja tudi na širino reza nista ugotovila vpliva pomožnega plina. Opažen pa je bil manjši vpliv tlaka plina. V zaključku članka Ulm in Black navajata, da s primerjavo med pulznim in kontinuiranim delovanjem laserskega sistema, v tem primeru, ne ugotavljata razlik.

2.2 VLAKNENE PLOŠČE

V splošnem sta znani dve definiciji vlaknenih plošč (Medved, 2003):

- Vlakninska lesna tvoriva so tvoriva različnih prostorninskih mas, ki so narejena iz lesnih ali drugih lignoceluloznih vlaken. Vezivna sredstva in/ali drugi dodatki so lahko dodani s ciljem izboljšanja trdnosti, odpornosti proti vlagi, ognju, glivam in insektom (FAO).
- Po ISO definiciji pa so vlaknene plošče tvorivo, ki je debelejše od 1,5mm in je izdelano iz lignoceluloznih vlaken, pri čemer so vlakna povezana med seboj predvsem z lastnim naravnim vezivom. Dodana so lahko vezivna sredstva in/ali drugi dodatki s ciljem izboljšanja lastnosti.

Razlika med tema definicijama je v tem, da definicija po sistemu FAO ne definira minimalne debeline vlaknenih plošč.

Vlaknene plošče so sestavljene iz lesnih ali drugih vlaken. Prvo vlakneno ploščo so izdelali v ZDA leta 1915. Različni standardi delijo plošče na različne načine in glede na različne lastnosti.

2.2.1 Delitev vlaknenih plošč

Vlaknene plošče delimo glede na zelo različne lastnosti (Medved, 2003):

- glede na prostorninsko maso,
- glede na način izdelave,
- glede na namembnost in
- glede na vrsto uporabljenega lepila.

Glede na prostorninsko maso lahko vlaknene plošče razdelimo v štiri skupine:

- izolacijske plošče ($\rho \leq 300 \text{ kg/m}^3$),
- lahke plošče ($300 \leq \rho \leq 500 \text{ kg/m}^3$),
- srednje goste vlaknene plošče ($500 \leq \rho \leq 800 \text{ kg/m}^3$),
- trde vlaknene plošče ($\rho \geq 800 \text{ kg/m}^3$).

Za uporabo v industriji pohištva se največkrat uporabljajo vlaknene plošče srednje prostorninske mase, medtem, ko se za uporabo plošč v gradbeništvu uporablja plošče večjih prostorninskih mas.

Vlaknene plošče lahko izdelujemo po mokrem ali suhem postopku. Pri mokrem postopku na posebno oblikovalno sito naneseemo pulpo, ki je mešanica vlaken, vode in lepila. Nato voda odteče, sledi pa še stiskanje plošč kjer pride do utrjevanja lepila. Pri suhem postopku izdelave pa pridobljena vlakna najprej sušimo jih oblepimo, natresemo v obliko tepiha in stisnemo, da dobimo želeno debelino plošče in dosežemo popolno utrjenost lepila.

Bistvene prednosti suhega postopka izdelave se v tem, da je ekološko prijaznejši, dobimo boljši izkoristek lesa in da imajo izdelane plošče gladko površino.

Glede na namembnost vlaknene plošče delimo v dve skupini (Medved, 2003):

- uporaba v splošne namene oziroma v pohištvene namene,
- uporaba v gradbeništvu.

Za uporabo v splošne namene ne zahtevamo ekstremno visokih trdnostnih lastnosti plošče, temveč bolj estetiko in enostavnost uporabe. Za uporabo vlaknenih plošč v gradbeništvu pa je estetika potisnjena v ozadje in je so pomembnejše trdnostne in mehanske lastnosti plošče.

Vrsta uporabljenega lepila ima velik vpliv na lastnosti vlaknenih plošč in na njihovo uporabnost.

Običajno se za izdelavo vlaknenih plošč uporablja (Medved, 2003):

- UF lepilo (urea – formaldehidno lepilo) – za splošne namene,
- MF lepilo (melamin – formaldehidno lepilo) – za splošne namene in uporabo v gradbeništvu,
- FF lepilo (fenol – formaldehidno lepilo) – za uporabo v gradbeništvu,
- izocianatno lepilo – za vlaknene plošče s posebnimi nameni.

2.2.2 Posebne oblike vlaknenih plošč

Med posebnimi oblikami vlaknenih plošč so najpogostejše vlakneno – mavčne plošče. Te plošče so znane po homogeni strukturi. Sestavljene so iz mešanice celuloznih vlaken in mavca. Standardne debeline teh plošč so: 10, 12, 15 in 18mm.

Osnovna surovina za izdelavo je star papir, ki ga na trgalnih strojih trgamo na velikost približno 2x3 cm. Te koščke papirja razvlaknujemo v mlinih, pridobljena vlakna mešamo z mavcev, jih navlažimo in stisnemo v kompaktno ploščo. Ko plošče stisnemo jih impregniramo s hidrofobnim sredstvom in premazom, ki nase veže mavčni prah.

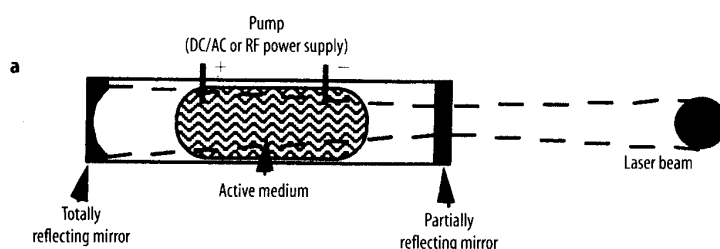
Te plošče se uporabljajo kot gradbeni element za montažne hiše, pregradne stene, zvočno in toplotno izolacijo in podobno (Medved, 2003).

2.3 LASERSKO REZANJE

2.3.1 Laser

Laser je naprava, ki je sestavljena iz treh osnovnih delov (Steen, 2003):

- sredice oziroma medija, ki je kristal ali cev s tekočino ali plinom, kamor dovajamo energijo,
- napajalne naprave, ki lahko proizvaja močne bliske svetlobe ali močne radijske valove (npr. bliskavica),
- resonatorja, ki ustvarja stoječe elektromagnetno valovanje in natančno usmeritev laserskega curka (ponavadi dve vzporedni zrcali, eno nepropustno, drugo pa pol propustno).



Slika 2: Resonator (Steen, 2003, str. 12)

Beseda LASER je kratica za Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (ojačevanje svetlobe s stimulirano emisijo sevanja). Korenine LASER-ja segajo v leto 1917, ko je eden najbolj znanih fizikov Albert Einstein postavil potreben in hkrati nujen pogoj za stimulirano emisijo. Do prvega praktičnega primera pa je prišlo šele desetletja pozneje.

Leta 1954 so Townes (ZDA), Bassov in Prokorov (Rusija) predstavili napravo, ki oddaja ojačano mikrovalovno sevanje in jo poimenovali MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation), za katero so leta 1964 prejeli tudi Nobelovo nagrado za fiziko. Že štiri leta kasneje sta Townes in Schawlow (oba zaposlena kot raziskovalca v BELL – ovih laboratorijih) postavila pogoje za vidno lasersko svetlobo in končno je leta 1960 Theodore H. Maiman predstavil prvi pravi LASER, ki je uporabljal rubinov kristal in je oddajal kratke bliske rdeče svetlobe.

Laser so na začetku razvijali predvsem v vojaške namene, predvsem za merjenje razdalj in označevanje ciljev, zamislili pa so si ga tudi kot smrtonosno orožje nove generacije (uničevanje ciljev z laserskim curkom – »VOJNA ZVEZD«), vendar pa bo moral laser do te stopnje prehoditi še dolgo razvojno pot. Klub temu pa si ne moremo predstavljati sodobnega življenja brez njega, uporabljamo ga praktično povsod. V medicini, industriji, šoli, zabavni industriji, geodeziji, policiji (Tarasov, 1986).

2.3.2 Lastnosti laserske svetlobe

Laserska svetloba ima sicer vse običajne fizikalne lastnosti elektromagnetnega valovanja, nekatere pa so še posebej pomembne za uporabo laserjev in sicer (Ready, 1997):

- monokromatičnost ali enobarvnost,
- divergenca,
- intenziteta ali jakost,
- usmerjenost žarka in
- moč.

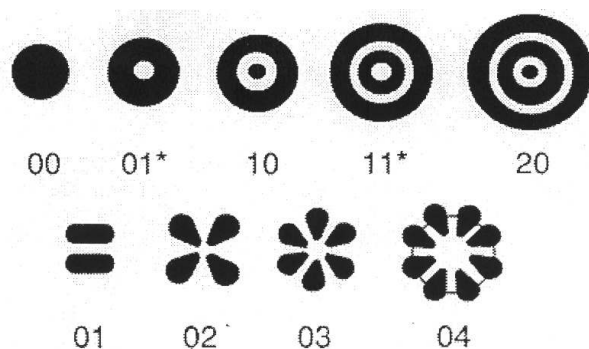
Za lasersko svetlobo je značilno, da je monokromatična, torej ima zelo ozek spekter.

Divergenca je kot, pod katerim se širi svetlobni žarek. Divergenčni kot laserskega snopa je majhen, ni pa nič. Minimalna možna vrednost temelji na osnovi fizikalnega pojava uklona svetlobe. Kot pojav je divergenca pomembna zato, ker želimo energijo laserskega žarka zbrati na čim manjši površini. Majhen divergenčni kot snopa namreč pomeni, da je zbiranje svetlobe enostavno, tudi pri razmeroma velikih oddaljenostih od izvora svetlobe. Povprečni kot pod katerim se laserski žarek širi znaša približno 1mrad, to pomeni, da se na razdalji 1 km curek razširi na 1m (Ready, 1997).

Preglednica 1: Vrednosti divergenčnih kotov za posamezne vrste laserjev (Ready, 1997, str. 7)

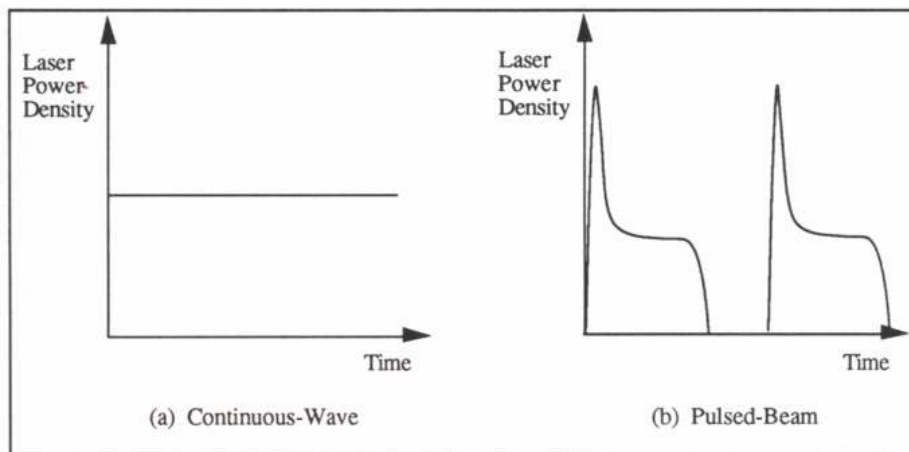
vrsta laserja	He - Ne	Ar	CO ₂	Rubin
divergenca snopa (mrad)	0,5 - 1	0,5 - 1	1 - 5	1 - 5

Rod TEM_{pq} opisuje različne fazne in amplitudne porazdelitve laserskih žarkov. V direktni povezavi z njimi so porazdelitve intenzitete. Iz rodu laserskega žarka lahko sklepamo na premer žarka, divergenco, premer v gorišču in globino gorišča, geometrijo in porazdelitev intenzitete. Za obdelavo (rezanje, varjenje) uporabljamo žarke z redom TEM₀₀, ki ima intenziteto razporejeno po Gaussovi distribuciji.



Slika 3: Redovi laserskega žarka (Ready, 1997, str. 10)

Laserji lahko delujejo kontinuirano ali v bliskih (impulzih), kar v običajnih svetlobnih virih ni mogoče. Tako se delovanje skoncentrira v kratke impulze reda velikosti nanosekunde, pri katerih sunki moči lahko dosežejo 10^{12} W in več (Chryssolouris, 1991).

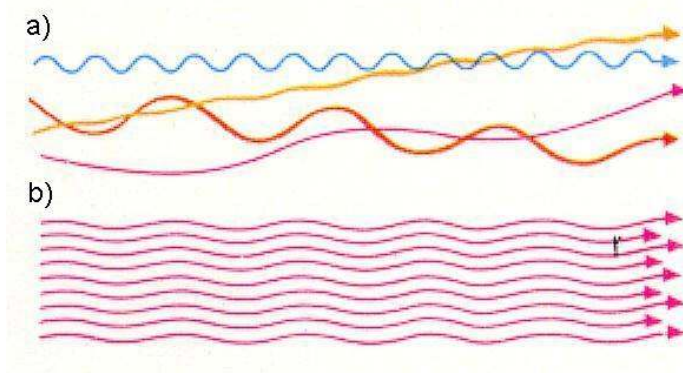


Slika 4: Časovna razporeditev laserske moči v primeru kontinuiranega (a) ali pulznega delovanja (b), (Chryssolouris, 1991, str. 41)

Moč je glavna in najenostavnejša značilnost določenega laserskega sistema. Laserski sistemi z manjšo močjo, bodo za opravljanje določene operacije praviloma potrebovali dalj časa. Običajno večje moči laserjev pomenijo večje rezalne hitrosti, s tem pa se zmanjšajo izdelavni časi. Seveda se z večjo uporabljenjo močjo stroški dela povečajo. Moči laserjev, ki delujejo kontinuirano segajo od manj kot 1 mW do približno 20 kW pri komercialnih in do več kot 1 MW pri posebnih vojaških laserjih.

Laserji so pri spreminjanju vstopne energije v lasersko svetlobo relativno neučinkoviti. Njihov izkoristek se giblje od nekaj pa do 50 %. Zaradi tako majhnega izkoristka pa je dostikrat potrebno laserje hladiti.

Značilnost laserske svetlobe je zelo ozek svetlobni curek in koherentna svetloba velike energije. Kot pod katerim se laserski žarek širi znaša približno 1mrad, to pomeni, da se na razdalji 1 km curek razširi na 1m.



Slika 5: Grafični prikaz nekoherentne svetlobe (a) in koherentne svetlobe (b), (Chryssolouris, 1991, str. 25)

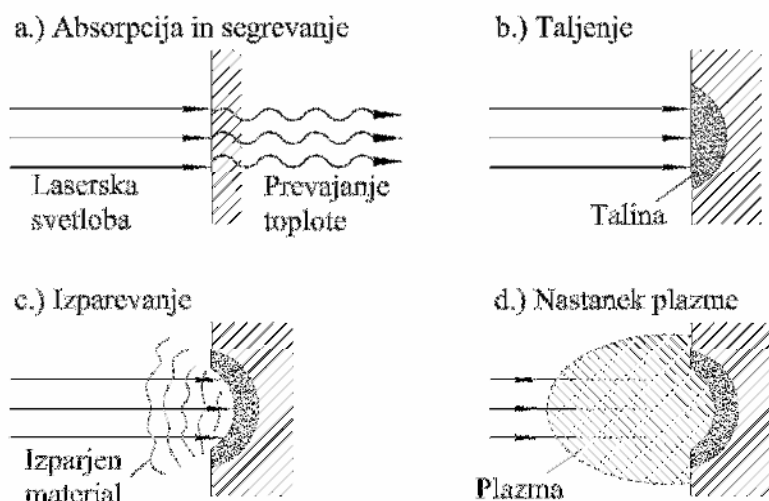
Zmožnost materiala, da absorbira določeno svetlobo, je odvisna od valovne dolžine svetlobe, zato je potrebno pri izbiri laserja upoštevati ta parameter (Chryssolouris, 1991).

Kot najbolj značilno in najbolj pomembno lastnost laserske svetlobe pa je možnost fokusiranja svetlobe v zelo majhno točko. Za fokusiranje žarka sta potrebna dva pogoja in sicer, da je svetloba monokromatska (enobarvna) ter vzporedna. Tipični premer fokusirane točke je 0,3 mm, kar pri moči laserja 1kW, pomeni povprečno gostoto energije $1,4 \times 10^{10} \text{ W/m}^2$ (Chryssolouris, 1991).

2.3.3 Interakcija laserske svetlobe s snovjo

Del laserske svetlobe, ki pade na površino obdelovanca se odbije, drugi del pa obdelovanec absorbira, kar ima za posledico različne efekte v materialu kot so dvig temperature obdelovanca, lokalno taljenje, uparjevanje in nastanek plazme. Naštete efekte lahko z ustrezno manipulacijo delovnih parametrov uporabljamo v tehnološke namene za termično obdelavo kovin, varjenje, rezanje, luknjanje, graviranje in označevanje (Ready, 1997).

Interakcijo laserske svetlobe s snovjo spremljajo različni fizikalni pojavi. V začetni fazi se svetlobna energija laserskega žarka pretvori v toplotno energijo. To se zgodi zelo hitro, v času pod 10^{-13} s. Toplota se v nadaljevanju širi v material s prevajanjem, zato je tukaj bistvenega pomena toplotna prevodnost materiala. Ko temperatura površine doseže tališče, se prične meja taline pomikati v notranjost, tako kot je prikazano v zgornjem desnem delu slike 6. Ob nadaljevanju obsevanja prične talina izparevati (spodnji levi del slike 6) in prične se vrtanje luknje v material. Če je intenziteta dovolj visoka, se del sevanja absorbira v odparjenem materialu, kar privede do nastanka vroče, neprozorne plazme. Plazma se lahko razširi nazaj proti laserju, pri tem absorbira svetlobo in zasenči površino obdelovanca, kar prikazuje spodnji desni del slike 6 (Ready, 1997).

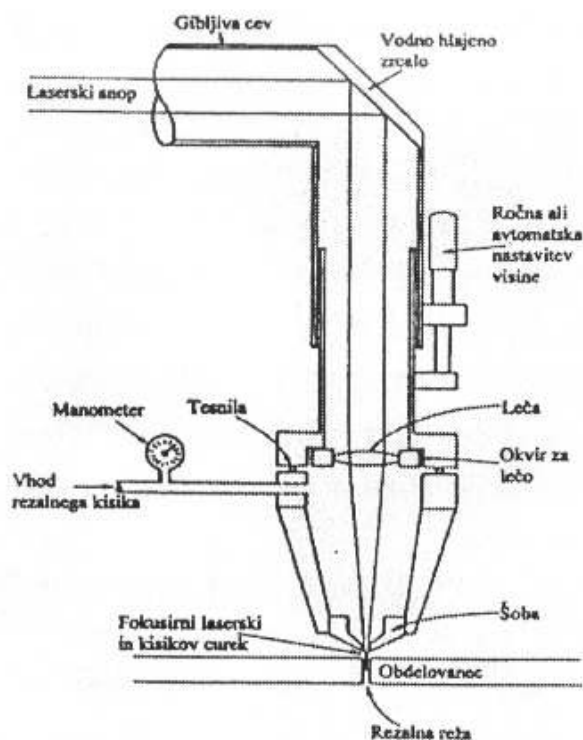


Slika 6: Prikaz fizikalnih procesov, ki spremljajo interakcijo laserske svetlobe s snovjo (Ready, 1997, str. 14)

Proces laserskega rezanja dobimo, ko naštetim efektom interakcije laserskega žarka in obdelovanca dodamo še njuno medsebojno relativno gibanje. Sekundarni parameter, ki spremlja skoraj vsak proces laserskega rezanja je še pomožni plin, ki ima nalogo, da izpihuje staljeni material iz reže, odnaša pare, poleg tega pa lahko služi še kot oksidant (pri kovinah vpihujemo kisik, ki povzroča eksotermne reakcije) ali inertni plin (pri nekovinah, ki so lahko gorljive).

Osnovni princip laserskega rezanja je zelo preprost in ga lahko povzamemo v nekaj točkah (Powell, 1993):

- visokoenergijski infrardeči žarek, ki ga omogoča laser,
- žarek je s pomočjo leč fokusiran v majhno točko na površini elementa,
- fokusirani žarek segreva površino materiala in povzroča zelo lokalizirano taljenje skozi celotno debelino materiala,
- raztaljeni material izločamo s pomočjo pomožnega plina, ki ga dovajamo skozi šobo soosno z laserskim žarkom,
- lokalizirano območje odstranjevanja materiala se pomika po površini tako, da se premika laserski žarek ali, da se premika obdelovanec in tako dobimo proces rezanja materiala.



Slika 7 : Shematski prikaz laserskega rezanja (Powell, 1993, str. 32)

Vzrok, da se je laserska obdelava uveljavila in se vedno bolj uveljavlja so nekatere bistvene prednosti pred klasičnimi načini obdelave (Powell, 1993):

- obdelava poteka brez dotika orodja in obdelovanca,
- toplotno prizadeta površina je zelo majhna,

- možnost obdelave različnih materialov,
- možnost obdelave zelo trdih in zelo mehkih materialov,
- velike rezalne hitrosti in
- delovanje z minimalnih hrupom.

Laserji v industriji, so se v začetku največ uporabljali za obdelavo jekel, manj pa za obdelavo barvnih kovin, zaradi njihove velike svetlobne odbojnosti in toplotne prevodnosti. Nekovine v splošnem bolje absorbirajo lasersko svetlobo, težave pa lahko nastopajo zaradi velikega števila kemijskih reakcij, ki spremljajo proces. Snovi, predvsem pa plini, ki iz teh reakcij izhajajo, so lahko zdravju škodljivi ali pa povzročajo nezaželene spremembe na obdelovanem materialu. Zaradi vsega naštetega, je v primeru nekovinskih materialov, težje priti do sklepov na podlagi teorije in eksperimentov (Powell, 1993).

Ne glede na vrsto ali skupino materiala, ki ga želimo obdelovati, ima lasersko rezanje pred konvencionalnimi metodami (mehansko, plazemsko, plinsko in rezanje z vodnim curkom) naslednje prednosti (Powell, 1993):

- minimalna izguba materiala,
- minimalna priprava obdelovanca,
- ni obrabe in zamenjave orodij,
- zelo kvalitetni robovi tudi pri visokih rezalnih hitrostih,
- celotna temperaturna obremenitev obdelovanca je majhna,
- ni mehanskih obremenitev površine,
- minimalne količine odpadkov,
- možne so zapletene oblike rezanja,
- možno je rezati predhodno utrjene materiale,
- rezati lahko začnemo kjerkoli na obdelovancu,
- proces je v celoti računalniško krmiljen ter
- večja varnost pri delu.

2.3.4 Vrste laserjev

Laserska snov je lahko trdna, plinasta in tekoča. Teh laserskih snovi je zelo veliko in so med seboj zelo različne. Iz teh snovi pa nekatere izstopajo, ki kot laserske snovi delujejo najboljše. Glede na to, lahko laserje delimo na (Ready, 1997):

- plinski laserji,
- trdninski laserji,
- polprevodniški laserji in
- barvilni laserji.

Podrobneje so opisane le vrste laserjev, ki smo jih na kakršenkoli način uporabljali pri izdelavi naloge.

2.3.4.1 Plinski laserji

Laserji, ki uporabljajo plinsko snov kot aktivno lasersko snov, so postali zelo pogosti. Bistvene prednosti plinskih laserjev pred trdninskimi in polprevodniškimi so (Ready, 1997):

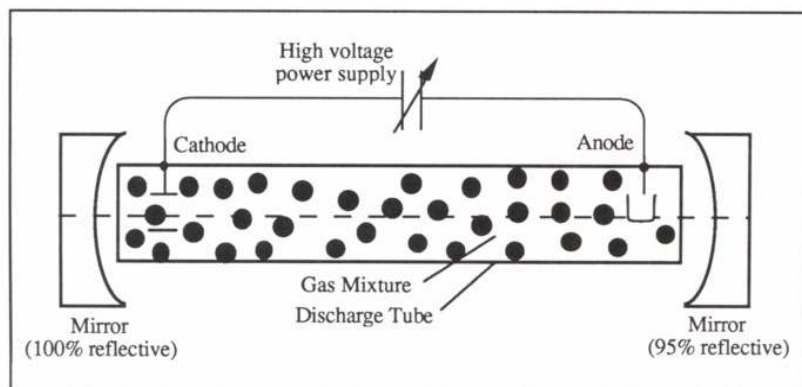
- da je lahko prostornina aktivnega materiala velika,
- snov je relativno poceni,
- ni nobene možnosti poškodbe aktivne snovi,
- snov je homogena,
- toploto lahko enostavno oddajamo s pretakanjem plina iz območja laserskega delovanja in
- visoke izhodne moči.

Plinske laserje delimo na (Ready, 1997):

- nevtralne plinske laserje (helij – neon laser),
- ionske plinske laserje (argon laser),
- molekulske plinske laserje (ogljikov dioksid),
- ekscimerne laserje (kriptonov fluorid) in
- laserje na kovinske pare (bakrove pare).

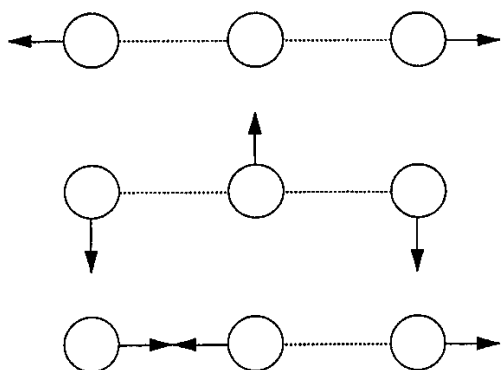
2.3.4.1.1 CO₂ laser

Do sedaj obravnavani laserji delujejo na osnovi izkoriščanja energijskih stanj, ki so značilna za prehode elektronov. Ta energijska stanja ustrezajo prehodom elektronov iz enega energijskega stanja v atomu oziroma ionu na drugo možno energijsko stanje. Poleg teh obstajajo tudi druga pomembna energijska stanja, ki niso povezana s prehodi elektronov v notranjosti atomov. To so nihajna in rotacijska energijska stanja molekul. Po zakonih kvantne mehanike sta nihajna in rotacijska energija kvantizirani, zato obstaja spekter odgovarjajočih diskretnih energijskih stanj. V primeru, ko pride do obrnjene zasedbe med nihajnimi in rotacijskimi energijskimi stanji, lahko nastane laserska svetloba (Ready, 1997). To je princip delovanja CO₂ laserja.



Slika 8: Shematski prikaz CO₂ laserja (Chryssolouris, 1991, str. 28)

Kot aktivni medij te vrste laserja uporabljajo plin ogljikov dioksid (CO_2). Molekula CO_2 je linearna molekula s tremi atomi, postavljenimi v ravni liniji. Srednji atom je atom ogljika. V tej molekuli se lahko pojavijo trije različni načini nihanja atomov (slika 9).



Slika 9: Načini nihanja atomov pri CO_2 laserjih (Ready, 1997, str. 9)

Puščice nakazujejo trenutni odmik atomov iz njihovih ravnotežnih leg, ki so označene s krogi. Gibanje atomov je harmonično. Pri prvem načinu nihanja ogljikov atom miruje, kisikova atoma pa se gibljeta v nasprotnih si smereh vzdolž simetrale. Pri drugem načinu nihanja, je gibanje atomov podobno upogibanju molekule, pri katerem se vsi atomi gibljejo v določeni ravnini, pravokotno na simetralo. Ogljikov atom se giblje v eni smeri, medtem, ko se kisikova atoma gibljeta v nasprotni smeri. Tretji način nihanja pa je asimetričen. Vsi atomi v molekuli se gibljejo vzdolž simetrale. V vsakem trenutku se ogljikov atom giblje v nasprotni smeri od kisikovih atomov. Energija, ki je povezana z različnimi načini nihanja je kvantizirana. Označba, ki označuje energijska stanja ima obliko ij^1k , kjer so i , j in k cela števila, ki označujejo kvant nihajne energije v vsakem od treh zgoraj opisanih nihajnih načinov. Celo število i ustreza simetričnemu načinu, j upogibnemu in k asimetričnemu načinu nihanja. Nadpis 1 je dodatno kvantno število, ki je prisotno, ker se upogibni način nihanja lahko pojavi v dveh medsebojno pravokotnih smereh. Na primer stanje 10^0 predstavlja stanje z enim kvantom energije simetričnega nihanja. V drugih načinih nihanja ni prisotnih kvantov nihajne energije (Ready, 1997).

CO_2 laserji lahko uporabljajo kot aktivni medij plinsko mešanico ogljikovega dioksida, dušika in helija, čeprav jih na splošno imenujemo CO_2 laserji. CO_2 laser je znan po relativno visokem izkoristku spremembe električne energije v optično energijo (10 – 30%) v primerjavi z večino drugih laserjev (0,1 – 3%). CO_2 laserji lahko delujejo kontinuirano, lahko pa tudi impulzno. Izhodne moči so zelo različne od 50 – 45000W (Ready, 1997).

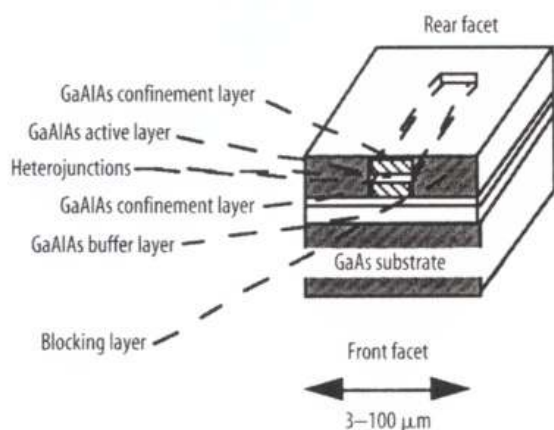
CO_2 laser smo uporabili pri razrezovanju vlaknenih plošč.

2.3.4.2 Polprevodniški laserji

Polprevodniški laserji ali laserske diode se po strukturi dokaj razlikujejo od plinskih ali trdninskih laserjev. Princip delovanja je opisan pod poglavjem injekcijskega laserja, ki je tipičen predstavnik te skupine laserjev.

2.3.4.2.1 Injekcijski laser

Injekcijski laser je posebna vrsta trdnega laserja. Osnova injekcijskega laserja je pojav, da se pri polprevodniških diodah pod posebnimi pogoji pojavijo v mejni plasti elektronski prehodi, ki oddajajo koherentno svetlobno delovanje. Laserski efekt je odvisen od toka, ki teče skozi mejne plasti in sestave polprevodniški diod. Laserski efekt je najmočnejši pri mešanih kristalih 3. in 5. skupine periodnega sistema elementov (npr. GaAs, InP, InSb), (Steen, 2003).



Slika 10: Shematski prikaz injekcijskega laserja (Steen, 2003, str. 32)

Laserski efekt nastane v mejni plasti med dvema deloma kristala z različno prevodnostjo. V enem delu skrbijo za električno prevodnost kvaziprosti elektroni (n), v drugem pa je električna prevodnost posledica pomanjkanje elektronov (p). Mesta, kjer manjka elektron, imenujemo vrzel, pri prevajanju električnega toka pa govorimo o prevajanju z vrzelmi. Mejno ploskev med deloma p in n imenujemo pn-spoj.

Laserski žarek je posledica združevanja (rekombinacije) elektronov iz n – področja in vrzeli iz p – področja (slika 10).

Ko iz zunanega vira napetosti spustimo tok skozi diodi, se znatno zveča število elektronov, ki imajo večjo potencialno energijo. To energijo pa oddajajo delno pri združevanju v obliki fotonov, delno pa jo oddajo v obliki toplote (Steen, 2003).

Laserski efekt še znatno ojačimo z zrcali, kjer je zadnje zrcalo nepropustno prednje pa polprepustno, tako da ojačena koherentna laserska svetloba lahko izstopa le v eni smeri.

Polprevodniški tip laserja smo uporabili za merjenje širine laserskega reza in merjenje nastale površine reza.

2.3.5 Primeri laserskega rezanja nekovin

Ker smo preučevali rezanje lesa z laserjem, bom predstavil nekatere podatke, ki jih zasledimo v literaturi, za rezanje lesa in vlaknenih plošč (MDF). Za vse podatke v preglednici 2 velja, da se je kot pomožni plin uporabljal zrak pod tlakom 3 – 10 bar in premer šobe 1 – 2 mm.

Preglednica 2: Podatki o optimalnih parametrih za rezanje lesa in lesnih kompozitov s CO₂ laserskim sistemom (Powell, 1993, str. 110)

material	debelina (mm)	rezalna hitrost (m/min)	moč (W)
Daglaška jelka	10	3,5	500
Bukev	10	4	500
Hrast	10	2,9	500
Vezana plošča	6	7	1000
Vezana plošča	12	3	1000
Vezana plošča	20	1,5	1000
MDF	6	9	1000
MDF	12	4	1000
MDF	20	2	1000
Iverna plošča	3	10	500
Iverna plošča	4	7	500

Večina nekovinskih materialov ima povečane absorpcijske lastnosti zato ni naključje, da je prva znana komercialna uporaba CO₂ laserja, rezanje utorov v matrične šablone iz vezanega lesa za embalirno industrijo. Prihranki materiala v primerjavi z mehanskimi metodami so precejšnji, zmanjša pa se tudi čas rezanja od 10 do 50%. Širine reza znašajo med 0,2 in 2 mm (Powell, 1993).

Celulozne materiale, kor so les, lesnit in papir, režemo podobno kot duroplaste z mehanizmom kemičnega razpada. Temperature v coni rezanja so običajno od 2000 – 3000°C, odvisno od gostote materiala. Rezalne hitrosti so odvisne od laserske moči in lastnosti materiala kot so: debelina materiala, količina vode na enoto volumna in količina zraka na enoto volumna. Debelina lesa ima velik vpliv na učinkovitost laserja, saj se ta niža z naraščajočo debelino lesa, kar pripisujejo predvsem zmanjšani učinkovitosti plinskega curka. Curek je namreč omejen samo s treh strani, odbije se od prednjega roba reže in uide nazaj po odprtini s čimer se zmanjša njegova možnost izplakovanja staljenega materiala. Proti spodnji strani rezane plošče pa se prednji rob vse bolj nagiba, kar povzroča še dodaten odboj curka (Powell 1993).

Zrak, ki se nahaja v lesu sam po sebi ne vpliva na rezalne hitrosti in ga obravnavamo kot luknje v materialu. Voda pa v primeru, da uporabljamo CO₂ lasersko svetlobo, med procesom zavre in izpari, kar zmanjšuje hitrosti rezanja. Zaradi velikega vpliva vode, je težko sestaviti tabele optimalnih rezalnih hitrosti za posamezne vrste lesa (Powell, 1993).

Z laserskim rezanjem lesa zlahka dosežemo robove, ki so pravokotni na osnovno ploskev, večino ogljikovih ostankov – črnih robov, pa lahko saniramo s krpo, že z minimalnim brušenjem pa jih popolnoma odstranimo.

Lesni kompoziti kamor spadajo, vezan les, iverne in vlaknene plošče in podobno, so veliko bolj homogeni kot les v svoji naravni obliki. Posledica tega so večje rezalne hitrosti in boljša kvaliteta rezanja. Ugotovljeno je tudi, da na rezalno hitrost pri rezanju lesnih kompozitov, močno vpliva tudi vrsta uporabljenega lepila. Kompozite, ki so zlepljeni z urea – formaldehidnim lepilom, lahko režemo tudi s trikrat večjo rezalno hitrostjo, kot kompozite zlepljene s fenol – formaldehidnim lepilom (Chryssolouris, 1991).

2.3.6 Obratovalni stroški

Pri vseh laserjih nastajajo obratovalni stroški. Med obratovalne stroške štejemo stroške za elektriko, hladilna sredstva, pline in tudi stroške popravil in vzdrževanja komponent, katerim se poslabšajo lastnosti ali se poškodujejo. Pri He – Ne laserjih so obratovalni stroški nizki in znašajo nekaj penijev na uro. Pri laserjih, s katerimi je možna obdelava materialov, kot so CO₂ laserji ali Nd: YAG laserji, obratovalni stroški znašajo nekaj dolarjev na uro. Obratovalni stroški laserjev z zelo visokimi močmi, pri katerih lahko pride do optičnih poškodb komponent pa so lahko zelo visoki (Ready, 1997).

Uporabnik mora za vsak laserski sistem posebej oceniti stroške. Pri tem mora upoštevati stroške vzdrževanja, stroške možnih periodičnih zamenjav izrabljenih delov in vseh potrošnih materialov. Ta procedura je osnova za ekonomsko analizo uporabe laserja v industriji (Ready, 1997).

2.3.7 Varnost pri delu

Dejstvo je, da je vsaka oblika energije nevarna. Laserska energija pri tem ni izjema, vendar vsebuje nenavadno obliko nevarnosti v obliki optičnega snopa. Na srečo do sedaj zabeležene nesreče pri delu z laserjem niso pogoste, so pa se dogajale. Tveganje je manjše, če je nevarnost zaznana (Steen, 2003).

Glavne oblike nevarnosti pri delu z laserjem so: poškodbe oči, poškodbe kože, električni udar in nevarnost zaradi izhajanja par (Steen, 2003).

Ne smemo pozabiti, da je laserska svetloba prav tako svetloba in da so bila človeška bitja vedno izpostavljena svetlobi. Zato pri tem nimamo opravka z neznanimi ali skrivnostnimi učinki. V osnovi se torej nevarnosti, ki izhajajo iz laserske svetlobe, ne razlikujejo od nevarnosti, ki izhajajo iz drugih izvorov svetlobe z visoko intenziteto. Z dobro zasnovanim varnostnim programom, so možne nevarnosti za poškodbe z laserjem v industriji zmanjšanje na minimum.

Tveganja so zmanjšana z uvedbo standardov, ki so jih sprejele različne organizacije in oblasti. Večina držav je sprejela svoje sklope standardov, nedavno pa so organizacije s področja laserske tehnike predlagale skupni nastop z enim samim sklopom standardov. Varnostni predpisi imajo dva vidika: zahteve za proizvajalca in zahteve za uporabnika. Predpisi lahko zavezujejo k upoštevanju podanih standardov, kar je lahko uporabljeno na sodišču pri ugotavljanju odgovornosti v primeru nesreče (Steen, 2003).

Tehnični komite št. 76 Mednarodne elektrotehnične komisije (International Electrotechnical Commission) je sprejel osnovni standard, iz katerega so se razvili mnogi drugi; to je IEC 825-1 (1993). Izvorna verzija je bila napisana leta 1984 in dopolnjena leta 1990. Ta standard obravnava tako zahteve za proizvajalca, kot tudi za uporabnika ter se nanaša tako na laserje, kot tudi na svetilne diode (LED). Standard je zdaj nekoliko zastarel in je bil dopolnjen (Steen, 2003).

Evropska organizacija za standardizacijo v elektrotehniko (CENELEC) je standard IEC 825 sprejela leta 1992 kot evropski standard EN 60825. Standard EN 60825-1, ki je identičen standardu 825-1, je bil sprejet leta 1994 in dopolnjen leta 1996 s čimer je bil spremenjen preveč konzervativen pristop, ki je omejeval proizvajalce diod LED ter uporabnike. Zdaj se za certificiranje izdelkov v Evropi uporablja le standard EN 60825-1. Ta standard zamenjuje vse druge standarde s področja varnosti laserjev v državah EU in EFTA (Steen, 2003).

V ZDA je Ameriški narodni inštitut za standardizacijo (ANSI) izdal ANSI Z-136.1-1993. Ta se od zahtev IEC razlikuje predvsem po označevanju, omejitvah razreda 1, varnostnih ključavnicah, kriterijih merjenja in stranskem sevanju (Steen, 2003).

Ta standarda sta se razvila v naslednjo generacijo, kjer je manj razlik med zahtevami evropskega EN 60825-1:2001 in ameriškega standarda ANSI Z136.1-2000. Velike spremembe so sprejete za laserje razreda 3. Standarda sta veljavna za vse laserje in izvore LED (Steen, 2003).

Obdelava materiala s pomočjo laserskega snopa je posebej obravnavana s strani Evropske organizacije za standardizacijo (CEN) in Mednarodne organizacije za standardizacijo (ISO). To je del obveznih zahtev za stroje: Smernica za strojogradnjo (ISO 11553 »Varnost strojev – Naprave za obdelavo z laserskim snopom – Varnostne zahteve« (1996), izdano s strani ISO v Švici. Zahteve so podane še v EN 292 del 1 in 2 »Varnost strojev« in ISO/Tr 12100:1992, del 1 in 2 »Varnost strojev«), (Steen, 2003).

Ti standardi podajajo navodila in pravila v zvezi s krmilnimi napravami, napotke za osebno varnostno opremo, administrativni nadzor, nadzor postopkov ter posebni nadzor. Sistemi z laserskim izvorom razreda 4, kar so skoraj vsi sistemi za obdelavo materiala, morajo imeti tudi pooblaščenca za varnost (LSO – Laser Safety Officer), ki mora preverjati upoštevanje teh varnostnih zahtev. Ob upoštevanju teh pravil bo uporaba laserskih naprav varna. Neupoštevanje lahko vodi do nezgode (Steen, 2003).

3 MATERIALI IN METODE

3.1 ZASNOVA EKSPERIMENTA

Zasnova eksperimenta je temeljila na vprašanjih, ki smo si jih postavili in sicer, kakšni so optimalni parametri laserskega rezanja vlaknenih plošč, kakšna je maksimalna hitrost pomika laserske glave, pri kateri bo kvaliteta reza še vedno zadovoljiva, vpliv pomožnega laserskega plina na kvaliteto reza in kako debelina vlaknenih plošč vpliva na kvaliteto reza.

3.2 MATERIALI

3.2.1 Vlaknena plošča

Za izvajanje poskusov smo uporabili vlakneno ploščo srednje gostote (650kg/m^3), ki je bila izdelana po suhem postopku. Plošča je bila zlepljena z urea – formaldehidnim lepilom in bila namenjena za splošno uporabo oziroma v pohištvene namene.

Iz vlaknene plošče formata 2500×2050 mm smo izrezali preskušance dimenzij približno 800×400 mm za razrez v lamele in preskušance dimenzij približno 500×500 mm za spiralni rez. Da bi s poizkusi ugotovili kako debelina vlaknene plošče vpliva na rezanje z laserjem, smo uporabili vlaknene plošče treh različnih debelin in sicer 6, 10 in 16 mm.

3.2.2 Laserski sistem

Za lasersko rezanje vlaknene plošče smo uporabili laser znamke LVD, ki ga uvršamo v skupino CO_2 laserjev.

Njegove osnovne značilnosti so:

Preglednica 3: Podatki o uporabljenem laserju

tip	plinski laser
valovna dolžina	10,6 μm
moč	10W – 20kW
delovanje	kontinuirano ali pulzno
izkoristek	pribl. 15 – 30%
natančnost	$\pm 0,025$ mm
hrapavost	2 – 25 μm
debelina obdelovanca	0,1 – 25 mm
širina reza	0,1 – 0,5 mm

3.3 METODE DE LA

3.3.1 Metoda spiralnega reza

Metoda spiralnega reza temelji na rotaciji obdelovanca ob sočasni interakciji z laserskim žarkom. Odrezujemo v obliki Arhimedove spirale. Ob sočasnem vrtenju preskušanca in interakcijo laserskega žarka, ki se je pomikal iz središča proti obodu preskušanca, lahko na enostaven način ugotovimo rezalno hitrost v vsaki točki rezanja. Torej je bistvena prednost spiralnega reza v tem, da lahko z enim samimi poizkusom, dobimo velik razpon rezalnih hitrosti.

Da smo omogočili rotacijo preskušancev smo za ta namen razvili posebno napravo. Naprava je sestavljena iz elektromotorja (12V), transformatorja, prenosa vrtilnega momenta in vpenjalnega koluta. Na ta kolut smo položili obdelovanec in ga na sredini vpeli. Z vklopom elektromotorja se je preskušanec začel vrteti. Hitrost vrtenja, od katere je bila odvisna tudi rezalna hitrost, smo nastavljali z reostatskim stikalom, ki je bilo priključeno na transformator. Laser je začel rezati v središču preskušanca in se pomikal proti obodu, s tem pa je naraščala tudi rezalna hitrost.

$$v = \omega \times r \times 60 \text{ [min}^{-1}\text{]} \quad \dots (1)$$

v ... rezalna hitrost v poljubni točki na spirali

ω ... kotna hitrost

r ... razdalja med središčem preskušanca in poljubno točko na spirali

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad \dots (2)$$

n ... število vrtljajev v minuti

S pomočjo teh enačb lahko enostavno izračunamo rezalno hitrost v vsaki točki na spirali.

Pri metodi spiralnega laserskega rezanja je prihajalo predvsem do težav s preskušanci, saj je prihajalo do krivljenja preskušancev in zato do neenakomernega in neravnega reza. Za natančnejšo analizo bi morali razviti novo zahtevnejšo napravo z vpetjem preskušancev na vsaj štirih mestih na obodu obdelovanca. Za enostavnejše in bolj natančno uravnavanje vrtljajev pa bi morali v prenos vrtilnega momenta dodati še reduktor.

Ker bi nam razvijanje take naprave vzelo zelo veliko časa in za podrobnejšo analizo potrebujemo bolj kvaliteten rez smo se odločili, da opravimo preskušanje po metodi razreza preskušancev v lamele.

3.3.2 Metoda razrezovanja v lamele

Pri tej metodi smo uporabili devet preskušancev dimenzij približno 800x400 mm in treh različnih debelin (6, 10 in 16 mm).

S pomočjo računalnika smo izdelali program po katerem smo nato rezali preskušance. Na delovno mizo laserja smo položili preskušanec, laser postavili v začetni položaj in nastavili ustrezne parametre. Na podlagi izkušenj upravljavca laserja in podatkov iz dokumentacije laserskega sistema, ki smo ga uporabljali, smo se odločili, da uporabimo naslednje parametre:

Preglednica 4: Pregled uporabljenih parametrov za lasersko rezanje

št. plošče	moč (W)	frekvenca (Hz)	pomožni plin	tlak plina (bar)	fokus (mm)	debelina plošče (mm)
1	2000	1500	dušik	9,6	2	16
2	2000	1500	dušik	9,6	5	16
3	2000	1500	zrak	4,2	5	16
4	2000	1500	zrak	4,2	5	10
5	2000	1500	dušik	9,6	5	10
6	2000	1500	dušik	9,6	2	10
7	2000	1500	zrak	4,2	5	6
8	2000	1500	dušik	9,6	5	6
9	2000	1500	dušik	9,6	2	6

Pravokotno na vzdolžni rob plošče smo nato izdelali laserski rez z določeno rezalno hitrostjo. In sicer smo po dva reza, v medsebojni oddaljenosti 30 mm, izdelali z enako hitrostjo pomika laserske glave. Za vsaka naslednja dva reza smo nato hitrost pomika povečali za 500 mm/min. Hitrost smo stopnjevali od 1500 mm/min do 6500 mm/min, oziroma do trenutka, ko laserski žarek ni več prodril skozi preskušanec.

Položaj fokusa žarka pa smo spreminjali tako, da smo lasersko glavo približali oziroma oddaljili od preskušanca.



Slika 11: Izvedba laserskega reza na preskušancu debeline 16 mm

3.4 LASERSKI MERILNIK OBLIKE TELES

Širino laserskega reza na preskušancih smo ugotavljali s pomočjo merilne naprave temelječe na principu laserske triangulacije.

Sistem deluje na osnovi linijskega osvetljevanja površine, triangulacijske metode ter digitalne obdelave video slike. Laserski merilnik oblike teles prikazuje slika 12. Sestavljen je iz projektorja laserske črte, kamere z objektivom (s spremenljivo goriščno razdaljo), pomične mize in računalnika, ki iz video signala izračuna obliko profila. Računalnik hkrati krmili tudi pomično mizo in moč laserskih diod, s čimer je omogočeno zaporedno merjenje večjega števila profilov ter optimalno delovanje na površinah s spremenljivo optično odbojnostjo.

Obliko telesa merimo tako, da s kamero pod določenim kotom opazujemo lasersko črto, ki jo projiciramo na merjeno površino. Tako dobimo profil telesa na presečni ravnini $x-y$. S premikanjem telesa v z smeri s pomočjo pomične mize dobimo množico profilov, ki celovito opisujejo obliko telesa (Jezeršek, 2000).



Slika 12: Laserski merilnik oblike in ostala oprema

3.4.1 Merjenje širine reza

Ker smo pričakovali, da bo širina reza na zgornji in na spodnji strani plošče različna, smo vsak rez merili z obeh strani. Pred meritvijo smo morali vsak rez najprej postaviti v merilno območje laserja. Ker je imela naprava merilno območje manjše od celotne dolžine reza, je bilo potrebno izmeriti širino reza najprej od leve strani do polovice preskušanca, nato pa še od desne strani do sredine preskušanca. To pomeni, da smo za meritev širine enega reza potrebovali štiri meritve. Širina reza se je merila na osmih enakih odsekih. Vsak izmed teh odsekov je bil dolžine približno 45 mm. Za vsak rez smo tako dobili osem

podatkov o širini reza za zgornjo stran plošče in osem podatkov o širini reza za spodnjo stran plošče.

Vse te podatke je beležil in shranjeval PC računalnik. Na katedri za optodinamiko in lasersko tehniko, so izdelali računalniški program s katerim smo dobljene podatke obdelali in prevedli v številčno uporabno obliko. Pri merjenju širine rezov je naprava delovala v tolerančnem območju $\pm 0,01$ mm.

3.4.2 Analiza površine reza

Za analizo čelne površine reza smo uporabili enako napravo, kot za merjenje širine reza, pri čemer je bila uporabljena manjša optična povečava objektivna kamere. Delovanje in sestavni deli naprave so opisani v poglavju 3.4. Naprava je med meritvami površine reza delovala v naslednjih območjih natančnosti:

- natančnost v vertikalni smeri 0,02 mm
- natančnost v prečni smeri (Y) 0,03 mm
- natančnost v smeri skeniranja 0,5 mm

Lamele, ki smo jih izžagali iz preskušanca, smo vpeli v prijemalo tako, da je bil odrezan rob, postavljen pravokotno na laserski merilnik in kamero. Ker je bilo merilno območje naprave manjše, od dolžine lamel, smo vsako površino najprej merili od sredine proti levi strani lamele in nato še od sredine proti desni strani lamele. Na vsaki lameli smo merili oba čelna robova. Za merjenje dveh robov ene lamele je bilo tako potrebno izvesti štiri meritve. Vse meritve je beležil PC računalnik, ki je s pomočjo izdelanega programa kasneje tudi izračunal naslednje vrednosti:

- ukrivljenost površine reza (radij ukrivljenosti R),
- poševnost površine reza (kot poševnosti α) in
- hrapavost površine (srednje odstopanje profila R_a od srednje linije)

Že z bežnim pogledom je bila vidna ukrivljenost rezanih površin. Površine rezov so bile ukrivljene na dva načina: konkavno ali konveksno. Če je bila površina ukrivljena konveksno smo dobili pozitivno vrednost, če pa je bila ukrivljen konkavno, pa je bila vrednost negativna.

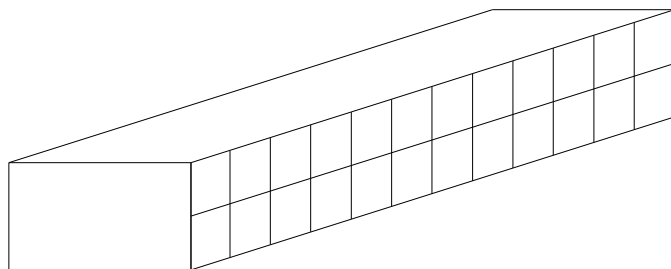


konveksna ukrivljenost

konkavna ukrivljenost

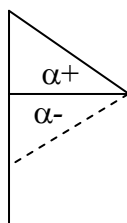
Slika 13: Shematski prikaz ukrivljenosti roba

Ukrivljenost površin rezov smo vrednotili s pomočjo merjenja radija ukrivljenosti R v milimetrih. V ta namen smo prečne profile površin aproksimirali s polinomi druge stopnje po metodi najmanjših kvadratov. Radij ukrivljenosti tako predstavlja ukrivljenost aproksimiranega polinoma na sredini robu. Merjenje radija ukrivljenosti smo merili na dvanajstih enako dolgih odsekih vzdolž lamele in sicer na sredini debeline lamele. Na vsakem izmed teh odsekov je bila kasneje izračunana povprečna velikost radija ukrivljenosti.



Slika 14: Razdelitev dolžine lamele pri merjenju poševnosti in ukrivljenosti površine rezanja

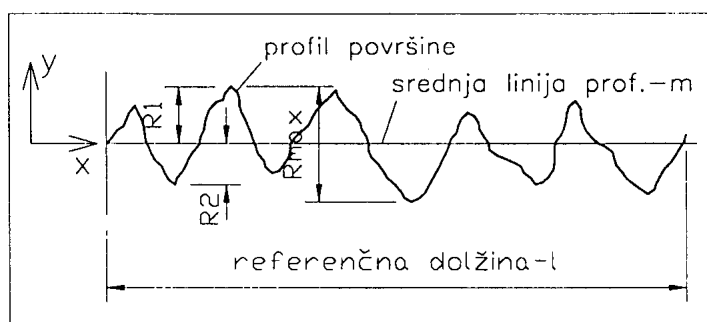
Poševnosti površin reza zgolj vizualno nismo mogli zaznati. Naše domneve o poševnosti roba so se s pomočjo meritev pokazale kot pravilne.



Slika 15: Shematski prikaz poševnosti roba

Poševnost robov smo označili z α in kot enoto uporabili stopinje. Poševnost je enaka nagibu aproksimiranega polinoma na sredini robu. Tudi poševnost robov smo merili na dvanajstih enako dolgih odsekih vzdolž lamele in sicer na sredini debeline lamele (slika 14). Iz teh meritev je bila nato na posameznem odseku izračunana povprečna vrednost, ki je predstavljena v rezultatih.

Pod besedo hrapavost površine razumemo mikromeometrijske nepravilnosti na površini predmeta, katerih dimenzije so večkratno manjše od dimenzij opazovanega dela površine (Medič, 2001).



Slika 16: Profil površine (Medič, 2001, str. 301)

Če posnamemo profil površine na določeni referenčni dolžini l , dobimo izhodišče za definiranje stopnje hrapavosti. Razmere so prikazane na sliki 16.

Profil površine vzdolž referenčne dolžine je naključna funkcija. Koordinatni sistem na sliki 16 je postavljen tako, da je abscisna os tudi srednja linija profila m . Tako lahko definiramo srednje odstopanje profila R_a od srednje linije, kot aritmetično oddaljenost profila od srednje linije (Medič, 2001).

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad \dots (3)$$

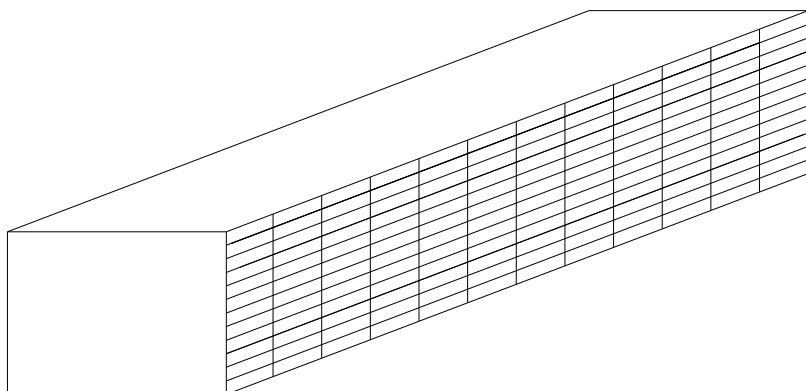
n ... število ekvidistančnih razdelkov na referenčni dolžini

y_i ... vrednost absolutne oddaljenosti profila od srednje linije profila

V našem primeru nismo merili srednjega odstopanja profila po zgornji enačbi, temveč smo uporabljali približno vrednost srednjega odstopanja profila od namišljene idealne linije.

$$R_a = \frac{1}{n} \int |y| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n |y_i| \quad \dots (4)$$

V naši analizi dejansko nismo merili velikosti R_a ampak smo iz izmerjenih vrednosti kasneje izračunali povprečne vrednosti R_a na posameznih odsekih. Te izračunane vrednosti pa smo predstavili v rezultatih meritev. Površina reza vsake lamele je bila po debelini in dolžini lamele razdeljena na dvanajst enako velikih odsekov. Na vsakem izmed teh odsekov je bila izračunana povprečna hrapavost (slika 17). Pomembno je omeniti, da so vrednosti na posameznem debelinskem odseku izračunane kot povprečne vrednosti na celotni dolžini lamele.

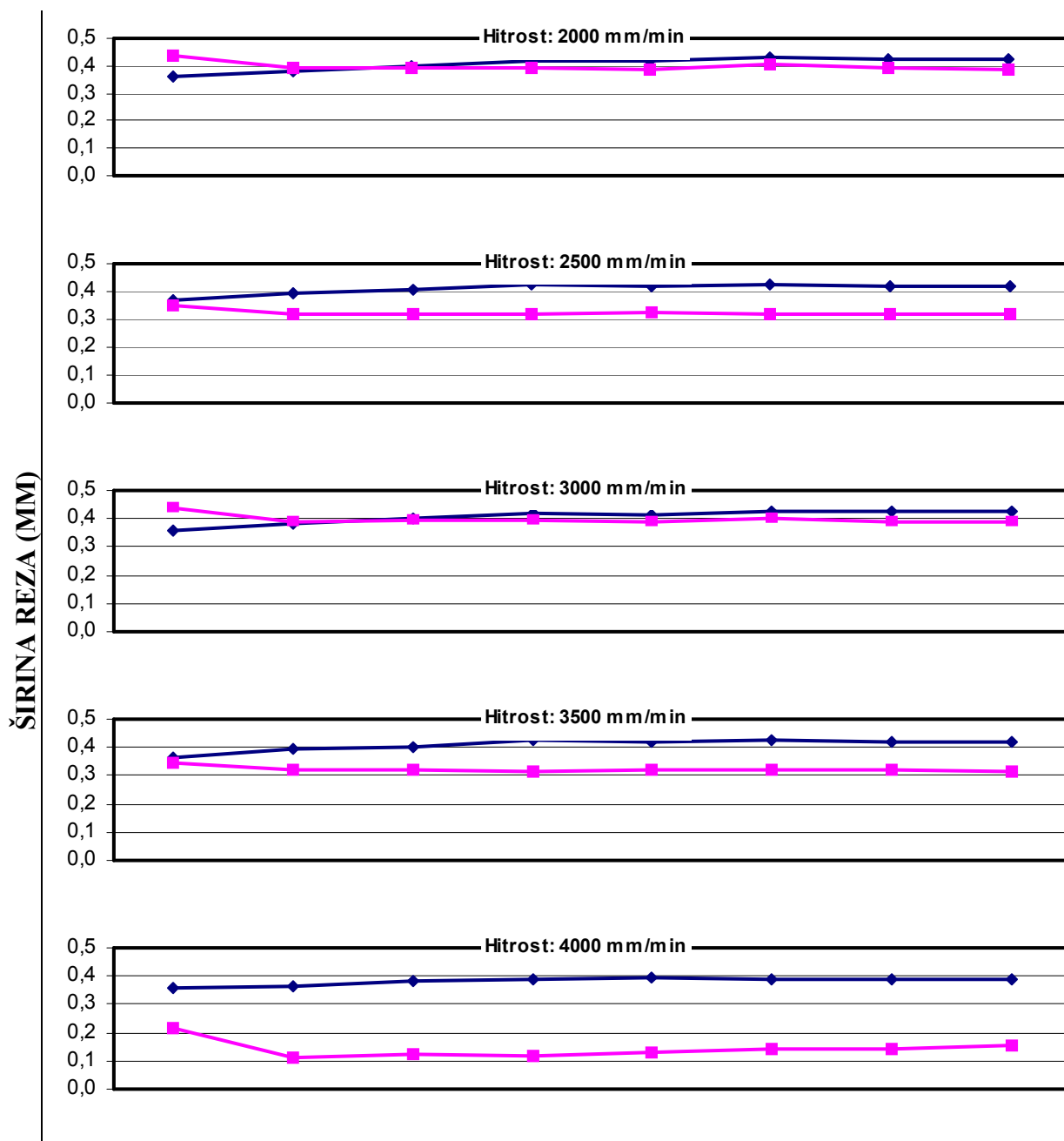


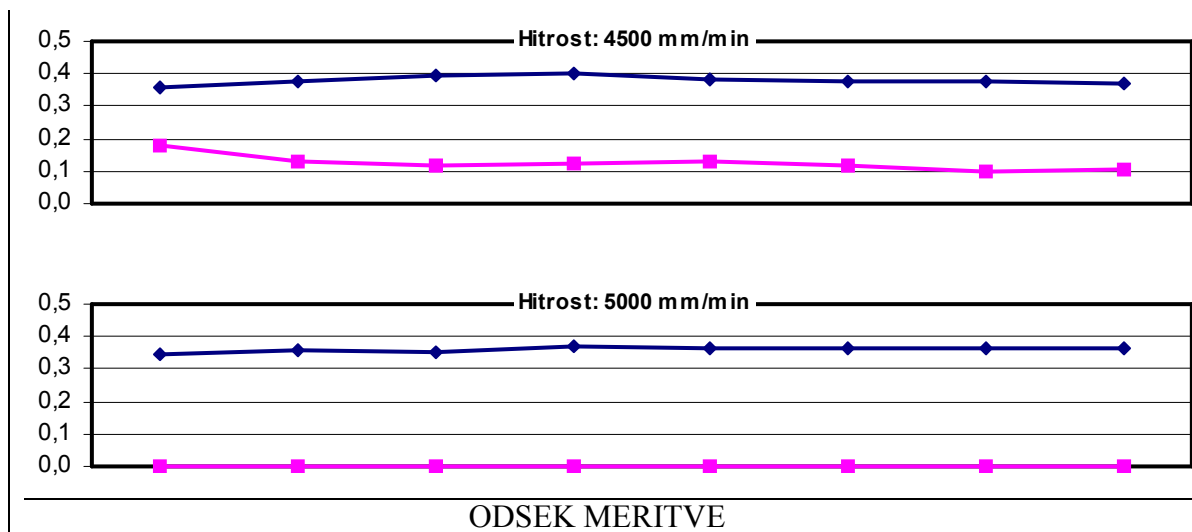
Slika 17: Razdelitev debeline lamele pri merjenju hrapavosti površine rezanja

4 REZULTATI

4.1 ŠIRINA REZA

Na slikah od št. 18 do št. 26 so predstavljene povprečne širine rezov na posameznih odsekih, na vsaki plošči posebej. Uporabljeni parametri za posamezno ploščo pa so predstavljeni v preglednici št. 4.

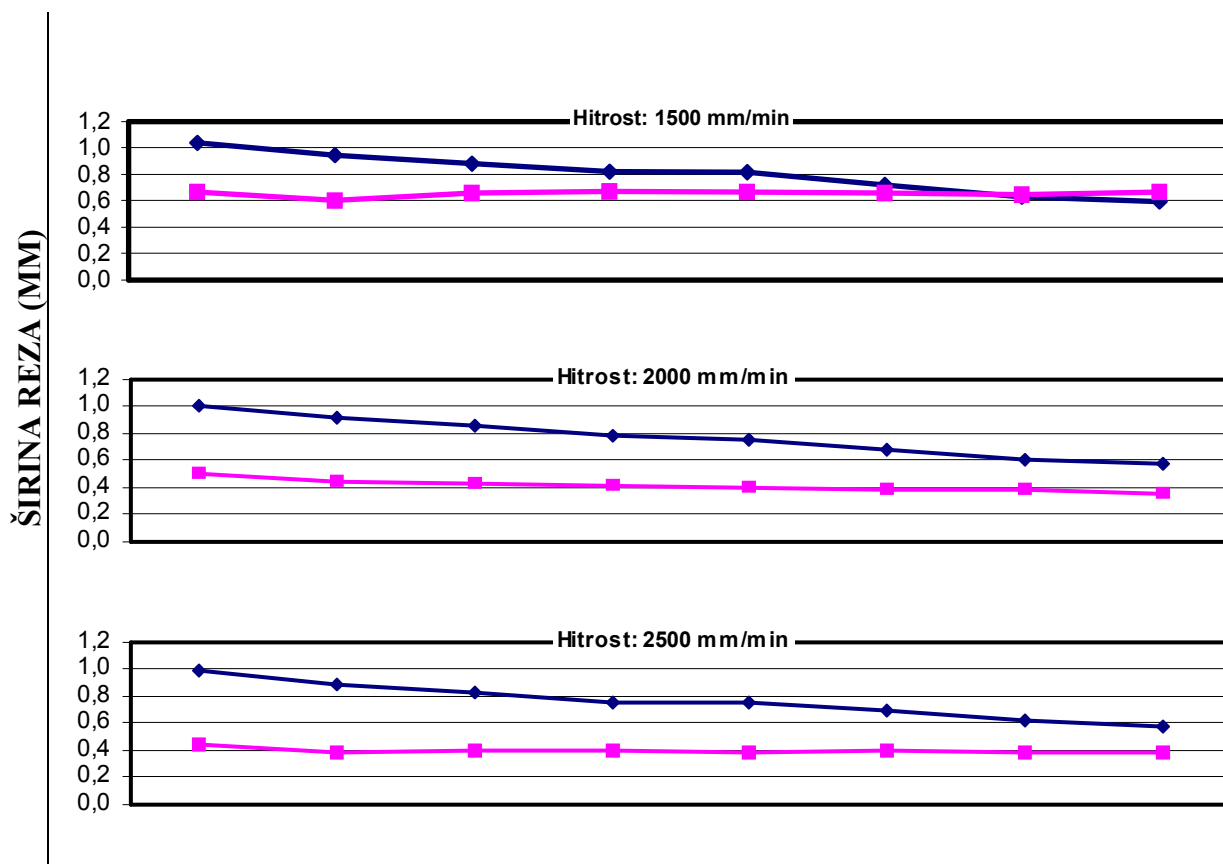


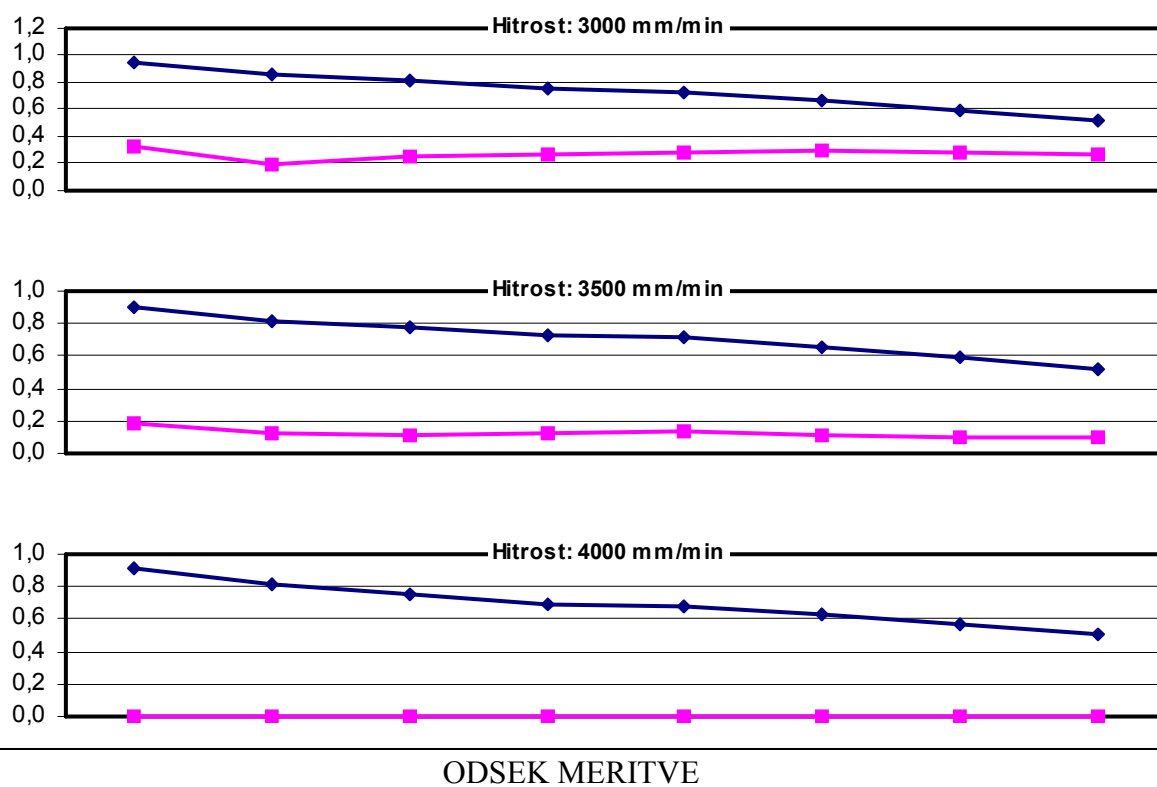


zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

Slika 18: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 1

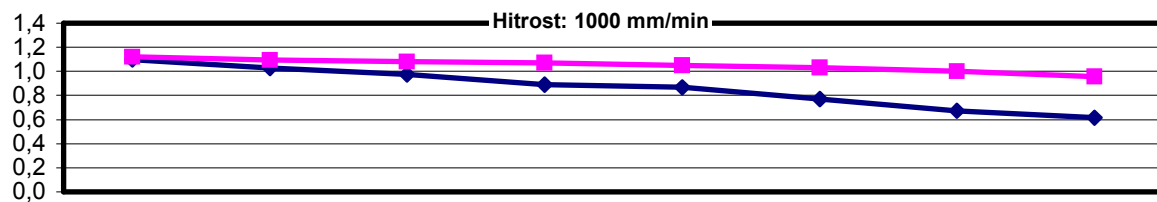


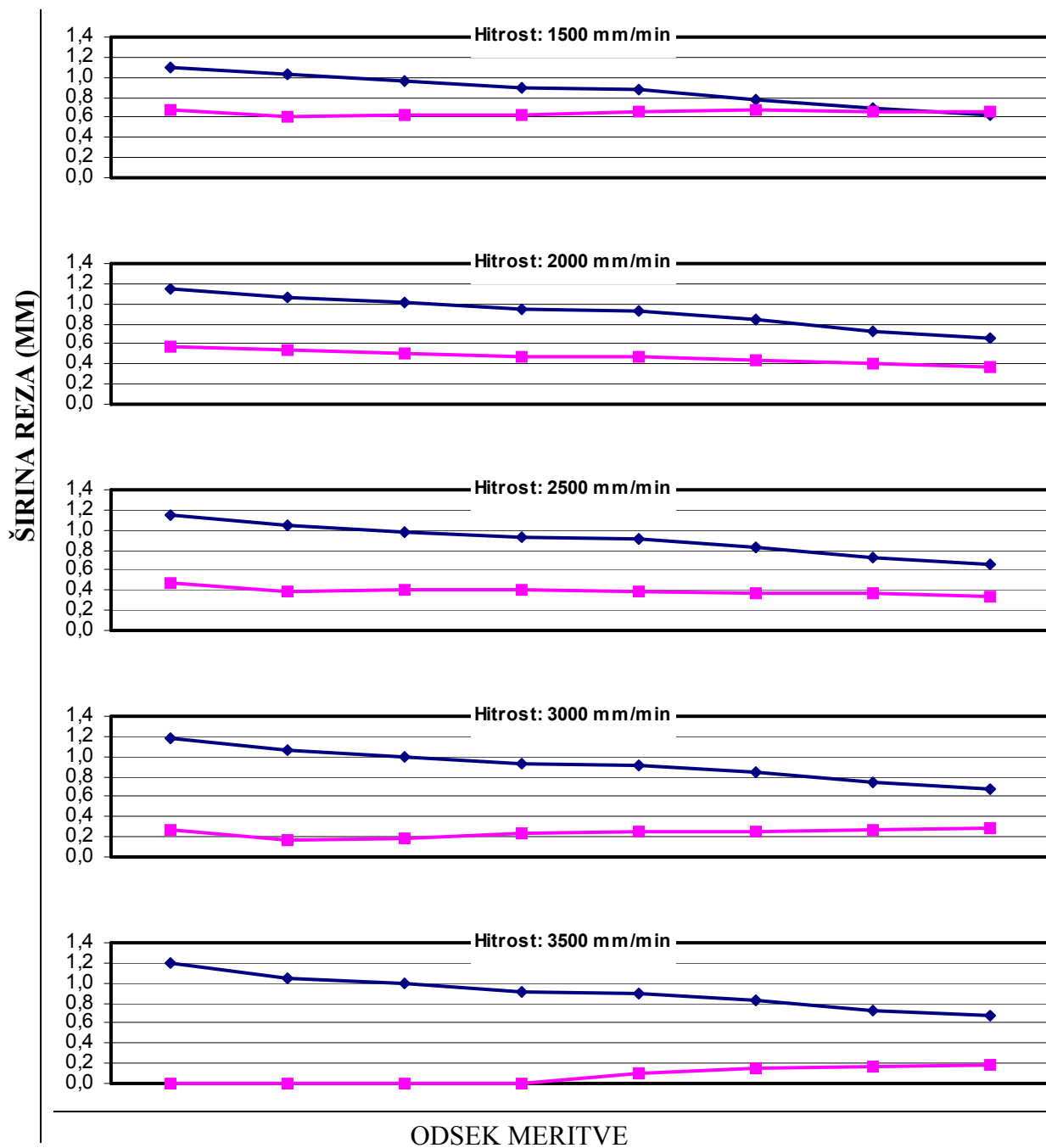


zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

Slika 19: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 2

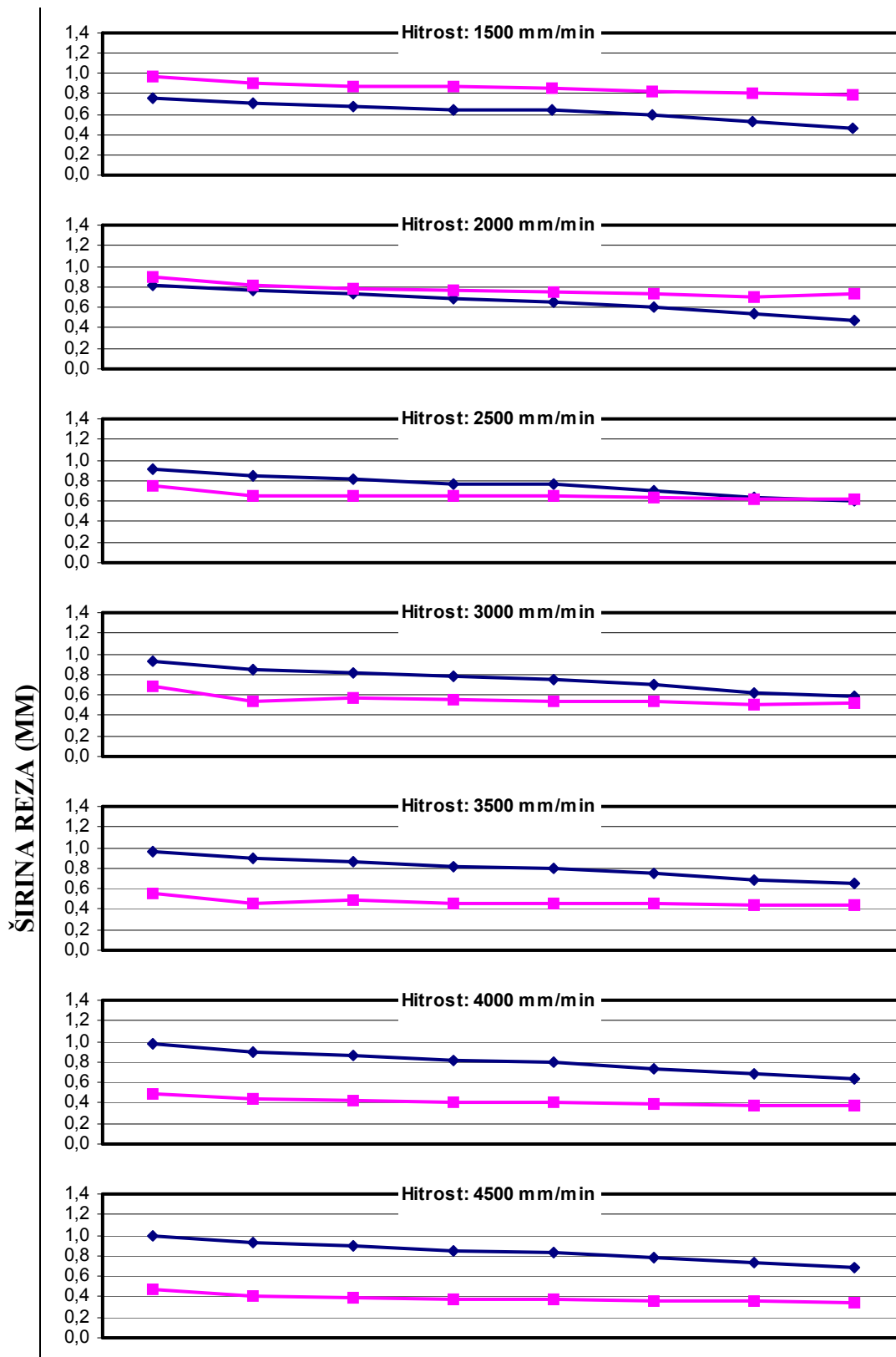


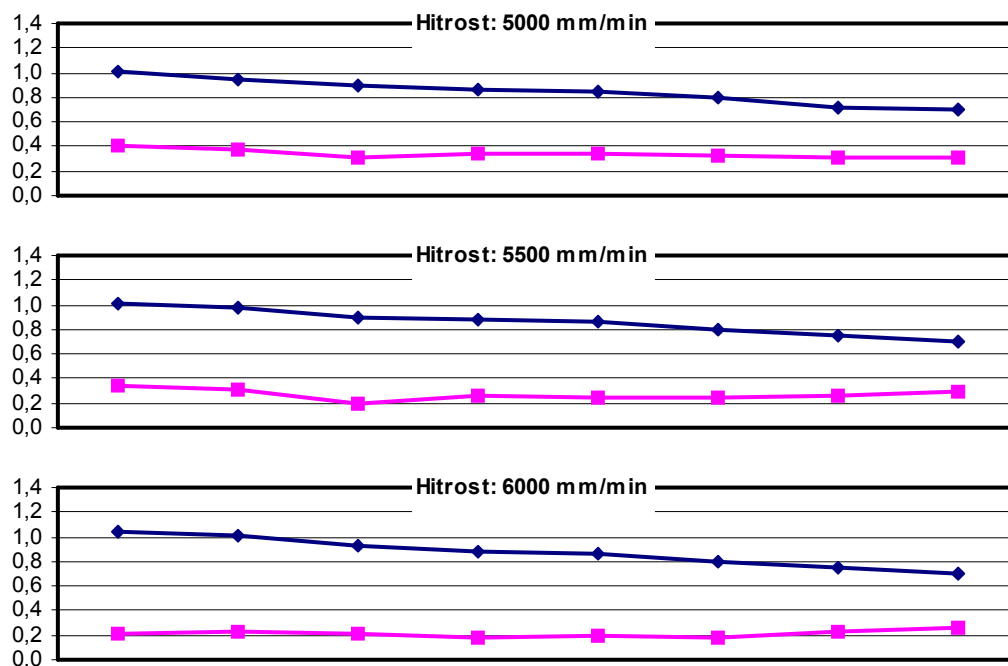


zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

Slika 20: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 3



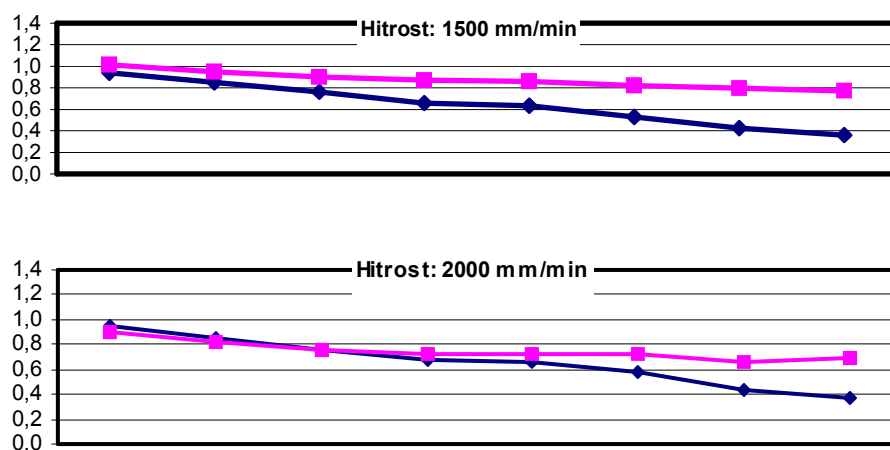


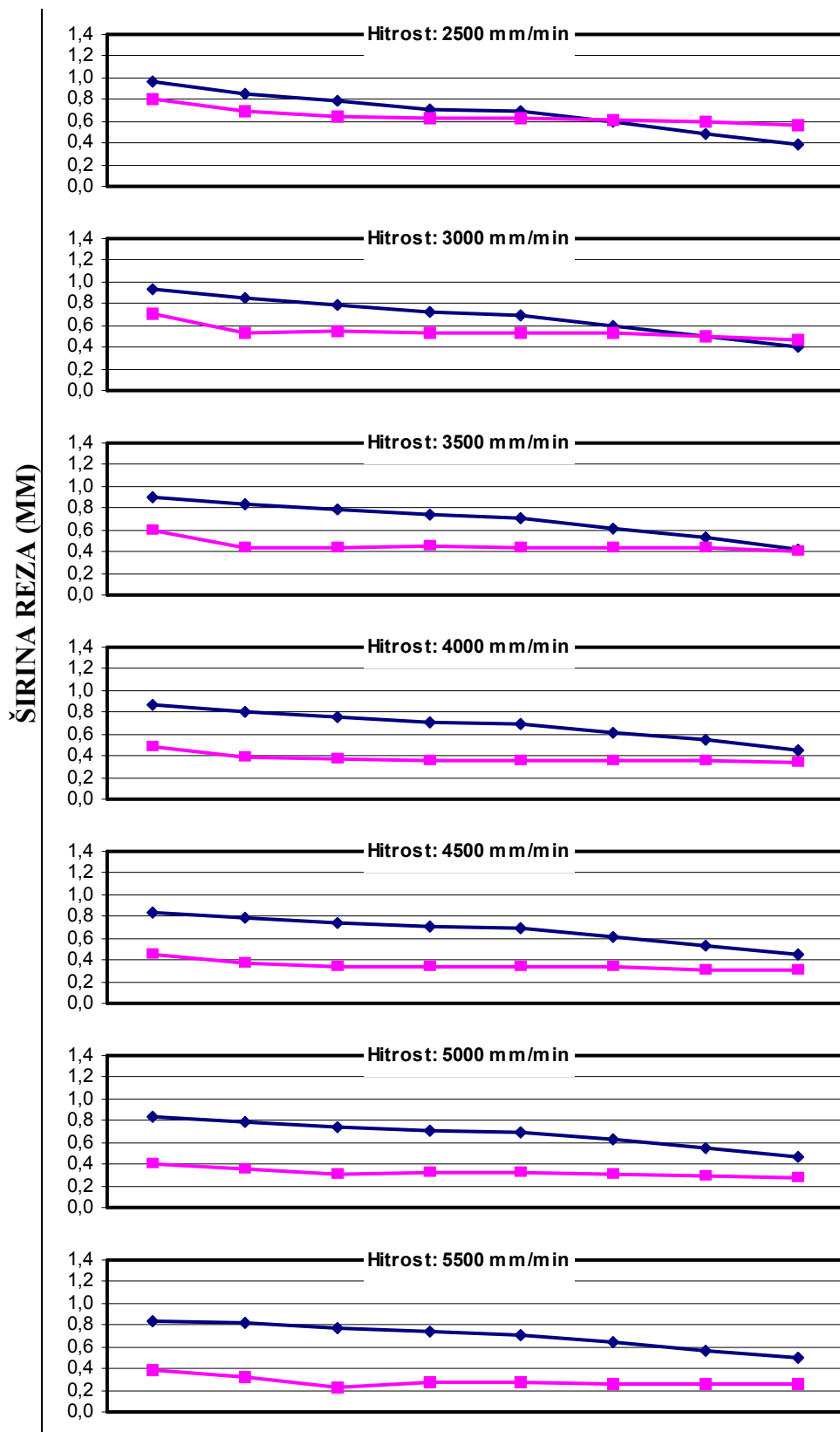
ODSEK MERITVE

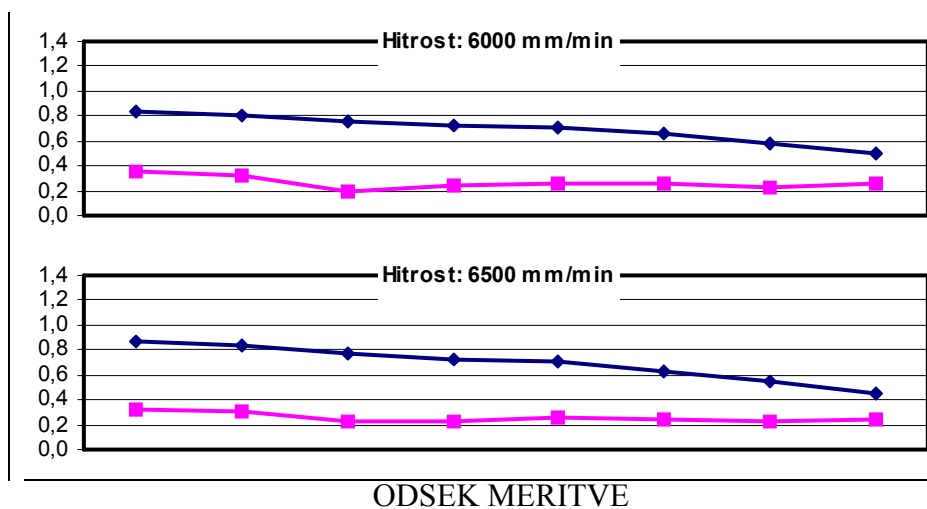
zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

Slika 21: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 4



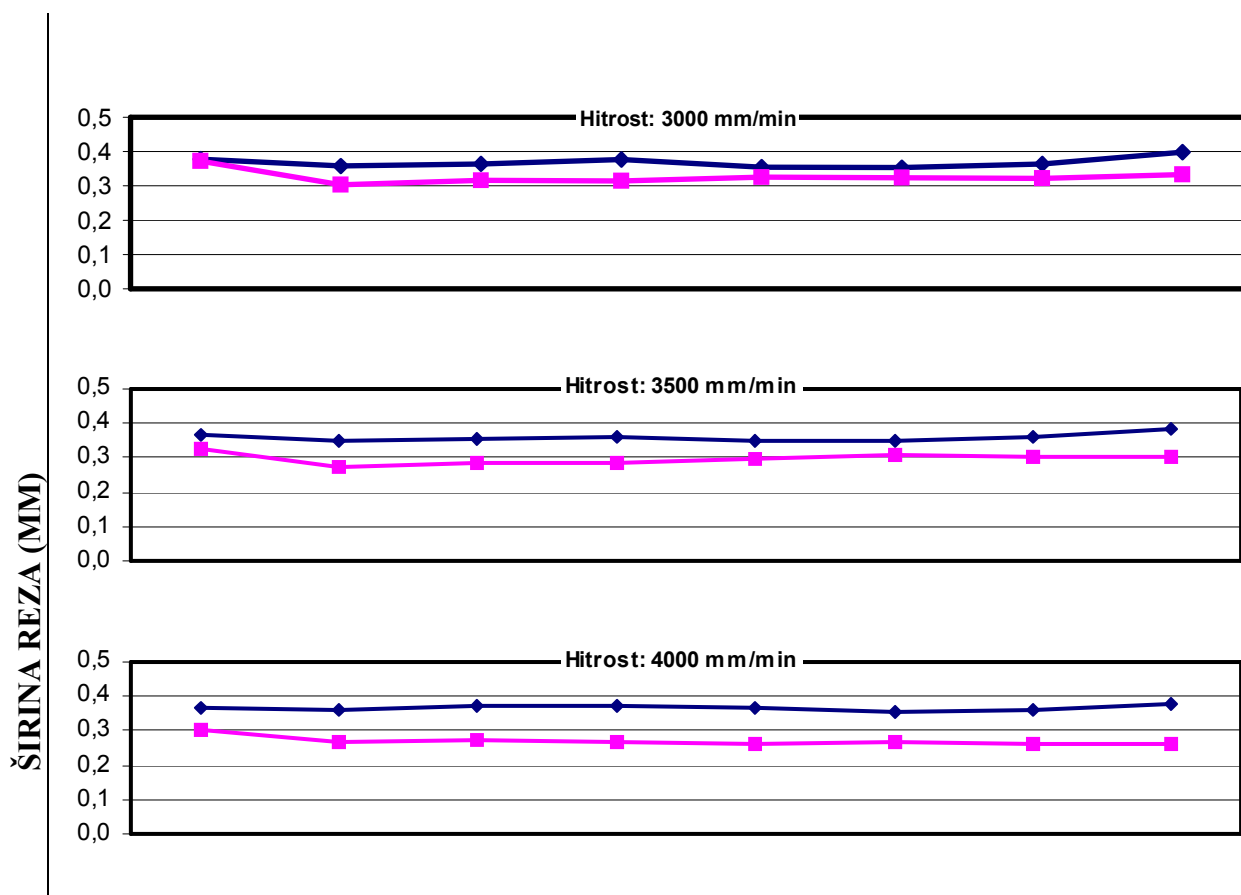


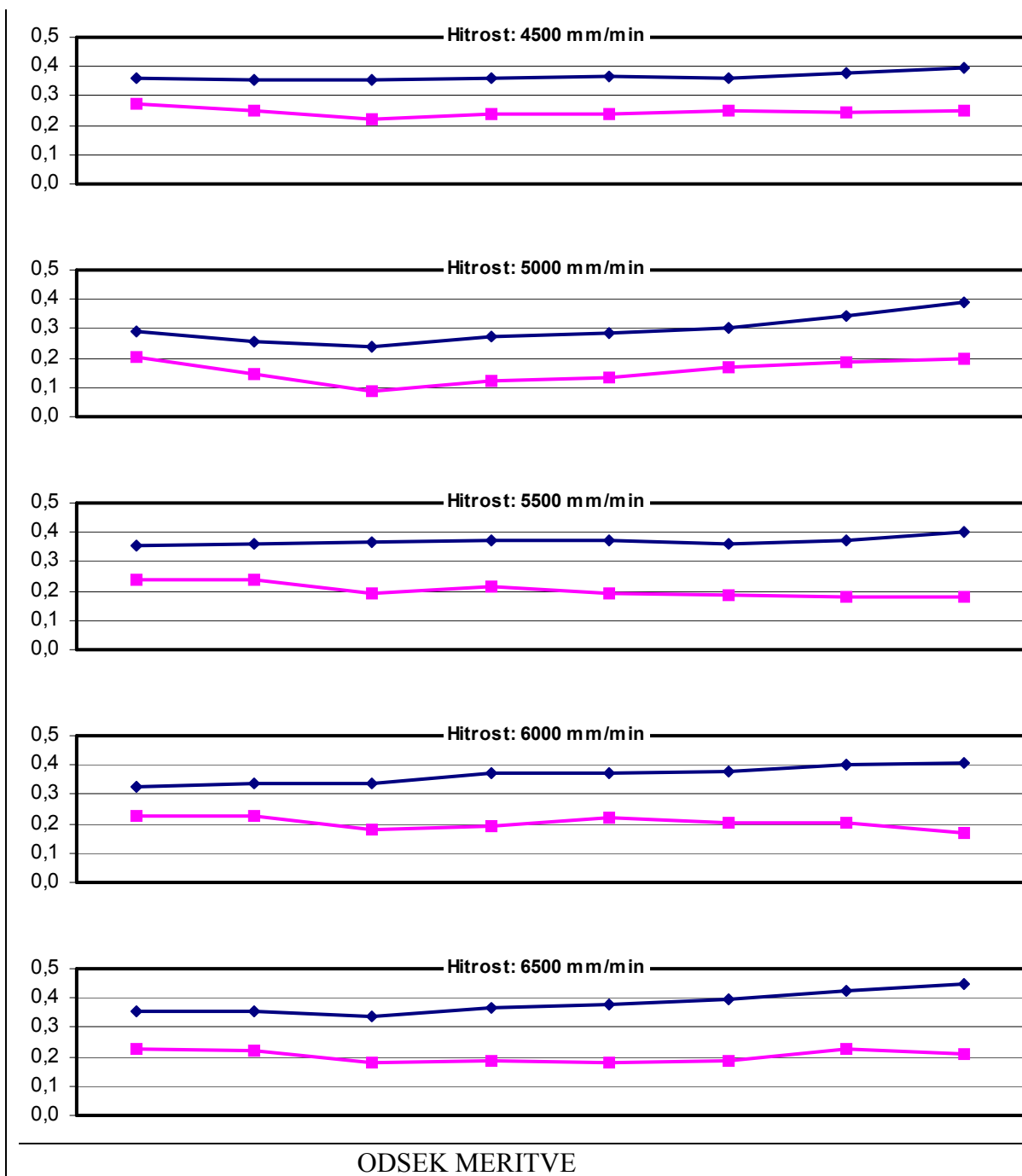


zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

Slika 22: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 5

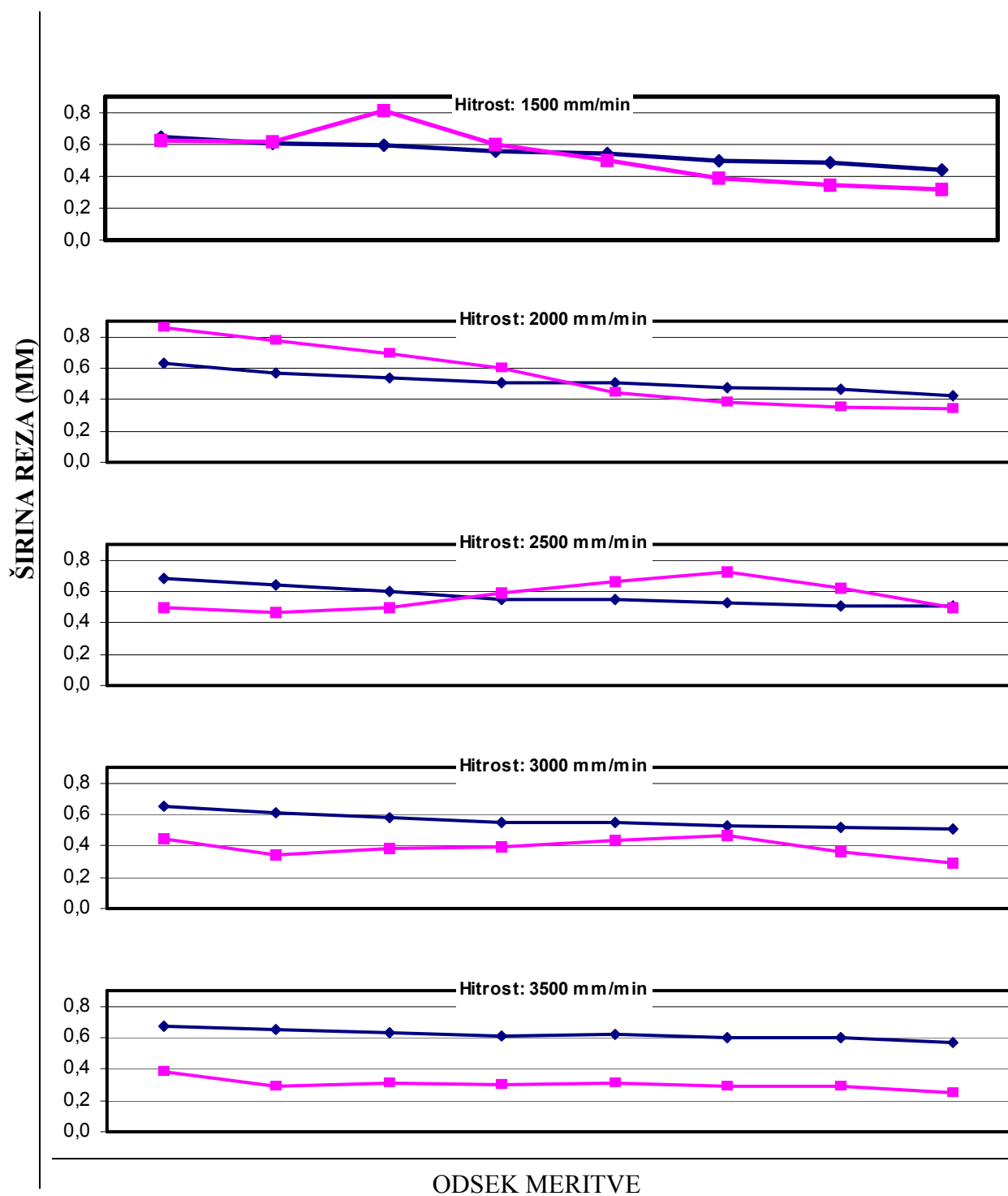




zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

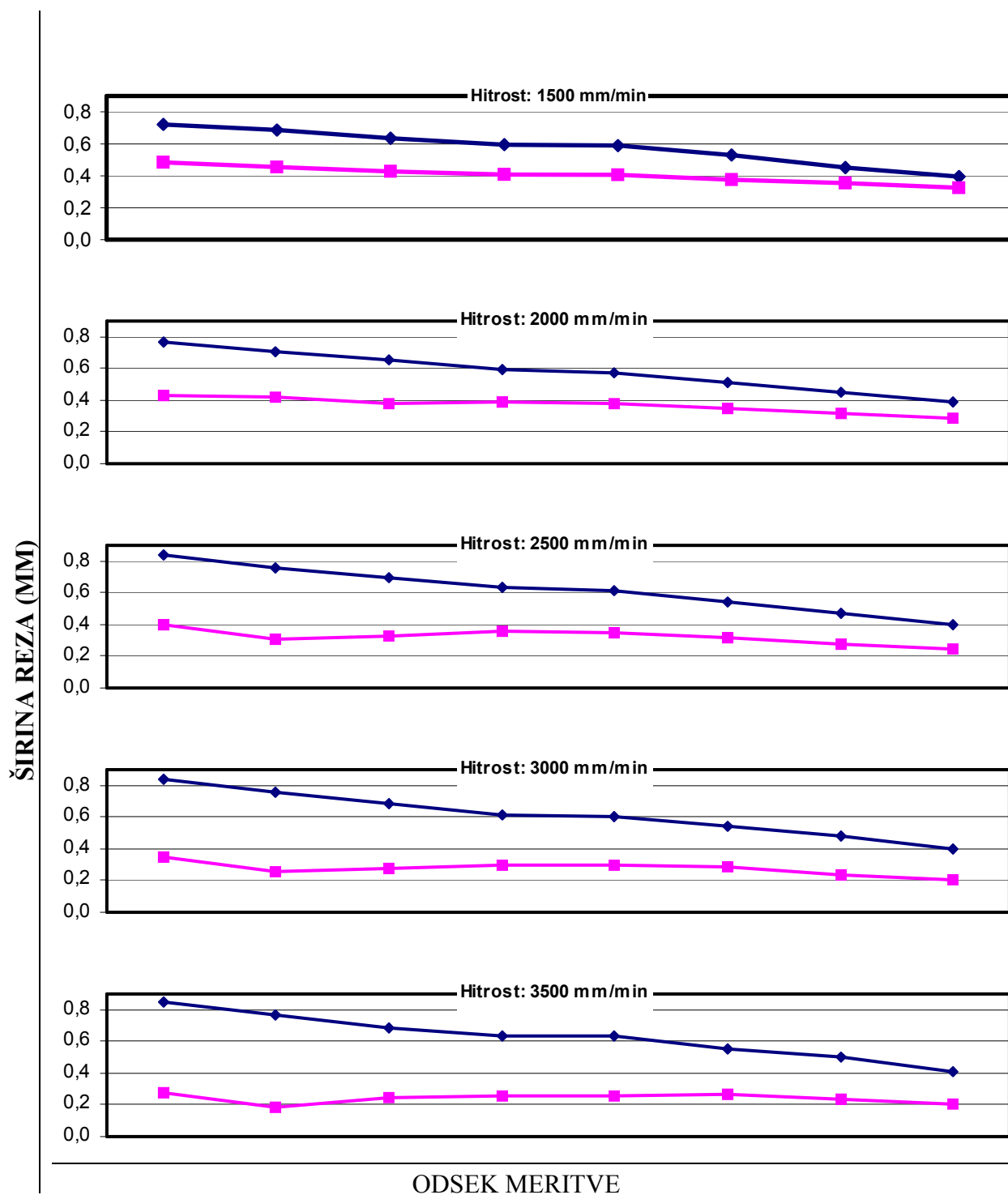
Slika 23: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 6



zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

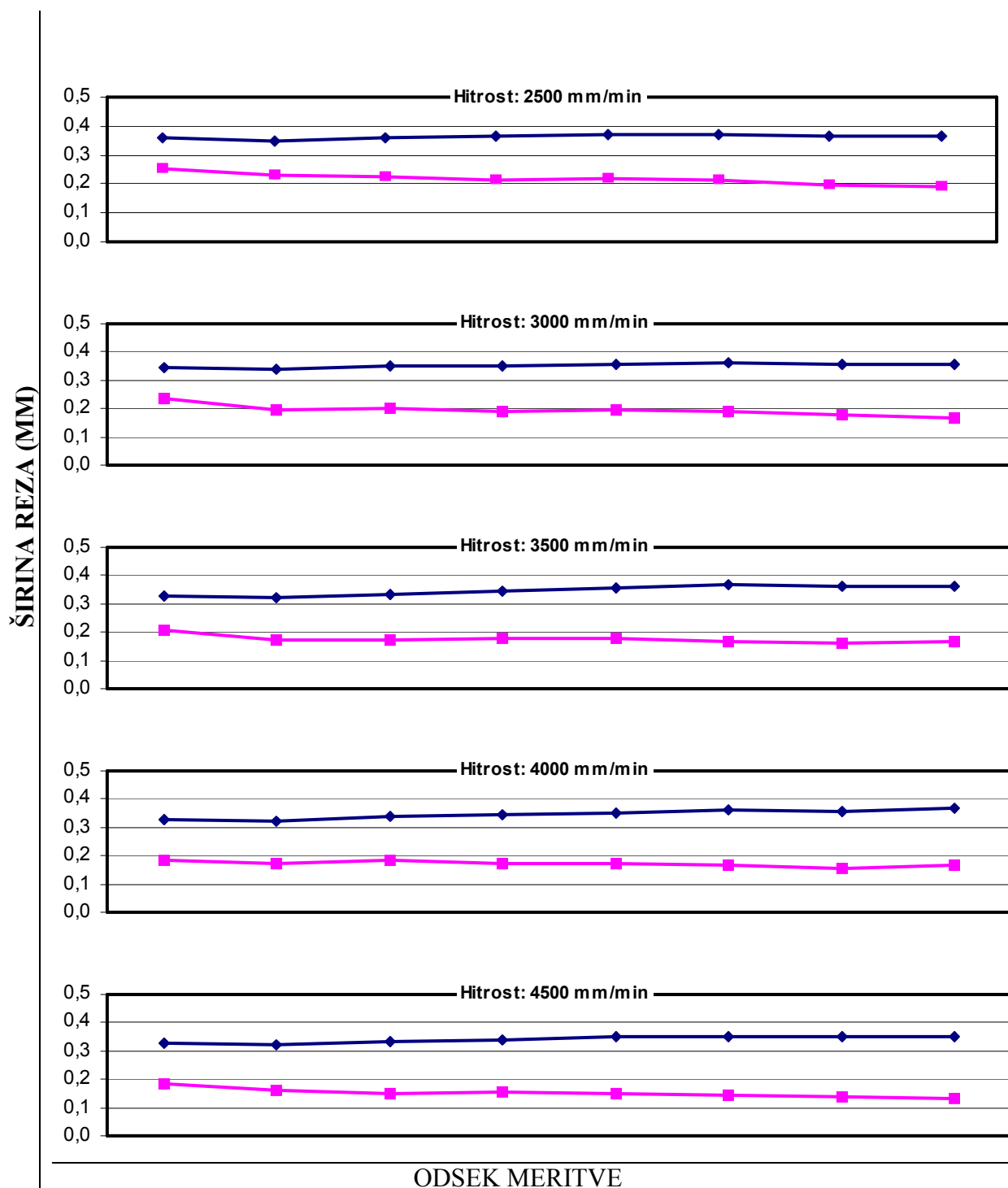
Slika 24: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 7



zgornja stran plošče

spodnja stran plošče

Slika 25: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 8

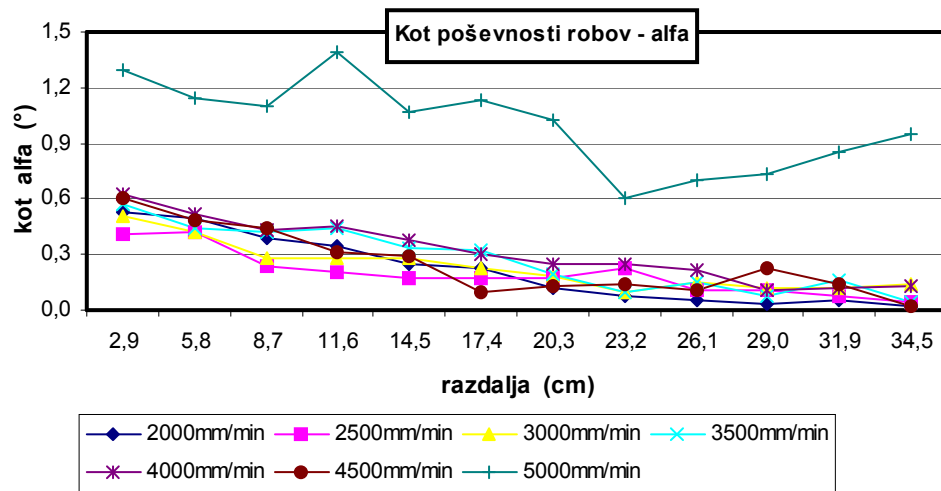


zgornja stran plošče

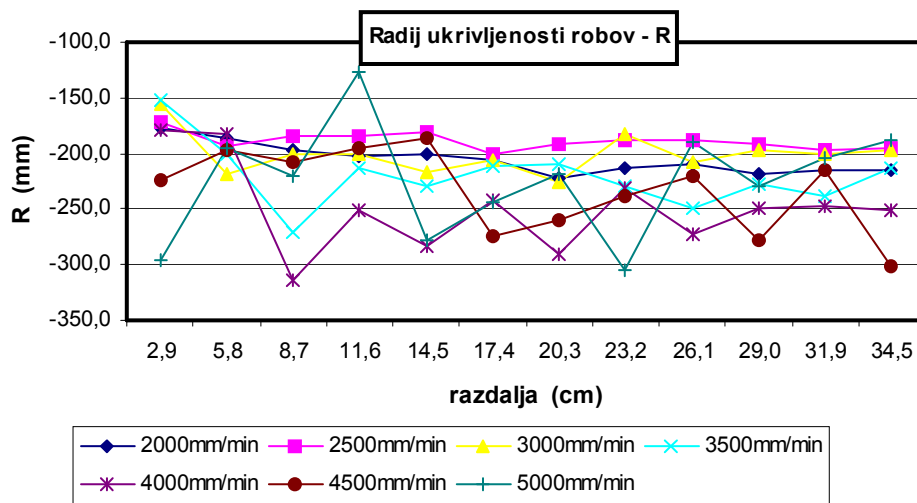
spodnja stran plošče

Slika 26: Grafični prikaz širine rezov na plošči št. 9

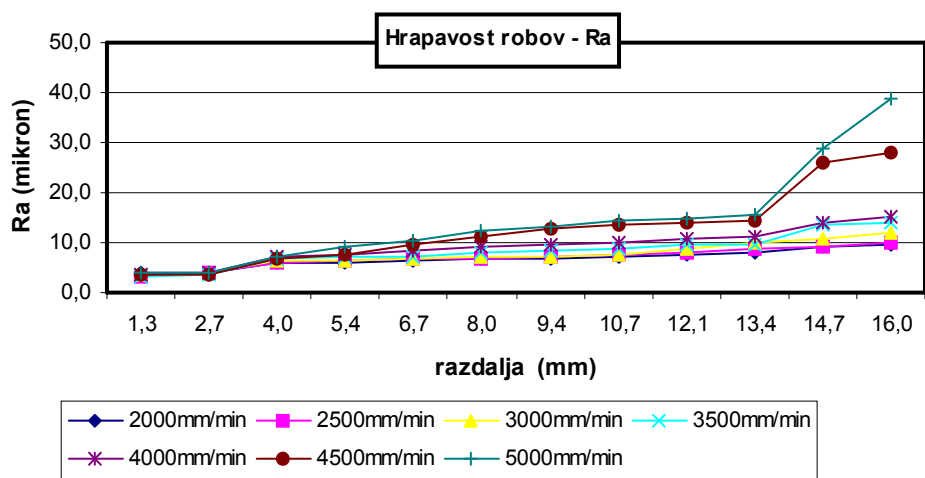
4.2 POVRŠINA REZA



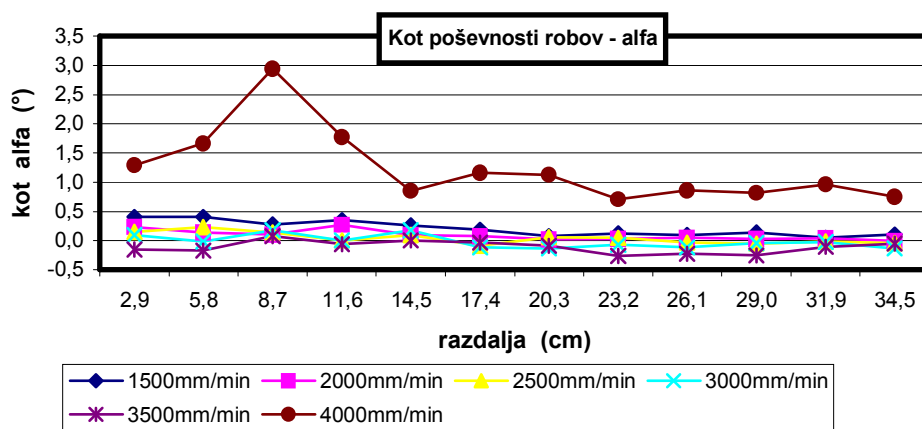
Slika 27: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 1



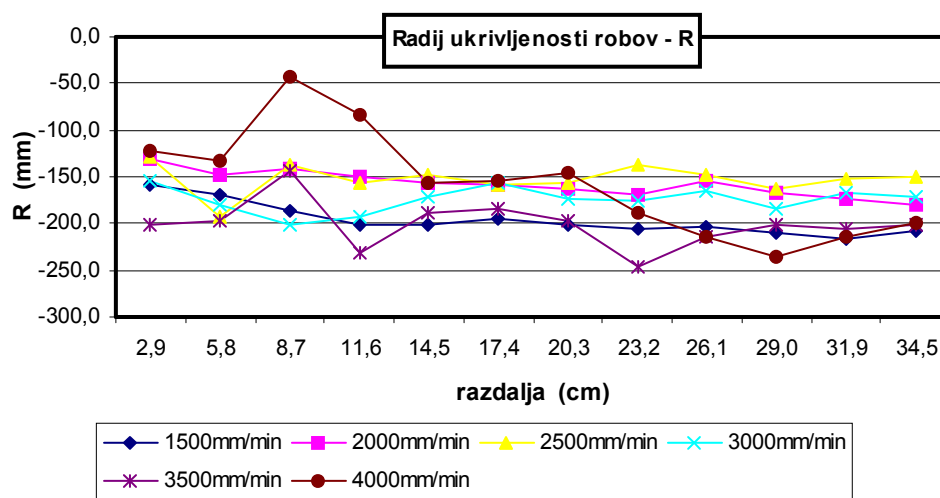
Slika 28: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 1



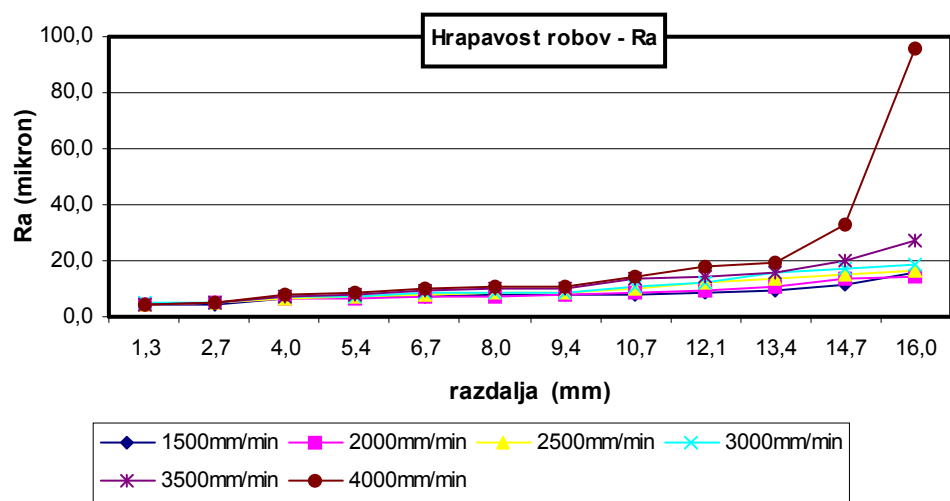
Slika 29: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 1



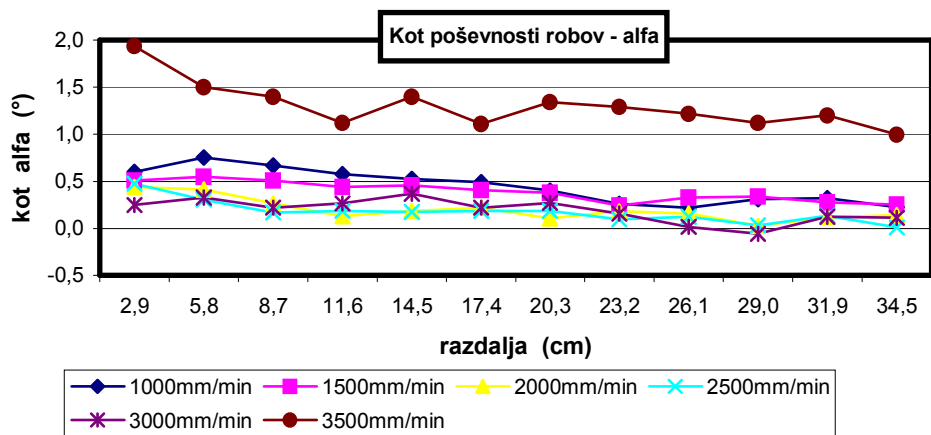
Slika 30: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 2



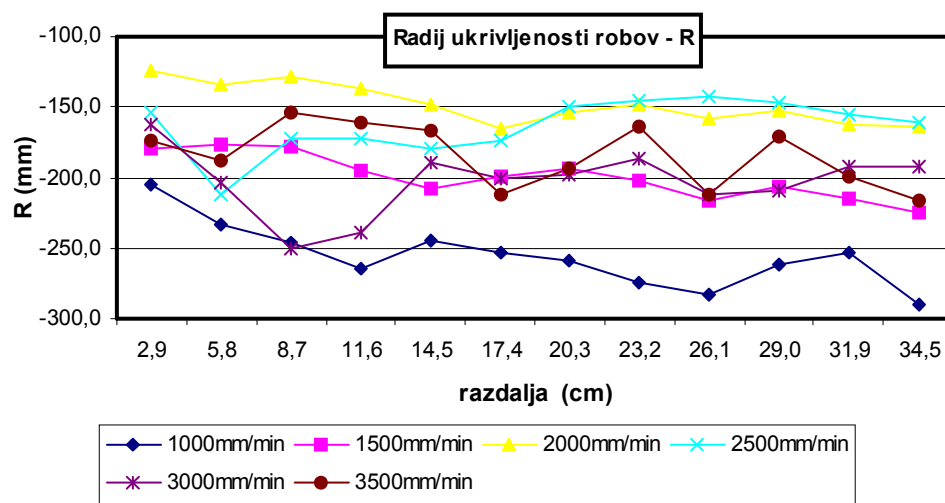
Slika 31: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 2



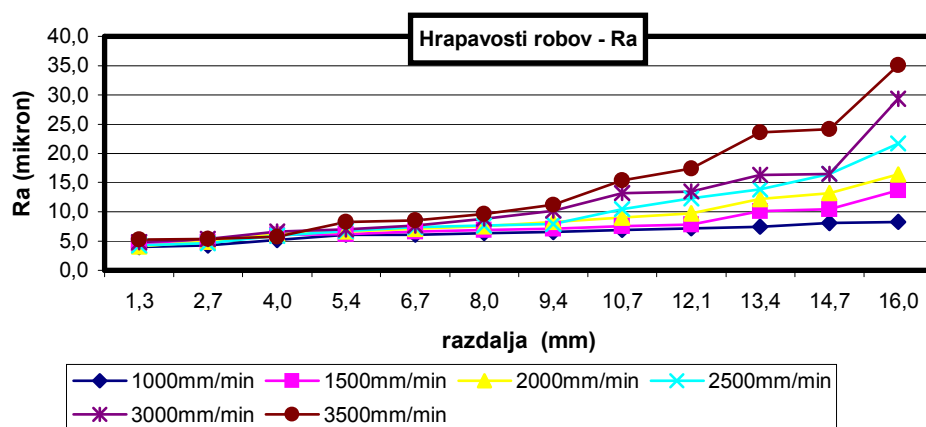
Slika 32: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 2



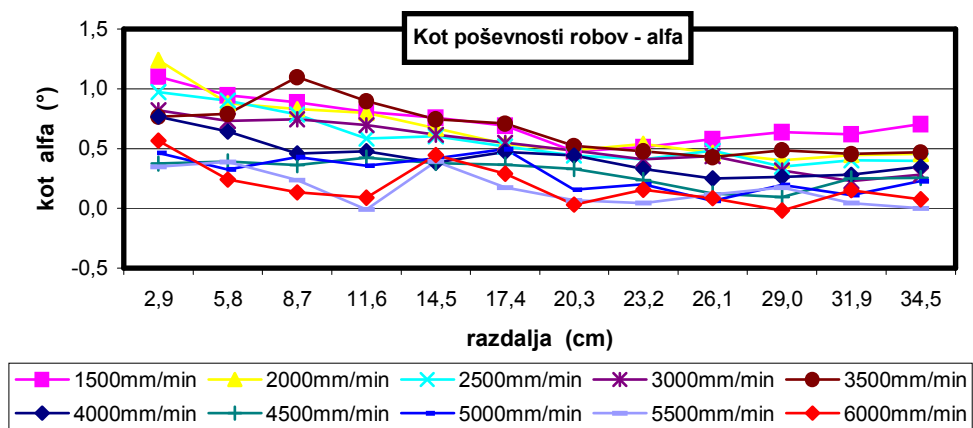
Slika 33: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 3



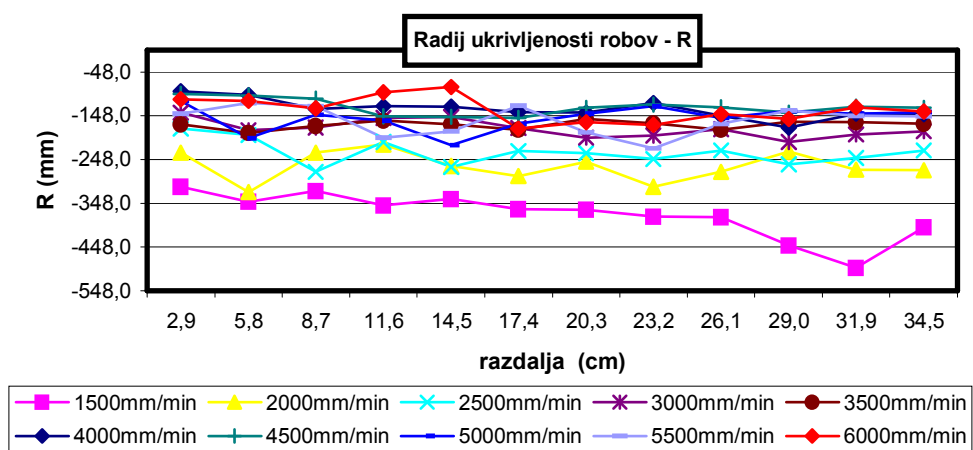
Slika 34: Grafični prikaz radija ukrivljenosti na plošči št. 3



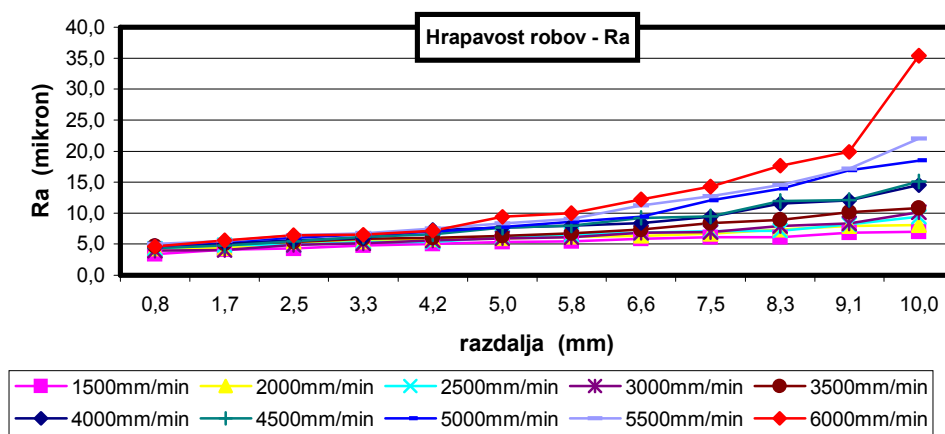
Slika 35: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 3



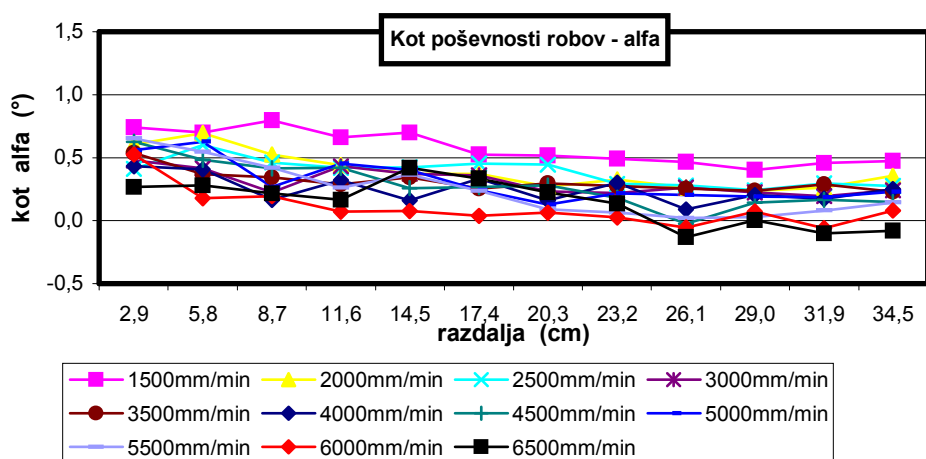
Slika 36: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 4



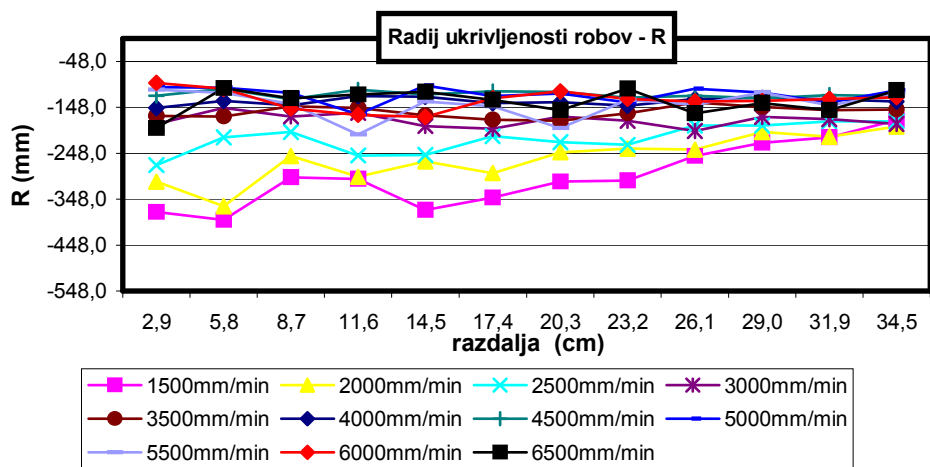
Slika 37: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 4



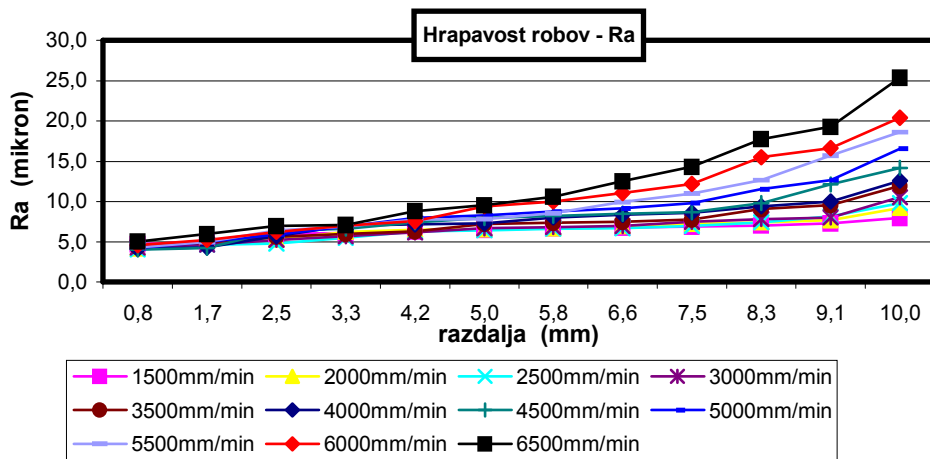
Slika 38: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 4



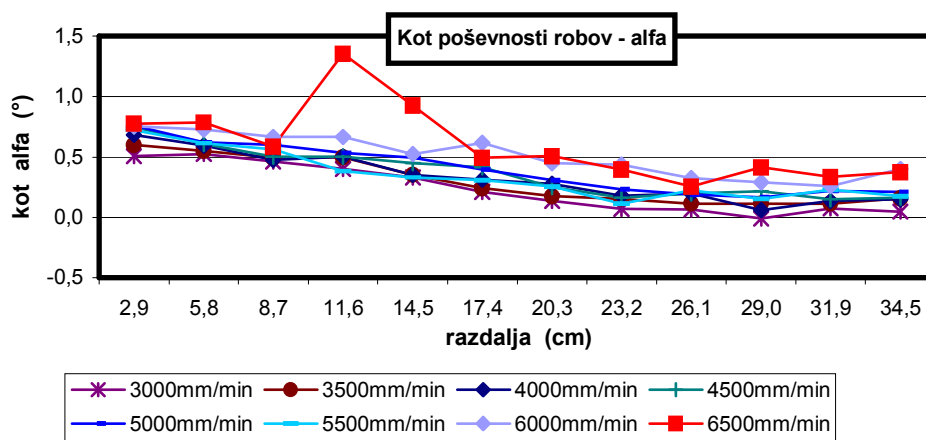
Slika 39: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 5



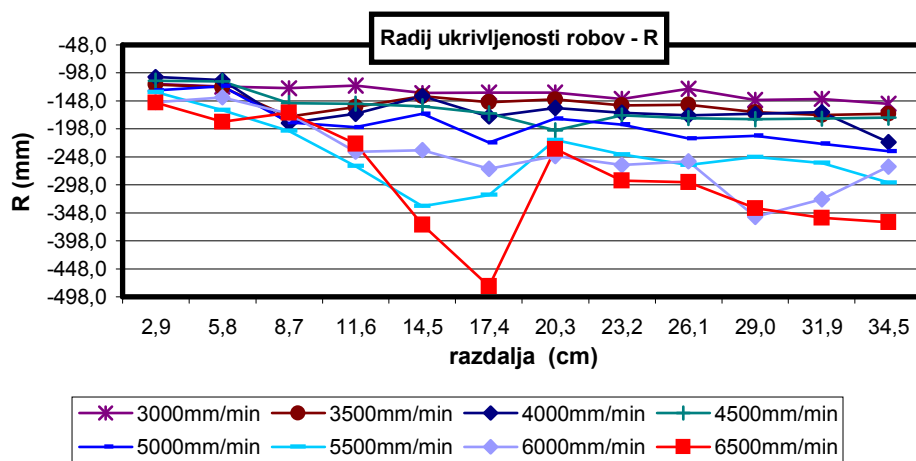
Slika 40: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 5



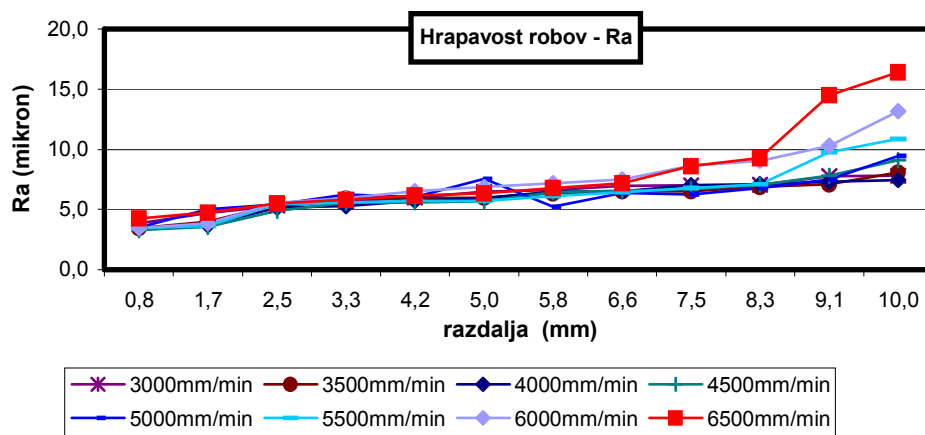
Slika 41: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 5



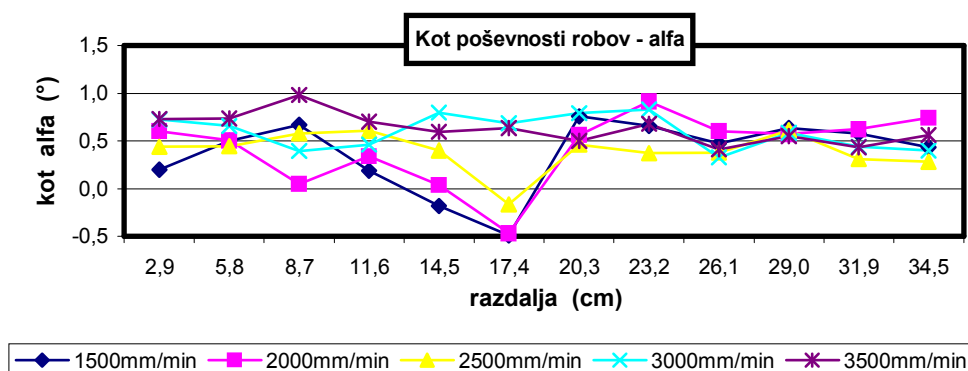
Slika 42: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 6



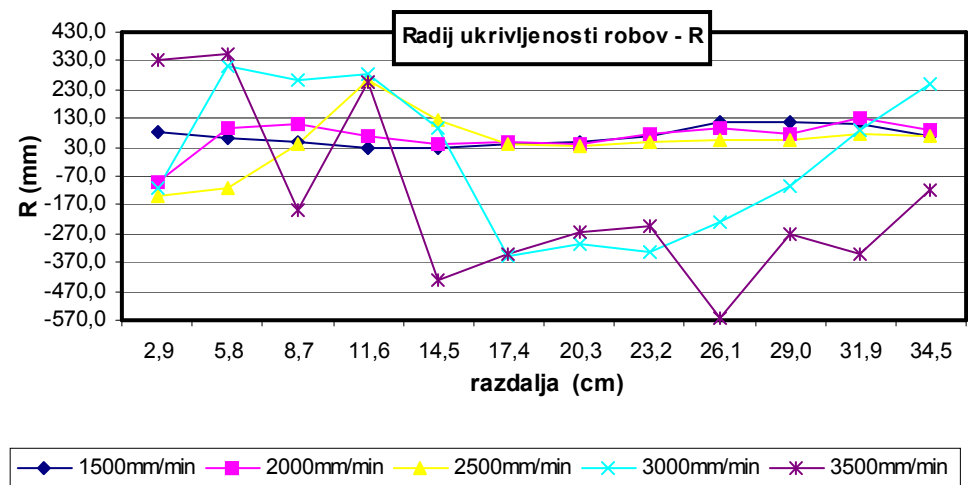
Slika 43: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 6



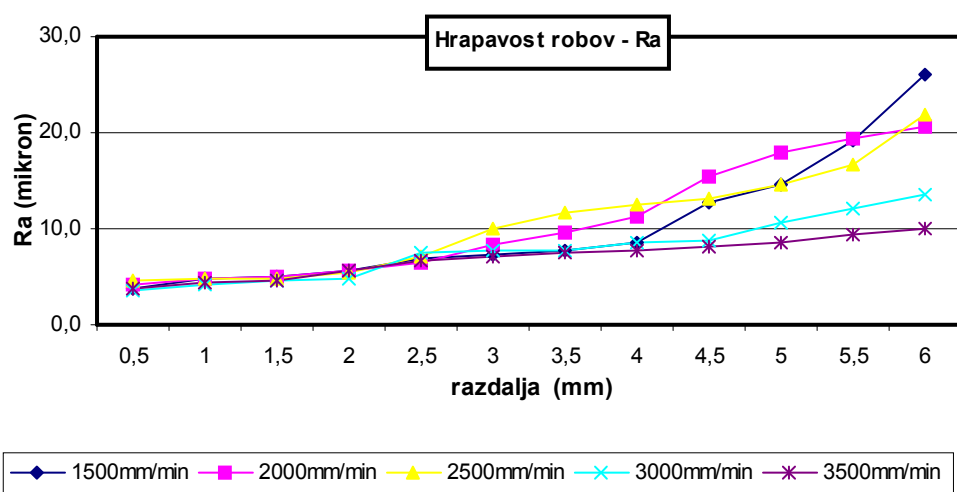
Slika 44: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 6



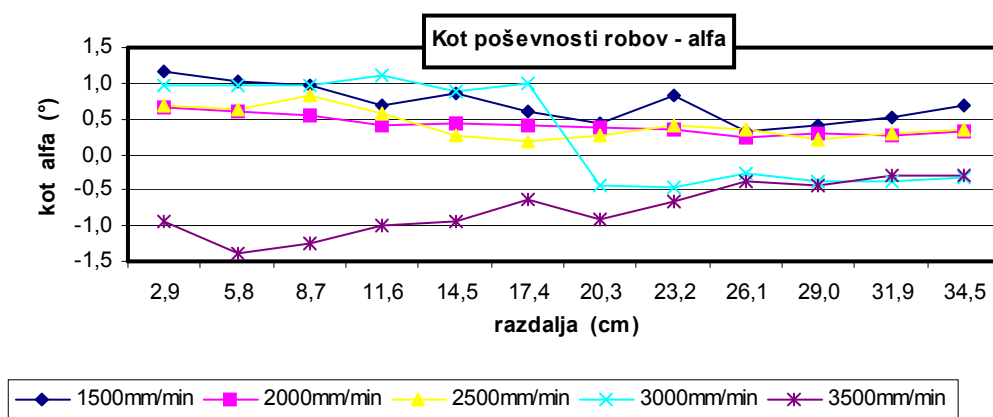
Slika 45: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 7



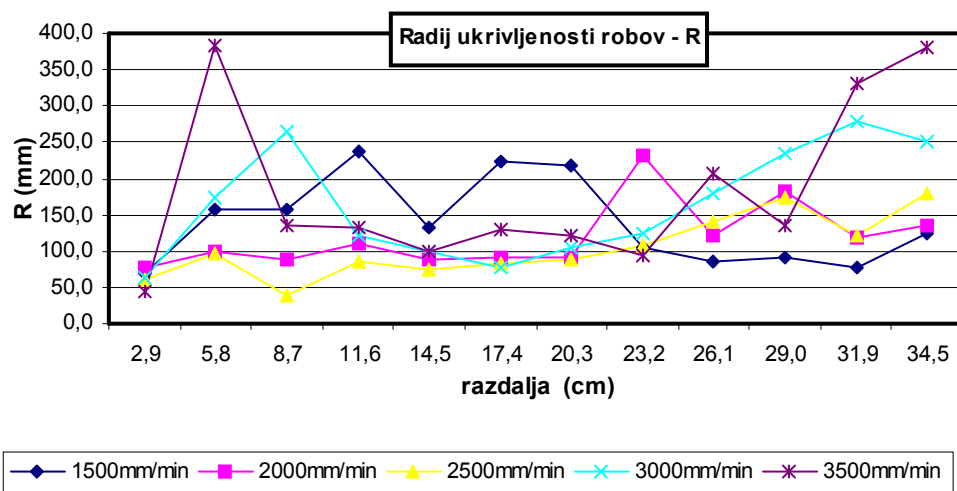
Slika 46: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 7



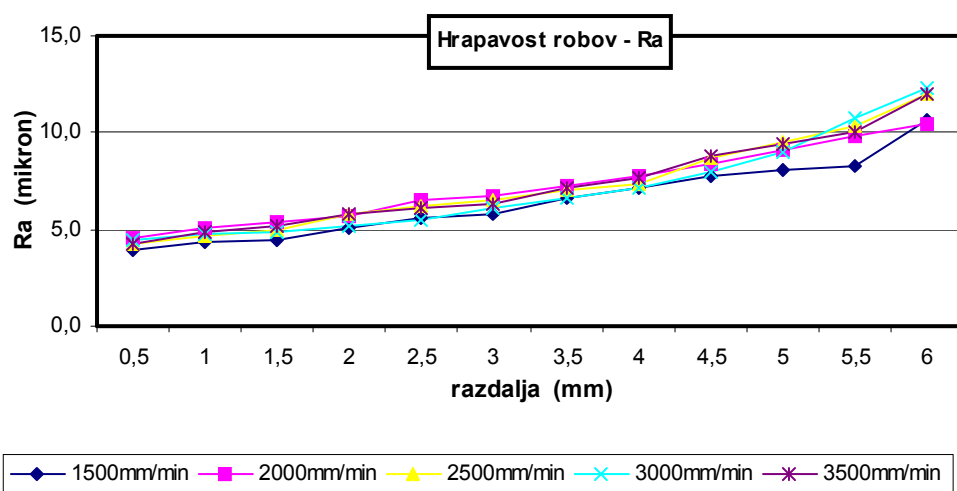
Slika 47: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 7



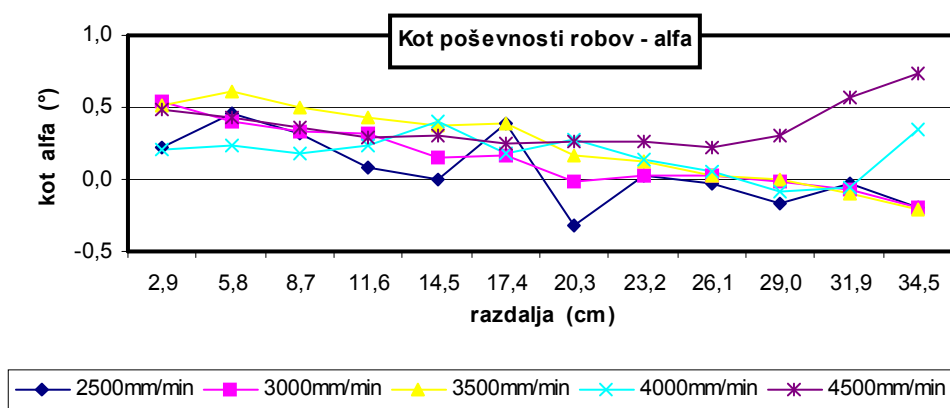
Slika 48: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 8



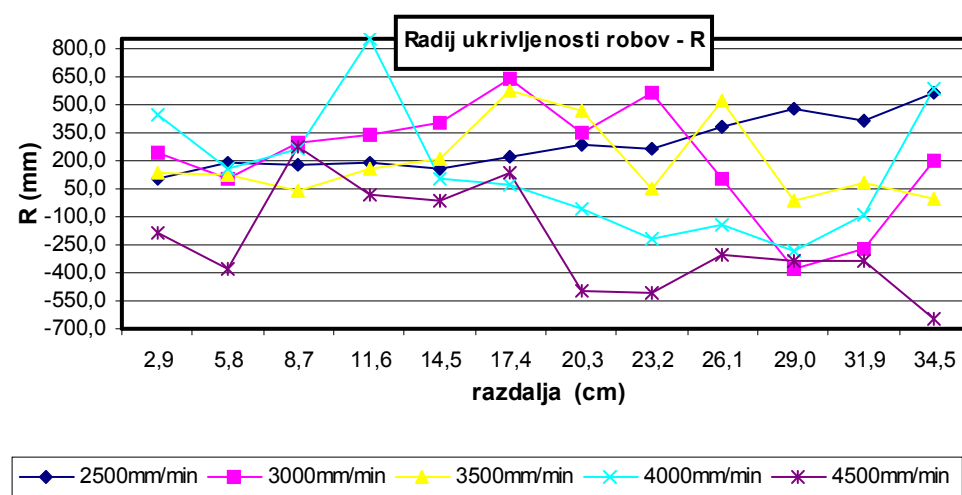
Slika 49: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 8



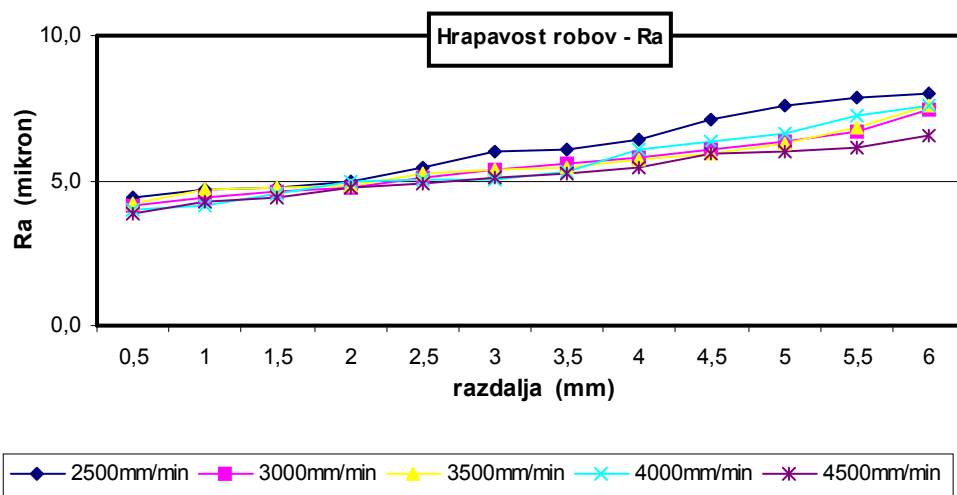
Slika 50: Grafični prikaz hrapavosti robov na plošči št. 8



Slika 51: Grafični prikaz kotov poševnosti robov na plošči št. 9



Slika 52: Grafični prikaz radija ukrivljenosti robov na plošči št. 9



Slika 53: Grafični prikaz hrapavost robov na plošči št. 9

5 RAZPRAVA IN SKLEPI

5.1 VPLIVI NA ŠIRINO LASERSKEGA REZA

Iz predstavitve rezultatov analize širine laserskega reza je razvidno, da je v večini primerov širina laserskega reza na zgornji strani plošče, kjer je laserski žarek vstopil, večja, kot na spodnji strani izstopa žarka. To razliko pripisujemo dejstvu, da je moč laserja na vstopu v ploščo večja, kot na izstopu iz plošče. Vzrok pa je lahko tudi v tem, da se laserski žarek lahko tekom prodiranja skozi ploščo odkloni. Vidno je tudi, da je širina reza padala z dolžino reza. Tako se širina reza na začetku, kar precej razlikuje od širine reza na koncu. V nekaterih primerih je ta padec zelo velik, od začetne širine 1,2 mm do končne širine 0,7 mm. Do teh razlik je prišlo, ko je oddaljenost laserske glave in preskušanca znašala 5 mm in s tem spremenili položaj fokusne razdalje žarka. Pri uporabi oddaljenosti le 2 mm so bile te razlike zanemarljive, saj so znašale le nekaj stotink mm, prav tako pa je bila manjša tudi razlika v širini reza na zgornji in spodnji strani plošče. Zanimivo je tudi dejstvo, da se razlika v širini reza med spodnjo in zgornjo stranjo, manjša z dolžino reza v primeru uporabe oddaljenosti 5 mm. To dejstvo je velikega pomena, saj bi to razliko izničili, v primeru, če bi rezali daljše reze. Z analizo širine rezov lahko razberemo vpliv rezalne hitrosti na širino laserskega reza. Z naraščajočo rezalno hitrostjo se je širina reza zmanjševala in sicer bolj znatno na spodnji strani plošče kot na zgornji. Razlaga tega efekta je preprosta. Z naraščajočo rezalno hitrostjo se je namreč zmanjševala moč laserske svetlobe na posamezno enoto materiala. Razvidno je tudi, da je na maksimalno rezalno hitrost vplivala predvsem debelina plošč. Tako smo pri vlakneni plošči debeline 16 mm dosegli hitrosti 3000 – 4000 mm/min, pri večjih hitrostih pa laserski žarek ni več prodril skozi celotno debelino plošče. Pri vlaknenih ploščah 10 mm pa smo lahko rezali z rezalno hitrostjo tudi do 6500 mm/min.

Iz analize pa ni razvidno ali debelina plošč vpliva na razliko v širini reza med zgornjo in spodnjo stranjo plošče. Iz analize širine reza tudi ne moremo določiti vpliva pomožnega laserskega plina na širino reza.

5.2 VPLIVI NA POŠEVNOST, UKRIVLJENOST IN HRAPAVOST POVRŠIN REZA

Iz predstavitve analize površine laserskih rezov je razvidno, da se poševnost robov rezanih z lasersko svetlobo manjša z naraščajočo razdaljo. Poleg tega je opazen tudi vpliv rezalne hitrosti na poševnost robov. V večini primerov se z naraščajočo rezalno hitrostjo veča tudi kot poševnosti robov. To dejstvo si lahko razlagamo tako, da se pri večjih hitrostih rezanja laserski žarek tekom prodiranja skozi debelino plošče bolj ali manj odkloni od idealne vertikalne smeri. Vpliv položaja fokusne razdalje pa je viden le pri plošči debeline 16 mm, in sicer je pri uporabi 2mm razdalje obdelovanca in laserske glave, poševnost robov nekoliko večja, kot pri oddaljenosti 5 mm. Iz opravljene analize ne moremo ugotoviti vpliva pomožnega laserskega plina in debeline preskušancev na poševnost robov.

Iz analize radija ukrivljenosti robov je razvidno, da je bila večina robov ukrivljenih konkavno. Konveksno ukrivljenost robov smo opazili le pri plošči št. 7, 8, 9, to je pri 6 mm debelini plošč. Tukaj bi rad poudaril, da je pri 6 mm ploščah težko govoriti o radiju ukrivljenosti, saj je 6 mm razdalje premalo, da bi lahko govorili o nekih relevantnih

rezultatih. Pri ostalih ploščah debeline 16 mm in 10 mm pa se je za najbolj izrazit vpliv na radij ukrivljenosti robov izkazala rezalna hitrost. Z naraščajočo rezalno hitrostjo se je radij ukrivljenosti zmanjševal na vseh primerih plošč, razen na plošči št. 6, ko se je iz nam nejasnega vzroka zgodilo ravno obratno. Naj poudarim, da je s strani uporabnosti zaželen čim večji radij ukrivljenosti, saj to pomeni, da je rob bolj raven. Tudi v primeru radija ukrivljenosti robov nismo opazili vpliva pomožnega plina in položaja fokusne razdalje.

Z analizo hrapavosti robov smo ugotovili, da ima na hrapavost robov največji vpliv rezalna hitrost. To velja za plošče debeline 16 mm in 10 mm. Z večanjem rezalne hitrosti se manjša energija žarka v posamezni poljubni točki, kar ima za posledico manj kvaliteten in manj gladek rez. Pri debelini plošče 6 mm pa je bilo včasih tudi obratno, torej pri manjši rezalni hitrosti večja hrapavost. To je vidno na ploščah št. 7 in 9. Drugi tudi zelo pomemben vpliv na hrapavost pa je debelina materiala, ki ga režemo. Z naraščanjem debeline materiala, se povečuje tudi hrapavost robov. Tako je max. izmerjena hrapavost pri 6 mm debelini vlaknene plošče približno 20 - 30 mikrometrov, medtem, ko je pri 16 mm plošči max. izmerjena hrapavost znašala tudi do 40 mikrometrov. Zanimivo je dejstvo, da max. hrapavost ni bila izmerjena pri max. rezalni hitrosti na določeni plošči. Poseben primer predstavljajo 16 mm plošče, saj se je pri večjih rezalnih hitrostih dogajalo, da žarek ni prodril skozi celotno debelino plošče, kar je imelo za posledico zelo veliko hrapavost na spodnjem robu plošče. Primer je na plošči št. 2, kjer je hrapavost znašala skoraj 100 mikrometrov. Kot je že bilo omenjeno je hrapavost na spodnjem delu plošče, ko se žarek že začne odklanjati in izgublja svojo moč večja, kot na zgornji strani, kjer žarek vstopi v material. Iz naše analize ni jasno razviden vpliv položaja fokusne razdalje žarka in vpliv pomožnega plina na hrapavost robov.

5.3 SKLEPI

Na podlagi opravljene raziskave lahko oblikujemo naslednje sklepe.

1. Širina laserskega reza je na zgornji strani plošče, kjer je laserski žarek vstopil, večja kot na spodnji strani izstopa žarka.
2. Širina reza se pri uporabi oddaljenosti 5 mm med lasersko glavo in obdelovancem kljub ostalim nespremenjenim laserskim parametrom, manjša z naraščajočo dolžino rezanja.
3. Na širino reza ima velik vpliv položaj fokusne razdalje. Najboljše rezultate dosežemo z oddaljenostjo 2 mm med lasersko glavo in obdelovancem, kjer je tudi pojav zmanjševanja širine reza z dolžino zanemarljiv.
4. Z naraščajočo rezalno hitrostjo se širina reza zmanjšuje, in sicer bolj opazno na spodnji kot na zgornji strani plošče.
5. Z opravljeno analizo ne moremo trditi, da na širino laserskega reza vpliva debelina materiala, ki ga režemo.

6. Z analizo tudi ne moremo potrditi domneve, da na širino reza vpliva vrsta pomožnega laserskega plina.
7. Poševnost površine reza se večja z naraščajočo rezalno hitrostjo in razdaljo rezanja.
8. Vpliv položaja fokusne razdalje je viden le pri plošči debeline 16 mm, in sicer je pri uporabi 2mm razdalje obdelovanca in laserske glave, poševnost površine reza nekoliko večja, kot pri oddaljenosti 5 mm.
9. Iz opravljene analize ne moremo ugotoviti vpliva pomožnega laserskega plina in debeline preskušancev na poševnost površine rezov.
10. Z analizo hrapavosti površine robov smo ugotovili, da ima na hrapavost površine robov največji vpliv rezalna hitrost in debelina materiala. Z naraščanjem hitrosti in debeline narašča tudi hrapavost.
11. Iz naše analize ni jasno razviden vpliv položaja fokusna razdalje žarka in vpliv pomožnega plina na hrapavost površine reza.
12. Iz analize radija ukrivljenosti površine reza je razvidno, da je bila večina površin reza ukrivljenih konkavno.
13. Za najbolj izrazit vpliv na radij ukrivljenosti površine reza se je izkazala rezalna hitrost. Z naraščajočo rezalno hitrostjo se je radij ukrivljenosti zmanjševal skoraj v vseh primerih.
14. Iz analize merjenja radija ukrivljenosti površine rezov nismo opazili vpliva pomožnega plina in položaja fokusne razdalje.
15. Vpliv pomožnega laserskega plina smo ugotovili na poizkusih rezanja, saj smo z uporabo dušika zmanjšali stopnjo ožganosti površine reza.
16. Brez nadaljne obdelave rezanih površin, plošče niso uporabne predvsem zaradi hrapavosti in pooglenelosti površine. Že z minimalnim brušenje pa lahko odpravimo vse težave kot so zoglenela plast, hrapavost, ukrivljenost in poševnost rezanih površin.

6 POVZETEK

V industriji se pogosto pojavi vprašanje, kako bi lahko proizvedli več, v krajšem času, z boljšim izkoristkom časa in materiala, bolj kvalitetno in ali bi lahko to dosegli že z zamenjavo tehnološke opreme. V tej nalogi smo skušali ugotoviti, ali je laserska tehnika, ki je že uporabna na veliko zelo različnih področjih, uporabna za rezanje vlaknenih plošč. Vlaknene plošče so še posebej zanimive za obdelavo z lasersko tehniko, saj te plošče zahtevajo zahtevnejše obdelave kot druga lesna tvoriva.

Za poizkuse smo uporabili vlakneno ploščo srednje gostote, treh različnih debelin 6, 10 in 16 mm ter CO₂ laserski sistem. Najprej smo izvedli spiralni laserski rez, da bi z enim poizkusom dobili večji razpon rezalne hitrosti. Pri poizkusu je prihajalo do težav s krivljenjem preskušancev in neenakomernimi vrtljaji posebne naprave, ki je omogočala vrtenje preskušanca. Ker smo za podrobnejšo analizo laserskih parametrov in za analizo lastnosti nastalega reza, potrebovali boljšo kvaliteto rezanja, smo se odločili, da rezanje izvedemo po metodi lameliranja. Pri tej metodi smo uporabili devet preskušancev. Trije preskušanci so bili debeli 6 mm, trije 10 mm in trije 16 mm. Najprej smo rezali tri plošče debeline 6 mm in sicer tako, da smo na vsaki plošči uporabili drugačne laserske parametre, rezalno hitrost pa smo spreminjali tako, da smo po dva reza, ki sta nato predstavljala robova lamele, rezali z enako rezalno hitrostjo. Za vsaka dva naslednja reza, oziroma robova lamele, smo uporabili večjo rezalno hitrost. Hitrost smo stopnjevali do trenutka, ko laserski žarek ni več prodrl skozi celotno debelino plošče, ali do trenutka, ko kakovost reza ni bila več zadovoljiva. Enak postopek stopnjevanja rezalne hitrosti smo uporabili na vseh ploščah. Glede na izkušnje in priporočila literature smo se odločili da na vseh ploščah uporabimo moč 2000 W in frekvenco 1500 Hz. Za vsako ploščo posebej, pa smo uporabili različno vrsto pomožnega laserskega plina in različen položaj fokusne razdalje.

Kakovost in lastnosti lasersko rezane vlaknene plošče, smo vrednotili šele po izvedbi metode merjenja širine laserskega reza in analizi površine reza.

Širine rezov smo ugotavljali z merilno napravo, ki deluje po principu linijskega osvetljevanja površine, triangulacijske metode ter digitalne obdelave video slike. Vsak rez smo merili posebej na zgornji in spodnji strani plošče, da bi potrdili naša pričakovanja, da bo širina reza na spodnji strani v primerjavi z zgornjo stranjo plošče manjša. Po opravljeni analizi rezultatov meritev lahko trdimo, da ja širina reza na zgornji strani plošče večja, kot na spodnji strani plošče. Za analizo rezultatov meritev širine reza, smo odkrili tudi pomemben parameter, ki ima velik vpliv na širino reza. To je položaj gorišča. Z zmanjšanjem odmika laserske glave in preskušanca, smo spremenili gorišča laserskega žarka. Tako se je pri uporabi le 2 mm odmika laserske glave in preskušanca, širina reza zmanjšala, prav tako pa je bil rez enakomerne širine po celotni dolžini reza. Opazili smo tudi, da lahko pri uporabi manjše razdalje laserske glave do preizkušanca uporabljamo večje rezalne hitrosti, pri katerih pa je kakovost reza še vedno na dovolj visokem nivoju. Velik vpliv na širino reza ima tudi rezalna hitrost. Z večanjem rezalne hitrosti se je širina reza zmanjševala. Vpliva debeline preskušanca na širino laserskega reza nismo ugotovili. Prav tako nismo opazili velikega vpliva pomožnega plina na širino reza.

Površino reza smo analizirali z isto merilno napravo. Izmerili smo celotno površino vseh površin rezov na vseh lamelah.

Z analizo površine smo merili tri parametre: poševnost površine reza, ukrivljenost površine reza in hrapavost površine reza. Po opravljeni analizi lahko trdimo, da je imela na vse tri parametre največji vpliv rezalna hitrost. Z večanjem rezalne hitrosti se je povečeval kot poševnosti robov in hrapavost robov, medtem ko se je radij ukrivljenosti robov zmanjševal. Zaželen pa je čim večji radij ukrivljenosti robov. Poševnost robov je naraščala še z razdaljo rezanja, hrapavost pa z debelino materiala. Z analizo ne moremo ugotoviti vpliva položaja fokusne razdalje in pomožnega laserskega plina na poševnost, ukrivljenost in hrapavost robov, saj je ta vpliv pokazal le na nekaj primerih.

7 VIRI

7.1 CITIRANI VIRI

1. Belforte D., Levitt M. 1986. The Industrial Laser Annual Handbook. Oklahoma, PennWell Publishing Company : 250 str.
2. Chryssolouris G. 1991. Laser Machining, Theory and Practice. New York, Springer – Verlag: 274 str.
3. Lum K.C.P., Black I. 1999. CO₂ lasers cutting of MDF – 1. Determination of process parameter settings. Optics & Laser Technology, 32: 67 - 76
4. Medič M. 2001. Lesarsko strojništvo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 336 str.
5. Medved S. 2003. Vlakninska in iverna lesna tvoriva. študijsko gradivo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
6. Migliore L. 1996. Laser Materials Processing. New York, Marcel Dekker: 139 – 163
7. Powell J. 1993. CO₂ Laser Cutting. London, Springer – Verlag: 246 str.
8. Powell J. 2002. CO₂ laser cutting of wood – based products. The Industrial Laser User, 27.
9. Ready J. F. 1997. Industrial Applications Of Lasers. 2nd Edition. New York, Academic Press
10. Steen W. M. 2003. Laser Material Processing. 3rd Edition. London, Springer – Verlag: 408 str.
11. Tarasov L. 1986. Laser Physics and Applications. Moscow, Mir Publishers: 41 - 41

7.2 DRUGI VIRI

1. Jezeršek M. 2000. Laserski merilnik oblike teles. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 69 str.
2. Rozman M. 2001. Laser in uporaba. Seminar. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko
<http://www.fiz.uni-lj.si/~jaglicic/sola/seminarji/laser-uporaba/LASER3.htm>
(15.8.2005)
3. Vadnjak J. 1989. Lasersko rezanje tesnil. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza Edvarda Kardelja v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 89 str.
4. Žabkar G. 2001. Rezanje lesa in lesnih tvoriv z abrazivnim vodnim curkom. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 93 str.

ZAHVALA

Ob koncu študija bi se rad zahvalil svojemu mentorju dr. Janezu Možini za njegovo pomoč pri nastajanju te diplomske naloge.

Zahvaljujem se tudi somentorju doc. dr. Bojanu Bučarju in recenzentu doc. dr. Marjanu Mediču.

Posebno bi se rad zahvalil dr. Matiji Jezeršku iz fakultete za strojništvo, iz katedre za optodinamiko in lasersko tehniko, za pomoč pri eksperimentalnem in teoretičnem delu naloge.

Zahvaljujem se tudi gospodu Andreju Hribarju iz podjetja Elektroservis Hribar, ki mi je omogočil delo z laserjem in pa gospodu Radivoju Jesenšku iz podjetja Jera – mix d.o.o, ki mi je pomagal pri literaturi in mi omogočil poizkuse.

Posebno bi se rad zahvalil tudi moji družini, staršema Andreji in Slavkotu, sestri Barbari ter dekletu Jasni za podporo v času študija in pomoč pri nastajanju diplomske naloge.

PRILOGE*Priloga 1: Širine rezov na ploščah pri različnih rezalnih hitrostih*

PLOŠČA št. 1							
Odsek	Širina reza na ZGORNJI strani v mm						
	pri hitrosti:						
	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
1	0,359	0,367	0,359	0,367	0,355	0,355	0,346
2	0,382	0,392	0,382	0,392	0,363	0,374	0,357
3	0,401	0,404	0,401	0,404	0,381	0,392	0,349
4	0,417	0,423	0,417	0,423	0,388	0,399	0,370
5	0,415	0,420	0,415	0,420	0,393	0,382	0,365
6	0,428	0,424	0,428	0,424	0,390	0,377	0,363
7	0,424	0,419	0,424	0,419	0,390	0,377	0,363
8	0,426	0,420	0,426	0,420	0,386	0,371	0,366
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm						
1	0,438	0,347	0,438	0,347	0,218	0,182	0,000
2	0,390	0,319	0,390	0,319	0,109	0,128	0,000
3	0,395	0,321	0,395	0,321	0,121	0,117	0,000
4	0,394	0,316	0,394	0,316	0,116	0,126	0,000
5	0,389	0,323	0,389	0,323	0,130	0,132	0,000
6	0,403	0,320	0,403	0,320	0,143	0,117	0,000
7	0,390	0,320	0,390	0,320	0,144	0,096	0,000
8	0,386	0,316	0,386	0,316	0,153	0,103	0,000

PLOŠČA št. 2						
Odsek	Širina reza na ZGORNJI strani v mm					
	pri hitrosti:					
	1500	2000	2500	3000	3500	4000
1	1,039	1,013	0,988	0,953	0,899	0,915
2	0,944	0,919	0,882	0,860	0,812	0,818
3	0,879	0,857	0,824	0,813	0,781	0,748
4	0,822	0,788	0,759	0,756	0,727	0,693
5	0,815	0,762	0,759	0,726	0,714	0,683
6	0,719	0,687	0,696	0,664	0,651	0,626
7	0,630	0,611	0,618	0,593	0,587	0,569
8	0,592	0,583	0,571	0,523	0,514	0,502
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm					
1	0,667	0,509	0,463	0,321	0,176	0,000
2	0,604	0,449	0,365	0,194	0,108	0,000
3	0,657	0,437	0,383	0,256	0,151	0,000
4	0,672	0,412	0,382	0,274	0,147	0,000
5	0,665	0,396	0,380	0,282	0,166	0,000
6	0,659	0,385	0,363	0,291	0,194	0,000
7	0,645	0,384	0,337	0,281	0,191	0,000
8	0,668	0,360	0,328	0,269	0,190	0,000

PLOŠČA št. 3						
Odsek	Širina reza na ZGORNJI strani v mm pri hitrosti:					
	1000	1500	2000	2500	3000	3500
1	1,098	1,102	1,146	1,145	1,183	1,191
2	1,030	1,031	1,058	1,051	1,063	1,046
3	0,973	0,966	1,004	0,979	0,987	0,998
4	0,891	0,891	0,945	0,923	0,924	0,911
5	0,868	0,874	0,928	0,904	0,911	0,887
6	0,772	0,783	0,849	0,820	0,840	0,819
7	0,673	0,684	0,729	0,730	0,749	0,727
8	0,618	0,629	0,663	0,665	0,682	0,668
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm					
1	1,119	0,672	0,570	0,480	0,270	0,000
2	1,093	0,599	0,537	0,382	0,165	0,000
3	1,081	0,621	0,506	0,404	0,193	0,000
4	1,074	0,631	0,477	0,400	0,234	0,000
5	1,052	0,653	0,466	0,391	0,257	0,106
6	1,032	0,667	0,433	0,374	0,259	0,147
7	1,000	0,651	0,399	0,375	0,263	0,164
8	0,957	0,659	0,376	0,340	0,291	0,181

PLOŠČA št. 4										
Odsek	Širina reza na ZGORNJI strani v mm pri hitrosti:									
	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000
1	0,754	0,821	0,905	0,926	0,965	0,983	0,996	1,002	1,005	1,040
2	0,715	0,761	0,848	0,847	0,903	0,898	0,934	0,944	0,970	1,006
3	0,681	0,728	0,808	0,821	0,858	0,860	0,897	0,892	0,893	0,922
4	0,641	0,681	0,772	0,776	0,813	0,808	0,849	0,857	0,873	0,877
5	0,646	0,658	0,758	0,754	0,793	0,792	0,832	0,844	0,865	0,866
6	0,598	0,604	0,701	0,693	0,752	0,734	0,786	0,791	0,805	0,800
7	0,531	0,541	0,627	0,619	0,684	0,677	0,726	0,714	0,745	0,745
8	0,467	0,472	0,595	0,592	0,644	0,641	0,687	0,692	0,696	0,697
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm									
1	0,975	0,902	0,748	0,679	0,559	0,493	0,468	0,407	0,345	0,218
2	0,913	0,812	0,646	0,535	0,457	0,434	0,399	0,369	0,307	0,232
3	0,878	0,777	0,658	0,572	0,481	0,429	0,388	0,309	0,198	0,209
4	0,869	0,760	0,652	0,553	0,458	0,412	0,380	0,344	0,262	0,180
5	0,853	0,751	0,646	0,539	0,462	0,405	0,370	0,340	0,250	0,188
6	0,823	0,732	0,632	0,535	0,451	0,387	0,354	0,322	0,243	0,173
7	0,800	0,701	0,623	0,509	0,435	0,380	0,353	0,309	0,267	0,227
8	0,788	0,726	0,615	0,517	0,438	0,380	0,347	0,311	0,289	0,257

PLOŠČA št. 5											
	Širina reza na ZGORNJI strani v mm										
	pri hitrosti:										
Odsek	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
1	0,939	0,947	0,966	0,933	0,896	0,869	0,837	0,831	0,833	0,835	0,873
2	0,850	0,860	0,859	0,849	0,829	0,807	0,785	0,785	0,816	0,805	0,841
3	0,761	0,762	0,785	0,782	0,786	0,763	0,745	0,744	0,767	0,758	0,766
4	0,657	0,671	0,714	0,722	0,734	0,705	0,702	0,702	0,743	0,730	0,732
5	0,634	0,659	0,687	0,686	0,701	0,684	0,686	0,684	0,708	0,714	0,710
6	0,530	0,579	0,589	0,597	0,615	0,617	0,619	0,626	0,649	0,652	0,633
7	0,423	0,441	0,487	0,498	0,527	0,540	0,536	0,552	0,567	0,579	0,549
8	0,361	0,374	0,385	0,395	0,422	0,452	0,452	0,470	0,494	0,495	0,454
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm										
1	1,014	0,908	0,801	0,714	0,589	0,476	0,443	0,408	0,380	0,346	0,316
2	0,949	0,823	0,697	0,539	0,430	0,388	0,368	0,350	0,320	0,317	0,309
3	0,901	0,762	0,647	0,545	0,440	0,374	0,342	0,312	0,228	0,196	0,226
4	0,870	0,719	0,632	0,529	0,448	0,352	0,339	0,326	0,277	0,247	0,227
5	0,861	0,718	0,634	0,527	0,437	0,349	0,333	0,316	0,276	0,257	0,254
6	0,821	0,717	0,617	0,524	0,441	0,356	0,338	0,301	0,263	0,259	0,246
7	0,798	0,666	0,589	0,499	0,439	0,352	0,305	0,289	0,261	0,233	0,233
8	0,773	0,700	0,569	0,467	0,401	0,333	0,306	0,277	0,257	0,251	0,240

PLOŠČA št. 6								
	Širina reza na ZGORNJI strani v mm							
	pri hitrosti:							
Odsek	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500
1	0,379	0,365	0,368	0,359	0,291	0,354	0,323	0,353
2	0,359	0,349	0,358	0,356	0,253	0,359	0,336	0,355
3	0,365	0,356	0,370	0,357	0,238	0,364	0,340	0,338
4	0,377	0,358	0,375	0,363	0,272	0,370	0,373	0,368
5	0,355	0,350	0,364	0,365	0,282	0,372	0,374	0,379
6	0,353	0,348	0,356	0,362	0,304	0,358	0,380	0,396
7	0,364	0,361	0,363	0,378	0,343	0,375	0,404	0,422
8	0,398	0,386	0,377	0,396	0,391	0,404	0,407	0,445
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm							
1	0,373	0,326	0,301	0,274	0,206	0,240	0,229	0,226
2	0,304	0,271	0,266	0,248	0,147	0,239	0,229	0,220
3	0,316	0,286	0,273	0,223	0,090	0,191	0,178	0,180
4	0,314	0,287	0,268	0,236	0,120	0,214	0,193	0,184
5	0,326	0,295	0,263	0,236	0,132	0,193	0,220	0,181
6	0,324	0,308	0,268	0,251	0,167	0,185	0,206	0,184
7	0,322	0,300	0,262	0,243	0,187	0,179	0,201	0,226
8	0,333	0,304	0,260	0,248	0,195	0,182	0,171	0,210

PLOŠČA št. 7					
Odsek	Širina reza na ZGORNJI strani pri hitrosti:				
	1500	2000	2500	3000	3500
1	0,648	0,629	0,680	0,652	0,676
2	0,607	0,570	0,640	0,607	0,648
3	0,595	0,537	0,596	0,578	0,630
4	0,557	0,502	0,551	0,545	0,607
5	0,543	0,511	0,553	0,552	0,623
6	0,497	0,481	0,525	0,532	0,603
7	0,486	0,465	0,509	0,518	0,600
8	0,441	0,424	0,502	0,507	0,565
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm				
1	0,625	0,861	0,497	0,440	0,378
2	0,617	0,774	0,461	0,346	0,285
3	0,814	0,696	0,493	0,381	0,313
4	0,601	0,602	0,594	0,392	0,300
5	0,501	0,449	0,660	0,438	0,309
6	0,388	0,384	0,722	0,466	0,291
7	0,346	0,356	0,622	0,359	0,286
8	0,318	0,337	0,496	0,288	0,252

PLOŠČA št. 8					
Odsek	Širina reza na ZGORNJI strani v mm pri hitrosti:				
	1500	2000	2500	3000	3500
1	0,721	0,766	0,836	0,843	0,851
2	0,686	0,701	0,758	0,758	0,770
3	0,636	0,655	0,697	0,687	0,687
4	0,594	0,598	0,633	0,617	0,630
5	0,589	0,576	0,609	0,599	0,633
6	0,531	0,515	0,545	0,537	0,555
7	0,451	0,453	0,475	0,477	0,498
8	0,394	0,389	0,402	0,398	0,413
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm				
1	0,484	0,426	0,399	0,344	0,280
2	0,455	0,415	0,310	0,260	0,188
3	0,427	0,382	0,325	0,278	0,248
4	0,408	0,387	0,356	0,292	0,257
5	0,405	0,377	0,346	0,301	0,254
6	0,377	0,343	0,317	0,282	0,261
7	0,353	0,318	0,277	0,236	0,238
8	0,323	0,288	0,244	0,209	0,203

PLOŠČA št. 9					
	Širina reza na ZGORNJI strani v mm pri hitrosti:				
Odsek	2500	3000	3500	4000	4500
1	0,358	0,342	0,330	0,325	0,327
2	0,350	0,338	0,324	0,322	0,324
3	0,359	0,352	0,333	0,337	0,334
4	0,365	0,351	0,346	0,346	0,339
5	0,368	0,358	0,356	0,353	0,350
6	0,370	0,364	0,365	0,362	0,351
7	0,365	0,359	0,360	0,359	0,352
8	0,365	0,357	0,361	0,366	0,350
Odsek	Širina reza na SPODNJI strani v mm				
1	0,255	0,233	0,209	0,185	0,182
2	0,230	0,197	0,170	0,173	0,160
3	0,223	0,201	0,175	0,184	0,150
4	0,215	0,188	0,179	0,173	0,155
5	0,221	0,198	0,177	0,170	0,149
6	0,211	0,187	0,165	0,165	0,146
7	0,194	0,178	0,162	0,157	0,139
8	0,189	0,164	0,166	0,167	0,133

Priloga 2: Parametri površine rezov na ploščah

Plošča št. 1						
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)						
2000		2500		3000		
odsek meritve	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,524	-177,339	0,415	-171,812	0,508	-156,295
2	0,500	-186,454	0,417	-194,278	0,416	-217,939
3	0,389	-196,727	0,242	-184,707	0,279	-200,030
4	0,342	-203,164	0,200	-183,687	0,279	-201,591
5	0,249	-199,954	0,175	-180,611	0,281	-216,063
6	0,231	-205,547	0,171	-200,173	0,226	-206,085
7	0,114	-222,793	0,173	-191,346	0,187	-226,679
8	0,079	-213,301	0,223	-187,510	0,098	-182,427
9	0,055	-209,999	0,111	-188,365	0,156	-207,717
10	0,029	-218,061	0,109	-192,477	0,118	-197,512
11	0,054	-215,442	0,075	-197,494	0,116	-200,694
12	0,021	-215,922	0,039	-194,429	0,136	-196,644
3500		4000		4500		
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,575	-152,226	0,626	-178,846	0,610	-224,000
2	0,446	-200,566	0,518	-182,900	0,488	-196,377
3	0,417	-270,250	0,432	-313,223	0,442	-207,400
4	0,445	-212,446	0,451	-251,846	0,308	-194,699
5	0,338	-229,519	0,381	-283,885	0,286	-185,799
6	0,321	-211,056	0,307	-241,269	0,100	-274,825
7	0,199	-210,442	0,246	-291,138	0,132	-260,667
8	0,101	-229,642	0,251	-231,774	0,140	-238,540
9	0,150	-248,650	0,214	-273,231	0,109	-220,904
10	0,075	-228,264	0,105	-249,518	0,223	-278,593
11	0,157	-238,426	0,118	-247,390	0,141	-214,547
12	0,047	-212,851	0,126	-250,620	0,021	-300,949
5000						
	α (°)	R (mm)				
1	1,290	-295,270				
2	1,140	-195,632				
3	1,100	-221,074				
4	1,390	-127,247				
5	1,070	-278,706				
6	1,130	-244,531				
7	1,030	-217,937				
8	0,605	-305,156				
9	0,697	-189,309				
10	0,733	-230,167				
11	0,856	-204,260				
12	0,955	-187,601				

Plošča št. 1			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	2000	2500	3000
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,832	3,314	3,424
2	3,909	3,871	3,908
3	5,924	6,160	6,209
4	6,073	6,475	6,470
5	6,297	6,636	6,617
6	6,635	6,836	7,016
7	6,979	7,070	7,277
8	7,291	7,430	7,775
9	7,586	8,039	8,950
10	7,996	8,671	10,174
11	9,383	9,170	10,869
12	9,681	10,134	12,053
	3500	4000	4500
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,163	3,505	3,402
2	3,795	3,979	3,574
3	6,790	7,124	6,909
4	7,060	7,441	7,605
5	7,275	8,334	9,547
6	8,036	9,128	11,166
7	8,225	9,558	12,711
8	8,638	9,967	13,627
9	9,419	10,895	13,918
10	9,719	11,275	14,480
11	13,602	13,934	26,085
12	14,138	15,228	27,805
	5000		
	Ra (mikrometri)		
1	3,928		
2	4,132		
3	7,126		
4	9,056		
5	10,498		
6	12,431		
7	13,018		
8	14,489		
9	14,719		
10	15,412		
11	28,995		
12	38,682		

Plošča št. 2						
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)						
odsek meritve	1500		2000		2500	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,406	-159,519	0,227	-130,934	0,152	-128,721
2	0,403	-168,374	0,139	-147,764	0,234	-192,975
3	0,278	-185,388	0,102	-140,892	0,139	-137,960
4	0,349	-200,411	0,269	-148,998	0,006	-156,820
5	0,262	-200,827	0,094	-156,519	0,097	-148,155
6	0,183	-194,813	0,075	-159,246	-0,089	-157,505
7	0,078	-202,379	0,016	-161,999	0,056	-156,834
8	0,120	-205,583	0,027	-168,241	0,050	-136,075
9	0,095	-204,396	0,051	-153,460	-0,038	-148,569
10	0,139	-209,910	0,034	-167,280	-0,051	-162,267
11	0,052	-216,806	0,036	-172,837	-0,018	-152,790
12	0,102	-208,482	-0,008	-180,544	-0,042	-149,259
	3000		3500		4000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,094	-154,036	-0,151	-202,073	1,290	-121,820
2	-0,020	-180,659	-0,170	-197,136	1,660	-132,057
3	0,175	-202,012	0,075	-143,313	2,940	-42,544
4	0,005	-192,746	-0,063	-231,359	1,770	-84,611
5	0,178	-170,396	-0,002	-187,543	0,855	-157,222
6	-0,113	-155,457	-0,032	-183,333	1,160	-155,207
7	-0,131	-174,374	-0,085	-196,176	1,130	-145,380
8	-0,069	-176,223	-0,262	-246,846	0,710	-188,626
9	-0,121	-164,665	-0,230	-214,013	0,864	-214,670
10	-0,041	-183,340	-0,252	-202,487	0,819	-235,422
11	-0,021	-167,582	-0,105	-204,674	0,965	-213,727
12	-0,132	-170,722	-0,049	-200,655	0,749	-198,557

Plošča št. 2			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	1500	2000	2500
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,277	4,242	4,613
2	4,614	4,819	4,805
3	6,312	6,477	6,656
4	7,232	6,684	7,122
5	7,441	7,153	7,841
6	7,611	7,347	8,233
7	7,683	7,929	8,927
8	7,801	8,249	9,990
9	8,850	9,428	12,160
10	9,315	10,749	13,903
11	11,451	13,379	15,229
12	15,423	14,302	16,135
	3000	3500	4000
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,904	4,321	4,027
2	5,121	4,649	5,192
3	6,979	7,303	8,043
4	7,361	7,857	8,285
5	8,342	9,003	10,233
6	8,521	9,956	10,495
7	8,916	10,346	10,714
8	10,849	13,490	14,219
9	12,023	14,248	17,741
10	15,366	15,950	19,514
11	16,849	20,223	32,501
12	18,491	27,496	95,931

Plošča št. 3						
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)						
odsek meritve	1000		1500		2000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,599	-205,081	0,507	-179,750	0,440	-123,573
2	0,755	-233,388	0,551	-176,427	0,414	-134,024
3	0,669	-246,219	0,510	-177,785	0,267	-128,707
4	0,576	-264,003	0,440	-195,517	0,127	-137,199
5	0,528	-244,777	0,457	-207,818	0,187	-148,515
6	0,494	-253,308	0,407	-199,551	0,221	-164,724
7	0,401	-258,588	0,377	-193,957	0,106	-154,094
8	0,260	-274,639	0,242	-201,649	0,180	-148,066
9	0,223	-282,440	0,327	-216,858	0,155	-158,429
10	0,311	-262,384	0,338	-206,046	0,025	-152,672
11	0,323	-253,360	0,276	-214,439	0,120	-162,752
12	0,228	-289,532	0,256	-225,020	0,142	-164,054
	2500		3000		3500	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,477	-153,651	0,246	-161,944	1,940	-173,844
2	0,306	-212,653	0,329	-203,486	1,500	-187,673
3	0,172	-172,886	0,221	-249,879	1,400	-154,254
4	0,187	-171,992	0,263	-238,732	1,120	-160,586
5	0,174	-180,001	0,366	-189,152	1,400	-166,456
6	0,184	-173,490	0,218	-201,214	1,110	-212,594
7	0,187	-149,208	0,272	-197,896	1,340	-193,955
8	0,097	-145,202	0,159	-186,298	1,290	-164,115
9	0,122	-142,699	0,016	-211,460	1,220	-212,149
10	0,032	-146,132	-0,060	-209,810	1,120	-170,819
11	0,135	-154,917	0,126	-191,958	1,200	-199,881
12	0,013	-160,713	0,113	-192,741	0,997	-216,802

Plošča št. 3			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	1000	1500	2000
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,016	4,520	4,115
2	4,295	4,864	4,930
3	5,169	6,071	6,223
4	6,070	6,194	6,669
5	6,099	6,666	7,150
6	6,410	6,882	7,595
7	6,575	7,138	8,287
8	6,944	7,540	9,051
9	7,168	7,818	9,773
10	7,441	10,120	12,213
11	8,098	10,494	13,257
12	8,265	13,623	16,398
	2500	3000	3500
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,325	4,805	5,317
2	4,617	5,417	5,351
3	5,947	6,691	5,774
4	6,705	6,993	8,301
5	7,344	7,699	8,586
6	7,670	8,860	9,650
7	7,966	10,221	11,185
8	10,486	13,235	15,370
9	12,321	13,472	17,439
10	13,865	16,279	23,554
11	16,528	16,502	24,145
12	21,717	29,382	35,085

Plošča št. 4								
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)								
odsek meritve	1500		2000		2500		3000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	1,101	-310,559	1,241	-231,989	0,972	-177,013	0,820	-140,545
2	0,949	-344,960	0,878	-322,775	0,903	-192,142	0,731	-181,212
3	0,890	-319,836	0,829	-232,751	0,784	-276,767	0,747	-174,955
4	0,810	-353,238	0,801	-213,651	0,585	-208,038	0,696	-153,233
5	0,761	-338,468	0,670	-262,499	0,601	-265,161	0,617	-150,303
6	0,694	-361,071	0,538	-285,608	0,518	-229,246	0,549	-176,638
7	0,476	-362,278	0,487	-253,108	0,441	-234,048	0,484	-198,336
8	0,515	-378,228	0,540	-309,830	0,409	-246,798	0,409	-193,267
9	0,582	-380,081	0,464	-276,819	0,482	-227,389	0,439	-179,139
10	0,640	-444,842	0,404	-230,199	0,350	-258,716	0,316	-208,511
11	0,619	-495,546	0,449	-271,248	0,403	-244,276	0,227	-190,925
12	0,704	-403,528	0,456	-272,475	0,398	-227,877	0,281	-183,218
	3500		4000		4500		5000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,769	-168,072	0,769	-91,950	0,375	-98,292	0,465	-114,387
2	0,789	-187,111	0,643	-100,978	0,392	-102,467	0,325	-199,966
3	1,097	-171,570	0,461	-132,304	0,361	-109,277	0,428	-145,665
4	0,897	-158,769	0,480	-126,902	0,424	-150,090	0,355	-159,769
5	0,747	-167,310	0,383	-128,097	0,380	-150,409	0,419	-215,850
6	0,710	-179,526	0,473	-139,407	0,364	-153,274	0,497	-166,516
7	0,523	-155,180	0,443	-140,714	0,332	-130,052	0,155	-144,021
8	0,476	-165,734	0,332	-119,644	0,239	-122,721	0,203	-126,507
9	0,430	-179,948	0,252	-148,196	0,124	-128,461	0,064	-152,734
10	0,488	-162,076	0,266	-174,615	0,095	-140,476	0,197	-137,454
11	0,458	-162,741	0,283	-144,090	0,252	-127,805	0,110	-143,357
12	0,470	-166,452	0,349	-144,728	0,253	-130,620	0,229	-139,524
	5500		6000					
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)				
1	0,350	-143,024	0,565	-110,443				
2	0,390	-119,589	0,240	-114,235				
3	0,235	-125,956	0,135	-131,862				
4	-0,010	-198,771	0,090	-94,338				
5	0,395	-183,419	0,445	-82,415				
6	0,175	-125,196	0,290	-177,301				
7	0,065	-185,663	0,030	-163,531				
8	0,045	-222,221	0,155	-168,825				
9	0,115	-166,197	0,085	-144,530				
10	0,175	-135,787	-0,020	-155,269				
11	0,045	-147,878	0,150	-129,004				
12	0,000	-149,318	0,075	-138,520				

Plošča št. 4				
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)				
	1500	2000	2500	3000
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,379	4,283	4,264	3,931
2	4,165	4,339	4,844	4,061
3	4,289	5,321	4,899	4,829
4	4,816	5,429	5,354	5,104
5	5,050	5,806	5,389	5,576
6	5,325	5,922	6,094	5,940
7	5,422	6,187	6,542	6,066
8	5,882	6,351	6,813	6,819
9	6,078	6,649	7,074	6,949
10	6,114	7,340	7,183	7,881
11	6,830	7,893	8,156	8,347
12	7,020	8,117	9,410	10,130
	3500	4000	4500	5000
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,717	4,732	4,374	4,618
2	5,058	5,154	4,813	5,423
3	5,391	5,590	5,437	6,027
4	5,838	5,984	6,196	6,592
5	6,002	7,221	6,631	7,036
6	6,311	7,661	7,647	7,728
7	6,755	7,987	8,031	8,554
8	7,336	8,383	9,227	9,367
9	8,385	9,386	9,508	12,017
10	8,870	11,518	11,944	13,934
11	10,148	12,035	12,124	16,926
12	10,831	14,517	15,087	18,507
	5500	6000		
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)		
1	5,027	4,608		
2	5,554	5,641		
3	6,439	6,467		
4	6,763	6,544		
5	7,495	7,185		
6	8,304	9,411		
7	9,049	9,994		
8	11,206	12,222		
9	12,684	14,290		
10	14,513	17,663		
11	17,163	19,883		
12	22,060	35,419		

Plošča št. 5								
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)								
odsek meritve	1500		2000		2500		3000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,740	-375,649	0,605	-309,921	0,413	-273,505	0,478	-184,363
2	0,701	-393,913	0,694	-363,013	0,603	-213,120	0,415	-149,802
3	0,795	-300,990	0,524	-254,443	0,461	-202,200	0,226	-167,916
4	0,659	-303,670	0,440	-299,814	0,418	-253,131	0,434	-160,034
5	0,701	-371,205	0,373	-266,195	0,425	-251,719	0,372	-188,536
6	0,526	-344,878	0,371	-291,795	0,456	-211,089	0,361	-195,165
7	0,517	-310,030	0,273	-246,253	0,446	-224,098	0,233	-168,039
8	0,491	-308,052	0,327	-237,382	0,291	-229,146	0,221	-177,899
9	0,466	-253,585	0,264	-239,720	0,278	-187,520	0,261	-199,709
10	0,401	-225,503	0,236	-202,325	0,243	-188,042	0,226	-168,912
11	0,459	-213,953	0,262	-212,767	0,297	-178,746	0,193	-173,990
12	0,475	-176,600	0,354	-190,451	0,275	-179,043	0,241	-184,120
	3500		4000		4500		5000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,538	-166,736	0,434	-149,016	0,626	-123,276	0,560	-103,714
2	0,371	-168,253	0,407	-134,964	0,483	-108,096	0,627	-105,278
3	0,345	-145,838	0,164	-143,275	0,417	-130,978	0,265	-117,257
4	0,290	-149,356	0,321	-124,124	0,422	-110,341	0,453	-163,952
5	0,344	-165,808	0,162	-124,846	0,257	-120,730	0,402	-100,867
6	0,253	-174,544	0,335	-139,424	0,269	-113,991	0,244	-124,516
7	0,297	-177,607	0,162	-136,693	0,278	-114,669	0,128	-118,225
8	0,277	-161,056	0,302	-144,806	0,182	-126,873	0,215	-137,567
9	0,255	-137,799	0,090	-129,846	-0,026	-123,149	0,202	-107,384
10	0,237	-147,272	0,204	-127,799	0,144	-129,007	0,189	-115,369
11	0,289	-154,623	0,173	-131,440	0,166	-121,073	0,186	-137,948
12	0,230	-153,363	0,251	-135,194	0,150	-124,340	0,231	-111,469
	5500		6000		6500			
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)		
1	0,651	-110,305	0,527	-94,411	0,265	-194,184		
2	0,548	-117,089	0,180	-107,605	0,280	-106,291		
3	0,420	-140,303	0,196	-150,735	0,215	-129,100		
4	0,265	-208,067	0,070	-165,167	0,165	-120,892		
5	0,364	-136,141	0,075	-169,289	0,420	-114,797		
6	0,237	-145,877	0,040	-128,762	0,335	-132,153		
7	0,091	-193,198	0,065	-113,583	0,227	-154,743		
8	0,063	-132,425	0,024	-129,413	0,134	-107,199		
9	0,020	-142,474	-0,054	-135,343	-0,131	-161,528		
10	0,029	-116,403	0,073	-134,620	0,006	-139,071		
11	0,079	-144,000	-0,061	-130,338	-0,102	-154,730		
12	0,146	-117,650	0,082	-126,527	-0,081	-111,033		

Plošča št. 5				
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)				
	1500	2000	2500	3000
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,703	4,172	4,070	4,294
2	4,950	5,104	4,603	4,660
3	5,992	5,325	4,753	5,200
4	6,062	6,214	5,481	5,699
5	6,306	6,463	6,266	6,162
6	6,492	6,548	6,441	6,659
7	6,689	6,667	6,612	6,800
8	6,769	6,977	6,678	6,972
9	6,921	7,216	6,930	7,506
10	6,991	7,447	7,393	7,799
11	7,294	7,654	8,152	8,008
12	7,945	9,212	9,819	10,538
	3500	4000	4500	5000
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,348	4,080	4,009	4,217
2	4,912	4,305	4,206	4,951
3	5,599	5,688	6,328	5,875
4	5,948	6,991	6,622	6,905
5	6,306	7,124	7,428	7,944
6	7,234	7,281	7,967	8,294
7	7,349	7,983	8,206	8,738
8	7,480	8,347	8,456	9,140
9	7,763	8,596	8,706	9,820
10	9,065	9,425	9,814	11,506
11	9,549	10,003	12,104	12,650
12	11,952	12,572	14,155	16,571
	5500	6000	6500	
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	
1	4,310	4,567	5,028	
2	4,955	5,254	5,990	
3	6,403	6,245	6,929	
4	6,888	7,049	7,073	
5	7,776	7,557	8,839	
6	7,847	9,389	9,507	
7	8,571	9,979	10,566	
8	9,953	11,081	12,543	
9	10,962	12,172	14,313	
10	12,659	15,525	17,779	
11	15,721	16,618	19,291	
12	18,624	20,422	25,341	

Plošča št. 6						
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)						
odsek meritve	3000		3500		4000	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,506	-117,174	0,600	-118,588	0,685	-105,556
2	0,524	-121,921	0,550	-123,714	0,597	-110,683
3	0,464	-125,548	0,492	-175,403	0,475	-186,763
4	0,400	-120,426	0,500	-158,509	0,502	-170,974
5	0,332	-133,329	0,353	-139,263	0,351	-139,713
6	0,211	-132,757	0,241	-150,475	0,312	-175,285
7	0,136	-132,912	0,177	-145,015	0,276	-160,167
8	0,070	-143,991	0,152	-156,042	0,179	-169,474
9	0,064	-126,530	0,112	-155,143	0,199	-173,530
10	-0,012	-145,852	0,115	-168,447	0,062	-170,859
11	0,075	-143,881	0,113	-172,424	0,136	-168,254
12	0,047	-153,051	0,156	-170,825	0,148	-221,454
	4500		5000		5500	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,752	-112,012	0,759	-128,614	0,725	-131,716
2	0,607	-112,787	0,623	-121,025	0,612	-164,503
3	0,504	-152,242	0,601	-186,665	0,563	-201,611
4	0,501	-152,663	0,533	-194,480	0,384	-264,879
5	0,449	-157,722	0,495	-171,177	0,331	-336,310
6	0,415	-170,248	0,397	-222,029	0,309	-315,976
7	0,251	-200,142	0,307	-179,746	0,254	-217,447
8	0,161	-173,375	0,235	-189,684	0,114	-243,570
9	0,200	-178,547	0,191	-214,895	0,223	-262,655
10	0,217	-180,683	0,169	-210,378	0,155	-248,161
11	0,151	-179,113	0,218	-224,719	0,230	-258,281
12	0,164	-178,045	0,211	-237,455	0,177	-294,330
	6000		6500			
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)		
1	0,756	-150,056	0,777	-150,608		
2	0,729	-141,909	0,784	-185,160		
3	0,664	-171,420	0,585	-169,446		
4	0,665	-238,336	1,355	-224,064		
5	0,523	-236,275	0,928	-369,737		
6	0,616	-269,615	0,495	-478,512		
7	0,449	-246,236	0,507	-233,631		
8	0,436	-262,311	0,397	-289,912		
9	0,327	-256,199	0,257	-292,551		
10	0,290	-355,241	0,412	-339,576		
11	0,258	-323,072	0,334	-356,829		
12	0,400	-265,203	0,372	-364,179		

Plošča št. 6			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	3000	3500	4000
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,859	3,440	3,470
2	4,714	3,983	3,688
3	5,331	5,426	5,162
4	5,674	5,878	5,273
5	6,007	5,930	5,727
6	6,464	6,002	5,949
7	6,592	6,334	6,471
8	6,970	6,503	6,531
9	6,992	6,540	7,018
10	7,056	6,861	7,118
11	7,743	7,105	7,329
12	7,816	8,054	7,463
	4500	5000	5500
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,302	3,503	3,455
2	3,527	5,030	3,622
3	4,871	5,417	5,472
4	5,564	6,255	5,581
5	5,584	6,051	5,710
6	5,691	7,548	5,742
7	6,412	5,237	6,113
8	6,552	6,366	6,446
9	6,680	6,231	6,795
10	7,061	6,784	7,112
11	7,801	7,493	9,735
12	9,100	9,465	10,882
	6000	6500	
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	
1	3,458	4,236	
2	3,870	4,753	
3	5,536	5,480	
4	5,941	5,831	
5	6,498	6,174	
6	6,883	6,340	
7	7,199	6,794	
8	7,489	7,174	
9	8,634	8,610	
10	9,044	9,265	
11	10,289	14,520	
12	13,161	16,426	

Plošča št. 7							
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)							
		1500		2000		2500	
odsek meritve	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	
1	0,201	84,394	0,599	-93,145	0,438	-140,669	
2	0,498	60,362	0,505	100,000	0,442	-114,413	
3	0,668	49,768	0,050	107,586	0,580	40,000	
4	0,185	28,807	0,340	69,731	0,608	261,966	
5	-0,180	30,243	0,035	41,155	0,398	126,047	
6	-0,487	39,369	-0,464	45,251	-0,168	43,048	
7	0,759	46,851	0,563	40,837	0,461	35,844	
8	0,657	66,681	0,912	77,276	0,369	50,367	
9	0,473	119,196	0,602	93,381	0,379	57,220	
10	0,632	120,785	0,570	77,387	0,613	53,282	
11	0,581	108,324	0,621	131,125	0,311	77,858	
12	0,436	68,209	0,742	88,022	0,285	67,105	
		3000		3500			
		α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)		
1	0,725	-113,833	0,731	334,314			
2	0,657	309,138	0,736	350,527			
3	0,393	265,000	0,981	-190,653			
4	0,460	284,482	0,702	256,926			
5	0,797	100,000	0,597	-429,550			
6	0,684	-350,309	0,632	-339,417			
7	0,793	-305,926	0,501	-262,140			
8	0,828	-335,212	0,682	-243,674			
9	0,328	-226,857	0,410	-562,716			
10	0,583	-107,176	0,549	-269,183			
11	0,437	90,328	0,433	-340,568			
12	0,399	246,226	0,562	-121,901			

Plošča št. 7			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	1500	2000	2500
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,800	4,182	4,622
2	4,700	4,883	4,790
3	4,943	5,060	4,848
4	5,624	5,530	5,377
5	6,817	6,363	7,141
6	7,195	8,396	10,021
7	7,618	9,490	11,644
8	8,551	11,211	12,408
9	12,769	15,486	13,200
10	14,606	17,986	14,566
11	19,253	19,294	16,658
12	25,987	20,702	21,951
	3000	3500	
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	
1	3,499	3,827	
2	4,100	4,285	
3	4,661	4,542	
4	4,840	5,604	
5	7,435	6,649	
6	7,669	7,030	
7	7,688	7,587	
8	8,460	7,683	
9	8,841	8,055	
10	10,670	8,602	
11	11,993	9,294	
12	13,514	9,982	

Plošča št. 8						
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)						
odsek meritve	1500		2000		2500	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	1,164	69,904	0,669	76,993	0,690	61,656
2	1,022	156,995	0,604	100,000	0,644	96,243
3	0,980	157,399	0,539	87,616	0,815	40,000
4	0,699	238,172	0,416	110,142	0,568	84,343
5	0,842	132,034	0,431	88,313	0,272	73,364
6	0,599	223,189	0,401	91,649	0,195	82,286
7	0,423	218,697	0,374	90,765	0,262	89,060
8	0,841	103,449	0,339	230,953	0,397	106,291
9	0,315	86,592	0,246	120,247	0,349	139,317
10	0,408	90,282	0,289	180,744	0,209	172,642
11	0,510	76,437	0,274	118,340	0,283	120,033
12	0,700	122,767	0,316	136,051	0,346	178,783
	3000		3500			
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)		
1	0,955	63,122	-0,926	45,301		
2	0,980	172,549	-1,380	382,497		
3	0,960	265,000	-1,260	136,468		
4	1,111	122,292	-0,993	131,280		
5	0,891	100,000	-0,944	99,185		
6	0,991	77,041	-0,631	129,140		
7	-0,448	103,505	-0,925	120,749		
8	-0,452	125,155	-0,652	94,517		
9	-0,257	178,481	-0,377	207,868		
10	-0,370	234,253	-0,424	133,881		
11	-0,372	277,573	-0,306	331,351		
12	-0,318	252,297	-0,304	380,031		

Plošča št. 8			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	1500	2000	2500
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	3,978	4,543	4,249
2	4,380	5,030	4,655
3	4,487	5,352	4,956
4	5,099	5,697	5,833
5	5,550	6,530	6,162
6	5,837	6,766	6,510
7	6,661	7,234	7,045
8	7,128	7,743	7,361
9	7,749	8,412	8,689
10	8,073	9,060	9,566
11	8,248	9,794	10,346
12	10,674	10,497	12,046
	3000	3500	
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	
1	4,431	4,226	
2	4,755	4,867	
3	4,846	5,200	
4	5,162	5,779	
5	5,454	6,142	
6	6,061	6,348	
7	6,578	7,099	
8	7,116	7,617	
9	7,969	8,800	
10	9,003	9,374	
11	10,762	10,028	
12	12,356	12,033	

Plošča št. 9						
Kot poševnosti in radij ukrivljenosti površin pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)						
odsek meritve	2500		3000		3500	
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)
1	0,217	103,602	0,538	242,364	0,517	130,688
2	0,457	189,360	0,403	100,000	0,605	124,510
3	0,324	179,084	0,336	297,256	0,498	40,000
4	0,087	184,939	0,325	335,853	0,432	157,199
5	-0,007	151,573	0,154	399,176	0,380	207,950
6	0,392	223,052	0,169	632,415	0,390	569,783
7	-0,323	283,126	-0,017	345,814	0,163	460,182
8	0,024	261,447	0,025	564,421	0,120	48,236
9	-0,023	383,057	0,034	105,145	0,029	523,033
10	-0,163	474,046	-0,014	-378,237	0,006	-12,881
11	-0,031	414,335	-0,076	-267,720	-0,096	85,050
12	-0,188	558,363	-0,196	192,750	-0,213	0,151
	4000		4500			
	α (°)	R (mm)	α (°)	R (mm)		
1	0,213	446,114	0,487	-192,143		
2	0,237	160,027	0,424	-382,246		
3	0,180	265,000	0,357	269,599		
4	0,236	844,755	0,288	12,667		
5	0,410	100,000	0,306	-10,681		
6	0,180	73,183	0,248	128,613		
7	0,275	-56,617	0,262	-500,832		
8	0,141	-217,633	0,263	-511,260		
9	0,049	-139,778	0,227	-307,643		
10	-0,090	-280,678	0,300	-331,593		
11	-0,061	-95,029	0,568	-334,929		
12	0,342	585,512	0,740	-647,476		

Plošča št. 9			
Ra pri različnih hitrostih pomika laserske glave (mm/min)			
	2500	3000	3500
odsek po debelini	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)
1	4,445	4,145	4,177
2	4,680	4,436	4,688
3	4,772	4,593	4,746
4	4,954	4,769	4,846
5	5,427	5,122	5,212
6	6,034	5,362	5,347
7	6,066	5,586	5,422
8	6,427	5,809	5,699
9	7,073	6,051	5,918
10	7,593	6,337	6,295
11	7,828	6,707	6,817
12	7,979	7,471	7,568
	4000	4500	
	Ra (mikrometri)	Ra (mikrometri)	
1	3,986	3,836	
2	4,127	4,273	
3	4,574	4,437	
4	4,960	4,782	
5	5,022	4,886	
6	5,059	5,074	
7	5,317	5,212	
8	6,061	5,439	
9	6,359	5,899	
10	6,606	5,980	
11	7,245	6,160	
12	7,595	6,575	

Priloga 3: Primeri nastalih površin po laserskem rezu



debelina plošče = 16 mm
hitrost pomika laserske glave = 2000 mm/min
pomožni plin = dušik



debelina plošče = 16 mm
hitrost pomika laserske glave = 5000 mm/min
pomožni plin = kisik



debelina plošče = 10 mm
hitrost pomika laserske glave = 1500 mm/min



debelina plošče = 10 mm

hitrost pomika laserske glave = 6000 mm/min



debelina plošče = 6 mm

hitrost pomika laserske glave = 1500 mm/min