VPLIV PARAMETROV STRUKTURIRANJA POVRŠIN NA MEHANSKE IN STRUKTURNE LASTNOSTI NERJAVNEGA JEKLA

Vladan Mladenovič

Doktorska disertacija
Mednarodna podiplomska šola Jožefa Stefana
Ljubljana, Slovenija, junij 2015

Komisija za oceno doktorske disertacije:

doc. dr. Janez Kovač, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

prof. dr. Uroš Cvelbar, Institut »Jožef Stefan«, Ljubljana

izr. prof. dr. Marta Klanjšek Gunde, Naravoslovnotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani

MEDNARODNA PODIPLOMSKA ŠOLA JOŽEFA STEFANA
JOŽEF STEFAN INTERNATIONAL POSTGRADUATE SCHOOL



Vladan Mladenovič

VPLIV PARAMETROV STRUKTURIRANJA POVRŠIN NA MEHANSKE IN STRUKTURNE LASTNOSTI NERJAVNEGA JEKLA

Doktorska disertacija

INFLUENCE OF SURFACE STRUCTURING PARAMETERS ON MECHANICAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF STAINLESS STEEL

Doctoral Dissertation

Mentor: doc. dr. Miha Čekada

Ljubljana, Slovenija, junij 2015

Kazalo

Povzetek ..... **VII**

Abstract ..... **IX**

Seznam kratic ..... **XI**

Seznam simbolov ..... **XII**

1 Uvod **1**

2 Teoretične osnove **3**

2.1 Preoblikovanje površine kovin 4

2.2 Razenje 5

2.3 Frezanje 7

2.3.1 Mikrofrezanje 10

2.4 Laserska obdelava 16

2.4.1 Fizikalne osnove 16

2.4.2 Delovanje laserja 19

2.4.3 Interakcija laserja s površino trdne snovi 21

2.4.4 Laserski sistemi 24

2.4.4.1 Plinski laserji 24

2.4.4.2 Trdninski laserji 28

2.4.4.3 Polprevodniški laserji 31

2.5 Interpretacija rezultatov statističnih metod 33

2.5.1 Metoda eksperimentalnega načrtovanja – DoE 35

2.5.2 Metodologija odzivne površine – RSM 38

2.5.3 Analiza variance – ANOVA 39

2.5.4 Pregled raziskav površinske obdelave z uporabo RSM 41

3 Eksperimentalno delo **45**

3.1 Priprava vzorcev 45

3.1.1 Pregled osnovnega materiala 45

3.1.2 Priprava na eksperimente 46

3.1.3 Razenje 47

3.1.4 Mikrofrezanje 48

3.1.5 Laserska mikroobdelava 50

3.2 Karakterizacija vzorcev 52

3.2.1 Uvod 52

3.2.2 Priprava vzorcev za analizo 53

3.2.3 Merjenje profilov s profilometrom 53

3.2.4 Merjenje topografije s konfokalno optično mikroskopijo 55

3.2.5 Merjenje mehanskih lastnosti 55

3.2.6 Elektronska mikroskopija 57
3.2.7 Statistična analiza 58

4 Rezultati in diskusija 63
4.1 Razenje 63
4.1.1 Topografske značilnosti 64
4.1.2 Utrjevanje 68
4.1.3 Analiza ANOVA vplivnih parametrov 69
4.1.3.1 Analiza ANOVA površine raze na prerezu; A_g 71
4.1.3.2 Analiza ANOVA površine grebena raze na prerezu, A_r 72
4.1.3.3 Analiza ANOVA globine raze; h_g 73
4.1.3.4 Analiza ANOVA višine grebena raze; h_r 75
4.1.3.5 Analiza ANOVA širine raze na ničelni višini, w_0 75
4.1.3.6 Analiza ANOVA širine med grebenoma raze; w_1 76
4.1.3.7 Analiza ANOVA hrapavosti površine na dnu raze; R_a 76
4.1.3.8 Analiza ANOVA razpona globinskega utrjevanja v prečni smeri; σ_x 77
4.1.3.9 Analiza ANOVA razpona globinskega utrjevanja v vzdolžni smeri; σ_y 77
4.1.3.10 Analiza ANOVA intenzivnosti globinskega utrjevanja; H_{max}/H_0 78
4.1.4 Sklep 78
4.2 Mikrofrezanje 80
4.2.1 Topografske značilnosti 81
4.2.2 Utrjevanje 84
4.2.3 Analiza ANOVA vplivnih parametrov 85
4.2.3.2 Analiza ANOVA hrapavosti obdelane površine; R_a 86
4.2.5 Sklep 88
4.3 Laserska mikroobdelava 89
4.3.1 Topografske značilnosti 91
4.3.2 Kemijski procesi in utrjevanje 93
4.3.3 Analiza ANOVA vplivnih parametrov 95
4.3.3.1 Analiza ANOVA površine kanala na prerezu; A_g 96
4.3.3.3 Analiza ANOVA površine grebena na prerezu; A_r 98
4.3.3.4 Analiza ANOVA globina kanala; h_g 98
4.3.3.6 Analiza ANOVA višine grebena; h_r 100
4.3.3.7 Analiza ANOVA širine kanala na ničelni višini; w_0 100
4.3.3.8 Analiza ANOVA širine med grebenoma; w_1 101
4.3.3.9 Analiza ANOVA hrapavosti obdelane površine; R_a 102
4.3.4 Sklep 102

5 Zaključki 105

6 Zahvala 107

7 Literatura in viri 109

Kazalo slik 117

Kazalo tabel 123

Priloge 125

Povzetek

V tem raziskovalnem delu smo se osredinili na tri metode mikropreoblikovanja, ki se po svojem fizikalnem področju bistveno razlikujejo. Metode so v industriji že implementirane in optimizirane za zelo konkretne aplikacije, in sicer pri izdelavi zaščitnih elementov na laminacijskih ploščah v proizvodnji identifikacijskih kartic in izdelavi intaglio tiskarskih plošč, namenjenih reliefnemu tisku bankovcev, potnih listin ipd.

K prvi metodi mikropreoblikovanja spada postopek razenja, kjer z izbrano konico enakomerno razimo po površini materiala in ga hladno preoblikujemo. Ključni procesni parametri so: oblika konice orodja (radij), hitrost razenja, pritisk konice v material in število prehodov konice. K drugi metodi spada postopek mikrofrezanja, kjer del materiala z orodjem (mikrofrezalom) pri obdelavi odvzemamo. Relevantni parametri obdelave so: geometrija orodja (radij), globina reza orodja ter vrtilna in podajalna hitrost orodja. Pri obeh metodah igra pomembno vlogo tudi material orodja ter mazanje orodja, ki pa ju nismo podrobneje analizirali. K zadnji metodi spada postopek laserskega strukturiranja, kjer material z veliko koncentracijo energije lokalno segrejemo tako, da nastane lokalno pretaljevanje, izparevanje materiala in celo nastanek plazme. Ključni parametri laserske obdelave so: frekvenca pulziranja laserskega žarka, povprečna izhodna moč žarka, skenirna hitrost in pomik žarka iz žarišča.

V vseh treh primerih smo raziskali vpliv štirih karakterističnih procesnih parametrov ter njihovo korelacijo na geometrijske spremembe (širina, globina, višina, površina na prerezu, hrapavost) ter spremembe trdote na prerezu obdelane površine. V raziskavi smo uporabili tankostenski material iz nerjavnega jekla tipa AISI 304.

Analizo površine smo izvajali z optično mikroskopijo in profilometrijo. Z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM) in energijsko disperzijsko spektroskopijo (EDS) smo pridobili osnovne podatke strukture in sestave na prerezu. Analizo trdote smo izvajali na metalografsko pripravljenih vzorcih z mrežo meritev trdote na prerezu po Vickersu. Izmerjene vrednosti horizontalno in vertikalno od strukture smo modelirali z Gaussovo prilagoditveno funkcijo.

Izmerjene vrednosti analiz so bile vhodni podatki za statistično analizo. Ker smo v vseh treh eksperimentalnih primerih analizirali štiri procesne parametre, je bila na treh nivojih za tak primer eksperimentalnega načrtovanja DoE kot najprimernejša izbrana Taguchijeva ortogonalna tabela $L_{27}(3^4)$. Kot pomožni inštrument za statistično analizo smo uporabili programski paket »Design-Expert 8.0«, ki je poleg metode DoE podprt še z metodo odzivne površine RSM in analizo variance ANOVA. Slednja nam je omogočila, da smo na diskreten način identificirali vpliv obdelovalnih parametrov.

Pri razenju smo dobili dobre statistične rezultate, ki nam povedo, da lahko z zastavljenim modelom z veliko verjetnostjo napovemo geometrijske spremembe. Z nekoliko manjšo verjetnostjo lahko napovemo širjenje globinskega utrjevanja, rezultata analize utrjevanja in hrapavosti površine pa sta prenizka, da bi te z dovolj veliko verjetnostjo lahko napovedali, kljub temu pa so nam ti dali neke smernice.

Pri mikrofrezanju, kjer smo analizirali hrapavost obdelane površine, smo dobili nekoliko slabši rezultat statistike, vendar kljub temu dovolj dober, da lahko z dovolj veliko gotovostjo interpretiramo dobljene rezultate.

Dobljeni statistični rezultati laserske mikroobdelave so dobri in zanesljivi. Z zanesljivimi modeli lahko z dovolj veliko gotovostjo napovemo vse geometrijske spremembe obdelave, razen za hrapavost površine.

Ključne besede: mikroobdelava, razenje, mikrofrezanje, laser, eksperimentalno načrtovanje DoE, analiza variance ANOVA.

Abstract

In this thesis we have focused on three micromachining (in this case, microforming) methods with fundamentally different physical backgrounds. All three methods are already implemented and optimised in industry for very specific applications in the security-printing field. They are applied to engrave the security features on lamination plates and intaglio printing plates. The lamination plates are used for identity-card production and the intaglio printing plates are dedicated to printing the tactile security images for banknotes, passports, etc. The first micromachining method is scratching, where a needle-tip is uniformly slid over the workpiece surface while the material is cold formed. The main engraving parameters are the needle-tip radius, the tool load, the transverse tool velocity and the number of tool passes. The second micromachining method is micromilling, where a part of the workpiece material is removed by a cutting tool (the micro endmill tool). The relevant process parameters are the tool geometry (tool radius), the cutting depth, the rotation speed and the tool transverse speed. Both the tool material and the lubrication play an important role in both methods, but they were not analysed in more detail. Laser engraving is the last micromachining method, where the laser-beam energy is used to locally heat the workpiece material, possibly up to the melting point, or even to the boiling point. With sufficiently high energy the material is removed from the target area as a vapour, or in some cases plasma can appear. The process parameters are the pulse frequency, the average output laser power, the laser-beam scan speed and the laser-beam focus.

Common to all three methods are the impacts of four characteristic process parameters and their correlations with the geometrical variables (width, depth, cross-sectional area and roughness), and the hardness on the groove cross-section. The material used in this work was a thick cold-rolled stainless steel AISI 304.

The surface-profile analyses were carried out using optical microscopy and profilometry. The scanning electron microscopy (SEM) and energy-dispersive *X*-ray spectroscopy (EDS) were used to obtain the basic data of the microstructure and the chemical composition of the material at the groove cross-section. For the evaluation of the hardness, a cross-section was prepared using a standard metallographic preparation and the measurements were performed at a pre-defined mesh. The hardening was modelled as a Gaussian in both directions: perpendicular and parallel to the surface.

The evaluated results were the input data for the statistical analysis. All three experimental methods were conducted using four process parameters at three discrete values. In this case the design of experiment (DoE) and L_{27} (3^4) Taguchi standard orthogonal array were used for the experimental design. In addition to the DoE, the applied statistical software “Design-Expert 8.0” is supported by the response-surface methodology (RSM) and the analysis of variance ANOVA. The latter enabled us to identify the effect of each process parameter and their interactions in terms of the responses.

In the case of scratching we obtained robust statistical results, which show us that the performed model for the geometrical responses can be reliably predicted. The spread of the hardening can be predicted with a somewhat lower probability, while the statistical

results for hardening intensity and surface roughness are too low to be reliably predicted. However, the results gave us some guidelines.

In the case of micromilling, the statistical results for the surface roughness were less significant, but still good enough so that the geometrical variables could be interpreted with a sufficient probability.

The resulting statistical results for the laser micromachining are good and significant. With reliable performed models we can predict all the geometrical responses with a high probability, except for the surface roughness.

Keywords: micromachining, scratching, micromilling, laser, design of experiment DoE, analysis of variance ANOVA

Seznam kratic

ANOVA	=	analiza variance (ang. *Analysis of variance*)
c-BN	=	kubični borov nitrid (ang. *Cubic-boron nitride*)
CVD	=	nanašanje s kemičnim naparevanjem (ang. *Chemical vapour deposition*)
DoE	=	metodologija načrtovanja eksperimentov (ang. *Design of experiment*)
EDS	=	energijskodisperzijska spektroskopija (ang. *Energy-dispersive X-ray spectroscopy*)
FD	=	faktorialna zasnova (ang. *Factorial design*)
FFD	=	popolna faktorialna zasnova (ang. *Full factorial design*)
HAZ	=	temperaturno vplivana cona (ang. *Heat affected zone*)
HPLD	=	polprevodniški laser velikih moči (ang. *High-power laser diodes*)
HRB	=	trdota po Brinellu
HRC	=	trdota po Rockewellu
HV	=	trdota po Vickersu
IR	=	infrardeč, -a, -e (ang. *Infrared*)
LCD	=	zaslon s tekočimi kristali (ang. *Liquid-crystal display*)
LVDT	=	linearno variabilni diferencialni pretvornik (ang. *Linear variable differential transformer*)
MMC	=	kompozit s kovinsko matrico (ang. *Metal-matrix composites*)
$\boldsymbol{M^2}$	=	kvaliteta laserskega žarka
Nd:YAG	=	itrij-aluminijev granat (ang. *Neodymium-doped yttrium/aluminium garnet*)
Nd:YLF	=	itrij-litijev fluorid (ang. *Neodymium-doped yttrium/lithium fluoride*)
PVD	=	fizikalno nanašanje z naparevanjem (ang. *Physical vapour deposition*)
PZT	=	piezoelektrični pretvornik (ang. *Piezoelectric transformer*)
RSM	=	metodologija odzivne površine (ang. *Response surface methodology*)
SEM	=	vrstična elektronska mikroskopija (ang. *Scanning electron microscopy*)
UV	=	ultravijoličen, -čna, -o (ang. *Ultraviolet*)

Seznam simbolov

A_p	=	delež prekrivanja laserskih žarkov
A_g	=	površina raze na prerezu
A_r	=	površina grebena raze na prerezu
a_p	=	globina odrezovanja
E	=	energija
F (F-value)	=	statistična značilnost
F_c	=	glavna rezalna sila (tangencialna sila)
F_n	=	normalna sila
F_p	=	odrivna sila
F_t	=	podajalna sila
F_v	=	navpična sila
f_p	=	frekvenca pulziranja laserskih žarkov
f_z	=	podajanje na zob
h	=	debelina odrezka
h_m	=	minimalna debelina odrezka
h_g	=	globina raze
h_r	=	višina grebena raze
$h\upsilon$	=	izsevana energija fotona
H_0	=	trdota osnovnega materiala
H_{max}	=	ekstrapolirana maksimalna trdota
I	=	intenzitete laserskega pulza
P	=	povprečna izhodna moč laserskega žarka
p-vrednost	=	precenitev
M^2	=	kvaliteta laserskega žarka
R^2	=	determinancijski koeficient
R^2_{Pred}	=	predviden determinancijski koeficient
R^2_{Pril}	=	prilagojen determinancijski koeficienti
R_a	=	hrapavost površine
r_e	=	radijorodja

$R_{p0,2}$	=	napetost tečenja pri raztezku 0,2 %
S/N	=	razmerje med signalom in šumom
T	=	temperatura
v_c	=	vrtilna hitrost orodja
v_t	=	podajalna hitrost orodja
w_0	=	širina raze na ničelni višini
w_1	=	širina med grebenoma raze
z	=	pomik laserskega žarka iz žarišča
z_R	=	Rayleighov parameter
x	=	prekrivanje dveh zaporednih laserskih žarkov
α	=	cepilni kot orodja
λ	=	valovna dolžina
υ	=	frekvenca
π	=	približno 3,14159…
Θ	=	divergenčni kot laserskega žarka
σ_x	=	razpona globinskega utrjevanja v prečni smeri
σ_y	=	razpona globinskega utrjevanja v vzdolžni smeri

1 Uvod

V zadnjih nekaj deset letih je bilo razvitih mnogo postopkov obdelave, ki bi bili v preteklosti s klasičnimi postopki preoblikovanja težko izvedljivi. Govorimo o postopkih, ki se danes uporabljajo za izdelavo najzahtevnejših delov v sodobni elektroniki, optiki, medicini, telekomunikacijah, merilni tehniki, grafični industriji in podobno. Za vse te so številni raziskovalci opravili vrsto raziskav na področju postopkov preoblikovanja tako na makronivoju, mikronovoju in v zadnjem desetletju tudi na nanonivoju. V tem raziskovalnem delu se osredinjamo predvsem na tri metode mikropreoblikovanja, ki se po svojem fizikalnem področju bistveno razlikujejo. Metode so v industriji že implementirane in optimizirane za zelo konkretne aplikacije, vendar je njihovo poznanje in analize ozadja dogajanja še vedno pomanjkljivo.

Tako je osrednji del raziskave študij mehanizmov preoblikovalnih parametrov z metodo razenja z diamantno konico, frezanja z mikrofrezali in laserskega strukturiranja ter njihov vpliv na preoblikovalni material. Vse tri navedene metode preoblikovanja obravnavamo primerjalno in poglobljeno.

Temeljni cilj raziskovalnega dela je torej študij postopkov, ki iz prej določenega začetnega stanja – v našem primeru gre za tankostensko nerjavno pločevino – vodijo v končno stanje. Enostavneje povedano, gre za postopke, ki iz gladke površine naredijo geometrijski vzorec na površini. Pri tem gre dejansko za tri aspekte.

Prvič je predstavljena interakcija med preoblikovalnim medijem in materialom, ki je v konkretnem primeru tankostensko nerjavno jeklo tipa AISI 304. Ta interakcija je pri razenju in frezanju mehanska, pri laserskem strukturiranju pa termična. V prvih dveh primerih gre za dvosmerno interakcijo, kjer material vpliva na preoblikovalni medij, in tretjem, ko je interakcija enosmerna.

Drugi aspekt postopkov so mehanski, fizikalni in kemijski postopki v materialu obdelovanca, ki je izpostavljen takšni obdelavi. Pri tem gre za prerazporeditev materiala ter njegovo lokalno ter strukturno spremembo. Raziskovali smo profil trdote na prerezu in kemijske lastnosti preoblikovanega materiala.

Tretji aspekt je aplikativne narave, kjer so predstavljene končne lastnosti že izdelanega geometrijskega vzorca, njegov natančen geometrijski profil, enakomernost profila, trdota na prerezu ter hrapavost strukturirane površine.

Rezultat raziskovalnega dela je torej poznanje mehanizmov v celotni verigi parametrov, tj. od vrste vhodnega materiala do končne geometrijske oblike. Tako z aplikativnega kakor znanstvenega vidika se metode bistveno razlikujejo. Pri vsaki izmed metod na obliko in strukturo gravure vplivajo najmanj trije parametri. Tako je za študij mehanizmov uporabljena statistična metoda RSM, ki deluje po metodi ANOVA in s katero smo lahko z izbranimi parametri preoblikovanja vnaprej napovedali strukturne rezultate za vsako omenjeno metodo preoblikovanja.

2 Teoretične osnove

V tem poglavju govorimo o teoretičnih osnovah postopkov površinskega preoblikovanja. Predstavili bomo nekaj postopkov, ki so v masivni industrijski proizvodnji uporabni že vrsto let. Poudarjamo postopek frezanja in laserske obdelave. Postopek razenja v masivni proizvodnji ni toliko razširjen, je pa za specifične proizvodne procese. Osrednja tema dela so tako postopki mikropreoblikovanja, kot so razenje, mikrofrezanje in lasersko strukturiranje. Omenjeni mikropreoblikovalni postopki bodo predstavljeni tako v teoretičnem kakor tudi v praktičnem delu raziskave.

Tako v teoretičnem delu kot tudi v eksperimentalnem bomo predstavili preoblikovalne postopke, ki temeljijo na treh različnih principih delovanja. Vsem pa je skupno, da je začetno stanje v prvem približku opredeljeno kot gladka površina kovinskega materiala, natančneje, nerjavna pločevina. Parametri te površine so v prvi vrsti lastnosti osnovnega materiala: kemijska sestava, mikrostruktura, površinska obdelava in toplotna obdelava. Za površino specifične lastnosti so hrapavost, morebitna predhodna strukturiranost površine in predhodna površinska zaščita površine.

Končno stanje se od začetnega razlikuje v tem, da so na površini lateralno dobro definirane razlike v topografiji. Iz obravnave torej izločimo vse postopke enakomerne obdelave površin, kot so poliranje, peskanje, valjanje itd. Pri končnem stanju ima površina neki vnaprej določen geometrijski vzorec, ki je določen bodisi z izboklinami ali udrtinami. Ti geometrijski vzorci so linijski (grebeni ali raze) in ploskovni (npr. mreža raz, vzporedne raze).

Pod vplivom zunanje obremenitve obdelovanca sledi najprej elastična deformacija materiala, pri dovolj veliki zunanji obremenitvi pa nato še želena plastična deformacija oz. velike in trajne spremembe oblike. Ne glede na vrsto preoblikovalnega postopka lahko plastična deformacija kovine poteka pri različnih temperaturah, kar je odvisno od vrste in tehnoloških lastnosti preoblikovanega materiala. Tako je za postopek sam kakor tudi za lastnosti deformiranega materiala pomembno, ali surovce pred preoblikovanjem segrevamo ali ne. V obeh primerih se namreč lahko trdnostne lastnosti obdelovancev spreminjajo, bodisi trajno ali samo prehodno.

Z delovanjem energije na material se le-ta preoblikuje. Vrsta in količina vnesene energije, kot so mehanska, električna, kemična, toplotna ali kombinacija več vrst energije, določa strukturne, kemične in druge spremembe materiala. Količino vnesene energije določimo po namembnosti materiala in vrsti preoblikovalnega postopka. Z vneseno energijo se namreč material deformira, pri tem pa dobi določeno obliko in lastnost, ki se od začetne lahko razlikuje bodisi po strukturni, kemični, mehanski ali kakšni drugi lastnosti. V vseh primerih pa je končna lastnost materiala odvisna od vrste preoblikovalnega postopka in količine vnesene energije.

Pri prenašanju sil od stroja na obdelovance so orodja močno obremenjena. Zlasti aktivna orodja, ki so v neposrednem dotiku z obdelovancem, morajo biti kos vsem nastopajočim obremenitvam. Močni obrabi ter mehanskim in toplotnim obremenitvam so izpostavljeni aktivni elementi preoblikovalnih orodij. Pri mikropreoblikovanju so obremenitve na orodja še toliko večje, zato je obraba orodja toliko bolj izrazita. Takšna orodja izdelujemo iz odpornejših materialov. Pri razenju navadno uporabljamo diamantno konico, pri mikrofrezanju pa orodja, odporna proti velikim rezalnim hitrostim, kot so

c-BN (kubični borov nitrid) orodja. Lahko pa orodja pripravimo iz karbidne trdine, ki jih prekrijemo z nekaterimi keramičnimi prevlekami (TiN, AlCrN, CrN, AlTiN, TiAlN ipd.) [1, 2]. Zaradi svoje miniaturnosti struktur na površini materiala morajo biti takšna orodja tudi precizno izdelana, imeti morajo kvalitetno površino, zlasti na aktivnih delih, po katerih material med preoblikovanjem drsi.

Lasersko strukturiranje se od predhodnih dveh načinov razlikuje v tem, da gre za brezkontaktno preoblikovanje. Laserski žarek z veliko gostoto moči lokalno segreje površino materiala. Če je gostota moči majhna, material samo segrevamo, če gostoto moči laserskega žarka povečamo, se lahko ta pretali ali celo upari. Odvisno od vnesene energije laserskega žarka se temu primerno material strukturira.

2.1 Preoblikovanje površine kovin

Preoblikovanje je v strojništvu zelo širok pojem. V osnovi gre za postopke, kjer iz neke že obstoječe oblike trdne snovi s plastično deformacijo pretvorimo material v novo deformirano stanje. V prvi vrsti govorimo o masivnih postopkih, kot so valjanje, vlečenje, kovanje, stiskanje itd. Bistveno je, da ostaneta masa in medsebojna vez v materialu ohranjeni. Želeno spremembo oblike obdelovancev lahko povzročajo preoblikovalna orodja neposredno, posredno z učinkom medija ali posredno z delovanjem kinetične ali kakšne druge vrste energije.

Da bi lahko obdelovance preoblikovali, potrebujemo preoblikovalna orodja (toga, elastična). To so obdelovalna sredstva, ki oblikujejo obdelovance ali spreminjajo njihovo obliko in lego, včasih celo njihove lastnosti, tako da se nasproti njim premikajo in prenašajo nanje preoblikovalno energijo. Preoblikovalni mediji so lahko trdne snovi (npr. orodje), tekoče snovi (npr. vodni curek) ali plinaste snovi (npr. CO_2). Z vneseno energijo (npr. mehansko, toplotno) ali s kemičnimi reakcijami povzročimo spremembe na obdelovancih. Naloga preoblikovalnega orodja je, da prenaša zunanje sile ali momente na obdelovanec in povzroči na njem zahtevane oblikovne in dimenzijske spremembe.

Ne glede na vrsto preoblikovalnega postopka lahko plastična deformacija kovine poteka pri različnih temperaturah, kar je odvisno od vrste in tehnoloških lastnosti preoblikovanega materiala. Pri tem je tako za postopek sam kakor tudi za lastnosti deformiranega materiala pomembno, ali surovce pred preoblikovanjem segrevamo ali ne. V obeh primerih se namreč lahko trdnostne lastnosti obdelovancev spreminjajo.

Obstaja vrsta postopkov, kako pripraviti geometrijski vzorec, torej kako doseči končno stanje strukturirane površine kovinskega vzorca. Okvirno jih delimo v tri skupine.

Prva skupina je hladno preoblikovanje, kjer z izbrano konico razimo po površini materiala. Ključni parametri obdelave so naslednji: oblika in material konice, globina in hitrost razenja ter pritisk konice v material. Volumen materiala se načeloma ne spremeni, tako da nastane zgolj prerazporeditev materiala na območju obdelave. V tem primeru se uporabijo diamantne konice velikosti (radija) od 100 μm.

V drugi skupini gre za postopke odrezovanja, konkretneje, frezanja, kjer del materiala na področju obdelave odvzamemo. Ta del materiala je odpadek (odrezek). Relevantni parametri obdelave so: vrsta in oblika frezala (predvsem rezalnega robu), vrsta prevleke na frezalu, globina frezala, hitrost vrtenja in hitrost pomikanja ter parametri mazanja (vrsta in poraba hladilno-mazalnih tekočin). Tudi pri tem se uporabljajo orodja velikosti (radija) 100 μm.

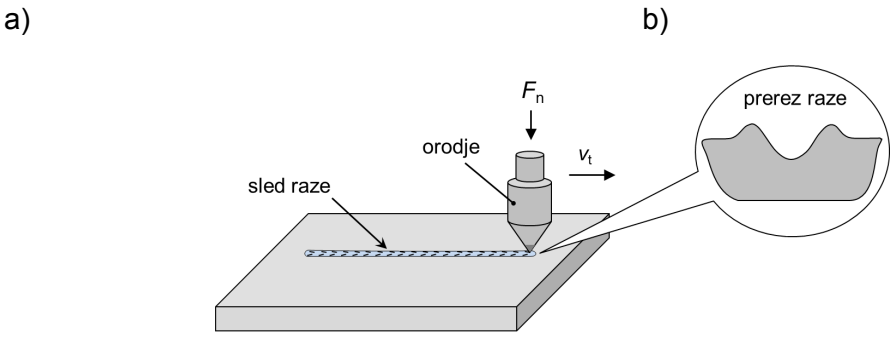
Za tretjo skupino postopkov je značilno, da material lokalno segrejemo tako, da nastane lokalno taljenje, izparevanje ali celo mikroeksplozija. V ta namen večinoma uporabimo laser. Tukaj so relevantni parametri: vrsta laserja (moč laserskega curka,

valovna dolžina ipd.), režim delovanja (kontinuirni, pulzni), gostota moči, širina žarka in hitrost pomikanja. Pri manjših gostotah moči nastane le porazdelitev materiala, pri večjih pa se del materiala upari in se potem bodisi redeponira v neposredni okolici ali pa popolnoma zapusti površino. Obstaja tudi možnost kontroliranega dovajanja tretjega materiala, tedaj govorimo o navarjanju.

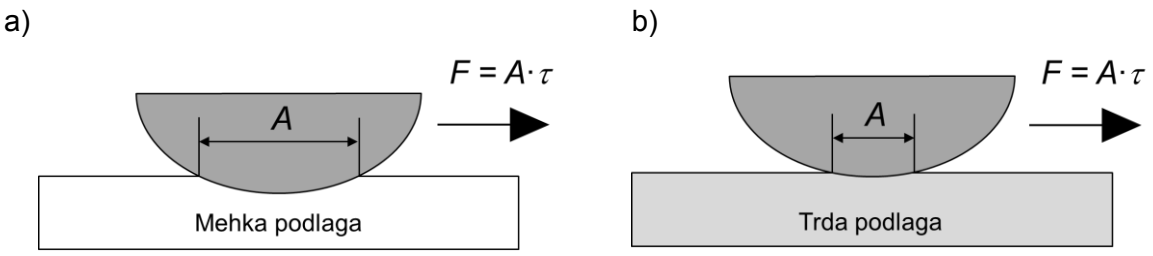
V nadaljevanju bodo prikazane vse tri skupine postopkov, torej metoda razenja z diamantno konico, ki jo vtisnemo in z njo enakomerno razimo površino. Pri tem gre za preoblikovanje brez odvzemanja materiala. Z metodo mikrofrezanja material z mikrofrezali odvzemamo, medtem ko z metodo laserskega strukturiranja z veliko koncentracijo energije laserskega žarka material lokalno segrevamo, tako da se del le-tega prerazporedi in del upari.

2.2 Razenje

Razenje je postopek hladnega preoblikovanja brez odvzemanja materiala. S silo na konico trdega orodja se pomikamo po površini obdelovanca in jo plastično preoblikujemo. Oblika odtisa je odvisna od mehanskih karakteristik materiala, predvsem od koeficienta napetostnega utrjevanja (n) in razmerja natezne trdnosti in modula elastičnosti materiala (Y/E) [3]. Navadno opravlja glavno premočrtno gibanje (podajalno gibanje) orodje, lahko pa ga opravlja tudi obdelovanec. Gibanje orodja je lahko tudi krožno. Vzdolž razenja se na površini obdelovanca tvori sled, ki ji pravimo raza (slika 1a), ob straneh raze pa nastaja greben (slika 1b). Velikost raze je odvisna od množice vplivnih veličin, kot so karakteristika orodja (vrsta, geometrija, sila), material obdelovanca ter karakteristike in parametri stroja (togost, globina prodiranja orodja v material, hitrost razenja, razmere pri delu) [4, 5]. Pri trdih materialih je pri enakih delovnih razmerah raza manjša v primerjavi z mehkejšimi materiali. Na sliki 2 prikazujemo vpliv kontaktne površine orodja in specifične trdote materiala na silo odtisa orodja.

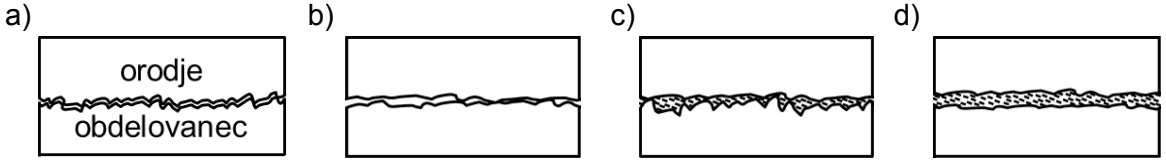


Slika 1: *Shema razenja; orodje razenja (a) in značilna oblika raze (b)*



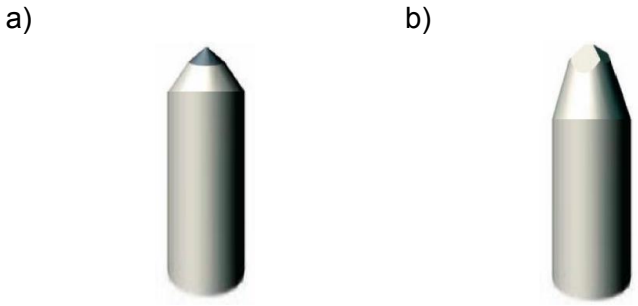
Slika 2: *Velikost kontaktne površine v odvisnosti od trdote materiala: mehka podlaga (a) in trda podlaga (b)*

Razo površine karakteriziramo tudi z njeno hrapavostjo (R_a). Ta je predvsem odvisna od sile konice orodja, števila prehodov orodja, razmer pri delu in od karakteristik materialov orodja in obdelovanca. Pri razenju med orodjem in preoblikovalnim materialom nastane trenje. To je lahko suho, mejno, mešano ali mokro (slika 3). Za zmanjšanje hrapavosti površine je treba zmanjšati trenje med orodjem in obdelovancem. Tega navadno zmanjšujemo z mazivnimi sredstvi.



Slika 3: *Vrste drsnega trenja pri preoblikovanju: suho trenje (a), mejno (b), mešano (c) in mokro trenje (d)*

Objavljenih je nekaj raziskav metode razenja, vendar v večini primerov za preizkušanje adhezije tankih plasti [6-9]. Dosti manj je raziskano področje razenje in korelacije preoblikovalnih parametrov ter vpliv le-teh na odzivno površino v aplikativnih procesih, kot je npr. razenje nerjavne pločevine. Z vidika preoblikovalnega mehanizma postopek razenja lahko primerjamo s konvencionalnim postopkom krogličnega glajenja (ang. burnishing), kjer je postopek bistveno bolj raziskan [10]. Skupno obema postopkoma je, da gre za glajenje materiala oz. za plastično deformacijo njegove površine. Pri razenju konica orodja (slika 4) drsi po površini obdelovanca, medtem ko pri krogličnem glajenju orodje kotalimo po površini. Pri slednjem se ustvarja bistveno manjše trenje na kontaktni površini, kar pripomore k izboljšanju hrapavosti površine (R_a se zmanjša), medtem ko se pri razenju ta nekoliko poslabša (R_a se poveča).

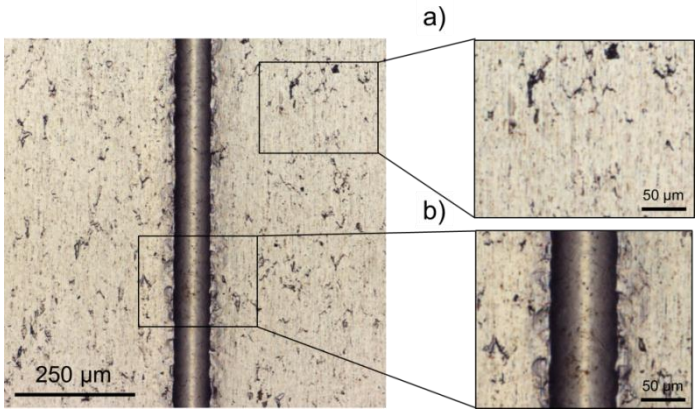


Slika 4: *Shematski prikaz orodij za razenje: orodje s konično konico (a) in piramidno konico (b)*

Dimenzije orodij razenja so bistveno manjše v primerjavi z orodji za glajenje površin. Ker je kontaktna površina pri razenju bistveno manjša v primerjavi z glajenjem, so orodja izpostavljena večjim obremenitvam, s tem pa obstaja večja verjetnost njihovega loma. Radij konice orodja je pri razenju med 1 μm in 1 mm, sila konice orodja pa med 10^{-4} N in 30 N (pritisk ≈ 15–2 500 N/mm^2). Radij orodja pri postopku glajenja je večji od 10 mm, sila orodja pa je med 300 N in 400 N (pritisk ≈ 2,5 N/mm^2). V obeh primerih igra pomembno vlogo pravilna izbira procesnih parametrov, vendar pa je kljub temu zaradi dimenzijske majhnosti orodij ta pri razenju bistveno pomembnejša, ker obstaja večja verjetnost loma orodij.

Pri glajenju je globina prodiranja kroglice v material enaka višini profila hrapavosti površine [11]. Pri razenju je ta nekajkrat večja in je od 3 μm naprej. Postopek razenja je z aplikativnega vidika uporaben predvsem pri konvencionalnem graviranju in kot merilna

metoda za preizkušanje obrabnih mehanizmov prekritih površin. Primer topografije osnovne, neobdelane površine in razene površine prikazuje slika 5.

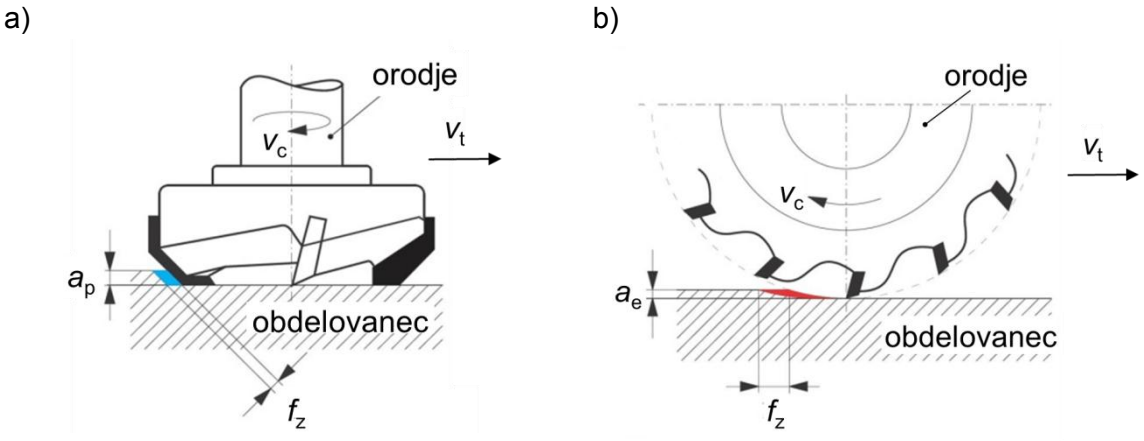


Slika 5: *Topografija osnovnega (a) in razenega materiala AISI 304 (b) posnetega s konfokalnim mikroskopom*

Gauthier [12] v raziskavi navaja, da je nasprotno od razenja jekla situacija pri razenju polimernih materialov dosti bolj kompleksna. Prav tako navaja, da ne obstaja model, ki bi upošteval vpliv viskoelastičnega vedenja materiala ali elastičnega vedenja pri velikih raztezkih.

2.3 Frezanje

Frezanje je med najbolj razširjenimi mehanskimi postopki odrezovanja v industriji. Glavno vrtilno gibanje opravlja orodje, frezalo, ki ima lahko po obodu eno ali več rezil (slika 6). Podajalna gibanja so lahko zelo različna in so odvisna od izbranega načina frezanja. Tako lahko podajalno gibanje opravlja obdelovanec, orodje ali pa oba hkrati.

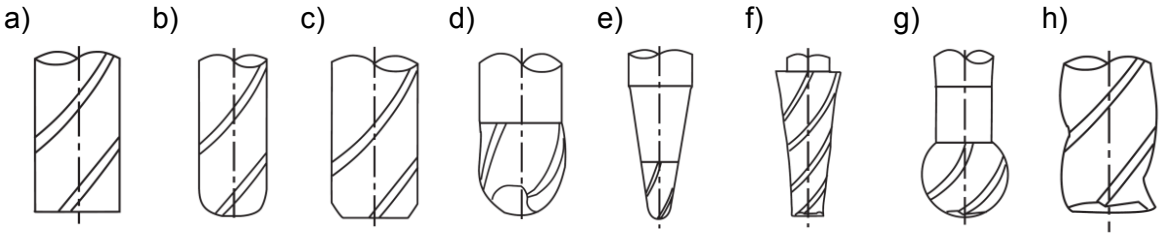


Slika 6: *2D shematski prikaz čelnega (a) in obodnega frezanja (b)* [13]

Iz množice vplivnih veličin na frezanje se pri sistematičnih raziskavah hkrati spreminja več parametrov, zato je presoja vsake posamezne vplivne veličine na frezanje toliko bolj kompleksna. Na primer pri spreminjanju rezalne hitrosti, podajalne hitrosti in globine frezanja se spreminja širina reza, premer orodja (obraba), nastavitev orodja, razmere vteka in izteka ipd. Če vse te vplivne veličine upoštevamo, dobimo sestav povezave vseh vplivnih parametrov na proces frezanja [13].

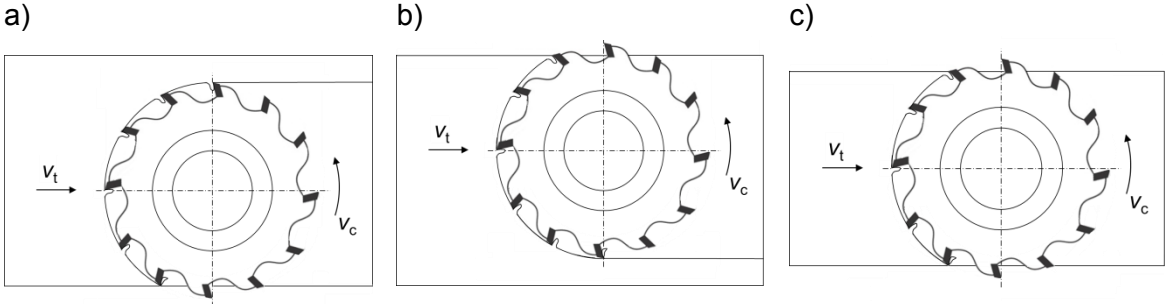
Vstopne veličine ne delujejo posamično na izstopne, ampak v najrazličnejših povezavah med krmiljenimi veličinami orodja (npr. vrsta, oblika, geometrija rezala, material), obdelovanca (material in oblika surovca) in stroja (vreteno, delovna miza, togost, delovni prostor). Z združitvijo več vplivnih veličin v značilne veličine se opazovanje procesa poenostavi in število upoštevanih veličin zmanjša. Iz procesa obdelave dobimo izstopne veličine, ki opisujejo obdelovanec, stanje orodja, odrezni material (odrezek) in jih primerjamo s funkcionalnimi in gospodarskimi zahtevami (ciljnimi veličinami) [13].

V industrijski proizvodnji uporabljamo najrazličnejša frezala. Razlikujejo se po obliki, dimenzijah in mehanskih lastnostih. Nekaj oblik frezal prikazuje slika 7. Vpliv geometrije orodja, mehanskih lastnosti orodja in parametrov preoblikovanja na obliko reza so predmet številnih raziskav. Lee [14] je raziskoval vpliv mikrofrezanja na hrapavost površine. Zamman [15] je analitično raziskoval sile v 3D-prostoru pri mikrofrezanju. Nekaj drugih raziskav pa lahko najdemo v publikacijah, kot so [16-25]. Najdemo pa lahko tudi raziskave na temo oblikovanja odrezkov v različnih delovnih razmerah [26].



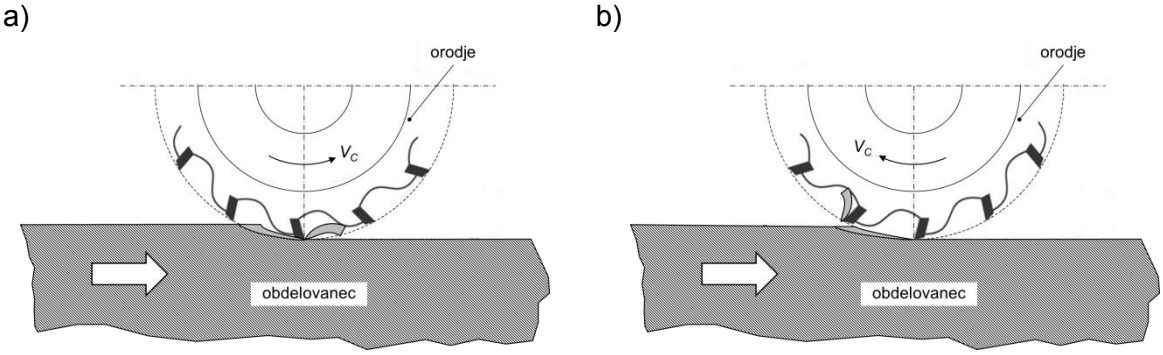
Slika 7: *Nekaj shematskih primerov frezalnih orodij: ostrorobi (a), vogalni radij (b), posnet rob (c), polni radij (d), konični s polnim radijem (e), konični oster (f), 250-stopinjski rezkar (g) in radialni (h)*

V principu imamo čelno (slika 8) in obodno frezanje (slika 9). Na čelni strani rezalni robovi material odrezujejo, medtem ko na obodni strani robovi obdelano površino gladijo. Na kakovost obdelane površine vpliva pravilna izbira frezalnih parametrov, kot so vrtilna hitrost, podajalna hitrost ter globina rezanja [23, 27]. Velika večina raziskav se osredinja na obliko odrezkov, sile odrezovanja, hrapavost obdelane površine, vibracije, ki pri odrezovanju nastajajo, ter na transformacijo temperature med rezilnim orodjem in obdelovancem [28-31]. Pri mikrofrezanju je Yang s sodel. [21] raziskal vpliv radija mikrofrezala na prenos toplote med obdelovancem in orodjem. Nekaj študij se osredinja tudi na dinamične lastnosti frezanja. Abrari s sodel. [32] je preučil sile, ki nastajajo v različnih razmerah mikrofrezanja in analiziral stabilnost postopka. Pri tem si je pomagal z analizo nastajanja odrezkov kompleksnih geometrij.



Slika 8: *Vrste čelnega frezanja: protismerno (a), istosmerno (b), simetrično (c)*

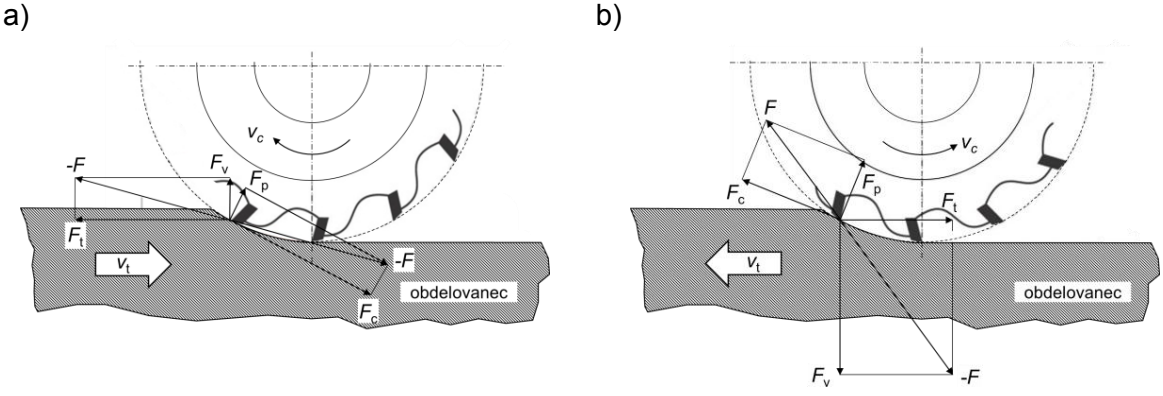
Na sliki 9a je prikazano istosmerno frezanje. S tem načinom frezanja dosegamo boljšo kakovost odrezovalne površine v primerjavi s protismernim frezanjem, kar je prikazano na sliki 9b. Ta način frezanja se uporablja za manjša podajanja oz. manjše ploskve in manjše globine rezanja (fina obdelava). Orodje v začetni fazi odrezovanja reže večji prerez, nato pa se le-ta zmanjšuje, s tem pa se zmanjšujejo tudi rezalne sile.



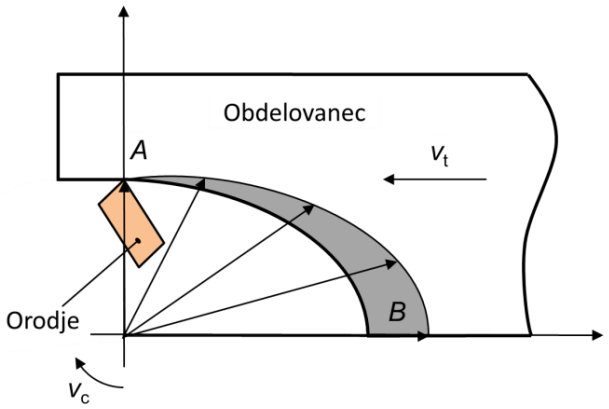
Slika 9: *Vrste obodnega frezanja: istosmerno (a) in protismerno (b)*

Komponenti rezalne in podajalne hitrosti lahko delujeta v dveh smereh, in sicer v isto ali nasprotno smer reza, medtem ko orodje reže od zunaj navznoter. Glavna rezalna sila (F_c) deluje tangencialno na obod frezala in ima smer rezalne hitrosti, medtem ko deluje odrivna sila (F_p) v radialni smeri pravokotno na os frezala in jo obremenjuje na upogib. Rezultanta sil (F) glavne in odrivne sile deluje pri frezalih z ravnimi zobmi v ravnini, ki je pravokotna na os frezala. Reakcija rezultante ($-F$) je enako velika kot rezultanta na frezalu, vendar je usmerjena v nasprotno smer. Podajalna sila (F_t) ima smer podajalne hitrosti (vodoravna sila), medtem ko navpična sila (F_v) deluje pravokotno na delovno mizo in podajalno silo. Slika 10 prikazuje sile odrezovanja pri istosmernem in protismernem frezanju. Na sliki 11 pa je shematsko prikazana porazdelitev rezalne sile pri enem rezu orodja.

Pri čelnem frezanju se debelina odrezka ne spreminja, zato je obremenitev vretena ugodnejša. Ker je vreteno obremenjeno na tlak, so lahko sile večje, s tem pa tudi globina rezanja, kakor tudi podajalna hitrost.



Slika 10: *Rezalne sile pri istosmernem (a) in protismernem (b) obodnem frezanju*



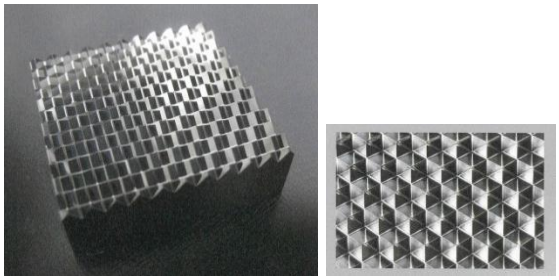
Slika 11: *Shematski diagram porazdelitve sil pri postopku frezanj*

2.3.1 Mikrofrezanje

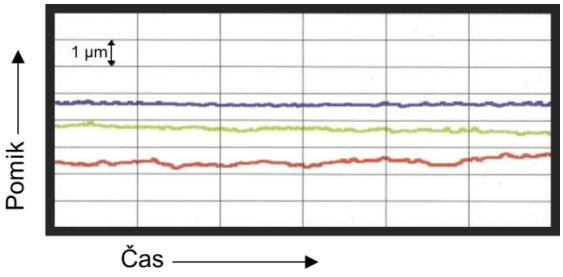
Mikrofrezanje je postopek obdelave, ki se nanaša na izdelavo izdelkov z dimenzijami od nekaj deset mikrometrov do nekaj milimetrov. Enotne definicije o velikosti dimenzij v raziskavah ni. Postopek mikroobdelave je primeren predvsem za obdelavo kompleksnih površin. Postopek je postal nepogrešljiv pri izdelavi mikroelementov, kot na primer v proizvodnji ur, mikrokirurških delov, v biomedicini, v mikrooptičnih sistemih, mikroelektronskih vezjih, pri ohišijih mikromotorjev, v aeroindustriji, mikrofluidiki in pri mnogih drugih sistemih, kjer so zahtevani visoki normativi po kakovosti površine. To področje obdelave je v zadnjih letih pritegnilo pozornost najrazličnejših raziskovalcev. Tako na primer Tonshoff v [33] predstavlja razvoj in usmeritve pri spremljanju in nadzoru obdelovalnih procesov. Bissacco s sodel. [34] je raziskoval mikrofezanje utrjenega jekla in [35] površinsko porazdelitev ter optimizacijo pri mikrofrezanju. Aramcharoen s sodel. [36] je raziskoval vpliv in obliko orodja pri frezanju. Obstajajo pa tudi številne druge raziskave [37-43].

Mikrofrezanje je v principu zelo podoben postopek kakor frezanje na makronivoju, tako imenovanem konvencionalnem frezanju. Najpomembnejša razlika je v velikosti rezila orodja (premer orodja in dolžina stebla orodja) ter njegovi geometriji. Slika 14 prikazuje mikrofrezalo za izvedbo eksperimentov in konvencionalno frezalo, medtem ko slika 15 prikazuje geometrijo mikrofrezala [18]. Geometrijske vrednosti mikrofrezala so prikazane v tabeli 1.

Kotni polmer (R) mikrofrezalnega orodja je lahko le 50 µm. Z vidika obremenitve orodja in primerjave le-tega s frezanjem na makronivoju je bistveno bolj ekstremen primer obdelovalnega okolja. Razlika med makro- in mikrofrezanjem je v ostrini rezilnega roba orodja, hrapavosti površine orodja ter vplivu zrnatosti obdelovalnega materiala. Tudi rezalni parametri se v obeh primerih odrezovanja bistveno razlikujejo. Vrtilna hitrost je pri mikrofrezanju bistveno večja v primerjavi s konvencionalnim frezanjem in je med 15 000 min^{-1} in 130 000 min^{-1}, pa tudi več, odvisno od materiala obdelovanca, premera orodja, podajalne hitrosti frezala, globine odrezovanja ipd. Pri mikrofrezanju sta podajalna hitrost in globina odrezovanja bistveno manjši v primerjavi s konvencionalnim frezanjem. Podajalna hitrost je od 1 mm/s do 10 mm/s, globina odrezovanja pa od 1 µm do 5 µm. Hrapavost površine je tudi do 11 nm. Stabilnost mikroobdelovalnega frezalnega centra je lahko velikosti manj od 1 µm. Tako lahko na jekleni podlagi s podobnimi centri izdelujemo tudi holograme. Grafični prikaz stabilnosti takšnega mikrofrezalnega obdelovalnega centra prikazuje slika 13.



Slika 12: *Primer obdelane površine z mikrofrezanjem (dimenzija obdelovanca 60 mm × 60 mm × 20 mm, trdota 52* HRC*, hrapavost površine R_a = 11 nm) (vir: tehnična dokumentacija Makino Milling Machine Co.,Ltd. 2014)*



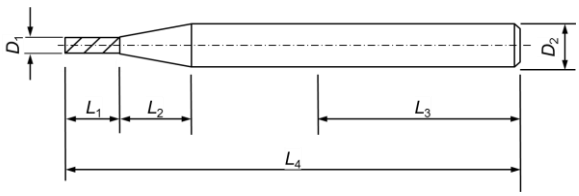
Slika 13: *Grafični prikaz stabilnosti mikrofrzalnega obdelovalnega centra v smeri x-y-z pri 12-urnem obratovanju (vrtilni hitrosti 45 000 min^{-1}, podajanje v smeri x-y 16 000 mm/min in v smeri z 8 000 mm/min) (vir: tehnična dokumentacija Makino Milling Machine Co.,Ltd. 2014)*

Obstojnost orodja se zmanjšuje z naraščajočo rezalno hitrostjo, kakovost obdelane površine pa je boljša. Rezalna hitrost je odvisna od obdelovalnega materiala, materiala orodja, oblike orodja, konstrukcije stroja in rezalnih razmer. Podajalna hitrost in globina frezanja sta odvisni od rezalnega materiala orodja, obdelovalnega materiala, vrste frezala in moči stroja. Odločilna pri izbiri parametrov je zahtevana kakovost površine.

Na primer pri orodju premera 200 µm in podajalni hitrosti v_c = 80 m/min (ne pretirano velika) bi bila vrtilna hitrost orodja n = 127 000 min^{-1}. Poleg tega bi bila pri frezanju kaljenega orodnega jekla in glede na dolžino vratu orodja okvirna aksialna globina reza in odvzem materiala 1 µm reza petih zob. Iz tega razloga zahteva mikrofrezanje izvedbo stroja z velikimi vrtilnimi hitrostmi in visoke natančnosti pozicioniranja, tudi do 10 nm. Vendar, če upoštevamo termične deformacije, bi bila natančnost stroja v smeri osi vretena 10 µm [34].



Slika 14: *Mikrofrezalo z radijem 100 µm (zgoraj) in konvecionalno frezalo velikosti 6 mm (spodaj)*



Slika 15: *Geometrija mikrofrezala* [28]

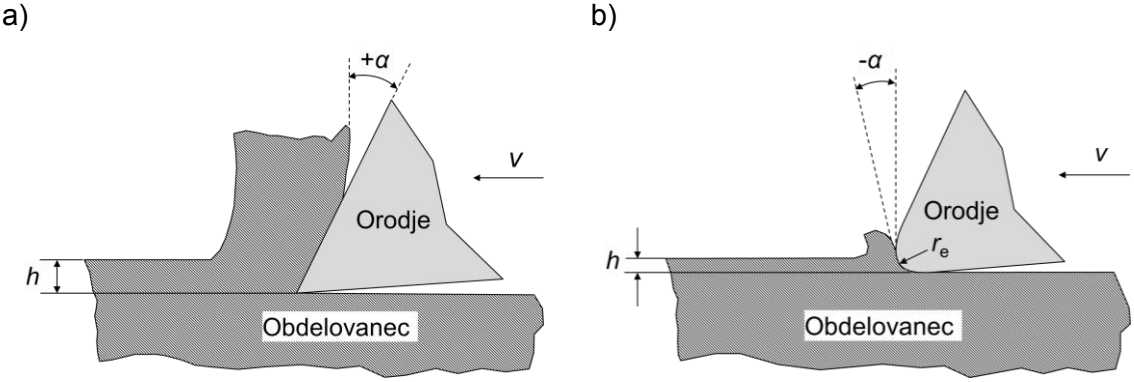
Tabela 1: *Dimenzijske vrednosti mikrofrezala premerov 0,8 mm in 1,0 mm*

Premer orodja	B/(rad/mm)	D_1/mm	D_2/mm	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	L_4/mm
0,8 mm	1,5	0,8	3,0	9,6	15,8	20	38,2
1,0 mm	1,5	1,0	3,0	9,6	15,2	20	38,2

Pri izbiri mikrofrezalnega orodja smo bistveno bolj omejeni kakor pri konvencionalnem frezanju, saj je izdelava le-teh zaradi miniaturnosti bistveno težja. Zaradi velikih rezalnih sil, ki so jim izpostavljena mikrofrezala, je šibka točka takšnih orodij že modeliranje, ki jo predstavlja Uhlmann [44]. Druga šibka točka je izdelava orodja zaradi svoje miniaturnosti. Polmer rezalnega robu mikrofrezala je namreč v razponu od 1 μm do 4 μm.

Predpostavko, da je rezalni rob mikroorodja popolnoma oster, izločimo, saj polmer rezalnega roba pri mikrofrezanju vpliva na končno površino obdelovanca in obliko odrezka. Pri mikrofrezanju je debelina odrezka manjša od radija rezalnega roba orodja, medtem ko je pri konvencionalnem frezanju debelina odrezka nekajkrat večja, zato predpostavljamo, da je rezilni rob frezala oster [45, 46].

Slika 16 prikazuje geometrijo cepilnega kota pri konvencionalni makroobdelavi v primerjavi z mikroobdelavo. Ta pri konvencionalni obdelavi ustreza nominalnemu kotu, pri mikroobdelavi pa je v območju rezalnega roba orodja cepilni kot izrazito negativen [34]. Zaradi interakcije in delovanja strižne sile med orodjem in obdelovancem, torej med prosto in cepilno ploskvijo, se material odrezuje in pri tem se tvori odrezek (slika 16a). Debelina in širina odrezka je v največji meri odvisna od oblike rezila orodja, od materiala obdelovanca in globine reza v material ter od obdelovalnih parametrov. Pri mikroobdelavi je radij rezilnega orodja bistveno večji od debeline materiala, ki se odrezuje (slika 16b).



Slika 16: *Vpliv radija rezalnega roba na velikost odrezka pri konvencionalnem odrezovanju (a) in mikroodrezovanju (b)* [36]

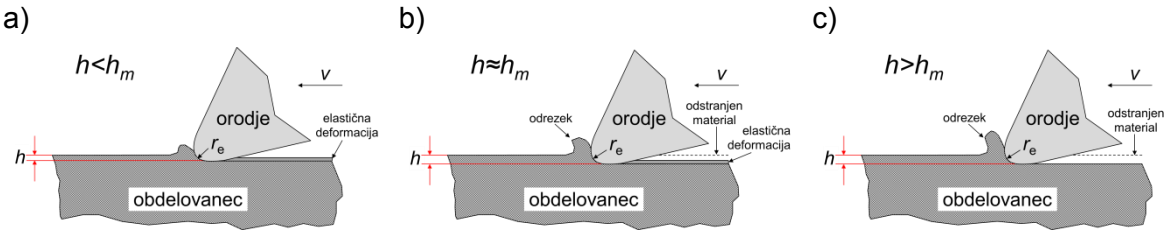
Minimalna debelina odrezka je odvisna od lastnosti obdelovalnega materiala. Son s sodel. [47] je raziskoval vpliv trenja med orodjem in obdelovancem (pri diamantu). Tako je definiral minimalno debelino odrezka (h_m). Ugotovil je, da je ta odvisna od radija orodja (r_e) in cepilnega kota orodja (α), kot to ponazarja enačba:

$$h_m = r_e\left[1-\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\alpha}{2}\right)\right] \qquad (1)$$

Son je prav tako je ugotovil, da ko pri mikrofrezanju dosežemo minimalno debelino odrezka, je hrapavost obdelane površine minimalna; odrezek je v tem primeru generiran kot neprekinjen.

Chae [17] in Ducobu s sodel. [48] predstavljata mehanizem nastajanja odrezka (slika 17) pri mikrofrezalih. V prvem primeru, ko je debelina odrezka (h) manjša od minimalne debeline odrezka (h_m), bo material stisnjen ob rezilno orodje, kot to prikazuje

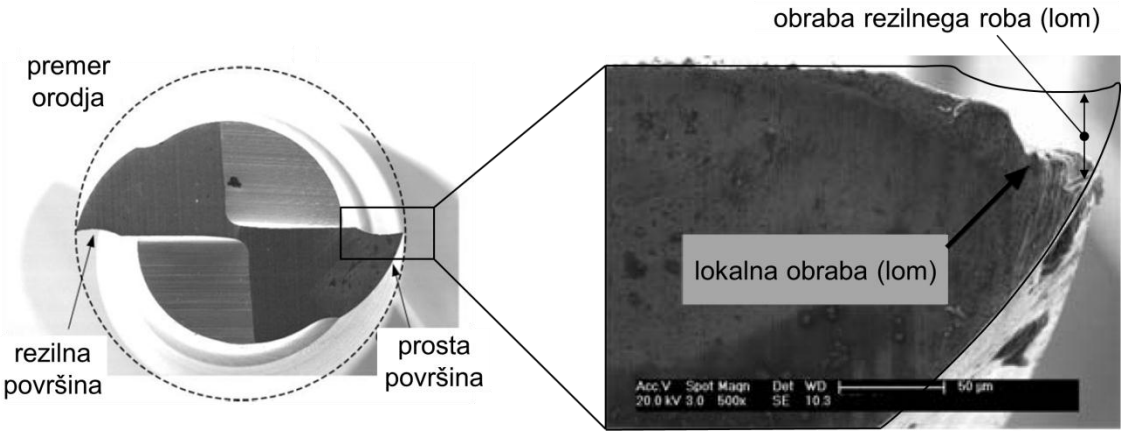
slika 17a. Material je obremenjen na prosti ploskvi pod orodjem. Po rezu orodja material zdrsi po cepilni ploskvi in se deformira tako, da prekrije neobdelan material na isti strani orodja (elastična deformacija). V drugem primeru, ko je želena debelina odrezka enaka minimalni debelini, kot je to prikazano na sliki 17b, se odrezek začne oblikovati ob rezilu orodja in materiala skupaj z delom elastične deformacije in relaksacije. Tako je količina odvzetega materiala manjša od želene količine odrezka. V zadnjem primeru, ko je želena debelina odrezka večja od minimalne debeline odrezka, kot je to prikazano na sliki 17c, se material odvzame in formira kot odrezek [36].



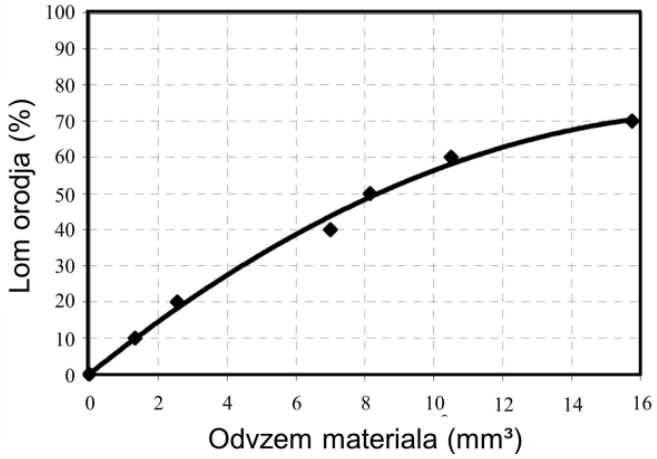
Slika 17: *Nastanek odrezka v povezavi z minimalno debelino odrezka pri mikroobdelavi (radij rezalnega orodja r_e, nedeformirana debelina odrezka h, minimalna debelina odrezka h_m)* [36]

Tudi drugi avtorji [41, 49, 50] opisujejo vplivne parametre odrezovanja na mikronivoju na najrazličnejših materialih ter vpliv parametrov odrezovanja na obrabo orodij. Pri tem so spremljali sled površine materiala, mehanizem nastanka odrezkov, strukturne spremembe materiala ter obrabo orodij. Furukawa [41] je raziskal vpliv materiala in parametrov odrezovanja na nastanek odrezkov. Pri tem je analiziral rezilne sile in obliko obdelane površine. Guo [49] je raziskal obrabo mikrofrezala, prekritega s PVD-prevleko TiAlNi. Tudi v tem primeru raziskava temelji na postopku mikrofrezanja pri različnih parametrih obdelave. Obdelovalna materiala, ki ju je uporabil v raziskavi, sta bila Cr12Mo1V1 in 4Cr14MoV.

Eno takšnih raziskav predstavljata Aramcharoen in Mativenga [51] na primeru materiala s povečano trdoto (45 HRC). V svoji raziskavi sta uporabila frezalo premera 700 µm. Vrtilna hitrost orodja je bila 20 000 min^{-1}, aksialna globina reza 50 µm in podajanje (f_z) 8 µm na zob. Slika 18 prikazuje meritev obrabe frezala in slika 19 skupni delež loma orodij pri naraščajočem volumnu odrezovanja.



Slika 18: *Obraba dvoreznega mikrofrezala premera 700 µm, pri rezu volumna 7,875 mm^3, jekla trdote 45* HRC [51]



Slika 19: *Delež loma orodij v odstotkih pri naraščajočem volumnu mikrofrezanja* [51]

Li [52] s sodelavci je objavil raziskavo o vplivnih parametrih mikrofrezanja na obrabo orodja (mikrofrezal), prevlečenega s PVD-prevleko TiAlN. Kot material je uporabil kaljeno orodno jeklo (54 HRC). Za analizo je uporabil statistično metodo ANOVA. Opazoval je tri vplivne parametre mikrofrezanja, in sicer hitrost odrezovanja (v_c), globino odrezovanja (a_p) in podajanje na zob (f_z). Prišel je do ugotovitve, da ima podajanje na zob večji vpliv na obrabo orodja kakor hitrost odrezovanja in globina odrezovanja. Prav tako je z ANOVO prišel do ugotovitve, da obstaja optimalna vrednost a_p, s katero pridemo do minimalne obrabe orodja, ko sta v_c in a_p fiksirana.

Podobno je Noordin s sodel. [53] uporabil statistično metodo ANOVA pri orodjih, prevlečenih s kombinacijo CVD-prevlek (TiCN-Al_2O_3-TiN). Za analizo mikrofrezanja je uporabil jeklo AISI 1045. Spremljal je vpliv podajanja orodja, kota rezila orodja (α) in vrtilne hitrosti orodja (v_c) na hrapavost površine (R_a) in velikost glavne, tangencialne sile (F_c). Ugotovil je, da ima največji vpliv podajanje orodja. Prav tako je ugotovil, da ima hitrost odrezovanja sekundarni vpliv na tangencialne sile.

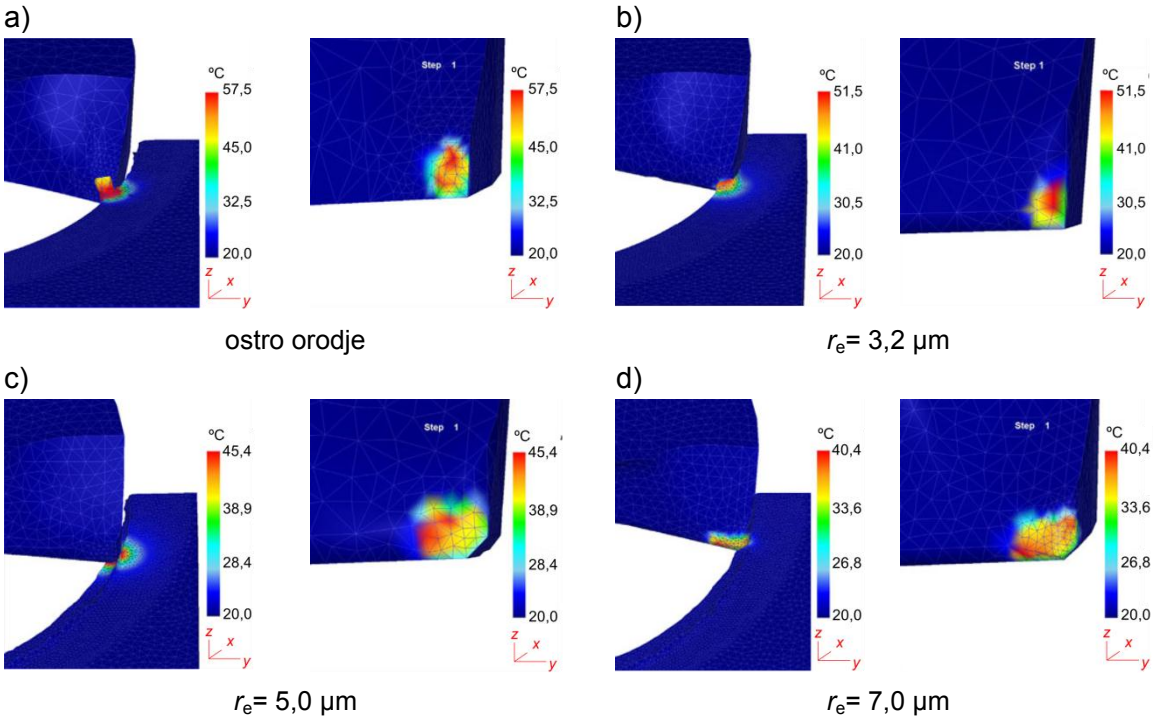
Iz navedenih raziskav ugotavljamo, da je nastanek odrezka dinamičen proces in je pogosto nelinearen. Oblikovanje odrezka je pomembno dejstvo predvsem v natančnem napovedovanju rezalnih sil. Tako je Zaman s sodel. [15] spremljal porazdelitev sil v 3-dimenzionalnem sistemu pri frezanja z orodjem premera 1 mm z ravnim koncem rezila in s 30-stopinjskim kotom vijačnice, prevlečenega z AlTiN. Predstavil je matematični model, ki vključuje teoretično območje odrezka z variacijo kotov vijačnice orodja in nedeformirane debeline odrezka. Zaradi razmerja med znatnim rezom v globino materiala in premerom orodja deluje tangencialna komponenta sile v 3-dimenzionalnem polju. Analiza pokaže, da ima ta sila odrezovanja signifikanten vpliv v aksialni smeri. Razvit model je uporaben pri simuliranju odrezovalnih sil z 90-odstotno natančnostjo.

Yang [21] je raziskoval vpliv radija orodja na temperaturo mikrofrezanja. Na podlagi simuliranih rezultatov je prišel do dveh ugotovitev. Prva ugotovitev je, da na mikronivoju igra temperatura odrezovanja izrazito vlogo na obrabo orodja. Čim manjši je polmer orodja (manjši od 50 μm), tem večji je vpliv temperature na obrabo orodja. Druga ugotovitev pa je, da z večanjem radija orodja rezilna sila narašča, medtem ko napetost in temperatura odrezovanja mikrofrezala počasi padata.

Bissacco [54] predstavlja vpliv velikosti in oblike gravure kaljenega orodnega jekla, nastale pri mikrofrezanju. Prvi del raziskave je neposredno povezan z geometrijo orodja (premer orodja in radij rezilnega kota orodja) in predstavlja plastično deformacijo materiala na pretežnem delu grebenov obdelane površine. Drugi del je povezan z obliko gravure, ki se pojavi za orodjem po obdelavi in se kaže kot majhni valovi v smeri

podajanja orodja. Ugotavlja, da sta ta dva učinka bistvena za omejeno zmanjšanje parametrov amplitude hrapavosti s premerom orodja.

Pri mikrofrezanju ima temperatura pomemben vpliv na mikrofrezalo. Yang [21] je ugotavljal porazdelitev temperature na orodju in primerjal vpliv temperature na orodje v primerjavi s konvencionalnim frezanjem. Eksperimente je izvajal na štirih različnih frezalih iz karbidne trdine, in sicer na ostrem orodju, orodju z radijem konice (r_e) 3,2 µm, 5,0 µm in 7,0 µm. Material obdelovanca je bila aluminijeva zlitina Al2024-T6. Vrtilna hitrost orodja je bila 140 000 min^{-1}, globina odrezovanja (a_p) 0,25 mm in podajanje na zob (f_z) 0,1 µm. Raziskava temelji na simulirani tridimenzionalni metodi končnih elementov in eksperimentalnem delu. Uporabil je orodja različnih dimenzij (radijev) in raziskoval vpliv teh na rezalne sile in efektivne napetosti pri odrezovanju ter na porazdelitev temperature na orodju. Iz simuliranih rezultatov je ugotovil, da z večanjem radija orodja rezalna sila narašča, medtem ko efektivna napetost orodja in povprečna temperatura odrezovanja počasi padata. Na sliki 20 je prikazan primer simulirane porazdelitve temperature v rezilnem območju pri ostrem orodju s konico radija (r_e) 3,2 µm, 5,0 µm in 7,0 µm.



Slika 20: *Temperaturna porazdelitev mikrofrezala pri ostrem orodju (a), orodju s konico radija (r_e) 3,2 µm (b), 5,0 µm (c) in 7,0 µm (d)* [21]

Ng s sodel. [43] je eksperimentalno raziskoval postopke obdelave na mikro- in nanonivoju. Opazoval je vpliv odrezovanja neferitnega jekla, aluminija 7075-T6 (87 HRB) pri seriji eksperimentov. In sicer je opazoval vpliv parametrov na rezalne sile, geometrijo odrezkov, hrapavost površine, specifično energijo odrezovanja, rezilni kot in koeficient trenja.

Težava, s katero se pri frezanju na mikronivoju ubadamo, je tudi ekscentričnost orodja oz. vpetje le-tega v vpenjalno glavo. Ekscentričnost orodja je pri mikrofrezanju bistveno bolj izrazita kakor pri tradicionalnem frezanju na makronivoju [14]. Podobne težave, ki nastajajo pri mikrofrezanju je v zadnjem obdobju pritegnilo mnogo raziskovalcev, kot npr. [55, 56].

2.4 Laserska obdelava

2.4.1 Fizikalne osnove

Zgodovina laserja sega v leto 1917, ko je Albert Einstein postavil enačbe za stimulirano emisijo, leta 1968 pa sta Townes in Schawlow postavila pogoje za vidno lasersko svetlobo. Theodore H. Maiman je leta 1960 predstavil prvi pravi LASER (ang. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) in pomeni ojačevanje svetlobe s stimulirano emisijo sevanja.

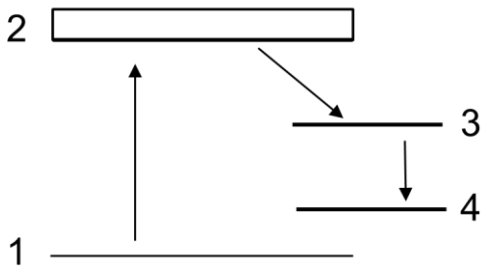
Preden predstavimo najpogostejše laserske sisteme je dobro, da za razumevanje njihovega delovanja spoznamo nekaj osnov. Atomi se nahajajo v različnih energijskih nivojih (slika 21). Iz enega v drug energijski nivo lahko prehajajo s spontano emisijo, absorpcijo ali stimulirano emisijo. Pri spontani emisiji atom sam od sebe preide v nižje energijsko stanje in pri tem odda foton. Pri absorpciji atom preide v višje stanje tako, da absorbira foton. Pri stimulirani emisiji, ki je najpomembnejša za razumevanje delovanja laserjev, pa foton povzroči, da atom preide v nižje stanje in pri tem odda dodaten foton.

Pri teh procesih sodelujejo fotoni z določenimi frekvencami (oz. valovnimi dolžinami). Frekvenco fotona opišemo z enačbo:

$$h \cdot \upsilon = E_2 - E_1 , \qquad (2)$$

kjer je h Planckova konstanta, υ frekvenca atoma, E_2 in E_1 pa energiji stanj atoma. Število atomov nižjega energijskega stanja, tudi osnovnega, označimo z N_1, število atomov v višjem stanju pa z N_2. Število atomov, ki preidejo iz višjega v nižje stanje v časovni enoti, je enako $(A_{21} + B_{21} \times u(\upsilon)) \times N$, podobno pa prehod iz nižjega v višje stanje opiše enačba $(B_{12} \times u(\upsilon)) \times N_1$. Vrednosti A_{21}, B_{21} ter B_{12} so Einsteinovi koeficienti in določajo, kakšna je verjetnost za posameznega od treh zgoraj opisanih pojavov. $u(\upsilon)$ je frekvenčna gostota fotonov (število fotonov na frekvenčni interval). V termičnem ravnovesju mora veljati $\mathrm{d}N_2/\mathrm{d}t = \mathrm{d}N_1/d$. Z uporabo zgornjih enačb dobimo po krajši izpeljavi izraz za emitirano (ali absorbirano) moč, deljeno s prostornino.

Če želimo, da je žarek močno ojačan, mora biti n veliko število, takrat pa je tudi prispevek zaradi spontane emisije $(h \times \upsilon \times N_2)/\tau$, ki ima vlogo šuma, majhen. Tako smo prišli do dveh pomembnih pogojev za izvedbo laserja: številčna gostota fotonov mora biti velika in v višjem stanju mora biti več atomov kot v nižjem (invertirana zasedba).



Slika 21: *Shematski prikaz atomov v različnih energijskih stanjih*

Za razumevanje laserskega žarka pa je treba poznati tudi lastnosti svetlobe. Ta je elektromagnetno valovanje in jo opišemo z Maxwellovimi enačbami [57], ki nas privedejo do valovne enačbe za električno polje (E) svetlobe v praznem prostoru:

$$\nabla^2 E = \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \tag{3}$$

pri čemer je ε_0 influenčna in μ_0 indukcijska konstanta.

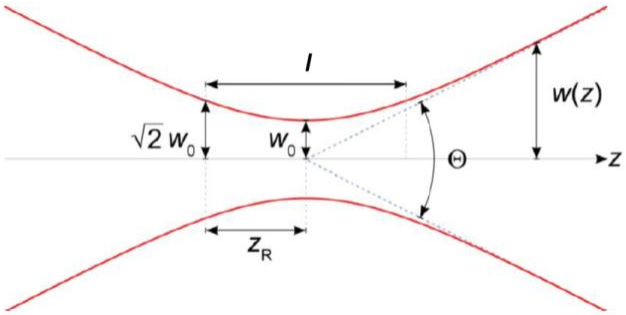
V obdelovalnih procesih je najpogosteje uporabljen osnovni laserski žarek (slika 22). Značilno zanj je ozek svetlobni curek in koherentna svetloba, ki ima intenziteto I v odvisnosti od radija r porazdeljeno z Gaussovo funkcijo. Z rešitvijo enačbe za valovno dolžino (3) električnega polja [58] izračunamo intenziteto osnovnega laserskega žarka, ki ga v cilindričnem koordinatnem sistemu podamo z enačbama (4) in (5).

$$I(r,z) = I_0 \frac{w_0^2}{w^2} exp\left(-2\frac{r^2}{w^2}\right) \tag{4}$$

$$w^2 = w_0^2 \left[1 + \frac{z^2}{z_0^2}\right] \tag{5}$$

I_0 pomeni maksimalno intenziteto, w polmer laserskega žarka, w_0 polmer pri $z = 0$, z_0 pa razdaljo, pri kateri se žarek širi v z-smeri, os žarka pa je pri $r = 0$ in označuje asimptotično enakomerno širjenje. Razdalji w_0 in z_0 definirata divergenco θ laserskega žarka (6) in sta določeni z izvirom laserskega žarka in s pripadajočo optiko.

$$\theta = \frac{w_0}{z_0} \tag{6}$$



Slika 22: *Prerez žarka z oznakami količin* [59]

Območje počasne razširitve žarka pred in za grlom žarka podaja Rayleighova dolžina l in je podana z enačbo:

$$l = \frac{f}{1 + \left(\frac{f}{z_0}\right)^2} \tag{7}$$

Ta je odvisna od goriščne razdalje leče f in razdalje, pri kateri preide laserski žarek v asimptotično enakomerno širjenje. Rayleighov parameter z_R podajata enačbi:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{M^2 \lambda} \tag{8}$$

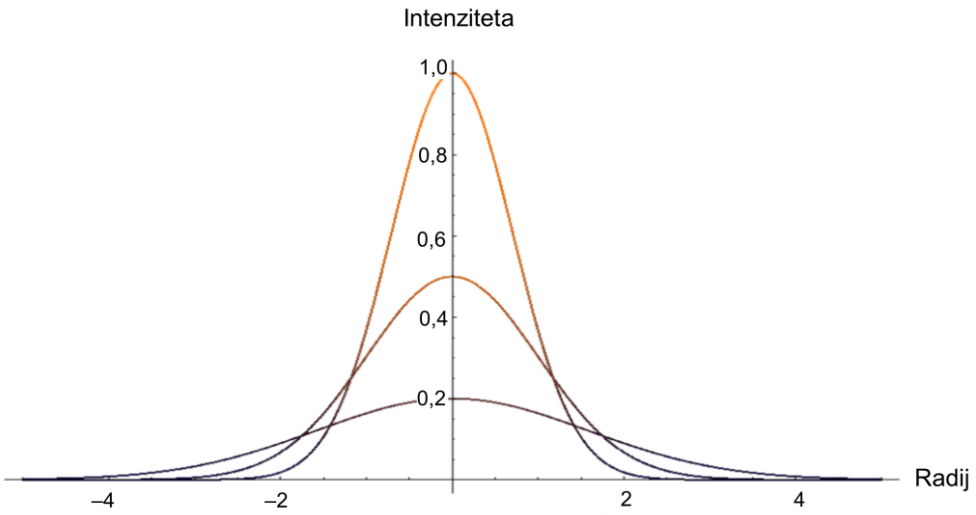
in

$$z = z_R \rightarrow w = \sqrt{2}w_0 \quad (9)$$

Parameter M^2 pove, koliko se realen žarek razlikuje od Gaussovega žarka (za Gaussov žarek je $M^2 = 1$ in realne žarke $M^2 > 1$). T. i. poravnan Gaussov žarek pomeni, da se pri enakem polmeru v pasu w_0 ta žarek širi z najmanjšo mogočo divergenco. Vrednost M^2 je torej odvisna od premera žarka v pasu d_0 (ali $2w_0$) in izmerjenega divergenčnega kota θ_p (rad) in valovne dolžine laserskega žarka λ ter je izražena kot:

$$M^2 = \frac{\pi d_0 \theta_p}{4\lambda} \ . \quad (10)$$

S primerno izbiro intenzitete dosežemo, da laserski proces poteka samo v bližini gorišča vzdolž širjenja žarka in samo v majhni okolici vrha Gaussove funkcije v prečni smeri. Odvisnost intenzitete Gaussovega pramena od širine v grlu in točkah, oddaljenih z_R in $2z_R$, prikazuje slika 23. Na robu Rayleighevega območja (srednja krivulja) je maksimalna intenziteta samo še polovica maksimalne v grlu. Navadno se v industrijski rabi uporabljajo intenzitete od 10^5 W/cm^2 do 10^{10} W/cm^2.



Slika 23: *Odvisnost intenzitete Gaussovega pramena od širine v grlu in točkah oddaljenih* z_R *in* $2z_R$

Nemški fizik Ernst Karl Abbe je leta 1873 ugotovil, da svetloba z valovno dolžino λ, ki potuje skozi sredstvo z lomnim količnikom n in se oži s kotom Θ, ne more ustvariti pike, manjše od premera d, ki ga zapišemo z enačbo:

$$d = \frac{\lambda}{2n\ sin(\theta)} \quad (11)$$

pri čemer vrednost $n \sin(\Theta)$ imenujemo numerična apertura. S tem smo podali najpomembnejše vrednosti laserskega žarka.

2.4.2 Delovanje laserja

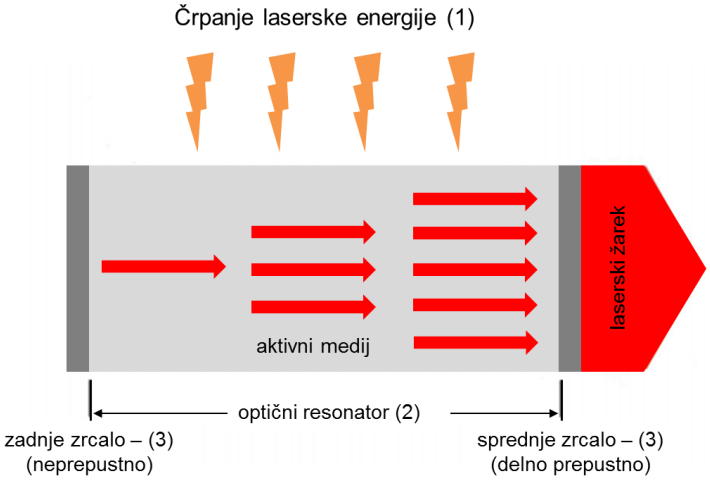
V praksi je v rabi veliko število najrazličnejših laserskih sistemov. Navadno se razlikujejo po aktivnem sredstvu oz. sredstvu ojačitve. Tako poznamo plinski laser, kjer je ojačevalno sredstvo ampula s plinom, v kateri vzbujamo atome z električnim tokom, pri čemer se ustvari plazma. Ojačitvena sredstva pa so lahko tudi trdna ali celo tekoča.

Laserski žarek je lahko pulzni ali kontinuirni. Moč pri slednjem je med 1 mW in 20 kW pri komercialnih laserjih, pa vse do 1 MW za specifične namene (npr. vojaška industrija). Moči pulznih laserjev so lahko bistveno višje, vendar pa je povprečna moč primerljiva z močmi kontinuirnih laserjev. Naj bo W energija svetlobnega valovanja v resonatorju. Zaradi izgub skozi zrcali, absorpcije in sipanja se energija na en prelet resonatorja zmanjša za:

$$\Delta W_{\text{izgube}} = -\Lambda W = -\left[\alpha L + \left(1 - \frac{1}{2}\right) \mathrm{R}_1 + \frac{1}{2}(1 - \mathrm{R}_2)\right] W \qquad (12)$$

kjer so Λ celotne izgube, α izgube, deljene s potjo, zaradi absorpcije in sipanja, R_1 in R_2 pa odbojnost obeh zrcal. Vsaj eno od obeh zrcal mora imeti odbojnost manj od 1, če naj laser nekaj svetlobe tudi izseva. Navadno je izkoristek laserske energije nizek in je med 0,01 % in 20 %.

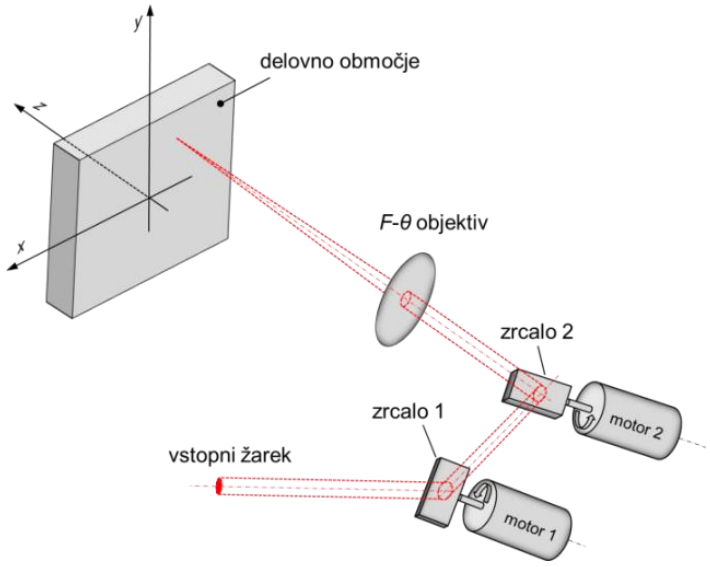
Laser je sestavljen iz treh osnovnih delov: iz napajalne naprave oz. medija (1), ki proizvaja močne vstopne žarke, bliske svetlobe ali radijske valove, napajalnega sistema (2), s katerim poskrbimo za vzbujanje atomov, ki mu sledi sevanje, in resonatorja (3), ki ustvarja stoječe elektromagnetno valovanje in natančno usmerja laserski žarek (slika 24). To dosežemo, če damo sevajoči medij v cev, ki jo z obeh strani zapremo z zrcaloma. Navadno je eno zrcalo neprepustno in drugo delno prepustno. Če nastane stimulirana emisija v smeri osi med zrcaloma, nastane odboj in ponovna stimulirana emisija. V nasprotnem primeru (če sevanje ne poteka na osi) pa sevanje zapusti laserski medij. V praksi prepusti eno zrcalo (včasih obe) del svetlobe bodisi skozi odprtino ali skozi delno prepustno zrcalo. Svetloba, ki izstopa, formira laserski žarek.



Slika 24: *Osnovna zgradba laserja*

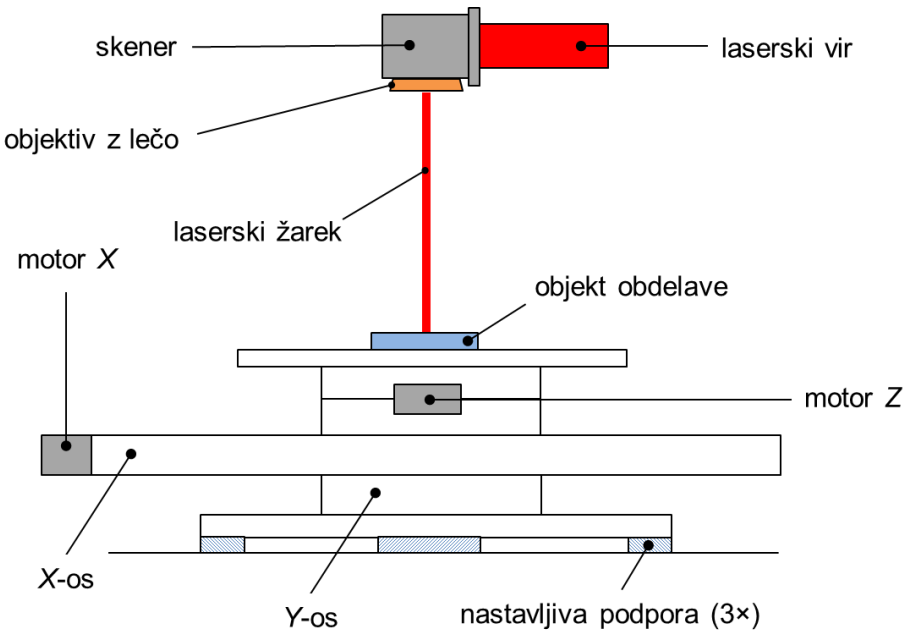
Za lasersko obdelavo pa lahko sestavimo laserski sistem. V osnovi je ta sestavljen iz laserskega vira (vstopni žarek), ki seva lasersko svetlobo (IR, UV ali vidno). Laserski žarek se tvori v resonatorju, kjer se navadno z uporabo dveh motorjev in dveh zrcal, od katerih je eno visokoodbojno, drugo pa rahlo prepustno. Motorja sta namenjena za vrtenje

zrcal in usmerjata laserski žarek do skenirnega sistema (slika 25).



Slika 25: *Dvoosni skenirni sistem*

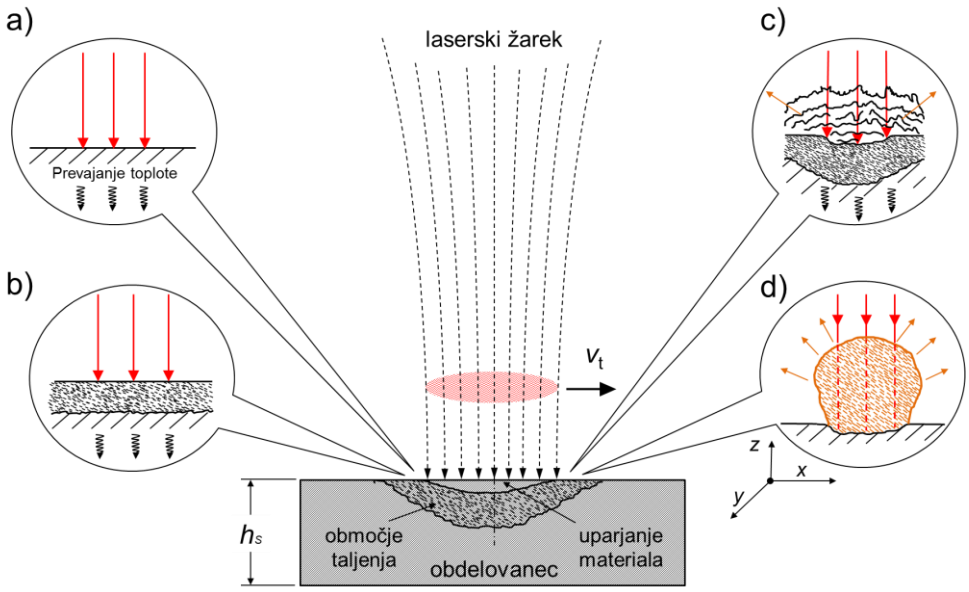
Skenirni sistem je sestavljen iz skenirne glave, ki usmerja oz. pozicionira žarek, ter objektiva. Ta na delovno območje fokusira laserski žarek z visoko gostoto energije. Premer tega je lahko tudi 1 µm ali manj. Odvisen je od goriščne razdalje in tipa laserja. Značilno za lasersko svetlobo je ozek svetlobni curek in koherentna svetloba. Kot svetlobe je ≈ 1 mrad. Navadno je gorišče na materialu, ki se lahko nahaja na fiksni ali motorizirani premični mizi. Ta lahko omogoča pomik v vseh treh koordinatnih smereh, *x*, *y*, *z*. Tak primer sistema je prikazan na sliki 26.



Slika 26: *Primer laserskega sistema primernega za strukturiranje*

2.4.3 Interakcija laserja s površino trdne snovi

Laserski žarek usmerjamo na površino obdelovanca (slika 27). Pri interakciji tega se površina trdne snovi segreje, in ravno ta pojav uporabimo pri obdelovalnih procesih. Laserski sistem se lahko uporablja za varjenje, rezanje, vrtanje, graviranje, markiranje in vrsto drugih obdelovalnih procesov tako na kovinskih kakor tudi na nekovinskih materialih.



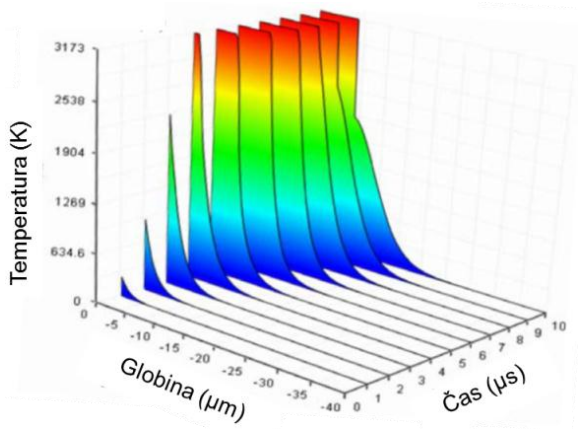
Slika 27: *Shematski prikaz obsevanega materiala debeline* h_s *in laserskega žarka* [60]

Pri kovinskih materialih laserski žarek z veliko koncentracijo energije lokalno segreje površino materiala do zelo visoke temperature (slika 27a). Visoka intenziteta laserskega žarka lahko povzroči, da se material tali (slika 27b) ali celo upari (slika 27c). Pri večjih dozah je prehod snovi iz pregrete površine zelo hiter. Pri hitrem izparevanju se nad snovjo ustvari visok tlak, material se v trenutku stali in upari. Absorbirana energija segreva plinski oblak in inducira nastanek plazme ter absorpcijskih valov (slika 27d) [61-63]. Plazma močno absorbira laserske žarke in loči laserski impulz od površine; plazma dejansko ščiti površino, tako da le malo laserskega žarka doseže površino kovine [64].

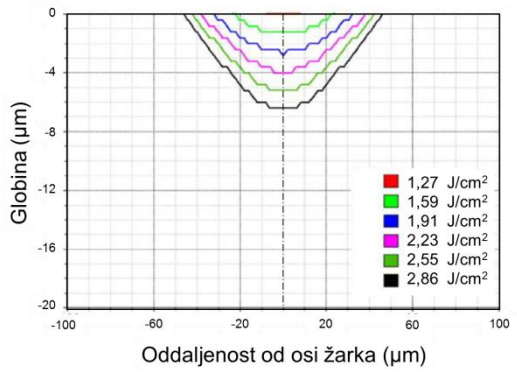
Čas trajanja laserskega pulza je lahko različen. Izbira tega je odvisna, za kateri namen laser uporabimo [65]. Ko z laserskim žarkom posvetimo v kovinski material, se del svetlobe absorbira in povzroči segrevanje snovi, del pa se odbije. Absorpcija svetlobe v snovi in odboj svetlobe od površine snovi nam določa delež svetlobne energije, ki se porabi za segrevanje snovi. Pojava absorpcije in odboja svetlobe okarakteriziramo z absorpcijskim koeficientom α in reflektivnostjo R. Absorpcijski koeficient α (m^{-1}) je obratno sorazmeren z vdorno globino svetlobe. Tako absorpcijski koeficient kakor reflektivnost sta odvisna od valovne dolžine svetlobe λ [57, 66].

Pri obdelavi kovinskih materialov lahko temperatura učinkuje do globine 1–100 µm [64, 65], pri laserskem kaljenju in laserskem razrezu pa tudi bistveno več (10 mm in več). Največji vpliv na absorpcijo svetlobe in s tem na segrevanje snovi imajo moč laserskega žarka, toplotna prevodnost in odbojnost materiala. Delež pretaljenega in uparjenega materiala je odvisen od parametrov, kot so kemijska sestava materiala, njegova homogenost in termične lastnosti. Slednje podajamo s toplotno prevodnostjo, koeficientom prevodnosti materiala, viskoznostjo taline ter tališčem in vreliščem materiala [67].

Dobrev s sodel. [65] je pri mikrosekundnem pulznem Nd:YAG-laserju (λ = 1 064 nm) raziskoval vpliv parametrov laserske obdelave na površinske spremembe nerjavnega jekla AISI 316 s tališčem T_v = 1 370−1 400 °C. Ugotovil je, da temperatura v globino materiala narašča s časom obsevanja, kar prikazuje grafični prikaz na sliki 28. Z grafa je razvidno, da se pri energiji laserskega žarka 2,86 J/cm^2 material pretali pri dolžini laserskega pulza 3 µs, material pa začne izparevati že po 4 µs. Strjevanje materiala se začne, še preden se laserski pulz konča, kar traja do 8 µs. Na grafičnem prikazu na sliki 29 je prikazal, da je globina kanala v materialu odvisna od vnesene energije laserskega žarka. Razvidno je, da se pri energiji laserskega žarka 2,86 J/cm^2 lahko ustvari kanal globine do 6,8 µm.

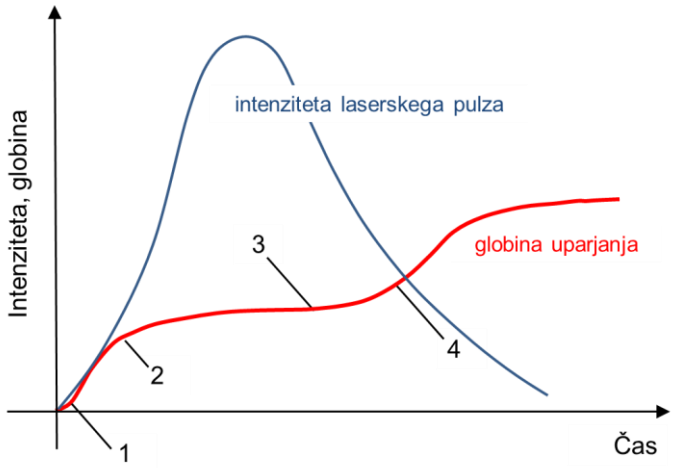


Slika 28: *Porazdelitev temperature po površini kovinskega materiala pri energiji laserskega žarka 0,0286 J/mm^2* [65]



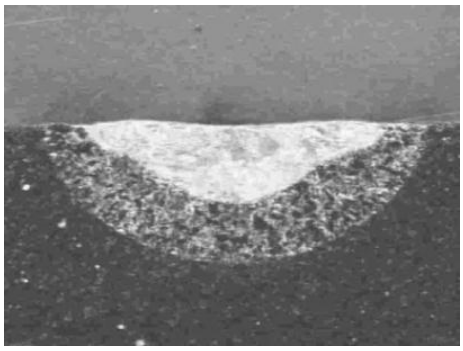
Slika 29: *Simulirana globina kanala pri različnih jakostih laserskega žarka* [65]

Slika 30 prikazuje časovni potek intenzitete *I* laserskega pulza v odvisnosti od časa, istočasno pa prikazuje časovno odvisnost globine izparevanja snovi. Številke od 1 do 4 označujejo posamezne faze: izparevanje (1), nastanek absorpcijskega vala, ki se odlepi od površine snovi (2), absorpcija laserskega žarka v izparjenem materialu in zmanjšano izparevanje (3) ter ekspanzija izparjenega materiala, ki zmanjša absorpcijo laserske svetlobe v pari in omogoči vnos energije v obdelovanec (4) [68].

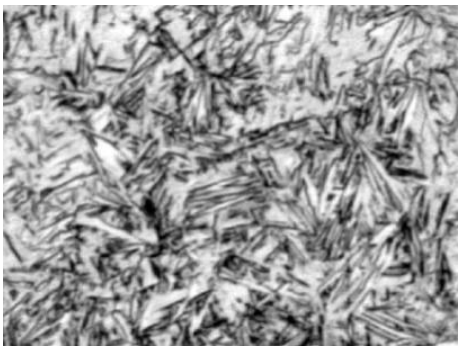


Slika 30: *Grafični prikaz vpliva časa in intenzitete laserskega žarka I na globino* [68]

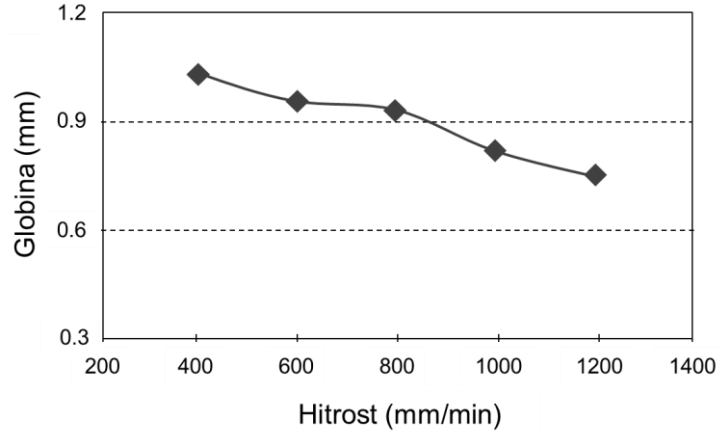
Pregledali smo teoretične osnovne delovanja laserja, sedaj pa predstavljamo praktičen primer laserskega strukturiranja na titanovem vzorcu. Raziskan je bil vpliv laserskih parametrov na profil pretaljene cone (slika 31) in njegove mikrostrukturne spremembe (slika 32) [62]. Ugotovili so, da gre za nizek delež pretaljevanja. Prav tako so ugotovili korelacijo med hitrostjo pretaljevanja in globino pretaljene cone (slika 33).



Slika 31: *Prerez pretaljene laserske strukturne cone* [62]



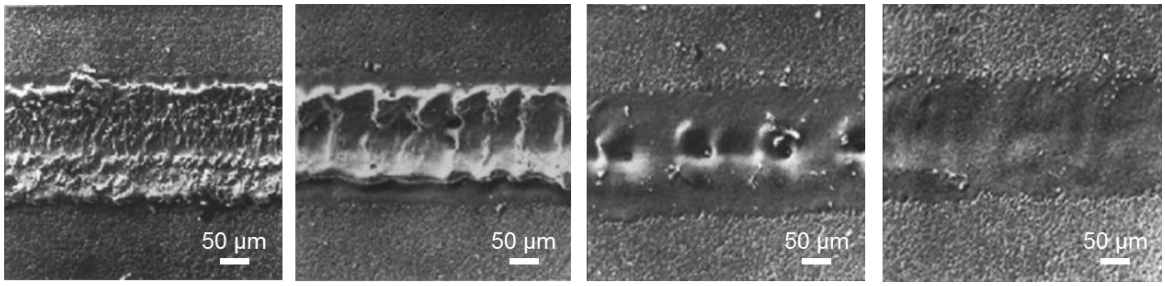
Slika 32: *Mikrostruktura pretaljene cone (povečava 100-kratna)* [62]



Slika 33: *Korelacija med hitrostjo pretaljevanja in globino pretaljene cone titanu* [62]

Sun s sodel. [69] je obravnaval pretaljevanje titana, ki je v primerjavi z drugimi kovinskimi materiali bistveno obstojnejši. Ugotovil je, da je širina pretaljene cone in temperaturno vplivane cone (ang. heat affected zone; HAZ) odvisna od efektivne širine laserskega žarka na površini obdelovanca, in ta je med 1,7 mm in 2,0 mm. Prav tako ugotavlja, da se lahko izboljšanje korozijske obstojnosti in luknjičavosti (pitting) titana doseže ravno z laserskim pretaljevanjem in s tem poveča uporabnost v zaostrenih delovnih razmerah. Na nekaterih področjih, kot so biomateriali, je postala implementacija titana obetavna tehnologija. Kakor koli že, višanje korozijske obstojnosti v tekočini človeškega telesa zahteva posebne korozijske lastnosti materiala. V študiji je uporabil pulzni laserski sistem Nd:YAG.

Qi s sodel. [70] je pri uporabi Nd:YAG-laserja ugotovil, da na kakovost laserske strukture močno vpliva frekvenca pulziranja. Z višanjem frekvence uparevanje materiala upada, v istem trenutku pa je oksidacija bolj intenzivna, kar izboljšuje kontrast gravure. V raziskavi so ugotovili, da je kontrast gravure optimiran, ko je frekvenca laserja okoli 8 kHz. Na sliki 34 je prikazanih nekaj tipičnih mikrostruktur, posnetih s SEM, pri različnih frekvencah obdelave.



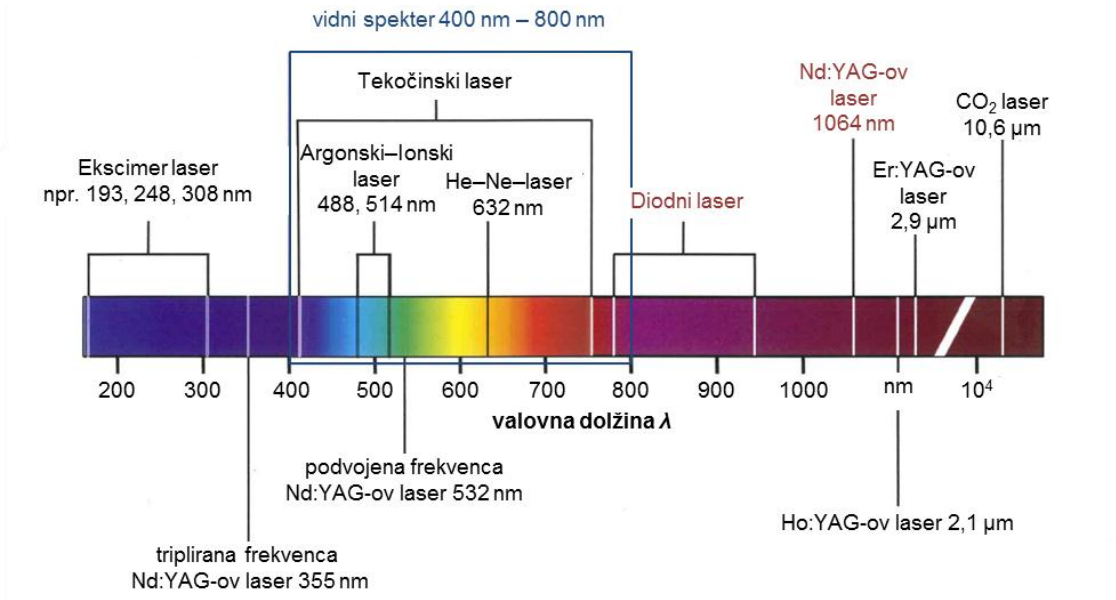
1 kHz 4 kHz 6 kHz 8 kHz

Slika 34: *SEM-posnetki mikrostruktur pri različnih frekvencah pulziranja* [70]

2.4.4 Laserski sistemi

V nadaljevanju bomo opisali nekaj najpogostejših laserskih sistemov, njihovo delovanje in uporabo. Laserje razlikujemo glede na princip delovanja, aktivno sredstvo in namen uporabe. Največkrat jih razlikujemo glede na aktivno sredstvo, in sicer so to plinski, trdninski, polprevodniški in tekočinski laserji [60, 71, 72].

Osredinili se bomo na tri najpogostejše tipe laserjev. Najprej bomo predstavili plinske laserje, nato trdninske in na koncu še polprevodniške. Na sliki 35 prikazujemo najosnovnejše podatke o valovnih dolžinah laserjev.



Slika 35: *Valovne dolžine laserjev*

2.4.4.1 Plinski laserji

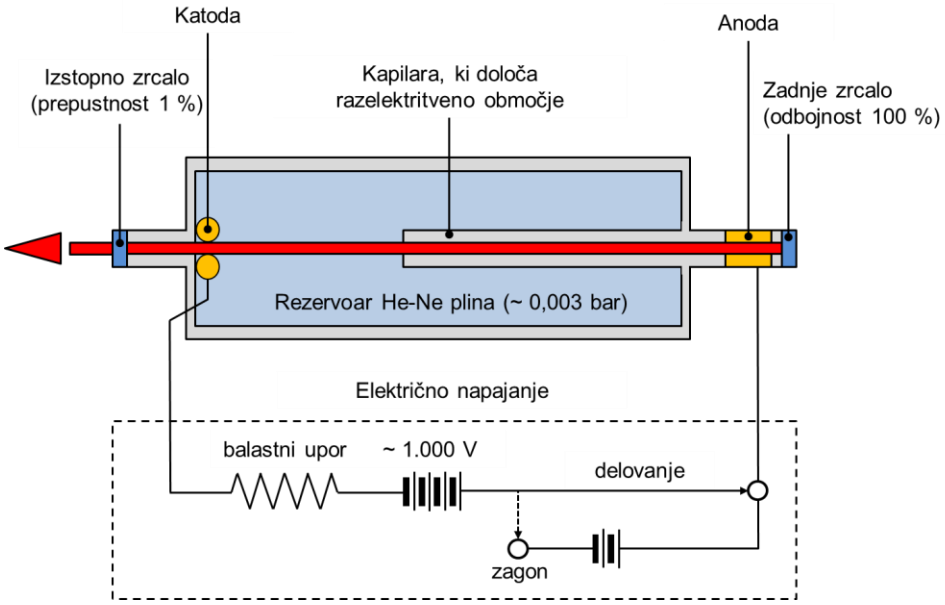
V plinskih laserjih je aktivna snov mešanica plinov. Vzbujanje največkrat poteka z razelektritvijo, redkeje s kemijskimi reakcijami. Lahko pa poteka vzbujanje tudi s kompresijo. S plinskimi laserji dobimo ozek žarek svetlobe v spektru valovnih dolžin v območju, infrardeče (IR), vidne in ultravijolične (UV) svetlobe. Plinska mešanica je najpogosteje mešanica helija in neona, lahko pa je tudi mešanica ogljikovega dioksida in

ioniziranega žlahtnega plina argona. V primerjavi z drugimi laserji so ti dokaj veliki in so zaradi svoje velikosti navadno nepraktični.

Plinske laserje navadno delimo na nevtralne laserje (He-Ne-laser), laserje na ioniziran plin (ion argona), molekulske laserje (CO_2), psevdomolekulske laserje in ekscimerske laserje (kriptonov fluorid) ter laserje na kovinsko paro (bakrena para) [60].

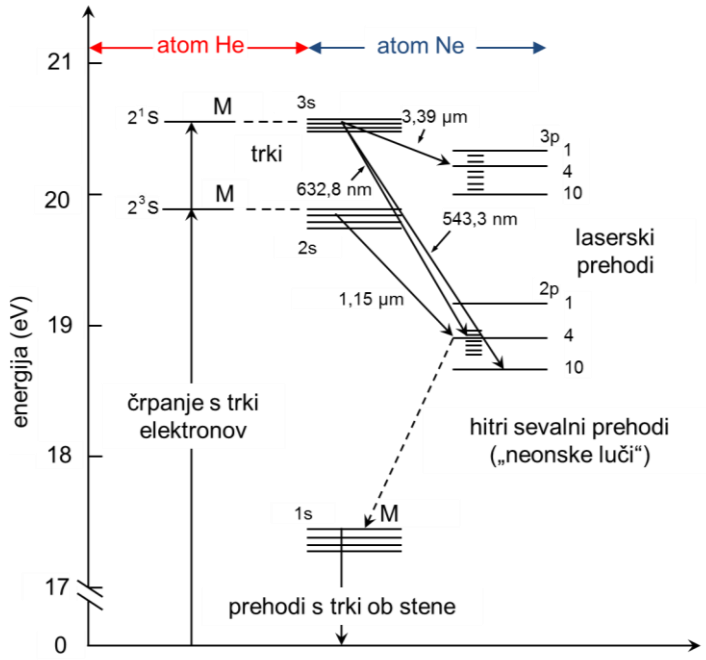
He-Ne-laser

Helij-neonov laser (slika 36) spada v skupino plinskih laserjev, kjer je aktivni medij v zaprti cevi mešanica plina helija (He) in neona (Ne) pri tlaku okoli 1–3 mbar. Razmerje med vsebnostjo helija in neona je med 5 : 1 in 20 : 1. He-Ne-laser oddaja svetlobo v rdečem vidnem spektru pri valovni dolžini 632,8 nm. Deluje kontinuirno in ima izhodno moč med 1 mW in 100 mW. Ta izbira je sicer najbolj pogosta, lahko pa He-Ne-laser deluje tudi pri valovnih dolžinah 1,15 µm (infrardeča svetloba), 543,5 nm (zelena), 594 nm (rumena), 612 nm (oranžna) ali 3,39 µm (infrardeča). Valovna dolžina je odvisna od izvedbe laserja.



Slika 36: *Shematski prikaz He-Ne-laserja*

V zaprti cevki se na obeh koncih optičnega resonatorja nahajata dve zrcali, od katerih je eno delno prepustno in prepusti 1 % svetlobe ter je izhodni vir svetlobe laserja. Zrcali sta lahko v plinski cevki ali zunaj nje. Mehanizem za črpanje energije sta anoda in katoda, ki sta na nasprotnih straneh cevi s plinom. Visoka priklopna električna napetost (≈ 1 kV) sproži tok skozi plazmo, ki je za delovanje laserja med 5 mA in 100 mA. Proces stimulirane energije se začne s trkom elektrona, ki smo ga pospešili z električnim poljem, in atomi helija. Ti atomi ob trku z atomi neona predajo večji del energije slednjim, tako pri trku atomi neona preidejo iz osnovnega stanja v vzbujeno z energijsko vrednostjo 20,66 eV. Z uporabo neona dosežemo inverzno populacijo neonovih atomov. Iz metastabilnega stanja pri 20,66 eV preidejo atomi neona v vzbujeno stanje z energijsko vrednostjo 18,70 eV, pri čemer oddajo foton z valovno dolžino laserja (632,8 nm). Na sliki 37 prikazujemo primer stimulirane emisije helij-neonskega laserja.



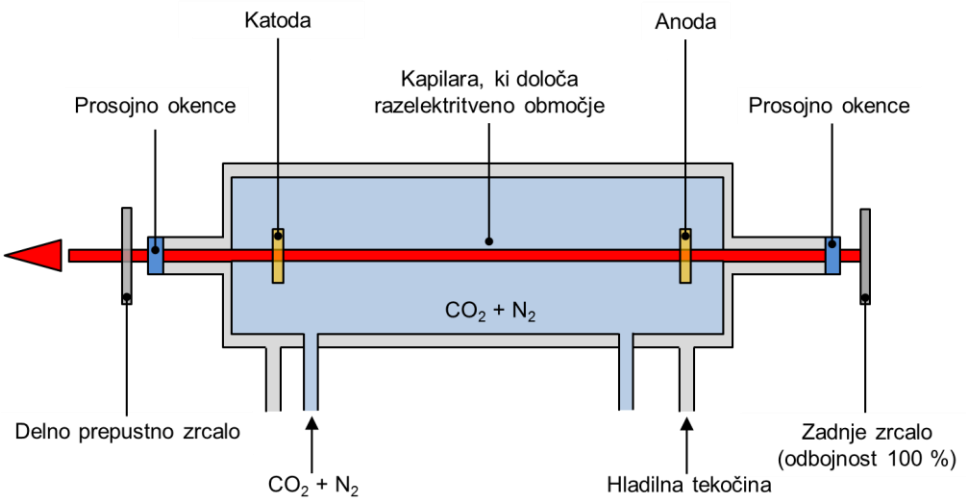
Slika 37: *Stimulirana emisija He-Ne-laserja*

Širina resonančne črte pri He-Ne-laserju je posledica Dopplerjeve razširitve in je za prehod pri 632,8 nm relativno ozka (približno 1,5 GHz). Zaradi majhne divergence izhodnega Gaussovega pramena in longitudinalne koherence nekaj metrov se He-Ne-laser pogosto uporablja pri holografiji in pri demonstracijah poskusov iz optike. Prav tako se uporablja v merilni tehniki, kot je interferometrija, za lasersko uravnavanje in niveliranje. V preteklosti pa se je ta laser uporabljal tudi kot čitalnik črtne kode. V zadnjem času jih izpodrivajo polprevodniški laserji.

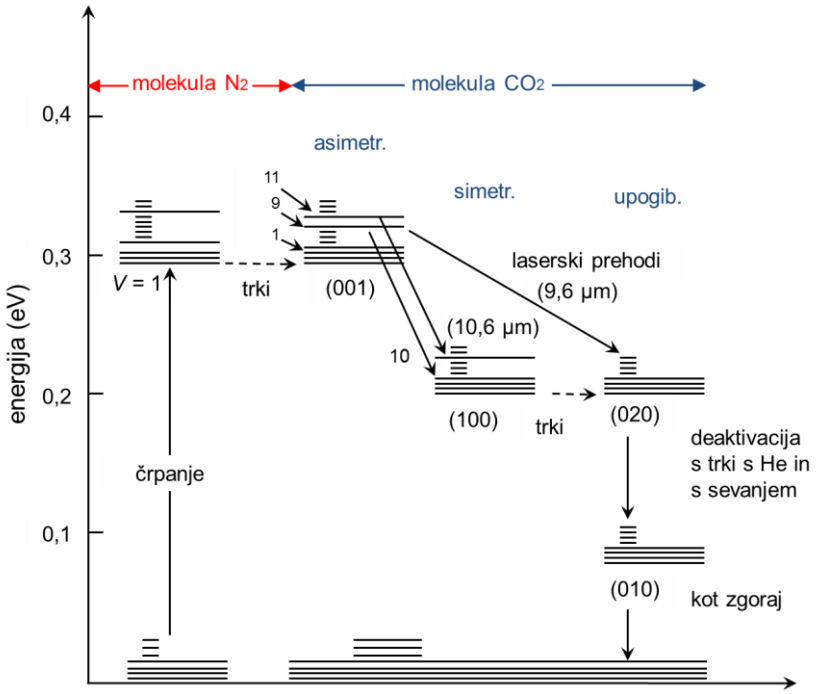
CO_2-laser

Plinski CO_2-laser je poleg YAG-laserja med najuporabnejšimi laserji v industriji [73]. Uporablja se za rezanje, vrtanje, varjenje, označevanje, za določanje razdalj in tudi v medicini. Izhodna moč CO_2-laserja je v velikem razponu. Na primer laserji z zaprto cevjo imajo moč do nekaj 100 W, medtem ko difuzijsko hlajeni laserji dosegajo moč več kilowatov. Laserji, primerni za laserski razrez, vrtanje in varjenje, imajo izhodno moč do ≈ 6 kW.

Ojačevalno sredstvo CO_2-laserja je mešanica dušika (N_2) in helija (He) z ogljikovim dioksidom (CO_2). Odvisno od izvedbe, se CO_2 dodaja vodik (H_2), vodna para (H_2O) ali ksenon (Xe). Tlak plinske mešanice je od ≈ 100 Pa do 10 MPa. Laser oddaja žarek z infrardečo (IR) svetlobo z valovno dolžino med 9,0 µm in 11,0 µm, navadno pa se uporabljajo laserji z valovno dolžino 10,6 µm. Valovno dolžino določa postavitev zrcal, uklonski element ali pa etalon, s katerim lahko izberemo posamezen energijski prehod. Vzbujanje elektronov dosegamo z razelektritvijo, ki poteka v prvem vzbujenem stanju. Drugo vzbujanje poteka z N_2 na metastabilni vibracijski nivo preko trkov. Zadnje, tretje vzbujanje CO_2 poteka na zgornjem laserskem nivoju preko trkov z vzbujenimi molekulami N_2 (slika 39). Izkoristek tega tipa laserja je med 10 % in 30 %.



Slika 38 *Shematski prikaz preprostega CO_2-laserja*



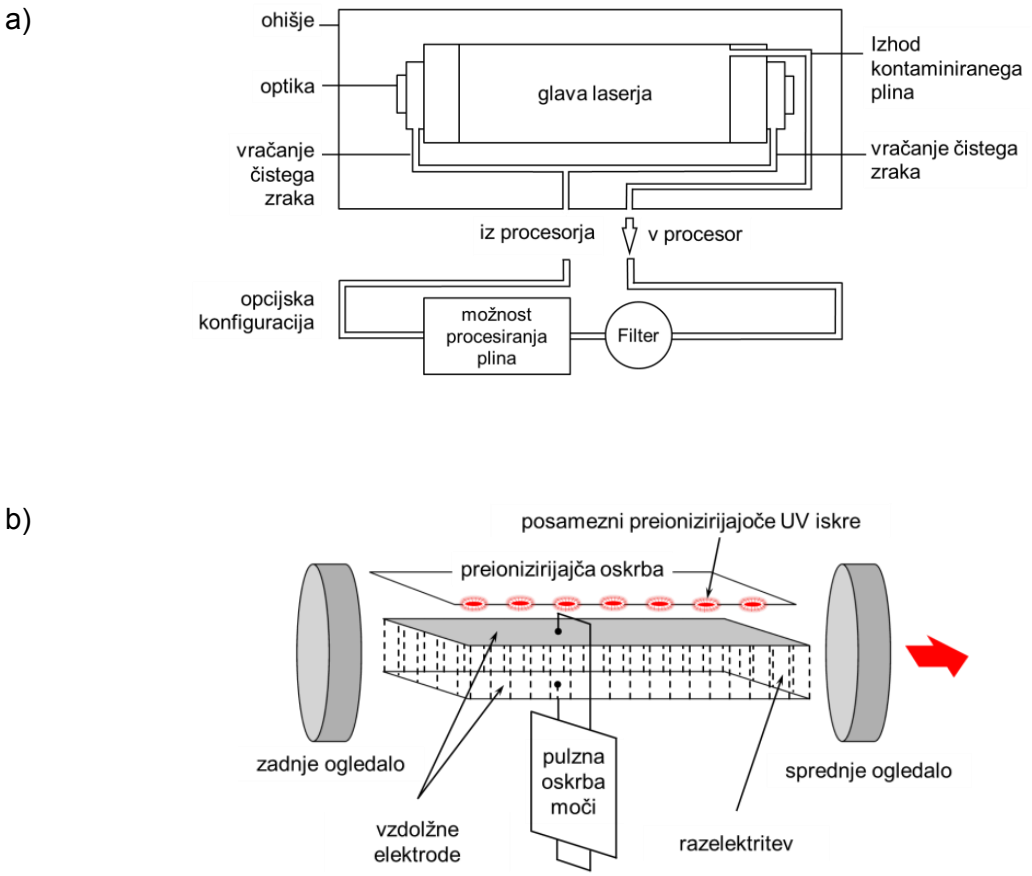
Slika 39: *Stimulirana emisija CO_2-laserja*

Ekscimerski laser

Ekscimer (Excited dimer) je dvoatomna molekula, ki nima stabilnega osnovnega stanja in je obstojna samo v vzbujenem stanju. Ekscimerski laser (slika 40) spada v skupino plinskih laserjev, ki delujejo v časovnem intervalu od 10 ns do 1 ps, njihovo delovanje pa je pulzno. V osnovni obliki tega tipa laserja je žarek z valovno dolžino 172 nm. Z mešanico plinov (ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF…) pa lahko ustvarimo žarek tudi z drugo valovno dolžino. Izkoristek laserja v primerjavi z drugimi tipi je nekoliko večji in je ≈ 15 %.

Tipični elementi tega tipa laserja so spojine žlahtnih plinov in elementov iz VII skupine periodnega sistema. Na primer pri ArF ekscimerskem laserju je aktivni del laserja mešanica plina argona (Ar) in fluora (F). Z električnim tokom se formirajo dvoatomske molekule ali dimeri, ki so molekule halogena in žlahtnih plinov, kot sta npr. Ar in F. Ti molekuli sta obstojni samo v vzbujenem stanju. Pri prehajanju obeh atomov v osnovno stanje se tako emitira žarek z valovno dolžino 193 nm.

Ekscimerske laserje uporabljamo v medicini, predvsem v očesni kirurgiji. Ta tip laserja ima visoko absorpcijo UV-svetlobe in visoko energijo bliskov, tako ga lahko uporabljamo tudi za zahtevnejše obdelovalne postopke, kot npr. v mikroelektroniki, fotolitografiji, v proizvodnji čipov itd. Valovna dolžna teh laserjev je 248 nm in 193 nm.

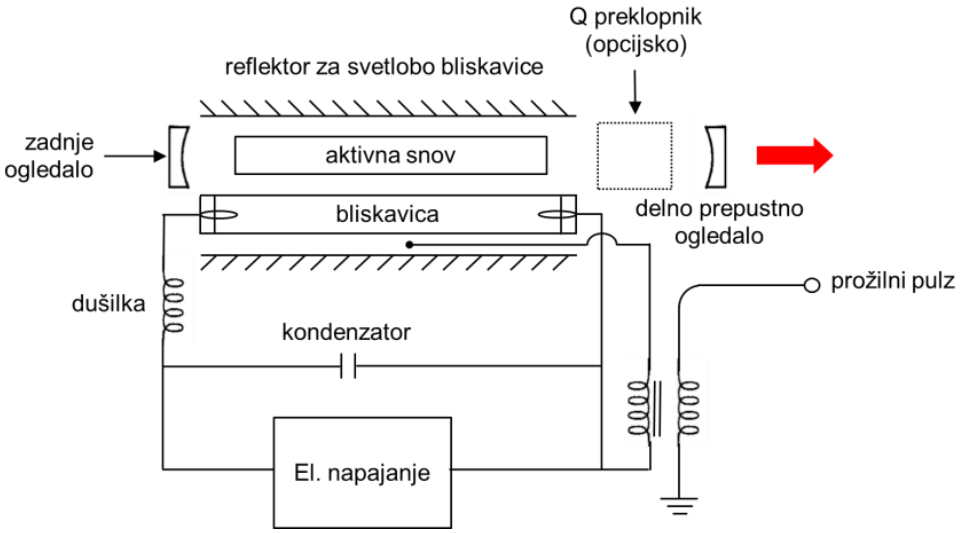


Slika 40: *Shematski prikaz ekscimerskega laserja in pretoka plina (a) ter fizikalnim principom proizvajanja laserskega žarka (b)*

2.4.4.2 Trdninski laserji

Aktivna snov v trdninskih laserjih je prozoren kristal. Navadno je valjaste oblike s poliranimi konci, ki se uporabljajo kot zrcala. Glede na različne sestave in interakcije kristala s primesmi atomov ima snov lahko več vzbujenih stanj (tudi metastabilna). Lasersko delovanje omogočajo sevalni prehodi med nekaterimi stanji. Okoli aktivne snovi je navadno ovita palica, razelektritvena luč, ki z zvezno ali bliskajočo svetlobo optično vzbuja aktivno snov. Bliskavica seva svetlobo z več različnimi valovnimi dolžinami, tudi tistimi, ki jih snov ne absorbira ali pa slabo absorbira, kar pomeni slabši izkoristek črpanja pri bliskavici, saj se porablja energija za svetlobo, ki se ne izkorišča. Razelektritvena luč je navadno ksenonska ali živosrebrna. Možnost optičnega vzbujanja

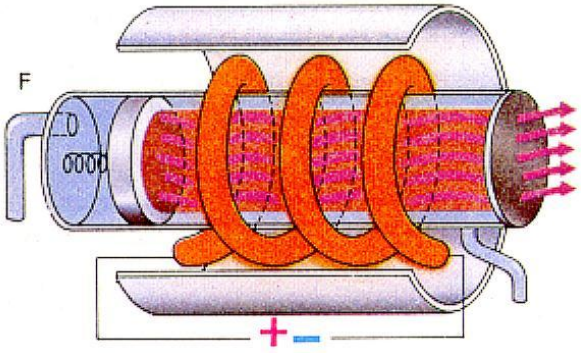
je tudi z volframovimi halogenskimi žarnicami, polprevodnimi laserji itd. V to skupino laserjev spada rubinov laser, Nd:YAG laser, neodim-itrij-litijev fluorid (Nd-YLF laser), laser z neodimovim steklom in holmijevi laserji itd. [72]. Shematski prikaz tipičnega trdninskega laserja prikazuje slika 41.



Slika 41: *Shematski prikaz trdninskega laserja* [60]

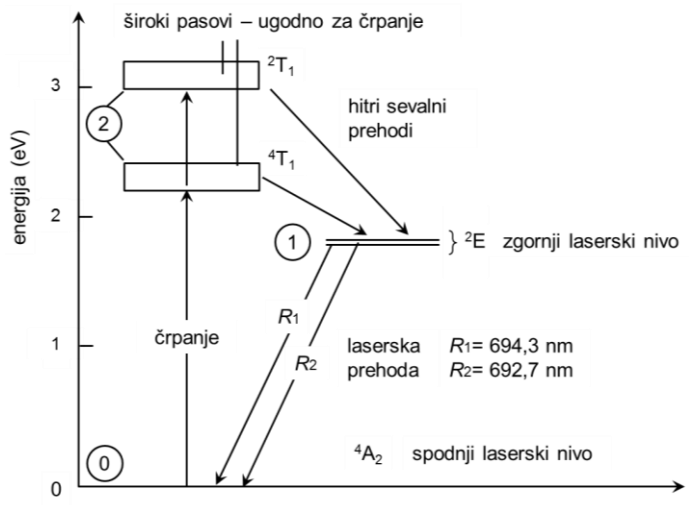
Rubinski laser

Rubinski laser (slika 42) spada v skupino trdninskih laserjev kjer je ojačitveno sredstvo umetni kristal rubina (Al_2O_3) s primesjo kroma (Cr^{3+}). Gre za trinivojski laser, kjer prehodi med različnimi nivoji potekajo med nivoji kromovih ionov, ki se vgradijo v kristalno mrežo.



Slika 42: *Shematski prikaz rubinskega laserja* [74]

Kristal rubina premera 3−25 mm in dolžine do 20 cm obdamo s ksenonsko bliskavico. Iz osnovnega nivoja se atomi vzbujajo v enega od dveh energijskih pasov z valovno dolžino svetlobe 400 nm ali 550 nm, ki jo kristal absorbira. Atomi prehajajo iz širokih energijskih pasov v par metastabilnih stanj. S stimulirano emisijo se ustvari svetloba z valovno dolžino 694,3 nm (rdeče barve). Slika 43 prikazuje energijski diagram stimulirane emisije rubinskega laserja [74].

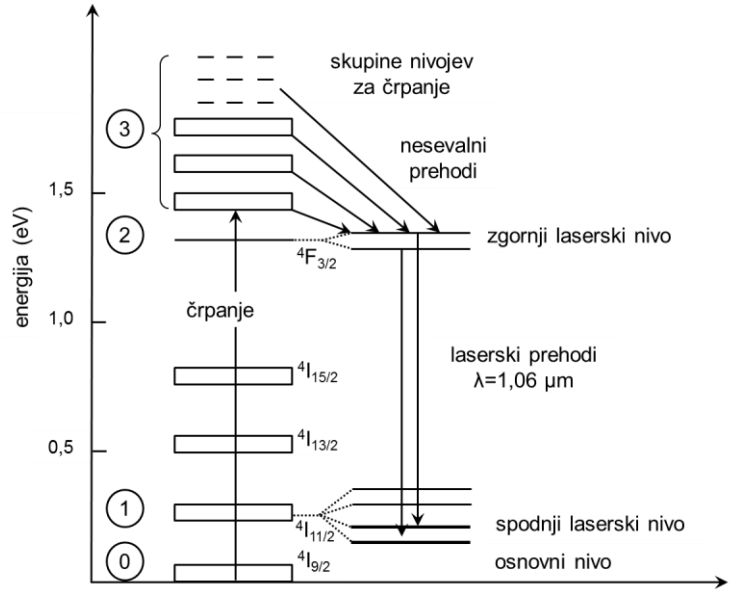


Slika 43: *Stimulirana emisija rubinskega laserja*

YAG-ov laser

YAG-ov polprevodniški laser je med najuporabnejšimi laserji v strojništvu. Njegova izhodna moč je lahko do 5 kW in je uporaben za varjenje, markiranje, strukturiranje, vrtanje ipd. Za lasersko strukturiranje jekla so navadno primerni laserji moči od ≈ 10 W do ≈ 30 W, odvisno od materiala in želene strukture preoblikovanega materiala.

Pri Nd:YAG-laserju je ojačevalno sredstvo kristal itrij-aluminijevega granata ($Y_3Al_5O_{12}$), dopiranega z neodimom. Kristal najbolje absorbira svetlobo v območjih valovnih dolžin 730–760 nm in 790–820 nm. Za optično črpanje v vzbujena stanja so včasih uporabljali kriptonske in ksenonske plinske svetilke za zvezno delovanje ali bliskavice za sunkovne bliske. Danes so plinska svetila največkrat nadomeščena z diodami (808 nm). Nd:YAG-laser je štirinivojski sistem stimulirane emisije, zato je inverzna populacija dosežena že pri majhni moči črpanja (slika 44).



Slika 44: *Stimulirana emisija Nd:YAG-laserja*

Oddaja svetlobo valovne dolžine 1064 nm. Zeleno svetlobo 532 nm generiramo tako, da podvojimo frekvenco in s tem razpolovimo valovno dolžino. Podvojevanje frekvence je nelinearen optični pojav. Efekt je drugega reda, torej odvisen od nelinearne susceptibilnosti χ. Efekt je opazen šele pri visokih gostotah svetlobnega toka, vendar se da doseči izkoristke konverzije nad 90 % že pri moči nekaj 100 mW.

Vlakenski laser

Z nedavnim napredkom na področju optičnih vlaken in izdelave steklenih vlaken z nizkimi transmisijskimi izgubami se je razvil tudi vlakenski laser ali fiber laser [75, 76]. Vlakenski laserji so poseben tip laserjev, katerih aktivni medij je z redkimi zemljami (neodim, iterbij, erbij, tulij, prazeodim, holmij) dopirano optično vlakno [77, 78]. Dopirani ioni so skupaj z nosilnim kremenom aktivni medij in se nahajajo v jedru z višjim lomnim količnikom. Črpanje poteka optično, s čimer ta postane aktivni medij. V sredico dovedena črpana svetloba, omogoča dobro prekrivanje z aktivnim medijem ter posledično majhne izgube [79]. Vlakna zagotavljajo odlično odvajanje toplote. Kakovost žarka je podana s profilom lomnega količnika aktivnega jedra in je zato neodvisna od moči črpanja [80]. Premer izstopnega žarka je reda velikosti premera sredice [79]. Pomembno vlogo pri razvoju in uveljavljanju vlakenskih laserjev je odigral tudi silovit razvoj diodnih laserjev, ki so najprimernejši za črpanje vlakenskih.

2.4.4.3 Polprevodniški laserji

Aktivna snov polprevodniškega laserja so polprevodniški materiali, kot so GaAs, AlGaAs, InP, … [81]. Laserska svetloba je lahko kontinuirna, mogoča pa je tudi pulzna. Delovanje laserja temelji na laserskih diodah in električnem polju. Skozi diode teče tok v prevodni smeri. Če je tok dovolj velik, se lahko koncentracija elektronov in vrzeli v deplecijski plasti (*p*-*n*-stik) toliko poveča, da nastane znatna rekombinacija, pri čemer se spontano emitirajo fotoni. Njihov pramen uravnavamo s širino naparjenih kovinskih stikov na obeh straneh diode. Polprevodniške laserje delimo glede na izhod emitirane svetlobe, ki lahko izhaja od zgoraj ali od strani. Če polprevodnik seva svetlobo od strani, ga lahko dalje delimo še glede na tip spoja polprevodnikov [60, 72].

Glede na različne sestave in kombinacije polprevodnikov lahko ti laserji sevajo z valovno dolžino v razponu od 450 nm do 1,65 μm, kot prikazuje tabela 2. Njihova izhodna moč je od nekaj miliwatov do nekaj watov, izkoristek pa je relativno visok (≈ 50 %). Polprevodniški laserji velikih moči ali ang. High Power Laser Diode (HPLD) (slika 45) oddajajo žarke s povprečno močjo nekaj več od 1 W.

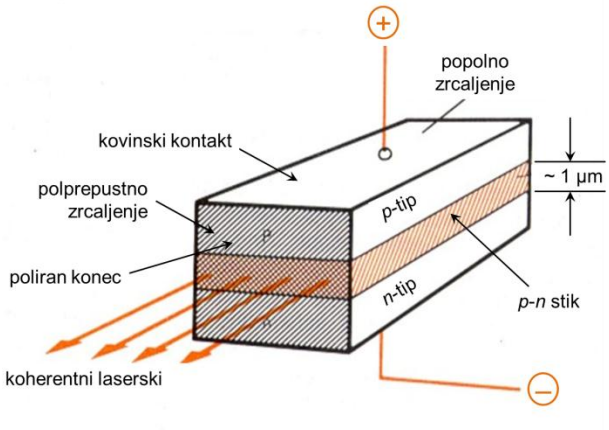
Tabela 2: *Valovne dolžine polprevodniških laserjev*

Snov	Območje valovnih dolžin, λ/nm
GaAs	910–1020
$Al_{1-x}Ga_xAs$	780–880
$In_{1-x}Ga_xAs_{1-y}P_y$	1 150–1 650
$Al_xGa_yIn_{1-x-y}P$	630–680

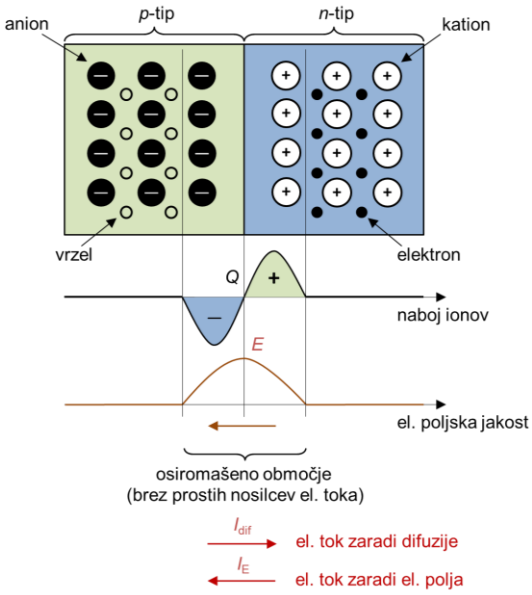
Elementi iz IV. skupine periodnega sistema elementov, kot sta silicij (Si) in germanij (Ge), niso primerni za izdelavo teh laserjev. Pri večini rekombinacij elektronov in vrzeli v elementih iz iste skupine elementov se razpoložljiva energija sprosti v obliki toplote. Za izdelavo se uporabljajo predvsem spojine elementov iz III. in V. skupine. Pri teh se rekombinacijska energija pretvori v svetlobo. S primesmi elementov iz II., IV. ali VI.

skupine je mogoče pri teh snoveh dobiti *p*-tip in *n*-tip polprevodnika.

Z zamenjavo nekaterih atomov v kristalni strukturi z atomi, ki imajo na zunanji lupini en elektron več oz. manj, lahko spreminjamo koncentracijo prostih elektronov oz. vrzeli in s tem prevodnost. Pri primeseh, ki povečajo število prostih elektronov, nastane *n*-tip polprevodnika (negativni naboj). S primesjo, ki poveča število vrzeli, nastane *p*-tip polprevodnika (pozitivni naboj). Shematski prikaz polprevodnika *p* in *n*-tipa s primanjkljajem elektronov prikazuje slika 46.



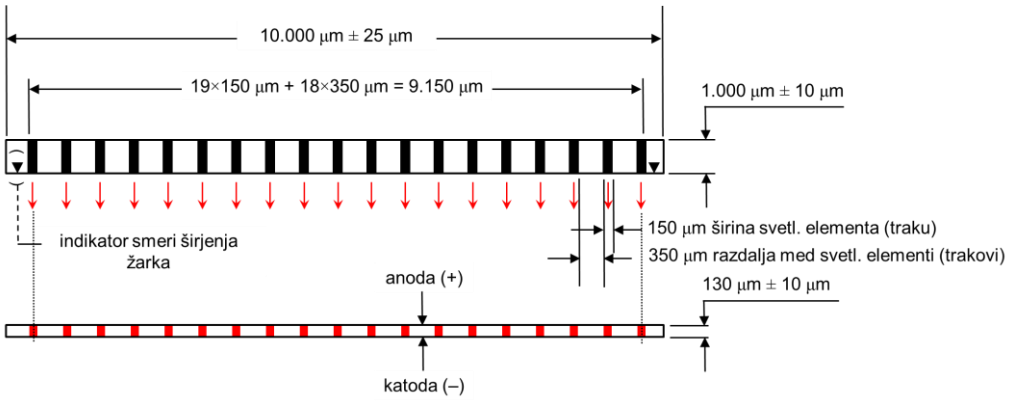
Slika 45: *Shematstki prikaz polprevodniškega laserja* [74]



Slika 46: *Shema polprevodnika p in n-tipa s primanjkljajem elektronov*

Poznamo tri osnovne strukture polprevodniških laserjev, in sicer:

- posamična laserska dioda širine 60–200 µm in moči 1–4 W;
- HPLD-palica dolžine ≈ 10 mm, integrirana iz več linearnih polj laserskih diod (20–50) širine 10 mm in moči 20–50 W (slika 47);
- sklad HPLD-palic (20–100 palic) širine ≈ 10 mm in moči > 1 kW. Na primer sklad 25 polprevodniških palic rastra 1 mm oddajajo najvišjo moč (3 kW) pri toku 120 A. Laserski žarek oddaja IR-svetlobo valovne dolžine 805 nm. Izkoristek tega laserja je ≈ 53 %.



Slika 47: *Polprevodniška laserska palica*

V tabeli 3 je primerjava najpogostejših tipov obdelovalnih laserjev.

Tabela 3: *Primerjalna tabela treh najpogostejših tipov laserjev*

	CO_2	Nd:YAG	Polprevodniški
Valovna dolžina	10,6 μm	1,06 μm	0,8–0,95 μm
Izhodna moč	do 30 kW	do 3 kW	do 3 kW
Izkoristek	5–10 %	1–3 % (bliskavica) 15–30 % (diodni laser)	30–60 %
Specifični volumen	10^3 l/kW	10^2 l/kW	10^{-1} l/kW
Prenos po vlaknu	ne	da	da
Delovne napetosti	do 20 kV	do 1 kV	do 100 V
Jakost žarka v gorišču	10^6–10^8 W/cm^2	10^5–10^8 W/cm^2	10^3–10^5 W/cm^2
Servisni intervali	1 000 h	500 h (bliskavica)	ni vzdrževanja
Cena na enoto moči	75–250 €/W	90–400 €/W	40–250 €/W

2.5 Interpretacija rezultatov statističnih metod

Statistika je veda o obravnavanju množice podatkov. S statistiko podatke zberemo, razvrstimo, uredimo in na osnovi določenih pravil sprejemamo sklepe. Matematična osnova statistike je verjetnostni račun.

Kadar obravnavamo večje število podatkov, je posamične podatke težko ali nemogoče opazovati, saj nam premalo povedo. V tem primeru te predstavimo grafično, navadno s histogramom oz. stolpičnim diagramom, ali numerično z določenimi značilnimi vrednostmi vzorca podatkov.

Če podatke razvrstimo po velikosti in po vrsti, narišemo njene vrednosti, te ni treba razporejati v razrede. Tako dobimo diagram kumulativnih frekvenc ali graf empirične porazdelitvene funkcije.
Kadar nas zanima, kolikšna je odvisnost ene količine od druge, to najlaže prikažemo s točkovnim diagramom, kjer vsak par vrednosti dveh količin prikažemo kot točko v koordinatnem sistemu.

Vrednost faktorja (parametra), katerega učinek (merjena odzivna veličina) na statistične enote opazujemo, imenujemo nivo faktorja (vrednost parametra). Kombinacije tistih nivojev različnih faktorjev, pri katerih opazujemo njihove učinke na statistične enote, imenujemo postopki.

Na osnovi statistik določamo točkovne ali intervalne ocene parametrov populacije in sklepamo pri preizkušanju domnev (preizkušanje hipotez). Za interpretacijo statističnih analiz so vpeljane značilne oznake in mere:

- najmanjša in največja vrednost vzorca (x_{min}, x_{max})
- vzorčna aritmetična sredina μ, ki jo izračunamo po enačbi: $\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$
- varianca vzorca σ^2, ki pomeni srednjo vrednost kvadratov odmikov od povprečja
- standardna deviacija σ
- koeficient variacije V_x, ki ga zapišemo po enačbi $V_x = \frac{\sigma_x}{\mu}$
- območje razpršenosti, ki ga zapišemo z variacijskim ali totalnim razmikom: $VR_x = [\min_{i=1}(x_i), \max_{i=1}(x_i)]$.

Varianca (σ^2) je ena izmed najpogosteje uporabljenih mer variabilnosti oz. razpršenosti enot. Definirana je kot povprečje kvadratov odklonov posameznih vrednosti

od aritmetične sredine. Formula za izračun variance, kjer je *x* vrednost spremenljivk, μ pomeni pričakovano aritmetično sredino in *n* velikost populacije, je:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(x_{\mathrm{i}} - \mu)^2 \tag{13}$$

Standardna deviacija (σ) je mera variabilnosti, s katero merimo razpršenost vrednosti okoli aritmetične sredine populacije oz. vzorca. Čim višja je vrednost standardnega odklona, tem bolj so enote v populaciji oz. vzorcu razpršene in obratno, čim nižja je vrednost, tem manjša je razpršenost enot in večja je koncentracija enot okoli aritmetične sredine.

Formuli za standardne deviacije celotne populacije ali vzorca statistične populacije se razlikujeta, in sicer formula standardne deviacije populacije se zapiše v obliki:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2} \tag{14}$$

enačba standardne deviacije vzorca:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}}(x_{\mathrm{i}} - \mu)^2} \tag{15}$$

kjer je *x* vrednost spremenljivk, μ pričakovana aritmetična sredina in *N* velikost populacije.

Stopnja značilnosti α, tudi stopnja signifikantnosti) je tveganje, ki je povezano s tem, da nismo stoodstotno gotovi, da je to, kar preučujemo v raziskavi, to, kar preverjamo. Stopnja značilnosti je verjetnost za napako 1. vrste, ki jo je uvedel Fisher [82, 83]. Napaka prve vrste je torej verjetnost, da zavrnemo pravilno domnevo oz. da v populaciji ne obstaja nobena resnična povezanost in je torej ničelna hipoteza pravilna. Najpogosteje uporabljamo stopnjo značilnosti v višini 0,05 (5 %), v uporabi pa sta tudi stopnji 0,01 (1 %) in 0,001 (0,1 %). Načeloma ne obstaja nikakršna matematična razlaga ali fizikalna utemeljitev, kdaj uporabljamo višjo in kdaj nižjo stopnjo značilnosti. V raziskavah, ki lahko nosijo široke posledice za zdravstveno in ekonomsko stanje populacije, se nagibamo k nizki ravni α (0,001–0,01), medtem ko se v inženirski praksi nekako držimo stopnje značilnosti 0,05 [84, 85]. Za stopnjo značilnosti velja, da:

- če je ta manjša ali enaka 0,05 ($\alpha \leq 0{,}05$), potem lahko z veliko gotovostjo (95 %) posplošimo rezultate vzorcev iz populacije;

če je statistična značilnost večja od 0,05 ($\alpha > 0{,}05$), takrat rezultate vzorcev iz populacije interpretiramo z nižjo gotovostjo in je bolje rezultate interpretirati le na nivoju vzorca. Torej v primeru, ko je $\alpha > 0{,}05$, določen rezultat na nivoju vzorca težko posplošimo na nivo populacije.

Precenitev *p* računamo glede na predpostavko, da je ničelna hipoteza resnična. Ni dovolj, da razberemo, ali je *p* večji ali manjši od α, saj obstoj razlike ne prispeva nobene informacije o ničelni hipotezi H_0. Precenitev *p* meri stopnjo, v kateri je rezultat dosežen po naključju. Težimo k temu, da vrednost pomembnosti interpretiramo kot kazalec

velikosti učinka. Za vrednosti *p*, ki so precej manjše od 0,05, se uporablja izraz »signifikanten« (ang. significant). Statistična pomembnost ne ustreza velikosti učinka. Pusti nam domnevati, da obstaja določen učinek, vendar nam o njegovih značilnostih ne pove ničesar. Vrednost *p* ni odvisna le od upoštevanja učinka, ampak tudi od velikosti vzorca. Majhnemu povečanju učinka lahko ustreza večji upad *p* in obratno [82, 83, 86].

Povezanost in regresija; Pogosto uporabljena mera povezanosti v regresijski analizi je koeficient determinance R^2, ki določa razmerje med pojasnjeno varianco in skupno varianco. Ta daje kvantifikacijo deleža variance odvisne spremenljivke, določenega z njenim odnosom z neodvisno spremenljivko.

$$R^2 = \frac{SS_{\text{eff}}}{SS_{\text{t}}} \tag{16}$$

Vrednost SS_{eff} pomeni varianco zaradi učinka in SS_{t} popolni odklon (varianca). Koeficient R^2 lahko zavzema vrednosti med 0 (odsotnost učinka – vsa pojasnjena varianca je posledica napake) in 1 (popoln učinek ali popolna napoved – vsa pojasnjena varianca je posledica neodvisne spremenljivke) [86, 87].

Pri preoblikovalnih procesih je statistično načrtovanje eksperimentov precej razširjeno. Nanaša se na postopek načrtovanja poskusov, tako da ustrezne podatke analiziramo s statističnimi metodami, ki izhajajo iz objektivnih sklepov raziskav [88-92]. Zasnove in metode, kot so faktorialna zasnova (ang. Factorial Design; FD), metodologija načrtovanja eksperimentov (ang. Design of Experiment; DoE) in metodologija odzivne površine (ang. Response Surface Methodology; RSM) so nadomestile eksperimentalni način, kot je hkratno spremljanje le enega faktorja, ki je dolgotrajen in stroškovno znaten. Preizkusni primeri slednjega obsegajo le majhen del preizkusnega območja v primerjavi z ortogonalno tabelo (OT), ki jo je vpeljal Taguchi. Ta temelji na preizkusih, razpršenih po celotnem preizkusnem območju [93].

Japonski inženir Genichi Taguchi je predlagal več načinov načrtovanja eksperimentov, ki jih navadno imenujemo »Taguchijeve metode« [93]. Te imajo široko področje uporabe, njihova sistematična uporaba pa omogoča optimizacijo različnih parametrov za kakovostnejši in učinkovitejši proces. Taguchijevi eksperimenti se načrtujejo po točno določenih pravilih, kot to predvideva metoda eksperimentalnega načrtovanja DoE [94].

2.5.1 Metoda eksperimentalnega načrtovanja – DoE

DoE (ang. Design of Experiment) je osnovna statistična metoda za analizo občutljivosti dejavnikov, pa tudi za uporabo večkratne linearne regresije, modeliranje in optimizacijo procesa. Ta metoda nam omogoča izvedbo minimalnega števila eksperimentov. Ponuja več kot naključni posamezni eksperimenti (sprememba enega parametra naenkrat), ker omogoča določanje vpliva posameznih vhodnih parametrov, kot tudi interakcij vhodnih parametrov na spremembe izhoda.

Kot osnovo za različne eksperimentalne situacije, ki olajšajo načrtovanje procesa, je Taguchi oblikoval nabor standardnih ortogonalnih tabel za 2-, 3-, 4-, 5-nivojski in mešani nivojski niz [95]. Le-te lahko prilagodimo, da zadostijo zahtevam eksperimentov glede na število faktorjev (parametrov) in njihovih nivojev (vrednosti) [92, 96]. Načrtovanje preizkusov z ortogonalno tabelo je primerno povsod, kjer je vključeno večje število faktorjev, ima pa tudi nekatere omejitve. Največja omejitev je, da je metoda učinkovito uporabna le na samem začetku načrtovanja eksperimentov. Pri kontinuirano spreminjajočih se faktorjih je primernejši klasičen način načrtovanja (popolno faktorialno

načrtovanje) in analiziranje procesov [69]. Taguchi je oblikoval vrsto nizov ortogonalnih tabel. Te so izražene v obliki $L_N(D^k)$, kjer pomeni N število potrebnih eksperimentov, D število nivojev in k število vplivnih faktorjev. V nadaljevanju so prikazane Taguchijeve standardne ortogonalne tabele:

- 2-nivojski niz (delne fakultete): $L_4(2^3)$, $L_8(2^7)$, $L_{16}(2^{15})$, $L_{23}(2^{31})$, $L_{64}(2^{63})$,
- 2-nivojski niz: $L_{12}(2^{11})$ (Plackett-Burmanovo oblikovanje),
- 3-nivojski niz: $L_9(3^4)$, $L_{27}(3^{13})$, $L_{81}(3^{40})$,
- 4-nivojski niz (delne fakultete): $L_{16}(4^5)$, $L_{64}(4^{21})$,
- 5-nivojski niz (delne fakultete): $L_{25}(5^6)$,
- mešani nivojski niz (delne fakultete): $L_{18}(2^1 \times 3^7)$, $L_{32}(2^1 \times 4^9)$, $L_{50}(2^1 \times 5^{11})$,
- mešani nivojski niz (delne fakultete): $L_{36}(2^{11} \times 3^{12})$, $L_{36}(2^3 \times 3^{13})$, $L_{54}(2^1 \times 3^{25})$.

Kot že omenjeno, je prednost metode DoE predvsem zmanjšanje števila preizkusov na zmerno število. Popolni faktorialni načrt (ang. Full Factorial Design – FFD) eksperimentov identificira vse mogoče kombinacije eksperimentov. Na primer, če sledimo procesu s sedmimi faktorji vpliva (sedem procesnih parametrov) na dveh nivojih (dve vrednosti), bi to bilo skupaj 128 (tj. 2^7) preizkusov, pri tem pa ne bi dobili bistveno več informacij, kot bi jih dobili s Taguchijevo ortogonalno tabelo L_8 (2^7) za tak primer, torej le osem eksperimentov.

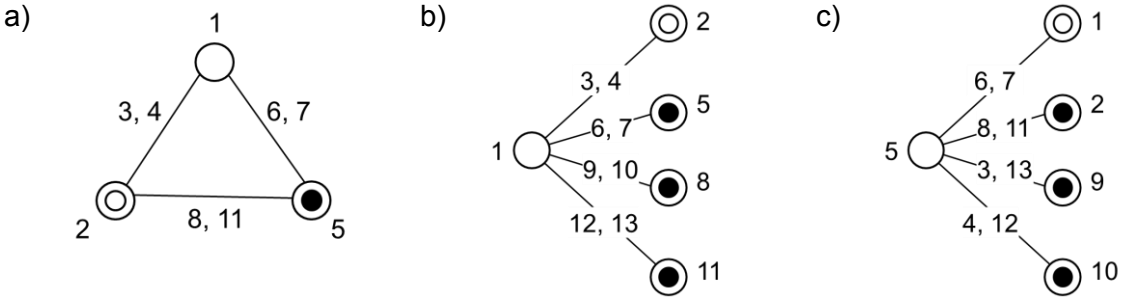
Če sledimo večjemu številu faktorjev (npr. 13) in njihovim vrednostim (npr. 3) se eksperimentalno načrtovanje lahko toliko bolj razširi (1 594 323 eksperimentov). Z uporabo ortogonalne tabele L_{27} (3^{13}) pa je skupno število eksperimentov le 27. To ortogonalno tabelo prikazujemo v tabeli 4.

Tabela 4: *Ortogonalna tabela $L_{27}(3^{13})$ eksperimentalnega načrtovanja DoE*

	Faktor												
	1	**2**	3	4	**5**	6	7	**8**	9	10	11	12	13
	A		A	A		A	A		A	A		A	A
		B	B	B^2				**B**	B	B^2	B	B^2	B
					C	C	C^2	**C**	C	C^2	C^2	C	C^2
	A		A	A		A	A		A	A		A	A
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Pri eksperimentih s tolikim številom faktorjev je ključnega pomena določanje prispevkov posameznih faktorjev in odnosov med njimi (tj. izbira stolpcev). Vsak stolpec pomeni določen faktor (A, B, C, B^2, C^2) [69, 97]. Pri štirih faktorjih izberemo štiri stolpce iz ortogonalne tabele. Izbira stolpcev je odvisna od medsebojne odvisnosti posameznih faktorjev. Nekaj teh odvisnosti za ortogonalno tabelo L_{27}, kjer ta dopušča analizo 13 faktorjev, je prikazana na sliki 48. Če ne poznamo medsebojnega vpliva analiziranih faktorjev in predvidevamo, da en faktor vpliva na drugega, izberemo indirektno vzorčno povezanost (krožni model) in model, prikazan na sliki 48a. Sicer pa lahko izberemo tudi preostala modela na sliki 48b in c.

V krožnem modelu so trije faktorji (1, 2 in 5 ali faktorji A, B in C) odvisni drug od drugega. Ker pa želimo spremljati še četrti faktor, izberemo eno izmed interakcij (npr. interakcijo 8 ali interakcijo med faktorjema B in C). Ta model ortogonalne tabele smo uporabili tudi mi. Taguchijeva kombinacija standardnega načina načrtovanja procesov in analize postopkov daje metodi skladnost in ponovljivost, ki jo druge statistične metode le stežka dosežejo [98].



Slika 48: *Primer modelov vpliva faktorjev v Taguchijevi ortogonalni tabeli*

2.5.2 Metodologija odzivne površine – RSM

Metodologija odzivne površine RSM (ang. Response Surface Methodology) je specializirana tehnika, ki se uporablja za modeliranje in optimizacijo eksperimentalnega načrtovanja. RSM je kombinacija eksperimentalnih in regresijskih analiz ter njunih statističnih sklepanj. Osnovni princip je, da z metodo DoE zasnujemo eksperimentalni model in s skupino matematičnih in statističnih tehnik, kot je analiza variance (ANOVA), modeliramo najustreznejši odnos med faktorji (npr. obdelovalnimi parametri) in izhodnimi spremenljivkami [99]. Za optimizacijo procesa nam daje odgovor na vpliv večjega števila spremenljivih vhodnih dejavnikov (procesnih parametrov) na merjen izhodni odziv (procesni) [100, 101]. RSM lahko uporabimo le v primeru, kadar razpolagamo z minimalno tremi vhodnimi parametri na štirih nivojih.

Z RSM lahko preiskujemo lokalne in oblikovne spremembe površin funkcij, zato metodologijo imenujemo tudi metodologija odzivne površine. Omogoča bistveno zmanjšanje števila eksperimentov, s tem pa prihranimo čas in denar. RSM uporablja statistične zasnove poskusov DoE in metodo najmanjših kvadratov v fazi generacije modela. Metodologija se uporablja za iskanje izboljšav oz. optimizacijo procesov, odpravljanje težav v procesu in za iskanje šibkih točk. V osnovi je bil RSM razvit za modelno prilagajanje eksperimentov po Boxu in Draperju [102], kasneje pa so metodologijo sprejeli tudi na drugih področjih. Model odzivne površine je formuliran kot polinomska funkcija:

$$f = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_{\mathrm{i}} x_{\mathrm{i}} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} a_{\mathrm{ij}} x_{\mathrm{i}} y_{\mathrm{j}} + \cdots \tag{17}$$

kjer je a_0 konstanta, a_i in a_{ij} so koeficienti linearnih in mešanih členov, x_i so spremenljivke, ki odgovarjajo obravnavanim faktorjem, n pa je število faktorjev (t. i. procesnih parametrov).

RSM deluje v treh korakih. V prvem koraku najprej posnamemo eksperiment in identificiramo manjše število kontinuirnih spremenljivk za nadaljnji študij. Nato izberemo najprimernejšo ortogonalno tabelo. V drugem koraku izvajamo analizo. Poskušamo določiti, ali je optimalna rešitev locirana v trenutnem območju eksperimentov. Če je ta v optimalni rešitvi, oblikujemo in poravnamo eksperiment odzivne površine in zberemo več podatkov, da ustvarimo empiričen model (linearen ali nelinearen), navadno model druge stopnje. Nato s statistično analizo variance (ANOVA) in serijo eksperimentalnih rezultatov izberemo statistično pomembne faktorje in velikost le-teh. Statistično nepomembne faktorje izločimo iz nadaljnje analize in poravnamo

model odzivov. Ko je končni model odzivov v obliki polinomske funkcije zapisan, izvedemo končno numerično ali grafično optimizacijo odzivov. Cilj je doseči stabilen optimum, na katerega imajo faktorji šuma (*S*/*N*) čim manjši vpliv. Kontrolni faktorji so tisti, katerih nivoje lahko kontroliramo med eksperimentom in pri končnem načrtu izdelka ali procesa, medtem ko so faktorji šuma tisti, ki imajo vpliv na produkt ali proces, vendar nimajo določenih nivojev med postopkom.

Pri naši raziskavi je kreiranje modela napisano v programu Design-Expert, lahko pa je tudi v programskem jeziku MATLAB. Programi imajo možnost kreiranja modela polinoma do desete stopnje, vendar le v primeru, kadar razpolagamo z zadostnim številom podatkov [103].

Osnova obeh metod (DoE in RSM) je statistična analiza variance (ANOVA). Preden bomo opisali potek eksperimentalnih postopkov in računalniške obdelave, pa je potrebno razumevanje statističnih pojmov ANOVA.

2.5.3 Analiza variance – ANOVA

Analiza variance (ANOVA) je splošno ime za metode, ki primerjajo pojasnjeno variabilnost (navadno merjeno z vsoto kvadratov odklonov) z nepojasnjeno. Če je pojasnjena variabilnost dovolj velika v primerjavi z nepojasnjeno, potem lahko sklenemo, da ima tisto, kar pojasnjuje, neki vpliv na obravnavano odvisno spremenljivko.
Analizo variance uporabljamo takrat, kadar analiziramo značilnost razlik med povprečnimi vrednostmi za več kot dva vzorca, pri čemer so ti med seboj neodvisni. Z njo preizkusimo vpliv ene ali več neodvisnih spremenljivk na odvisno (slučajno) spremenljivko *Y*. S to ugotavljamo, ali se aritmetične sredine razlikujejo od skupine do skupine.

Varianco podatkov, s katerimi izražamo učinke faktorjev na statistične enote, razčlenimo na več delov. En del variance je rezultat učinkovanja slučajnih vplivov, preostali deli, eden ali več, pa imajo izvir v učinkih preučevanih faktorjev na statistične enote. Kadar so posamezni deli tako razčlenjene skupne variance bistveno večji od dela, ki pripada slučajnim vplivom, sklepamo, da so učinki teh faktorjev statistično pomembni. Če smo skupno varianco podatkov razčlenili na dva dela, od katerih eden pripada slučajnim dejavnikom, drugi pa preučevanemu faktorju, govorimo o enofaktorski analizi variance. Če smo skupno varianco razčlenili na tri ali več členov, tako da eden pripada slučajnim dejavnikom, preostali pa preučevanim faktorjem, govorimo o dvo- ali večfaktorski analizi variance. Predpostavke večfaktorske analize variance so podobne predpostavkam enofaktorske.

Večfaktorska analiza je enostavnejša, če so neodvisne spremenljivke med seboj neodvisne/nepovezane. Če neodvisne spremenljivke med seboj niso neodvisne, je pomemben vrstni red faktorjev. Model namreč najprej "poskuša" pojasniti čim več variabilnosti odvisne spremenljivke s prvim faktorjem, nato z drugim, tretjim itd. Rezultati se torej spremenijo, če zamenjamo vrstni red faktorjev. Od vrstnega reda je tudi odvisno, kaj neki preizkus sploh preverja. Pri prvem faktorju preizkus preverja, ali faktor pojasni vsaj nekaj variabilnosti odvisne spremenljivke (oz. ali vpliva nanjo). Pri vseh drugih pa preverja, ali faktor pojasni kak del variabilnosti odvisne spremenljivke, ki še ni pojasnjen s faktorji in so v modelu pred obravnavanim faktorjem.

ANOVA je statistična metoda s širokim matematičnim in statističnim ozadjem in s katero preučujemo učinke faktorjev na izračunane osnovne statistične enote, kot so:

- determinancijski koeficienti R^2,
- prilagojen determinancijski koeficienti R^2_{Pril},

- predviden determinancijski koeficient R^2_{Pred},
- precenitev ali *p*-vrednost ("*Prob*>*F*"),
- statistična značilnost *F* (*F*-value) in
- razmerje med signalom in šumom *S*/*N*.

Za dobro izvedbo analize je treba posebno pozornost posvetiti zbiranju procesnih podatkov, da bodo meritve odzivov razporejene v pričakovanem prostorskem območju eksperimentov. Meritve, ki so preveč oddaljene od merilnega kontrolnega območja, ali kjer je spremenljivost odzivov nenadzorovana, lahko vodi do pristranske ocene variance. Tako je pred izvedbo preizkusov priporočljivo preučiti podobne študije analiziranega primera, upoštevati priporočila (npr. proizvajalcev strojev, naprav, orodij ipd.) ter po možnosti izvesti preliminarne preizkuse. Dobra izbira podatkov iz procesa omogoča več interpretacij rezultatov, med drugim tudi določitev ponovljivosti analiziranega vzorca ter soodvisnost med merilci in merjenci [87].

ANOVA odgovarja na vprašanje, ali so učinki faktorjev statistično pomembni in kako veliki so. Temelji na dejstvu, da varianca vsakega vzorca, vzetega iz skupine (populacije), pomeni nepristransko oceno variance skupine (populacije).

Celoten regresijski model preizkusimo s *F*-preizkusom (*F*). Čim manjša je statistična značilnost *F*-statistike, tem boljši je regresijski model. Vzorčno porazdelitev razmerij teh varianc imenujemo tudi porazdelitev *F*. Dobimo jo tako, da primerjamo varianco med skupinami z varianco znotraj skupin. Čim večji je količnik, tem večja je verjetnost, s katero lahko zavrnemo ničelno hipotezo. Če ničelna hipoteza drži, potem bo *F*-statistika imela pričakovano vrednost približno ena in naključno vzorčenje distribucije. Značilnost analize variance (*F*-vrednost) nam torej pokaže, kakšen vpliv imajo izbrani členi (faktorji ali korelacija med njimi) glede na skupno vrednost *F* zapisanega modela.

V strojništvu navadno izvajamo analizo variance pri stopnji značilnosti 95 %, kar pomeni, da s 95-odstotno gotovostjo posplošimo rezultate vzorcev iz populacije.

Determinancijski koeficient R^2 ali kvadrat multiplega koeficienta korelacije nam pove delež pojasnjene variance z upoštevanjem vseh signifikantnih faktorjev, opisanih z modelom, in je definiran na intervalu [0, 1]. Pri linearni povezanosti je enak kvadratu koeficienta korelacije. Glede na dejstvo, da se vrednost R^2 zmanjšuje ali povečuje z zmanjševanjem oz. povečevanjem števila neodvisnih regresijskih spremenljivk, pri statističnem modeliranju navadno izberemo **prilagojen determinancijski koeficient** R^2_{Pril} (angl. Adjusted R^2). Za zapis značilne enačbe modela določimo mejno vrednost prilagojenega koeficienta determinance R^2_{Pril}, ki naj bi bila za vsak posamezen odziv ≥ 0,90. Ta vrednost sicer ni eksaktno definirana, zato jo jemljemo po lastni presoji. Zadnji koeficient, **predviden determinancijski koeficient** R^2_{Pred}, pa pomeni, v kolikšni odstotni meri lahko pričakujemo, da bo pri vseh novih spremenljivkah nov model tudi razložen [92, 100]. Vrednosti R^2, R^2_{Pril} in R^2_{Pred} naj bi bile blizu 1 in dovolj blizu druga drugi. Vrednosti R^2_{Pril} in R^2_{Pred} naj se ne bi odmikale za ≈ 20 %. Pri negativni vrednosti R^2_{Pred} pomeni, da je trenutni model slabši napovedovalec od skupnega povprečja in obratno.

Če se zgodi, da smo dobili nizko vrednost koeficienta determiniranosti, še ne pomeni, da modela ne moremo zapisati. Znatna in pomembna vrednost je značilnost analize variance *p*-vrednosti, ki označuje vpliv parametra in razumno oceno njegovega učinka. Znatna *p*-vrednost skupaj z nizko R^2 lahko pomeni dodatno delo pri oblikovanju poskusov, čeprav bi sprva mislili, da imamo težavo in modela ne moremo zapisati. R^2 je pomembna statistična vrednost, ne pa izrednega pomena v DoE. Precenitev ali *p*-vrednost nam pokaže, ali so model, posamezni faktorji ali korelacija med faktorji statistično značilni (signifikantni) ali ne. Če je vrednost *p* manjša od 0,05 (*p*-vrednost < 0,05) pomeni, da so bodisi model, posamezni faktorji ali korelacija med njimi statistično signifikantni (pri stopnji značilnosti 95 %) [92].

Ustrezna natančnost meri razmerje med signalom in šumom (ang. Signal to Noise; *S*/*N*). Zaželeno je razmerje večje od 4. V naši raziskavi smo določili vrednost *S*/*N* > 10, da bi analiza pokazala ustrezen signal. Z ustreznim signalom dobimo informacijo, da lahko model uporabimo za navigacijo prostorskega oblikovanja.

2.5.4 Pregled raziskav površinske obdelave z uporabo RSM

Številne raziskave s področja preoblikovalnih procesov temeljijo na metodi eksperimentalnega načrtovanja DoE, metodologiji RSM ter analizi variance ANOVA. Iz velike večine raziskav lahko ugotovimo, da je metodologija RSM primerna pri določanju optimalnih parametrov obdelovalnih postopkov in določanju površinskih karakteristik (hrapavost površine) tako obdelovancev kot orodij (obraba). V nadaljevanju bomo predstavili nekaj raziskav, ki jih lahko primerjamo z našo.

Metodo krogličnega glajenja bi lahko v principu primerjali z metodo razenja. Gre za postopek plastičnega preoblikovanja v hladnem (tj. glajenje), kjer z vrtenjem kroglice (orodjem) in njenim pomikom po obdelovancu gladimo površino materiala. Pri tem se hrapavost površine zniža, material pa utrdi. Pregled raziskav s tega področja sta objavila Mahajan in Tajane [10].

Shiou in Chen [104] sta v svoji raziskavi npr. uporabila Taguchijevo ortogonalno tabelo L_{18}, analizo ANOVA in popoln faktorialni načrt eksperimentov (full factorial expreiment). Določala sta optimalne razmere pri obdelavi za izboljšanje površinskih karakteristik (hrapavost) orodja (material PDS5) za brizganje plastike. Ugotovila sta, da se pri optimalnih razmerah, kot so pravilna izbira materiala kroglice, vrtilne hitrosti glajenja, sile orodja na obdelovanec in podajanje, lahko hrapavost površine R_a izboljša z 1 μm na 0,07 μm.

Seemikery s sodel. [105] se je pri enakem preoblikovalnem postopku poleg izboljšanja profila površine in njene hrapavosti osredinil tudi na podaljšanje trajnostne dobe orodja. Z izbiro optimalnih procesnih parametrov je analiziral mikrotrdoto obdelane površine materiala AISI 1045. Podobno kakor Shiou in Chen je tudi on v raziskavi uporabil popoln faktorialni načrt eksperimentov.

Hassan s sodel. [106] je raziskoval vpliv sile in števila prehodov kroglice na hrapavost površine medeninastega materiala. Za določanje optimalnih preoblikovalnih razmer je uporabil metodologijo RSM, s katero je zapisal tudi matematični model hrapavosti površine. Ugotovil je, da sta za dosego hrapavosti medeninaste površine 0,172 μm potrebna dva prehoda orodja s silo 203 N.

Enako metodologijo (RSM) je El-Axir s sodelavci [107] uporabil za določitev matematičnega modela stanja končno obdelane površine pri aluminijevi zlitini 2014. Spreminjal je naslednje parametre: vrtilno hitrost glajenja, podajanje, globino penetracije in število prehodov. Ugotovil je, da lahko površino hrapavosti 4 μm izboljšamo na 0,140 μm. Ugotovil je tudi, da ima največji vpliv na R_a vrtilna hitrost glajenja, podajanje in število prehodov orodja. V raziskavi [108] pa je El-Axir ugotovil, da na mikrotrdoto površine jekla in njeno hrapavost vpliva večje število interakcij vseh štirih vplivnih parametrov krogličnega glajenja. Z analizo variance je določil najvplivnejše parametre na izboljšanje hrapavosti površine R_a (s 4,5 μm na 0,5 μm) in zapisal matematični model mikrotrdote in hrapavost površine obravnavanega jekla.

Tudi raziskave s področja odvzemanja materiala (struženje, vrtanje, frezanje, …) temeljijo na podobnih statističnih metodah. V nadaljevanju prikazujemo nekaj teh. Lalwani s sodel. [109] je preučeval vpliv rezalnih parametrov struženja (hitrost odrezovanja, podajanje, globina reza) na sile odrezovanja in površinsko hrapavost

martenzitnega jekla MDN250 z uporabo keramičnih orodij. Ta tip materiala se pogosto uporablja v letalski industriji, v vesoljski industriji za izdelavo raket in raketnih motorjev, za vzletno in pristajalno opremo, strelivo, izsekovalna orodja ipd. Za razlago korelacij vplivnih parametrov obdelave je uporabil metodologijo RSM. Za določanje prispevkov faktorjev vpliva na odrezovalne sile je uporabil linearni regresijski model. Največji vpliv na sile odrezovanja imata podajanje in globina reza. Za določitev posameznih prispevkov faktorjev na hrapavost obdelane površine (R_a) je uporabil nelinearen (kvadratni) model. Največji vpliv na R_a ima podajanje, medtem ko imajo sekundarni vpliv interakcija podajanja in globine reza, kvadrat podajanja in interakcija vrtilne hitrosti ter globine reza.

Choudhury in El-Baradie [110] sta v raziskavi struženja enega najtežje obdelovalnih materialov Inconel 718 prav tako uporabila metodologijo RSM. Določila sta modele, s katerimi sta opredelila funkcijsko razmerje spremenljivk vhodnih parametrov odrezovanja, kot so hitrost odrezovanja, podajanje in globina reza, na izhodne veličine obdelave. Poleg modela rezalnih sil in hrapavosti površine sta določila tudi model trajnostne dobe orodja.

Alauddin s sodel. [111] je uporabil metodologijo RSM za določanje optimalne kakovosti površine obdelovanca, prav tako materiala Inconel 718, pri frezanju pri suhih razmerah dela. Razvil je model, s katerim lahko s spreminjanjem rezalne hitrosti in podajanjem orodja skrajšamo čas obdelave, pri tem pa ne povečamo hrapavosti površine obdelovanca. Da je lahko vzpostavil ustrezno funkcijsko odvisnost med odzivi (kot so hrapavost površine, rezalne sile, trajnostna doba orodja) in rezalnimi parametri (rezalna hitrost, podajanje in globina reza), je moral izvesti večje število eksperimentov za vsako kombinacijo reza orodja v obdelovanec.

Pri mikrofrezanju pa je Li s sodel. [52] uporabil metodo DoE in RSM za študij vpliva obdelovalnih parametrov na obrabo dvoreznega mikrofrezala, prevlečenega s trdo prevleko TiAlN. Obdeloval je kaljeno jeklo Böhler W300 (SAE H11) trdote 54 HRC. Za analizo ANOVA obrabe orodja je uporabil kvadratni model analize. Spremljal je tri vplivne parametre, in sicer vrtilno hitrost, globino odrezovanja in podajanje orodja. Ugotovil je, da ima podajanje največji vpliv na obrabo orodja.

Sahin [2] je raziskoval trajnostno dobo orodja iz c-BN v primerjavi s standardnim keramičnim orodjem pri obdelavi kaljenega jekla. Za določitev efektivnih rezalnih parametrov (vrtilne hitrosti, podajanja in trdote orodja) je v študiji uporabil Taguchijevo ortogonalno tabelo L_9 (3^4), razmerje med signalom in šumom (S/N) in analizo ANOVA. Za analizo ANOVA je uporabil dvofaktorski interakcijski model in ugotovil, da ima največji vpliv na trajnostno dobo orodja vrtilna hitrost (42 %), sledi trdota orodja (33 %) in nato podajanje (25 %). Prav tako je ugotovil, da ima c-BN orodje boljše karakteristike za obdelavo kakor standardno keramično orodje.

Sahin in Motorcu [112] sta v raziskavi uporabila c-BN-orodje za študij hrapavosti površine (R_a, R_z in R_{max}) kaljenega jekla AISI 1050. Z metodologijo RSM sta določila optimalne obdelovalne parametre in ugotovila, da ima podajanje največji vpliv na hrapavost površine kaljenega jekla. Prav tako sta ugotovila, da hrapavost površine pada s padanjem vrtilne hitrosti, s podajanjem in z globino odrezovanja in da c-BN-orodja v primerjavi s kompozitno keramiko (70 % Al_2O_3 + 30 % TiC) omogočajo boljšo hrapavost površine, ne glede na izbiro obdelovalnih parametrov.

Öktem s sodel. [103] je statistično metodo RSM uporabil za analizo hrapavosti površine in optimizacijo procesnih parametrov pri mikrofrezanju. Pri tem je spreminjal pet obdelovalnih parametrov: podajanje, vrtilno hitrost, aksialno in radialno globino odrezovanja ter toleranco obdelave. Uporabil je trifaktorski interakcijski model analize in zapisal enačbo četrte stopnje modela odzivne površine. Prav tako je analiziral obrabo in deformacijo orodja, vpliv hladilnega sredstva in obdelovalnega materiala. Podobne

raziskave in uporabo omenjenih statističnih metod najdemo tudi pri vrtanju.

Kaye s sodel. [113] je npr. uporabil metodologijo RSM pri raziskavi obrabe boka orodja pri spreminjanju hitrosti vrtenja vretena. Razvil je model, s katerim lahko napovemo obrabo boka orodja ob dejstvu, da je obraba orodja v začetku normalne faze rezanja znana. Izpeljal je tudi empirično enačbo za izračun začetne obrabe proste ploskve glede na hitrost, podajanje, globino reza in trdoto obdelovanca.

Davim [114] je v svoji raziskavi določil optimalne obdelovalne parametre na obrabo orodja, specifičen pritisk odrezovanja in hrapavost vrtane površine pri kompozitu s kovinsko matrico MMC (ang. Metal-matrix composites). Uporabil je metodo eksperimentalnega načrtovanja DoE in Taguchijevo ortogonalno tabelo L_{27}.

Nekatere raziskave s področja laserske obdelave temeljijo, podobno kakor raziskave s področja mehanske obdelave, na obravnavanih statističnih metodah. Na primer Chen s sodel. [115] je uporabil Taguchijevo ortogonalno tabelo L_{16} za načrtovanje in optimiranje obdelovalnih parametrov mikrograviranih fotomask z laserskim virom Nd:YAG. Fotomaske so potrebne za ustvarjanje različnih oblik pri izdelavi zaslonov s tekočimi kristali (LCD-zaslonov). Spremljal je vpliv petih ključnih procesnih parametrov (stopnjo povečave laserskega žarka, žariščno razdaljo, povprečno moč laserja, frekvenco laserskega žarka in hitrost graviranja) na debelino linije, gravirane na steklo, prekrito z železovim oksidom.

Saklakoglu in Kasman [116] sta raziskovala vpliv procesnih parametrov laserske obdelave na hrapavost površine in globino obdelave nerjavnega jekla AISI H13. Uporabila sta vlakenski laserski vir 30 W z valovno dolžino 1 064 nm in regresijsko analizo za določitev matematičnega modela za obe analizirani veličini. Ugotovila sta, da pri najnižji frekvenci (20 kHz), najnižji povprečni moči (18 W), srednjem prekrivanju oz. razdalji med laserskima pulzoma (30 μm) in najvišji skenirni hitrosti (800 mm/s) dosežemo najnižjo vrednost hrapavosti površine. Največjo globino dosežemo pri najnižjih vrednostih eksperimentalnih parametrov, medtem ko je frekvenca pulziranja najvišja (40 kHz).

3 Eksperimentalno delo

Eksperimentalni del raziskave temelji na treh preoblikovalnih postopkih, in sicer na strukturiranju brez odvzemanja materiala (metoda razenja), mikrofrezanju ter strukturiranju z laserskim žarkom.

Pri prvem postopku raziskave, kjer material razimo, so ključni parametri obdelave oblika konice orodja, globina in hitrost razenja ter pritisk konice v material. Volumen materiala se načeloma ne spremeni, tako da prihaja zgolj do prerazporeditve materiala na območju obdelave. Pri tem smo uporabili diamantne konice radija od 90 μm do 150 μm.

Pri drugem postopku smo raziskovali metodo frezanja z mikrofrezali. Pri tem material odvzemamo. Ključni parametri obdelave so vrtilna hitrost orodja, njegova podajalna hitrost in globina reza v material. Tako kot pri prvem postopku, tj. pri razenja, so tudi tukaj uporabljena orodja treh različnih dimenzij z radijem med 100 μm in 200 μm.

Pri tretjem postopku smo raziskovali metodo laserskega strukturiranja. Podobno kot v predhodnih dveh primerih smo analizirali vplivne procesne parametre laserskega strukturiranja. Ti so bili: frekvenca pulziranja, moč laserskega žarka, hitrost ter žariščna razdalja (fokus).

V vseh treh primerih smo raziskovali vpliv karakterističnih procesnih parametrov ter njihovo korelacijo z geometrijskimi spremembami obdelane površine (širina, globina, višina, površina na prerezu, hrapavost) ter njeno trdota. Ključno vlogo na končno stanje površine imajo štirje parametri. Po metodi DoE je za tak primer eksperimentalnega načrtovanja najprimernejša Taguchijeva ortxogonalna tabela L_{27} (3^4), prikazana v tabeli 4.

Ta model ortogonalne tabele omogoča analizo štirih faktorjev na treh nivojih. Ker v našem primeru medsebojna odvisnost faktorjev obdelave na odzivno površino ni bila znana, je za ta primer najprimernejša izbira modela, prikazanega na sliki 48a, in kolone 1, 2, 5 in 8 iz tabele 4.

3.1 Priprava vzorcev

3.1.1 Pregled osnovnega materiala

Pri vseh treh eksperimentalnih metodah strukturiranja smo uporabili enak tip materiala iz iste šarže proizvodnje. Uporabili smo eno najpogosteje uporabljanih nerjavnih jekel, jeklo tipa AISI 304. Jeklo je bilo hladno valjano na debelino 0,80 mm. Kemijske in mehanske lastnosti so prikazane v tabeli 5 in tabeli 6.

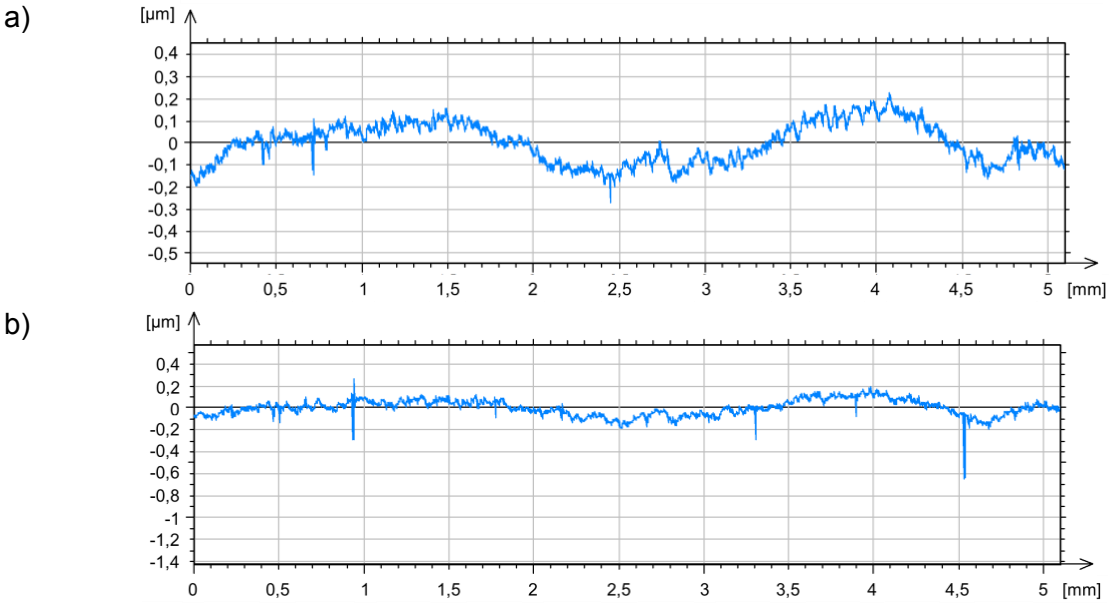
Strukturo osnovnega materiala (hrapavost površine) smo izmerili na površini vzorca v smeri valjanja (slika 49a), ki je $R_a = 0{,}0154$ in pravokotno na smer valjanja površine (slika 49b), kjer je hrapavost $R_a = 0{,}0193$ μm.

Tabela 5: *Kemijska sestava jekla AISI 304 v masnih deležih (%) (iz tehniškega lista materiala)*

C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S	N	Fe
0,037	18,11	8,02	0,35	1,28	0,031	0,005	0,053	preostalo

Tabela 6: *Mehanske lastnosti jekla AISI 304 (iz tehniškega lista materiala)*

Mehanska lastnost	Vrednost
Natezna trdnost	520 MPa
Tlačna trdnost	210 MPa
Napetost tečenja pri 0,2 % ($R_{p0,2}$)	210 MPa
Raztezek A5	45 (%)
Trdota po Vickersu	166 HV – 172 HV

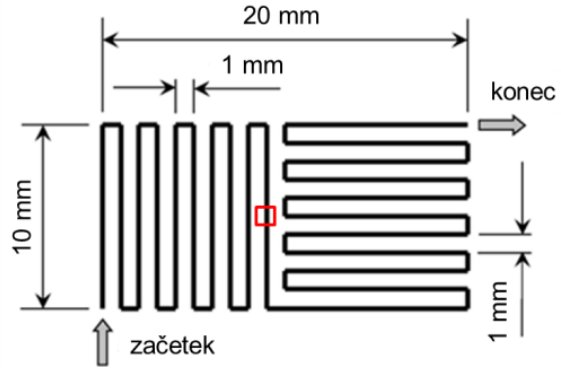


Slika 49: *Struktura (hrapavost) osnovnega materiala vzorca v smeri valjanja (a) in pravokotno na to smer (b)*

3.1.2 Priprava na eksperimente

V prvi fazi priprave smo za izvedbo eksperimentov nerjavno pločevino lasersko razrezali na dimenzijo 300 mm × 300 mm. V prostoru kjer, smo izvajali eksperimente smo zagotovili konstantno temperaturo, ki je bila 21 °C ± 1 °C.

V drugi fazi smo vnaprej določili konturo, po kateri smo izvajali eksperimente. Koncipirali smo jo v računalniškem programu Visual LaserMarker (Rofin). Ta je prikazana na sliki 50. Postopek strukturiranja je potekal vedno v isti smeri.



Slika 50: *Vnaprej določena kontura vzorca, označena s smerjo strukturiranja in mestom analize vzorca*

Pri izvedbi analiz smo posebno pozornost posvetili pravilni izbiri procesnih parametrov. Tako smo pred izvedbo eksperimentov preučili podobne študije eksperimentalnih primerov, upoštevali priporočila proizvajalcev strojev, naprav in orodij ter pri laserski obdelavi izvedli preliminarne preizkuse.

3.1.3 Razenje

Eksperimentalni del razenja smo izvajali na mehanskem gravirnem stroju IS7000XP (Gavograph), prikazanim na sliki 51. Za zagotavljanje stabilnosti sile razenja smo na gravirni stroj aplicirali merilni senzor 208C02 (PCB Piezotronics) prikazan na sliki 52. Silo razenja smo nastavljali s privijanjem vzmeti, ki je del vpenjalne glave stroja.

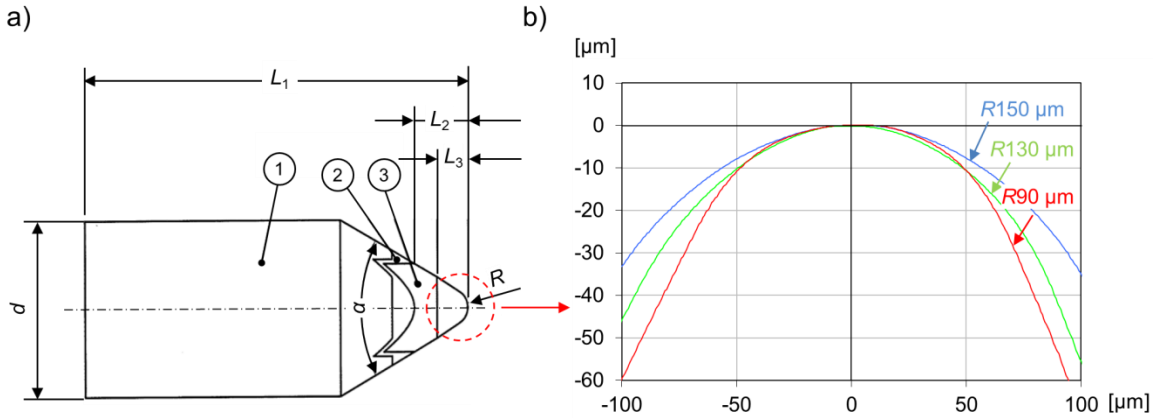


Slika 51*: Mehanski gravirni stroj IS7000XP za izvedbo eksperimentov razenja z gravirno iglo*



Slika 52: *Senzor PCB 208CO3 za merjenje sile razenja*

Za izvedbo vsakega eksperimenta smo uporabili novo orodje oziroma t.i. gravirno iglo, proizvajalca Synton-MDP (slika 53a). Ta je izdelana iz dveh komponent. Osnova gravirne igle je izdelana iz karbidne trdine (1), na katero je vakuumsko spajkana (2) diamantna konica (3). Uporabili smo tri različne gravirne igle, ki so se razlikovale po radiju (*R*) konice. Izmerjeni radiji diamantnih konic so bili 90 µm, 130 µm in 150 µm, kot konice igle (α) pa je bil 60º ± 5º (slika 53b).



Slika 53: *Risba diamantne igle (a) in meritev profilov diamantnih konic; R90 µm, R130 µm in R150 µm (b)*

Eksperimente smo izvajali v mokrem stanju z uporabo oljnega lubrikanta WD-40. Gravirne parametre smo izbirali na podlagi dosedanjih izkušenj. Po eksperimentalnem

načrtu DoE in uporabi ortogonalne tabele L_{27} (tabela 4) je bilo treba skupaj izvesti 27 eksperimentov. Izvedba teh je temeljila na spreminjanju štirih vplivnih faktorjev na treh nivojih (spodnji, srednji, zgornji) kot to navaja tabela 7. Faktorji za statistično analizo so v našem primeru radij konice orodja (R), normalna sila orodja (F_n), hitrost pomika orodja (v_t) in število prehodov orodja (N).

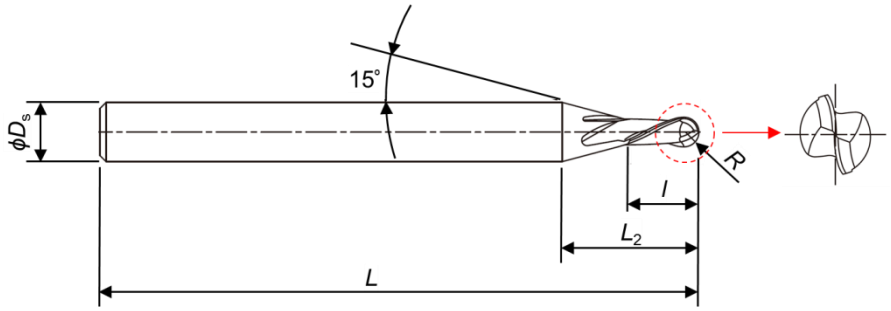
Tabela 7: *Eksperimentalni parametri razenja z diamantno konico*

Parameter (faktor)	Nivo		
	spodnji	srednji	zgornji
Radij konice, R/µm	90	130	150
Sila orodja, F_n/N	38,7	43,2	44,7
Hitrost pomika, v_t/(mm/min)	200	400	800
Število prehodov, N	1	5	9

3.1.4 Mikrofrezanje

Za izvedbo eksperimentov mikrofrezanja smo uporabili mehanski gravirni stroj IS8000XP (Gravograph) z visokofrekvenčno glavo (slika 56), ki omogoča vrtilno hitrost 120 000 min^{-1}. Naprava ima pnevmatski sistem za vpenjanje orodij, vpenjanje vzorca na delovno mizo pa se izvaja z vakuumskim sistemom vpenjanja (vakuumska miza). Za eksperimente smo uporabili tri tipe dvoreznih WXL-mikrofrezal (OSG Corporation) iz karbidne trdine, prevlečene s trdo prevleko AlCrN. Trdota tega orodja je bila 3 100 HV, koeficient trenja 0,25 in oksidacijska obstojnost do temperature 1 100 °C.

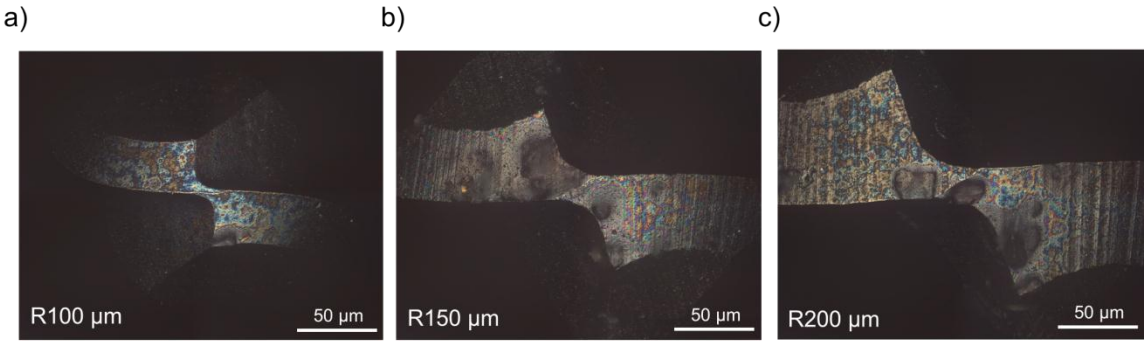
Kot vijačnice mikrofrezal je bil 30°, orodja pa so se med seboj razlikovala po kotnem polmeru, in sicer so bili ti: 100 µm, 150 µm in 200 µm. Toleranca kotnega polmera je bila ± 5 µm. V tabeli 8 so prikazane karakteristične dimenzije vseh treh tipov mikrofrezal. Slika 54 prikazuje shematsko risbo mikrofrezala, slika 55 pa mikroskopske posnetke topografije mikrofrezal za izvedbo eksperimentov radija 100 µm (a), 150 µm (b) in 200 µm (c).



Slika 54: *Shematski prikaz mikrofrezala za izvedbo eksperimentov*

Tabela 8: *Karakteristične dimenzije mikrofrezal, uporabljenih za izvedbo eksperimentov*

R/µm	L/mm	l/mm	L_2/mm	D_S/mm
100	40	0,4	6,5	4
150	40	0,6	6,7	4
200	40	0,8	7,2	4



Slika 55: *Mikroskopski posnetek mikrofrezalnih orodij radija: 100 µm (a), 150 µm (b) in 200 µm (c)*

Za določanje ničelne točke v *z*-smeri smo inštalirali mikrokamero, s katero smo preko zaslona opazovali stik orodja in obdelovanca. Z merilnikom upornosti, ki smo ga povezali z vretenom stroja (pozitivni pol) in obdelovancem (negativni pol), pa smo merili spremembo upornosti ob stiku. Vrtilna hitrost orodja pri določevanju ničelne točke je bila 30 000 min^{-1}.

Pri obdelavi smo za hlajenje orodja uporabili hladilno sredstvo v razpršilu Metaflux 70-03 Schnied-Spray. Princip eksperimentalnega postopka prikazujemo na sliki 56.



Slika 56: *Izvedbe eksperimenta s postopkom mikrofrezanja na stroju Gavograph IS7000XP*

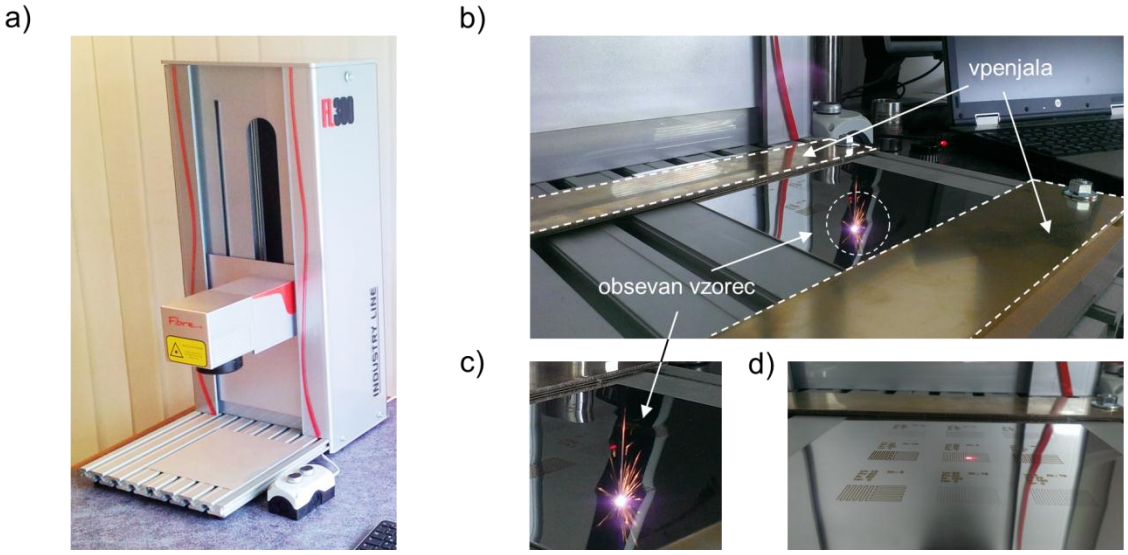
Podobno kot pri razenju smo pri mikrofrezanju uporabili eksperimentalni načrt DoE in ortogonalno tabelo L_{27} (tabela 4). Faktorji za statistično analizo so v tem primeru bili: radij konice orodja (R), vrtilna hitrost orodja (v_c), podajalna hitrost (v_t) in globina reza (h_g). Izbiro parametrov mikrofrezanja smo določili na osnovi priporočil proizvajalca orodij. Tako je bila vrtilna hitrost orodja od 30 000 min^{-1} do 90 000 min^{-1}, podajalna hitrost od 1 mm/s do 6 mm/s in globina reza 10 µm do 30 µm. Za vsak izveden eksperiment smo uporabili novo orodje. Eksperimentalne parametre prikazujemo v tabeli 9.

Tabela 9: *Eksperimentalni parametri razenja z diamantno konico*

Parameter (Faktor)	Nivo		
	spodnji		spodnji
Radij konice orodja, R/µm	100	150	200
Vrtilna hitrost, v_c/(mm/s)	30 000	60 000	90 000
Podajalna hitrost, v_t/(mm/s)	1	4	6
Globina reza, h_g/µm	10	20	30

3.1.5 Laserska mikroobdelava

Pri tretjem eksperimentalnem postopku raziskave smo eksperimentalni material strukturirali s pulznim laserskim žarkom. Uporabili smo Gravographov laserski sistem, model FL300, katerega maksimalna moč je 30 W, deluje pa na valovni dolžini 1 064 nm. Laserski žarek ima obliko poravnane Gaussove krivulje s kvaliteto laserskega žarka $M^2 \approx 1{,}2–1{,}8$. Divergenca laserskega žarka je bila 0,3 mrad, premer laserskega žarka v žarišču ≈ 20 µm in dolžina trajanja laserskega pulza 90–120 ns. Za preprečevanje termičnih deformacij, ki prihajajo pri pretaljevanju z laserskim žarkom, smo pločevino pritrdili s posebej pritrjenima vpenjalnima pripravama, kot to prikazuje slika 57.



Slika 57: *Izvedba eksperimenta s vlaknasti laserskim sistemom: laser Gravograph FL300 (a), obdelava z laserskim žarkom (b), nastanek plazme (c) in končno obdelan vzorec (d)*

Podobno kot pri razenju in mikrofrezanju, tudi pri laserski mikroobdelavi operiramo s štirimi vplivnimi parametri na treh nivojih. Eksperimentalni načrt DoE in ortogonalno tabelo L_{27} (tabela 4) smo uporabili tudi pri tem eksperimentalnem postopku. Faktorji za statistično analizo so bili frekvenca pulziranja (f_p), povprečna izhodna moč žarka (P), hitrost pomika žarka (v_t) in pomik žarka iz žarišča (z). Primer slednjega prikazuje slika 58.

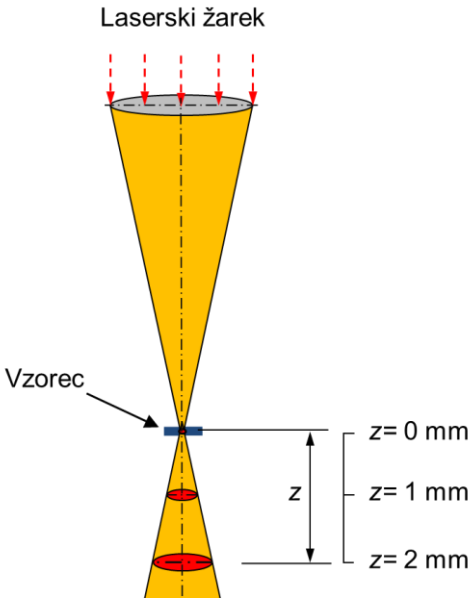
Dovajanje toplote v material določata poleg moči laserskega žarka tudi kombinacija skenirne hitrosti (v_t) in frekvence pulziranja (f_p). Ti dve veličini določata delež prekrivanja (A_p) dveh zaporednih žarkov na določeni razdalji (L). Primer sledi laserskega žarka in prekrivanje laserske sledi prikazuje slika 59. Delež prekrivanja je določen z enačbo:

$$A_{\mathrm{p}} = \frac{x}{D} = \left[1 - \frac{L}{d}\right] \times 100 \ldots [\%] \tag{18}$$

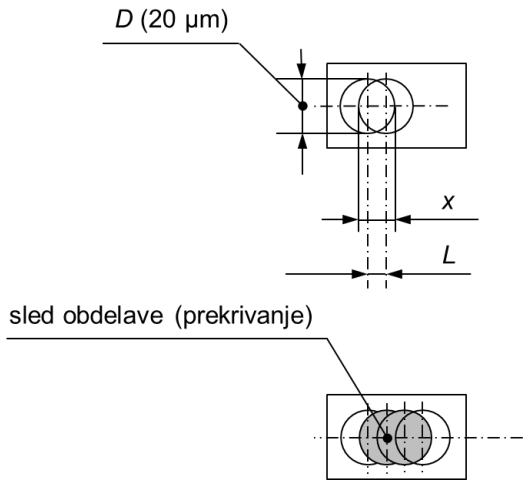
pri čemer je razdalja med žarkoma določena z:

$$L = \frac{v_{\mathrm{t}}}{f_{\mathrm{p}}} \ldots \ldots . [\mathrm{mm}] \tag{19}$$

Pri naših eksperimentih se prekrivanje laserskih pulzov giblje med 97,00 % in 99,83 %.



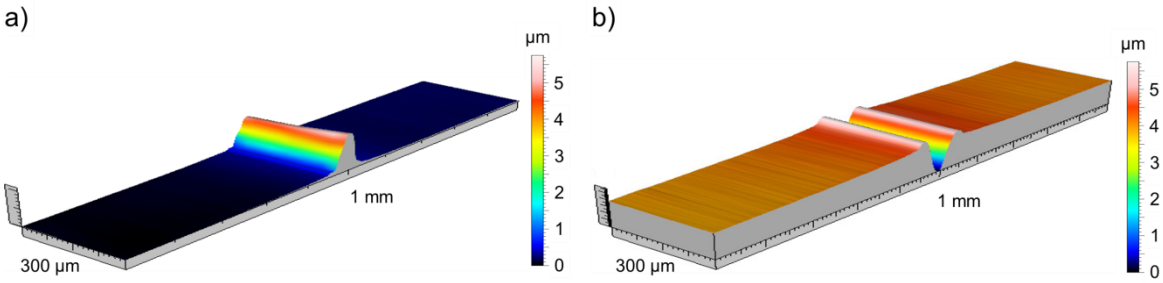
Slika 58: *Shema laserskega žarka in pomik iz žarišča*



Slika 59: *Sled laserskega žarka in prekrivanje laserskih sledi*

Da bi dobili boljše statistične rezultate, smo najprej izvedli preliminarne preizkuse. Površino vzorca smo s konstantno hitrostjo laserskega skeniranja (10 mm/s) strukturirali s spremenljivimi parametri v njegovem širšem območju, in sicer smo spreminjali odziv površine pri spremenljivi moči laserskega žarka od 6 W do 15 W, spremenljivi frekvenci pulziranja (od 20 kHz do 150 kHz) in premikanju žarišča laserskega žarka (od 0 do 2 mm) od vzorca navzgor. Na osnovi analiz, ki smo jih opravili s profilometrom, smo ugotovili, da dobimo niz različnih profilov.

Najizrazitejša profila, kjer se pojavi samo greben, prikazuje slika 60a, in takšen, kjer se pojavi tako kanal kot greben, prikazuje slika 60b. V primeru, ko se pojavi v celotni populaciji vzorcev takšen s slike 60a, obstaja velika verjetnost, da bodo statistične vrednosti točk izstopale od celotnega razpona prediktorjev oz. normalne porazdelitve rezidualov. Te vrednosti je treba vzeti pod drobnogled in jih jemati s posebno pazljivostjo. Namreč te točke je treba v določenih primerih blokirati in jih ne upoštevati v statistični analizi ANOVA. Eksperimentalne parametre prikazujemo v tabeli 10.



Slika 60: *Profili preliminarnih preizkusov lasersko obdelanih vzorcev s pojavom grebena (a) ter kanala kot grebena (b)*

Tabela 10: *Eksperimentalni parametri laserske obdelave*

Parameter (faktor)	Nivo		
	spodnji	srednji	spodnji
Frekvenca pulziranja, f_p/kHz	50	100	150
Izhodna moč laserskega žarka, P/W	10	12	15
Hitrost pomika laserskega žarka, v_t/(mm/s)	5	15	30
Pomik žarišča laserskega žarka, z/mm	0	1	2

3.2 Karakterizacija vzorcev

3.2.1 Uvod

V splošnem lahko razdelimo metode karakterizacije površine na tiste, ki podajo informacijo o fizikalnih lastnostih površine (optična in elektronska mikroskopija, absorpcijske izoterme, meritve specifične površine, meritve porazdelitev por, meritve refleksivnosti...) in na tiste, ki podajo informacijo o kemijski sestavi površine (številne spektroskopske metode za identifikacijo kemijskih elementov).

Analizo površine smo izvajali z optično mikroskopijo in profilometrijo. Optična mikroskopija nam je do neke mere omogočila študij topografije in je bila namenjena hitremu pregledu vzorcev. Precej več informacij smo pridobili s profilometrijo, ki nam je poleg linijskih profilov vzorcev dala tudi 3D-topografijo le-teh. Metodi sta komplementarni, saj se prednosti posameznih metod dopolnjujejo.

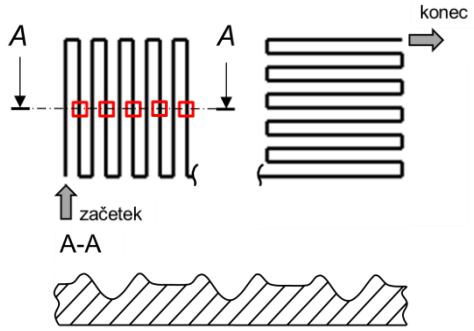
Globinski profil materiala po obdelavi smo raziskovali na prerezu. Osnovne podatke smo pridobili s povezavo metalografske priprave vzorcev in klasične mikroskopije. Natančnejšo, poglobljeno analizo smo pridobili z uporabo metode mikroskopiranja z vrstičnim elektronskim mikroskopom (SEM). Ta tehnika je bila še posebej relevantna pri analizi sledi po laserski obdelavi, kjer je pomembna tudi sprememba kemijske sestave v okolici obdelovanega območja. Določili smo jo z energijsko disperzijsko spektroskopijo (EDS).

Analizo trdote materiala smo prav tako izvajali na prerezu. Na metalografsko pripravljenih vzorcih smo izvajali mrežo meritev trdote na prerezu po Vickersu. Izmerjene vrednosti horizontalno in vertikalno od strukture smo modelirali z izbrano prilagoditveno funkcijo. Vrednosti so bile tudi vhodni parametri za statistično analizo. Kot pomožni inštrument za metodo DoE, metodologijo RSM in analizo ANOVA smo uporabili programski paket Design-Expert 8.0.

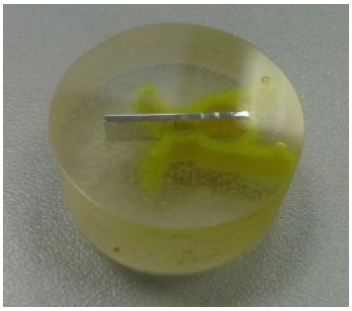
Pomembna podporna aktivnost je bila tudi statistična karakterizacija postopkov po RSM metodi. Z njo smo statistično okarakterizirali predvsem geometrijske spremembe vzorcev po obdelavi in trdoto na prerezu. Za vsako veličino, ki smo jo spremljali, smo zapisali enačbo modela odzivne površine v odvisnosti od vplivnih faktorjev. Prav tako smo prikazali velikost vpliva posameznega faktorja in njegovo pomembnost na izražen model.

3.2.2 Priprava vzorcev za analizo

Analizo topografije smo izvajali na nerazrezanem vzorcu dimenzije 300 mm × 300 mm. Za analizo mehanskih lastnosti (trdote) in strukturnih lastnosti (mikrostrukture in kemijske sestave) na prerezu smo vzorce predhodno ustrezno pripravili. Te smo razrezali pravokotno na smer valjanja pločevine na mestu kot to prikazuje slika 61. Nato smo okoli vzorca ulili dvokomponentno transparentno maso CEM 3020 Cloeren Technology (slika 62) in ga zbrusili z vodobrusnimi papirji gradacije 100, 220, 320, 500, 800, 1 200, 2 500 in fino spolirali z diamantno pasto granulacije 3 µm.



Slika 61: *Shematski primer razreza vzorca za analizo na prerezu*



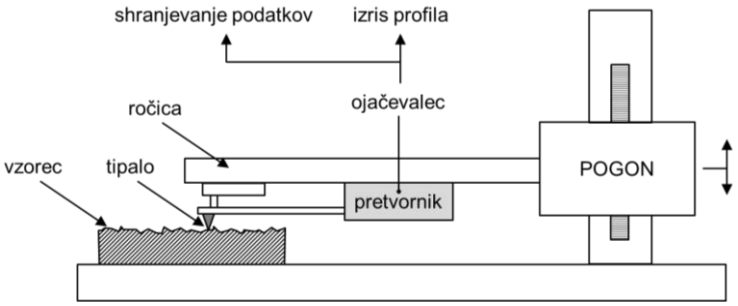
Slika 62: *Vzorec ulit v valjasto dvokomponentno transparentno maso, za analizo na prerezu (A–A)*

3.2.3 Merjenje profilov s profilometrom

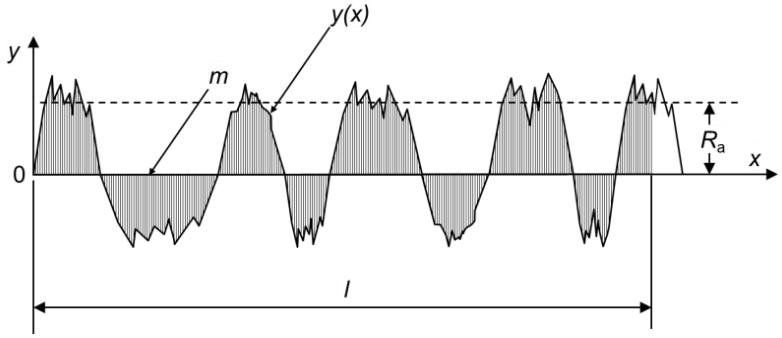
Za merjenje hrapavosti površine se najpogosteje uporabljajo profilometri. Profilometrija je ena od standardnih metod za karakterizacijo površin. Poznamo kontaktne profilometre, kjer je tipalo v stiku z merjencem, in optične profilometre. Pri merilniku s tipalom se pri konstantni hitrosti tipala preko površine njegovi vertikalni pomiki ojačajo in zapisujejo oz. shranjujejo v mediju za shranjevanje podatkov. Shematičen prikaz merilnika s tipalom prikazuje slika 63. Diamantna konico s kontaktno težo od 1 mg do 50 mg pomikamo linijsko po vzorcu. Pretvorniki, ki se uporabljajo za zaznavanje vertikalnih pomikov, so linearno variabilni diferencialni pretvorniki (LVDT) [3]. Konica tipala je stožčaste oblike s kotom 90° in radijem od 20 nm do 50 nm. Horizontalna resolucija se nadzoruje s hitrostjo skeniranja in frekvenco vzorčenja podatkovnih signalov.

Iz linijskega profila $z(x)$ izračunamo parametre hrapavosti (R_a, R_t, R_z itd.). R_a je splošno priznana in najpogosteje uporabljena veličina za hrapavost površine, ki smo jo tudi uporabili v naši raziskavi. Pomeni aritmetično sredino absolutnih odmikov profila hrapavosti površine od srednje linije (slika 64) in jo zapišemo kot:

$$R_{\mathrm{a}} = \frac{l}{l_{\mathrm{r}}} \int_0^{l_{\mathrm{r}}} |z(x)|\, dx \tag{20}$$

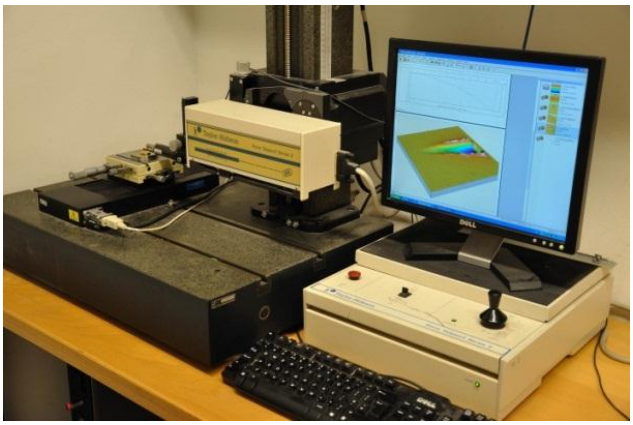


Slika 63: *Shematski prikaz profilometra*



Slika 64: *Shematski prikaz profila in hrapavosti površine R_a*

Za merjenje karakterističnih dimenzij profilov (globine, širine, višine gravure ipd.) vzorcev ter hrapavosti površine na dnu gravure smo uporabili profilometer Taylor Hobson, tip Form Taylsurf Series 2 (slika 65). Naprava deluje po principu drsenja z diamantno konico in meri profil površine, tako linijski kakor 3D-profil površine. Ločljivost profilometra je 0,25 μm v *x*-smeri, v *y*-smeri 1 μm in *z*-smeri 3 nm [117, 118].



Slika 65: *Profilometer Taylor Hobson, tipa Form Talysurf Series 2*

3.2.4 Merjenje topografije s konfokalno optično mikroskopijo

Konfokalna optična mikroskopija je nadgradnja klasične optične mikroskopije in nam omogoča vizualizacijo vzorca tudi v 3D-sliki. S konfokalnim optičnim mikroskopom lahko točkovno ali linijsko osvetljujemo objekt v določeni optični (goriščni) ravnini z vrsto različnih virov svetlobe. To dosežemo z dvema zaslonkama z majhnima odprtinama, ki sta nameščeni v gorišču za lečo objektiva (konfokalno). Pri monokromatskem viru svetlobe sveti svetloba le pri eni valovni dolžini, medtem ko ima širokopasovni izvir (volframova nitka, kremenova halogenska luč, obločne luči) valovne dolžine svetlobe porazdeljene preko celotnega vidnega spektra.

Pri naši raziskavi smo uporabili konfokalni optični mikroskop Axio CSM 700 (Carl Zeiss), kot to prikazuje slika 66. Mikroskop ima kot izvir osvetljevanja ksenonovo luč in omogoča slikanje topografije vzorca s hitrostjo več kot 100 slik na sekundo. Vertikalna ločljivost mikroskopa je 10 nm. Objektivi imajo povečave od 2,5- do 100-kratne, okular 15-kratno, skupna efektivna povečava pa je približno 35-kratna do 1 500-kratna.



Slika 66: *Konfokalni optični mikroskop Axio CSM 700 (Carl Zeiss)*

3.2.5 Merjenje mehanskih lastnosti

Trdota je odpornost materiala proti lokalni plastični deformaciji in jo relativno enostavno izmerimo. Vrednost te nam omogoča primerjalno razvrstitev različnih materialov. Pri naši raziskavi smo merili trdoto na prerezu, kot je prikazano na sliki 68. Meritev trdo smo izvajali s statičnim vtiskovanjem štiristrane diamantne piramide z merilnikom nanotrdote po Vickersu proizvajalca Helmut Fischer, tip Fischerscope H100C (slika 67). Natančnost naprave za merjenje nanotrdote je 0,2 nm, natančnost obremenjevanja pa 0,5 µN. Instrument omogoča sprotno spremljanje globine vtiska v material. Naprava spremlja obremenitev in globino vtiskovanja med samim vtiskovanjem.

Prvi pogoj za zanesljive meritve so dobro pripravljeni vzorci (poliranje) ter konstantne in ponovljive merilne razmere. Zagotoviti smo morali konstantno temperatura okolice (sobna temperatura) in merjenje brez kakršnih koli okoliških vplivov, kot so vibracije ipd. Z merilnikom nanotrdote smo izvedli serijo mrežnih meritev trdote na prerezu obdelave materiala, kot to prikazuje slika 68. Razdalja med posameznimi vtiski je bila 20 µm. To razdaljo smo določili iz razloga, da pri meritvah ne bi prihajalo do prekrivanja plastičnih

deformacijskih con med vtisi. Vrednosti meritev smo ugotovili z njihovimi koordinatami meritev in nato s prilagajanjem določili krivulje serije meritev. Z meritvami smo poskušali določiti usmeritev utrjevanja v materialu na mestu obdelave. Hitrost vtiskovanja v material je bila 100 mN/10 s, pri čemer je bila maksimalna obremenitev 100 mN.

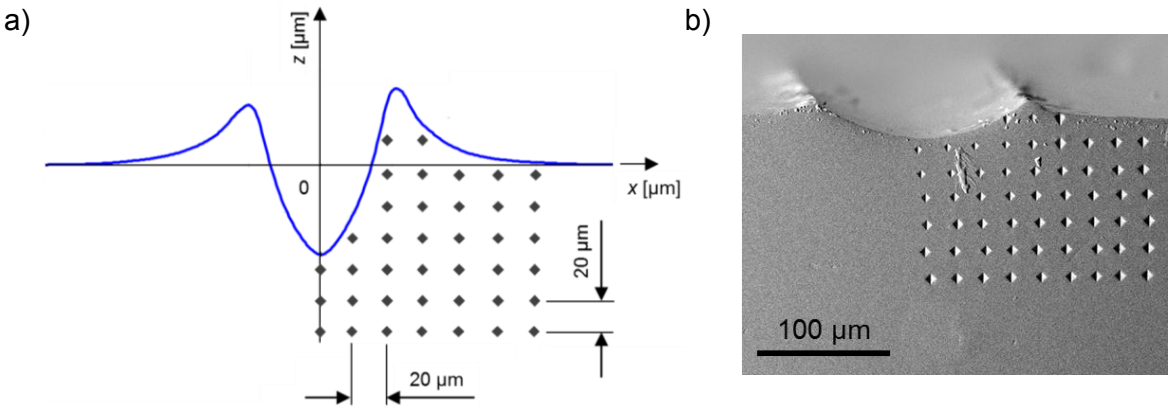


Slika 67: *Fotografija merilnika nanotrdote po Vickersu, proizvajalca Helmut Fischer, tip Fischerscope H100C*

Predpostavili smo, da se material pri mehanski obdelavi na mestu obdelave utrjuje tako v globino kot v njegovo širino (levo-desno). Predpostavili smo, da utrjevanje pada z globino. Tako smo utrjevanje ovrednotili z Gaussovo krivuljo. Enačbo modela smo zapisali kot:

$$H = H_0 + (H_{\max} - H_0)\cdot\exp\left(-\left(\frac{x}{\sigma_x}\right)^2 - \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right), \qquad (21)$$

kjer so H_0 vrednost trdote osnovnega materiala, $H_{\max}$ ekstrapolirana maksimalna trdota v središču gravure in σ_x ter σ_y razpon utrjevanja v obeh smereh (prečni in pravokotni). Ti trije parametri so bili obravnavani z najmanjšim kvadratom izmerjenih vrednosti trdote.



Slika 68: *Shematski prikaz meritve trdote vzorca (a) in SEM slika tipične meritve (b)*

3.2.6 Elektronska mikroskopija

Pri uporabi elektronske mikroskopije za karakterizacijo vzorcev navadno govorimo o karakterizaciji mikrostrukture vzorcev. S pojmom mikrostruktura opredelimo več lastnosti snovi, kot so kemijska in strukturna sestava zrn, ki sestavljajo material, porazdelitev velikosti zrn, njihova oblika ter tudi usmerjenost zrn materiala. Z mikrostrukturo anorganskih materialov so neločljivo povezane njihove lastnosti (npr. mehanske, električne, optične in magnetne lastnosti) in tako tudi namembnost in uporabnost materiala. Velikostni nivo, na katerem lahko opazujemo mikrostrukturo vzorca, se razlikuje glede na vrsto mikroskopa, ki ga uporabljamo. Z optičnim mikroskopom lahko opazujemo površinske značilnosti vzorca do velikosti nekaj mikrometrov, medtem ko se za karakterizacijo mikrostrukture na nižjem velikostnem nivoju uporablja elektronska mikroskopija.

Vse vrste elektronskih mikroskopov za opazovanje strukture in sestave vzorca uporabljajo fokusiran curek elektronov. Delovanje katerega koli elektronskega mikroskopa bomo opisali v naslednjih alinejah.

- Elektroni se iz svojega vira zaradi velike razlike električnega potenciala med virom elektronov (katodo) in anodo pospešijo proti vzorcu.
- Za opazovanje vzorca potrebujemo koherenten elektronski curek majhnega prereza, ki ga dosežemo z uporabo magnetnih leč.
- Med vpadnim elektronskim curkom in atomi vzorca pride do številnih fizikalnih pojavov, ki jih z detektorji zaznamo in prevedemo v sliko.

V vrstičnem elektronskem mikroskopu (SEM-*Scanning Electron Microscopy*) nam interakcija elektronov z atomi na površini vzorca podaja informacije o topografiji in morfologiji vzorca (oblika, velikost in porazdelitev velikosti zrn na površini vzorca do spodnje velikostne meje detekcije). Podaja nam tudi namig o povprečni elementarni sestavi vzorca in deležu posameznega elementa v vzorcu ter nekatere kristalografske informacije. Vrstični elektronski mikroskop SEOL FX 7600, ki smo ga uporabili za karakterizacijo naših vzorcev, prikazuje slika 69.



Slika 69: *Vrstični elektronski mikroskop (SEM) JEOL FX 7600*

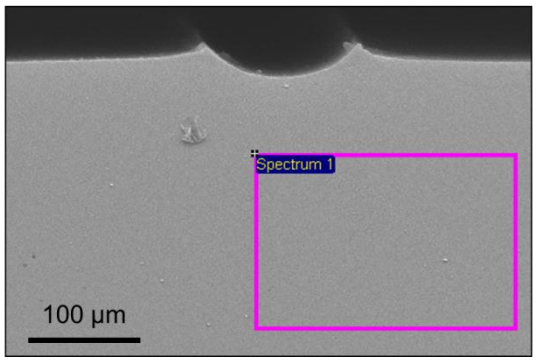
S SEM smo sistematično analizirali vzorce za vse tri eksperimentalne metode. Vzorce smo analizirali na dveh mestih (pri 250-, 1 000- in 5 000-kratni povečavi), in sicer na dnu gravure in na njenem robu. Pri tem smo analizirali geometrijske spremembe ter nastale nepravilnosti (npr. razpoke, pore, nastanek oksidne plasti in zajetih zračnih mehurjev v materialu ipd.)

K elektronskemu mikroskopu je pogosto dodana tudi energijska disperzijska spektroskopija (EDS-*Energy X-ray Spectroscopy*). Pri sipanju curka elektronov po vzorcu nastane emisija karakterističnega rentgenskega sevanja. Z emitiranimi rentgenskimi žarki

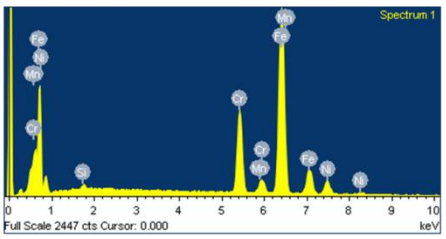
analiziramo kemijsko sestavo dela vzorca, tj. spekter elementov v točki, na liniji ali površini.

V našem primeru smo z EDS analizirali kemijsko sestavo nerjavne pločevine tipa AISI 304. Uporabili smo sistem INCA 350 (Oxford Analytical). Primer merjenja te je prikazan na sliki 70. Tehnika je bila še posebej relevantna pri analizi sledi po laserski obdelavi, kjer smo analizirali spremembe kemijske sestave v okolici obdelovanega območja.

a)



b)



c)

Cr	Ni	Si	Mn	Fe
17,50	9,05	0,35	1,31	71,79

Slika 70: *Primer meritve kemijske sestave: definiranje merilnega mesta vzorca (a), spekter kemijske sestave na merilnem mestu vzorca (b) in izmerjene vrednosti v masnih deležih (%) (c)*

3.2.7 Statistična analiza

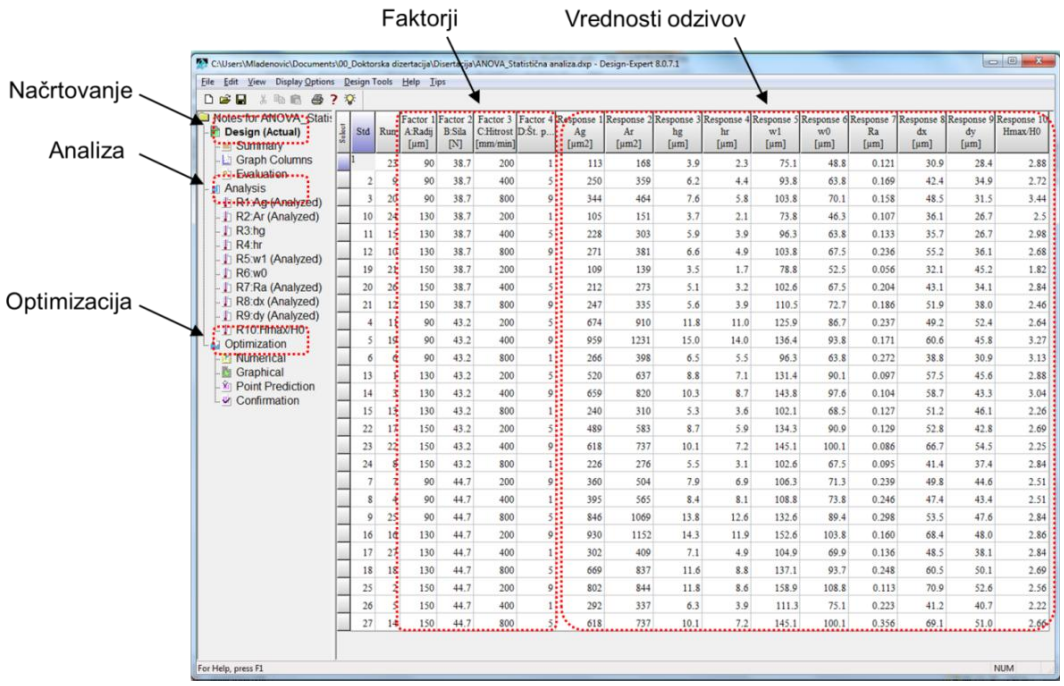
Odzivne karakteristike smo analizirali z uporabo statističnega programa Design-Expert 8 (Stat-Ease Inc.), ki je podprt z metodo eksperimentalnega načrtovanja DoE, metodo odzivne površine RSM in analizo variance ANOVA [119]. Slednja nam omogoča, da na diskreten način identificiramo vpliv obdelovalnih parametrov (imenovanih faktorji), podanih z majhnim številom diskretnih vrednosti (imenovanih nivoji) [98]. Obdelava podatkov v omenjenem programskem okolju deluje v treh korakih, in sicer oblikovanju, modeliranju in optimizaciji.

V prvi fazi smo z eksperimentalnim načrtovanjem DoE izbrali primerno ortogonalno tabelo in izdelali načrt eksperimentov [120]. Izbira najprimernejše ortogonalne tabele je odvisna od meril, kot so: število faktorjev, njihova interakcija in želene eksperimentalne resolucije. V naših primerih smo obravnavali štiri faktorje, njihova medsebojna odvisnost pa ni znana. Uporabili smo najprimernejšo Taguchijevo standardno ortogonalno tabelo (L_{27}) in iz te izbrali kolone 1, 2, 5 in 8.

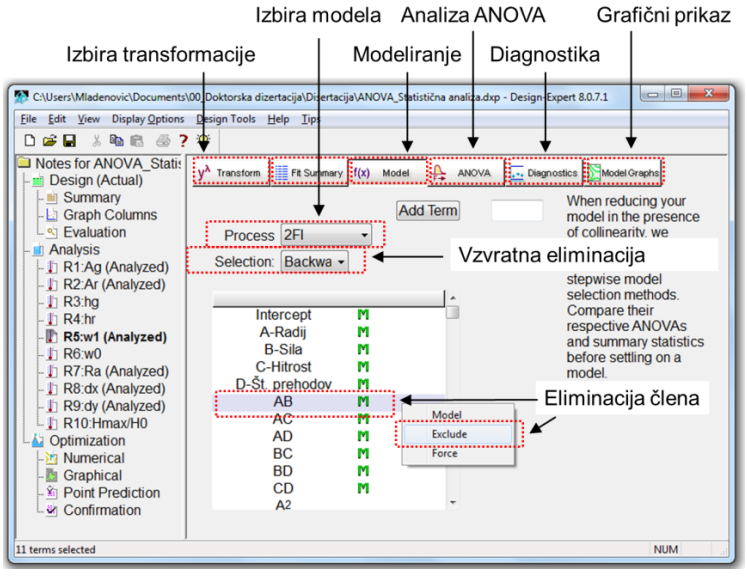
Analizirali smo spremembo geometrijskih lastnosti vzorcev, kot so globina, višina, širina, površina in hrapavost, ter mehanske lastnosti, kot je trdota na prerezu. Načeloma se omenjeni eksperimentalni postopki preoblikovanja po fizikalni osnovi razlikujejo, vendar pa je njihova obravnava kljub temu zelo podobna. V vseh treh primerih analiziramo vpliv štirih faktorjev na spremembe lastnosti vzorcev. Ti so pri razenju zapisani v poglavju 3.1.3, za mikrofrezanje v poglavju 3.1.4 in za lasersko mikroobdelavo v 3.1.5.

Iz predlaganih eksperimentov smo izmerjene vrednosti posameznih odzivov vstavili v tabelarično obliko programa. Na sliki 71 prikazujemo zgled takšnega zapisa, in sicer za razenje. Pomembno dejstvo pri analizi ANOVA je bila izbira ustreznega modela analize. Program omogoča analizo modelov tudi višjih polinomskih stopenj (kvadratni, kubični, ipd.) in pomeni, koliko medsebojnih vplivov želimo analizirati in bodo kasneje zapisani z značilno polinomsko enačbo modela (slika 72). Program omogoča, da s

postopkom vzvratne eliminacije samodejno reduciramo zanemarljive faktorje (parametre) in omogočimo kontroliranje signifikantnih. Za zmanjšanje prispevkov napak lahko faktorje tudi sami eliminiramo. Pri tem moramo biti pazljivi, ker je obravnavani model hierarhičen. Torej osnovna ideja eliminiranja faktorjev je bila, da smo ustvarili homogene bloke, v katerih smo spremljali in spreminjali samo relevantne faktorje.



Slika 71: *Kvantitativno ovrednotene spremenljivke v Design-Expertu*

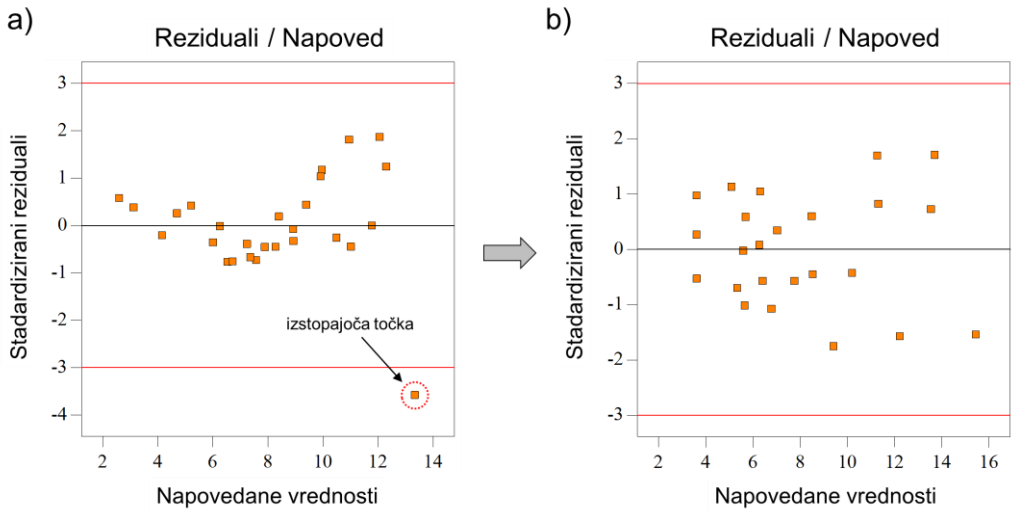


Slika 72: *Izbira modela analize v Design-Expertu*

Grafični prikaz vrednosti nam pomaga vizualno oceniti, v kolikšni meri se vrednosti odmikajo od predvidenih. Ustreznost zapisanega modela preverjamo s porazdelitvijo rezidualov v razsevnem grafikonu (slika 73). Reziduali so tisti del variabilnosti, ki ga ni mogoče razložiti z modelom. S slike 73a je razvidno, da razporeditev točk sugerira stalno

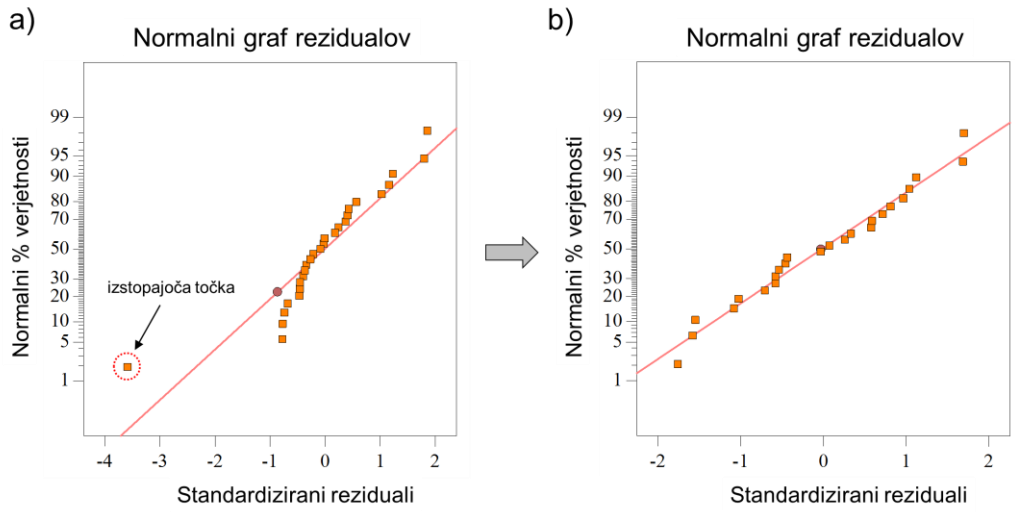
rast variance, torej variance niso homogene. Točke, ki izstopajo iz celotnega razpona prediktorjev (neodvisnih spremenljivk), lahko vplivajo na interpretacijo korelacijskih in regresijskih koeficientov. Tem se želimo izogniti in dobiti homogeno razporeditev točk, ki ne tvorijo nobenega pravilnega vzorca, kot to prikazuje slika 73b. Variabilnost je tako za vsako spremenljivko enaka.

Za dober model je torej pomembno dobro prilagajanje. Prvi del prilagajanja izvajamo tako, da predvidene točke, ki izstopajo v grafu normalne populacije (t. i. predvidene vrednosti modela v primerjavi z dejanskimi vrednosti), izločimo. Točko, ki izstopa s področja grafa (slika 73a), ne upoštevamo v analizi ANOVA in dobimo nov graf normalne populacije, kot to prikazuje slika 73b.



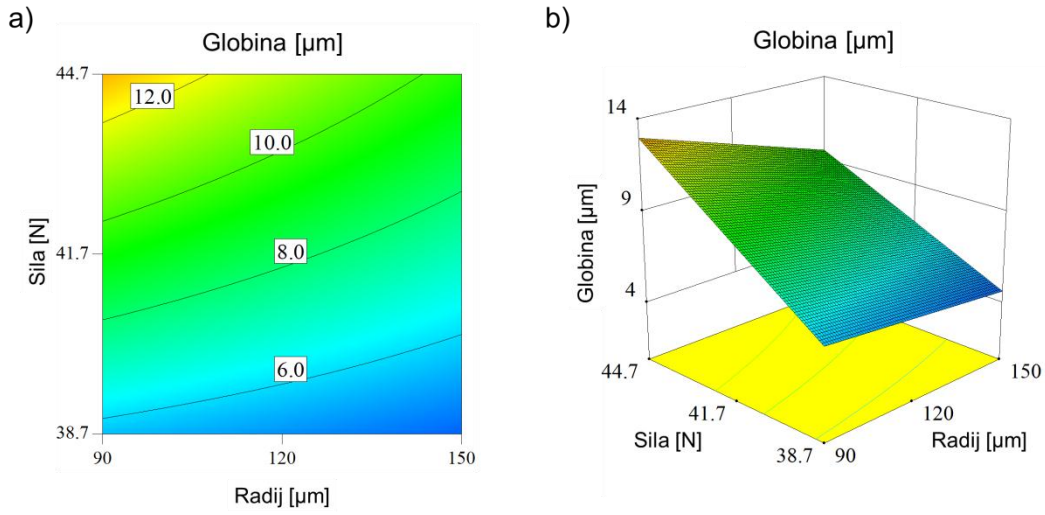
Slika 73*: Porazdelitev rezidualov v razsevnem grafikonu ali graf normalne populacije: pred prilagajanjem (a) in po njem (b)*

Normalnost porazdelitve rezidualov preverjamo tudi z normalnim grafom rezidualov (ang. Normal Plot of Residuals), kot to prikazuje slika 74. Ugotovimo lahko, da so vrednosti na grafični sliki 74b dokaj pravilno prilagojene diagonali, kar nam daje linearno zvezo.



Slika 74: *Normalni graf rezidualov: pred prilaganjem (a) in po njem (b)*

Drugi del prilagajanja izvajamo z eliminacijo členov, ki ne pomenijo pomembnejših vplivov na model. Teh ne vključimo v enačbo modela in tako dobimo ustrezen model, ki vključuje samo signifikantne člene iz analize ANOVA. Rezultati analiz so tako lahko podani v tabelarični obliki in v vrsti grafičnih oblik. Zgled grafične oblike v 2D- ali 3D-grafu prikazujeta sliki 75a in b.



Slika 75: *Zgled 2D in 3D grafičnega prikaza odvisnosti faktorjev na odziv*

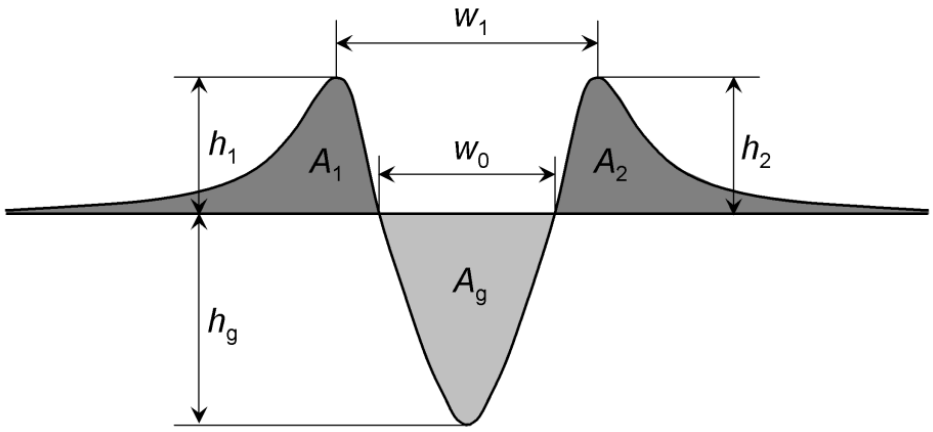
4 Rezultati in diskusija

Teoretične osnove eksperimentalnih postopkov (razenje, mikrofrezanje, laserska mikroobdelava) in karaketrizacijo teh postopkov smo opisali v predhodnih poglavjih. V nadaljevanju prikazujemo eksperimentalne rezultate, kot so topografske značilnosti vzorcev ter njihove strukturne značilnosti. Meritve in analize vseh treh postopkov preoblikovanja smo izvajali po enakem principu merjenja in analize teh. Uporabili smo najučinkovitejšo metodo načrtovanja DoE. Za modeliranje in optimizacijo načrta pa smo uporabili metodologijo odzivne površine RSM in analizo variance ANOVA.

4.1 Razenje

Pri postopku razenja konica orodja prodira v material, napravi razo in material izpodriva na stran. Pri tem dobi vzorec karakterističen topografski profil kot je shematično prikazan na sliki 76. Na isti sliki smo shematično prikazali tudi analizirane geometrijske vrednosti.

Eksperimente razenja smo izvajali po eksperimentalnem načrtu prikazanem v tabeli 11. Skupno smo izvedli 27 eksperimentov, pri čemer smo analizirali geometrijske spremembe vzorcev kot so: površina raze na prerezu (A_g), skupna površina grebena (A_r) izračunana z $A_r = A_1 + A_2$, globina raze (h_g), višina grebena (h_r) izračunana s $h_r = (h_1 + h_2)/2$, širina raze od grebena do grebena (w_1) in širina raze na ničelni višini (w_0). Utrjevanje vzorcev smo spremljali z vrednostmi razpona utrjevanja v prečni smeri (σ_x), razpona utrjevanja v pravokotni smeri (σ_y) in razmerja med ekstrapolirano maksimalno trdoto in trdoto osnovnega materiala (H_{max}/H_0).



Slika 76: *Analizirane mere profila gravure razenja*

Z geometrijskega vidika postopka razenja spremenljivke niso povsem neodvisne. Razenje je sicer postopek brez odvzemanja materiala, zato naj bi bila površina prereza raze enaka površini prereza obeh grebenov $A_1 + A_2$, torej $A_g = A_r$. Površino prereza raze bi lahko ocenili kot produkt polovične širine raze $w_0/2$ in globine raze h_g ali $A_g \approx w_0 h_g/2$, vendar pa to ne drži popolnoma. Obstajajo tudi drugi vplivi, ki delujejo na odmike, kot so plastična deformacija materiala, nastajanje razpok in odmiki pri meritvah, kot npr. odmik

meritev pri profilometriji. Konica igle profilometra namreč drsi po vrhovih profila namesto po povprečni površini profila, kar prispeva k določenemu odmiku.

V tabeli 11 prikazujemo izmerjene karakteristične vrednosti vseh razenih vzorcev po eksperimentalnem načrtu DoE. Izmerjene vrednosti so vhodni podatki za nadaljnjo statistično analizo ANOVA v programu Desigu-Expert 8.

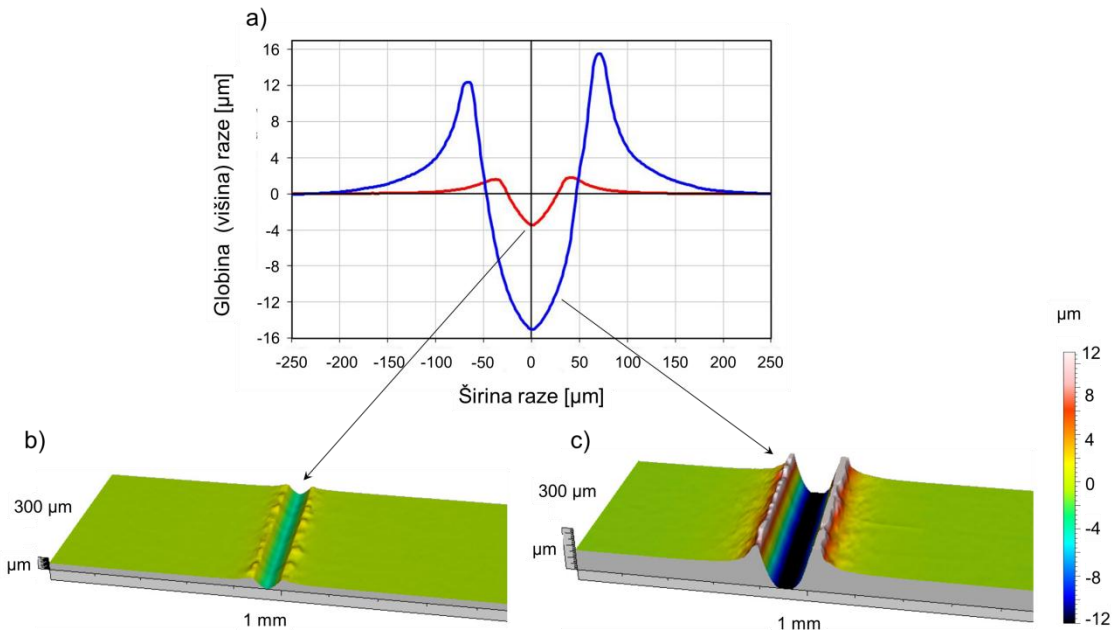
Tabela 11: *Eksperimentalni načrt DoE in rezultati izmerjenih vrednosti pri razenju*

Št.	R/ µm	F_n/ N	v_t/ mm/min	N -	A_g/ µm^2	A_r/ µm^2	h_g/ µm	h_r/ µm	w_1/ µm	w_0/ µm	R_a/ µm	σ_x/ µm	σ_y/ µm	$\frac{H_{max}}{H_0}$ -
1	90	38,7	200	1	113	168	3,9	2,3	75	49	0,121	30,9	28,4	2,88
2	90	38,7	400	5	250	359	6,2	4,4	94	64	0,169	42,4	34,9	2,72
3	90	38,7	800	9	344	464	7,6	5,8	104	70	0,158	48,5	31,5	3,44
4	130	38,7	200	1	105	151	3,7	2,1	74	46	0,107	36,1	26,7	2,37
5	130	38,7	400	5	228	303	5,9	3,9	96	64	0,133	35,7	26,7	2,59
6	130	38,7	800	9	271	381	6,6	4,9	104	68	0,236	55,2	36,1	2,68
7	150	38,7	200	1	109	139	3,5	1,7	79	53	0,056	32,1	45,2	1,82
8	150	38,7	400	5	212	273	5,1	3,2	103	68	0,204	43,1	34,1	2,84
9	150	38,7	800	9	247	335	5,6	3,9	111	73	0,186	51,9	38,0	2,46
10	90	43,2	200	5	674	910	11,8	11.0	126	87	0,237	49.2	52,4	2.64
11	90	43,2	400	9	959	1231	15,0	14,0	136	94	0,171	60,6	45,8	3,27
12	90	43,2	800	1	266	398	6,5	5,5	96	64	0,272	38,8	30,9	3,13
13	130	43,2	200	5	520	637	8,8	7,1	131	90	0,097	57,5	45,6	2,88
14	130	43,2	400	9	659	820	10,3	8,7	144	98	0,104	58,7	43,3	3,04
15	130	43,2	800	1	240	310	5,3	3,6	102	69	0,127	51,2	46,1	2,26
16	150	43,2	200	5	489	583	8,7	5,9	134	91	0,129	52,8	42,8	2,69
17	150	43,2	400	9	618	737	10,1	7,2	145	100	0,086	66,7	54,5	2,25
18	150	43,2	800	1	226	276	5,5	3,1	103	68	0,095	41,4	37,4	2,84
19	90	44,7	200	9	360	504	7,9	6,9	106	71	0,239	49,8	44,6	2,51
20	90	44,7	400	1	395	565	8,4	8,1	109	74	0,246	47,4	43,4	2,51
21	90	44,7	800	5	846	1069	13,8	12,6	133	89	0,298	53,5	47,6	2,84
22	130	44,7	200	9	930	1152	14,3	11,9	153	104	0,160	68,4	48,0	2,86
23	130	44,7	400	1	302	409	7,1	4,9	105	70	0,136	48,5	38,1	2,84
24	130	44,7	800	5	669	837	11,6	8,8	137	94	0,248	60,5	50,1	2,69
25	150	44,7	200	9	802	844	11,8	8,6	159	109	0,113	70,9	52,6	2,56
26	150	44,7	400	1	292	337	6,3	3,9	111	75	0,223	41,2	40,7	2,22
27	150	44,7	800	5	618	737	10,1	7,2	145	100	0,356	69,1	51,0	2,66

4.1.1 Topografske značilnosti

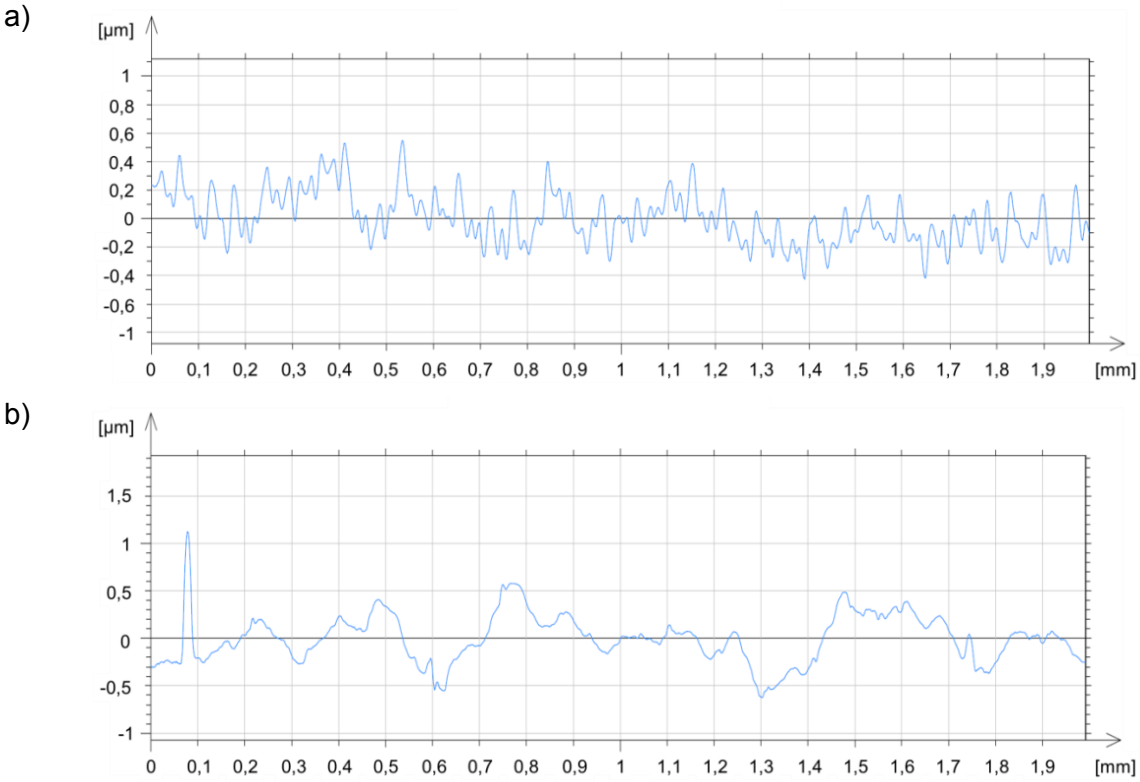
Analizo površine smo izvajali s profilometrijo, kot dopolnilno orodje pa smo uporabili konfokalno mikroskopijo. Metodi sta komplementarni, saj se prednosti posameznih metod dopolnjujejo. S profilometrom smo analizirali geometrijske profile razenih vzorcev in merili hrapavost površine na dnu raze, medtem ko smo konfokalno mikroskopijo in SEM uporabili zgolj za vizualizacijo.

V nadaljevanju je prikazana primerjalna analiza dveh raz, najplitvejše in najgloblje (eksperiment št. 1 in 11), obe narejeni z najmanjšim radijem orodja (R = 90 µm). Na sliki 77a je prikazan karakterističen 2D-profil obeh raz. Z grafičnega prikaza lahko ugotovimo, da se razi razlikujeta v globini za ≈ 11 µm in v širini (na ničelni višini) za ≈ 45 µm. Karakterističen 3D-profil najplitvejše raze prikazuje slika 77b, najgloblje raze pa slika 77c.



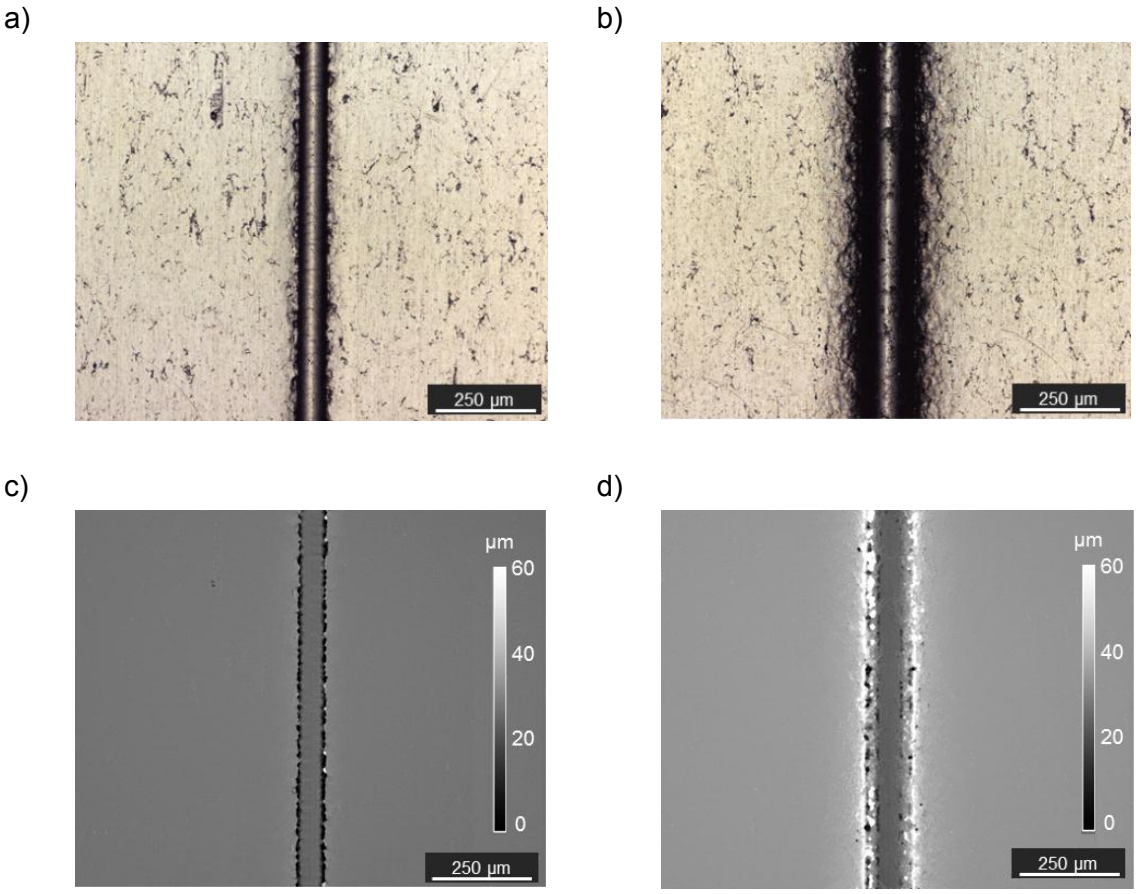
Slika 77: *2D-profil (a) in 3D-profil razenih vzorcev z najmanjšo (b) in največjo razo (c)*

S profilometrom smo na razdalji 2 mm merili hrapavost površine R_a na dnu raze. Rezultati meritev so prikazani v tabeli 11. Ugotavljamo, da se z razenjem hrapavost površine poveča (za ≈ 10-krat do 20-krat), ne glede na obravnavane procesne parametre. Prav tako ugotavljamo, da se hrapavost manjša z večanjem števila prehodov konice orodja, vendar pa ta ne doseže stanja hrapavosti osnovne površine materiala. Zgled dveh skrajnih profilov (najplitvejše in najgloblje raze) hrapavosti površine prikazuje slika 78.



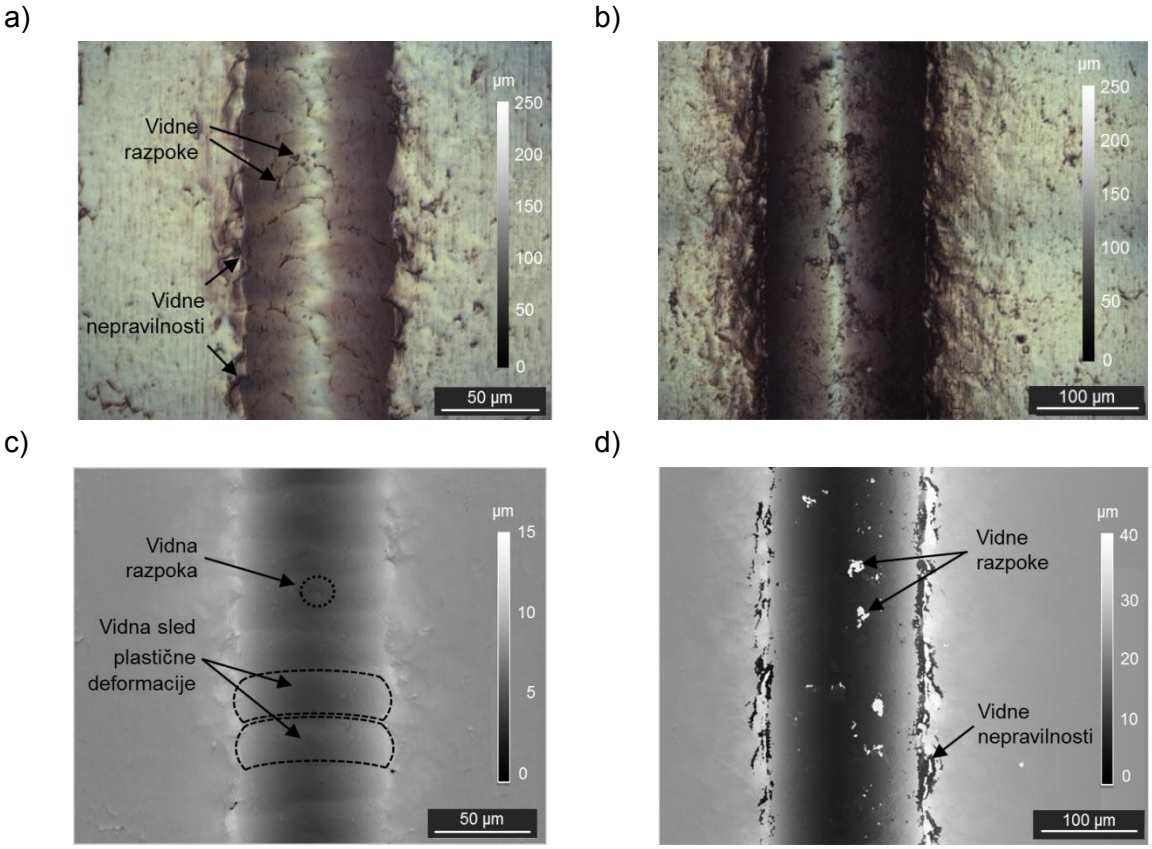
Slika 78: *Zgled hrapavosti površine na dnu najplitvejše (a) in najgloblje raze (b)*

Raze smo dodatno analizirali z obema elektronskima mikroskopoma, s konfokalnim in vrstičnim elektronskim mikroskopom. Fotografije, posnete s konfokalnim mikroskopom pri 10-kratni povečavi so prikazane na sliki 79 in pri 50-kratni povečavi na sliki 80. Sliki (a) in (c) prikazujeta najplitvejšo razo, ter (b) in (d) najglobljo. Prvi dve fotografiji (a in b), ki sta posneti z belim virom svetlobe s ksenonovo lučjo, nam dasta optično sliko vzorca, medtem ko drugi dve (c in d) topografsko sliko površine vzorcev. Z obeh slik je razvidno, da se pri razenju z manjšim številom prehodov (a in c) pojavi značilna plastičnodeformacijska sled kot posledica trenja med orodjem in obdelovancem. Na isti sliki so vidni vršički, nastali zaradi trganja materiala pri izpodrivanju le-tega. Ti se z večanjem števila prehodov (b in d) nelinearno povečujejo kar negativno vpliva na hrapavost površine. Na isti sliki so vidne tudi prve razpoke, ki se z večanjem števila prehodov nelinearno odpirajo in so vidne na sliki 80d. Z iste slike je tudi razvidno, da se na robovih (grebenih) raze pojavijo dodatne nelinearne nepravilnosti. Nastale nepravilnosti prispevajo k slabši statistični karakterizaciji hrapavosti površine, kar je v nadaljevanju naloge, v poglavju 4.1.3.7, tudi prikazano.

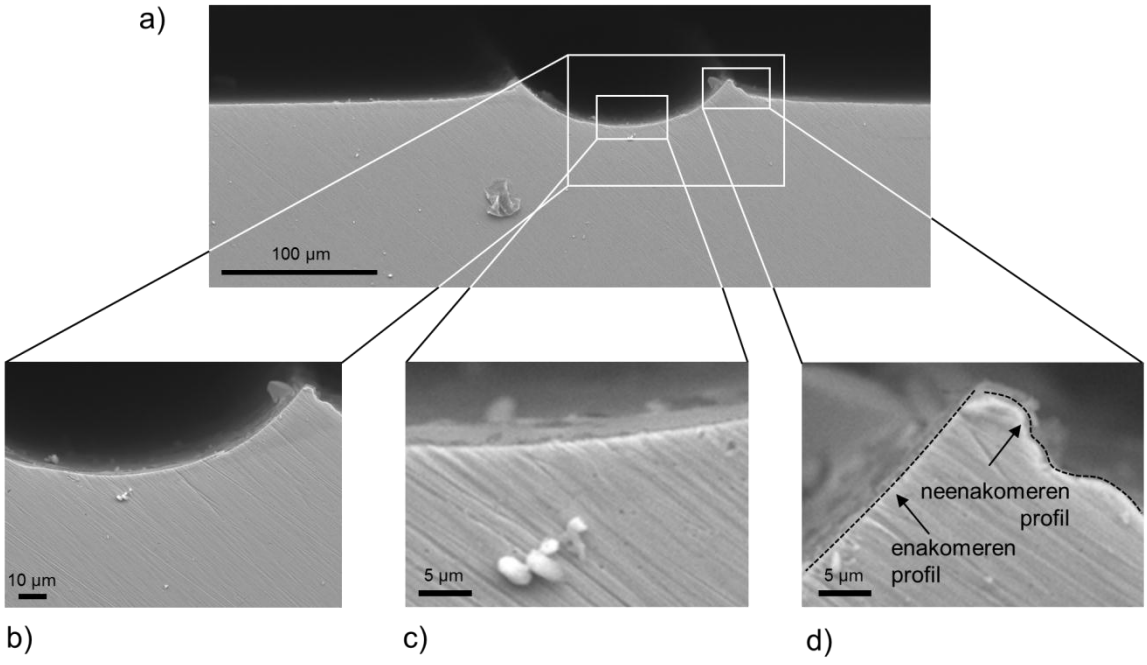


Slika 79: *Značilna topografija najmanjše (a, c) in največje raze (b, d), posnete s konfokalnim mikroskopom pri 10-kratni povečavi: optična slika (a, b) in topografija površine (c, d)*

Slika 81 prikazuje SEM-posnetek vzorca z najglobljo razo pri različnih povečavah (250-, 1 000- in 5 000-kratni). S prvih dveh slik je rzvidno, da je na notranji strani raze profil površine pravilno oblikovan. Ta se ujema s profilom konice orodja, medtem ko je na zunanji strani nastali profil neenakomeren. Ta je prikazan na posnetku detajla grebena raze (slika 81d). Na slikah so vidne sledi poliranja vzorca in manjše nečistoče, ki so nastale pri pripravi vzorcev, medtem ko drugih nepravilnosti na prerezu raze ni zaznati.



Slika 80: *Značilna topografija najmanjše (a, c) in največje raze (b, d), posnete s konfokalnim mikroskopom pri 50-kratni povečavi: optična slika (a, b) in topografija površine (c, d)*



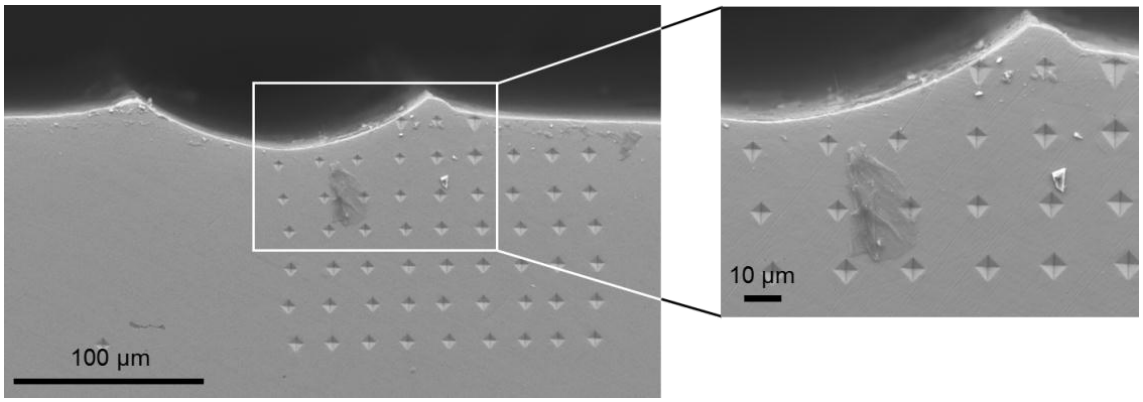
Slika 81: *SEM-posnetek vzorca z najglobljo razo*

4.1.2 Utrjevanje

V teoretičnem delu smo omenili, da lahko razenje do neke mere primerjamo s krogličnim glajenjem. Pri tem nastaja plastična deformacija materiala in določen delež utrjevanja materiala. Prepričati smo se hoteli, ali se podoben utrjevalni mehanizem dogaja tudi pri razenju. S tem namenom smo za vsak eksperimentalni vzorec izvedli serijo meritev trdote na prerezu raze. Na osnovi izmerjenih vrednosti v posameznih točkah na prerezu raze smo določili utrjevalno krivuljo v odvisnosti od globine.

Trdoto po Vickersu smo merili na ustrezno pripravljenih prečnih prerezih vzorcev po metodologiji, opisani v poglavju 3.2.5. Zgled meritve enega od vzorcev (eksperiment 22) prikazuje slika 82. Kot smo že omenili, smo posamične meritve (v prečni in vzdolžni smeri) izvajali z medsebojnim razmikom 20 µm. Pri tem smo se izognili odkrivanju plastičnih deformacijskih con materiala, ki nastanejo ob vtisu konice v material.

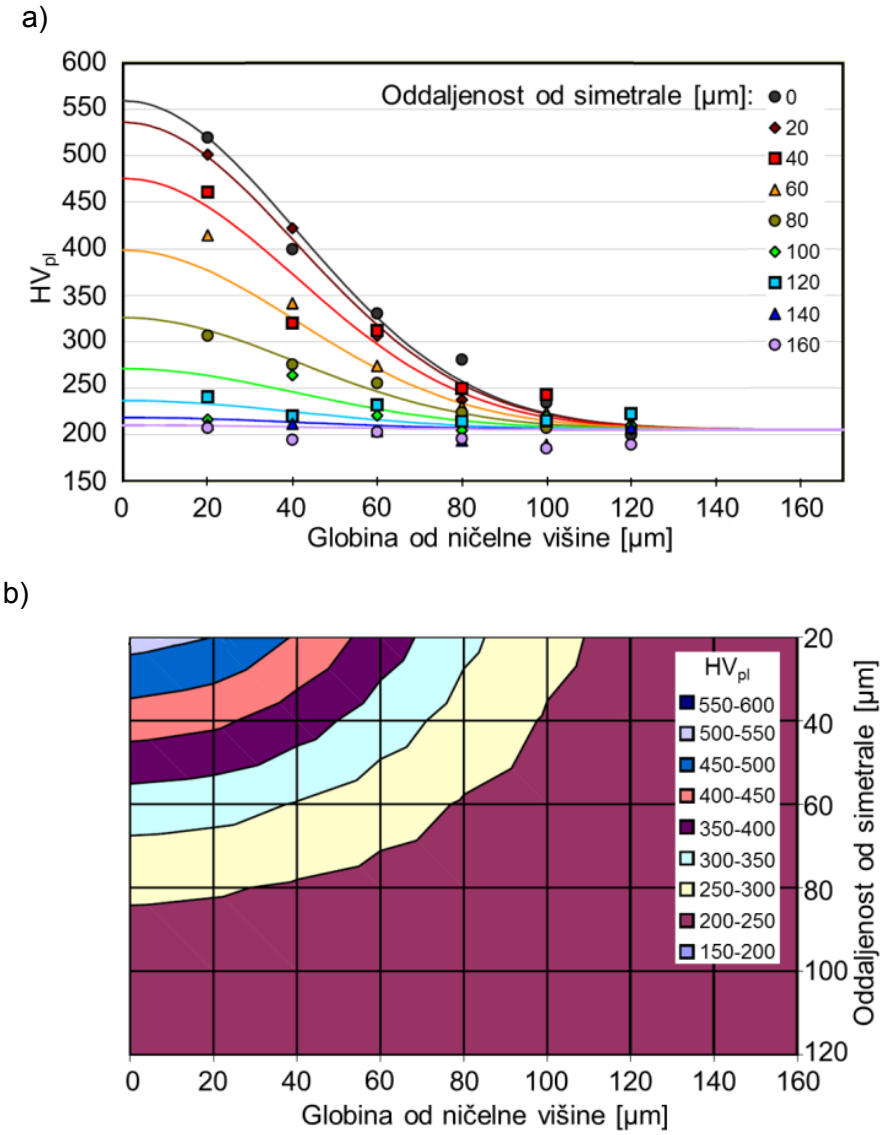
Vsako posamično meritev smo natančno pozicionirali v koordinatnem sistemu z izhodiščem v presečišču osnovne površine obdelovanca in simetrale raze. Iz velikosti vtisov je razvidno, da so ti bližje površini manjši v primerjavi s tistimi, odtisnjenimi globlje v material. To potrjuje dejstvo, da se material z razenjem utrjuje. Z vrednostjo posamičnih trdot v posamičnih točkah smo lahko prikazali smer razvoja utrjevanja materiala na prerezu, kot to prikazuje slika 83.



Slika 82: *SEM-posnetek prečnega prereza raze z vidnimi vtisi merjenja trdote po Vickersu*

Ugotovili smo da:

- je v vseh primerih razenja usmerjenost v utrjevanju podobna, ne glede na izbiro parametrov razenja,
- se vrednost trdote na površini razenega materiala lahko zviša tudi za več kot 100 % (> 500 HV),
- se intenzivnost utrjevanja z globino nelinearno znižuje,
- je intenzivnost trdote izrazitejša v vzdolžni smeri,
- učinek utrjevanja seže tudi do globine 120 µm in
- učinek utrjevanja v vzdolžni smeri raze do razdalje 110 µm.



Slika 83: *Primer utrjevanja materiala po globini raze (a) in porazdelitve trdote na prerezu raze (b)*

4.1.3 Analiza ANOVA vplivnih parametrov

Eksperimentalne meritve po metodologiji DoE in ortogonalni matriki L_{27}, prikazani v tabeli 11, smo analizirali s statističnim programom Design-Expert 8. Iz statične analize ANOVA smo ugotovili, da z dvofaktorskim interakcijskim (2FI) modelom analize dosežemo zahtevano najvišjo vrednost determinacijskega koeficienta (koeficienta regresije) (R^2), razen za analizo širin raze (w_0 in w_1), kjer je zadostoval linearni model statistične analize. Analize smo izvajali pri stopnji značilnosti 95 %, izbrali pa smo model vzvratne eliminacije, s čimer smo samodejno reducirali zanemarljive člene (faktorje). Iz statističnih rezultatov analize ANOVA (*p*-vrednost in *F*-vrednost) smo ugotavljali, kateri členi v prvotno zapisanem modelu imajo zanemarljiv vpliv in jih lahko blokiramo, pri tem pa bistveno ne znižamo determinacijskih koeficientov. S tem smo dodatno reducirali faktorje vpliva in tako dobili značilno odzivno enačbo z minimalnim številom faktorjev.

V nadaljevanju prikazujemo rezultate statističnih analiz za vsako karakteristično

vrednost posebej. Skupni rezultat vseh analiz ANOVA in vpliv posameznih členov (faktorjev) na karakteristične vrednosti raze so zbrani in prikazani v tabeli 12.

Tabela 12: *Rezultati analize ANOVA in vpliva posameznih faktorjev na signifikantnost spremenljivk pri postopku razenja*

Faktor	A_g	A_r	h_g	h_r	w_0	w_1	R_a	σ_x	σ_y	$\frac{H_{max}}{H_0}$
R/%	5	8	9	15	-	-	26	-	-	100
F_n/%	49	47	49	46	55	54	24	42	78	-
v_t/%	-	-	2	2	-	-	51	-	-	-
N/%	35	34	36	30	45	46	-	58	22	-
$R \cdot F_n$/%	1	3	-	4	-	-	-	-	-	-
$R \cdot v_t$/%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
$R \cdot N$/%	2	2	1	-	-	-	-	-	-	-
$F_n \cdot v_t$/%			3	2	-	-	-	-	-	-
$F_n \cdot N$/%	8	6	-	-	-	-	-	-	-	-
$v_t \cdot N$/%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R^2	0,978	0,973	0,953	0,962	0,934	0,940	0,420	0,862	0,736	0,214
R^2_{Pril}	0,971	0,965	0,938	0,950	0,928	0,934	0,344	0,850	0,713	0,182
R^2_{Pred}	0,959	0,947	0,912	0,933	0,916	0,924	0,196	0,829	0,672	0,071
S/N	37,5	36,1	27,1	29,8	36,3	38,2	8,3	24,2	15,6	4,4

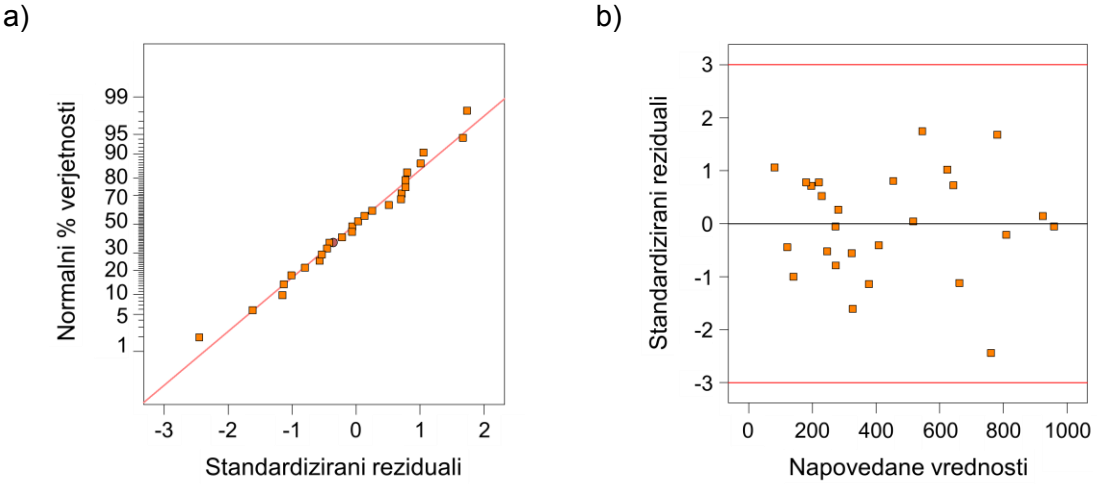
Rezultati analize ANOVA za geometrijske spremenljivke (A_g, A_r, h_g, h_r, w_0 in w_1) so nam pokazali, da so vsi izbrani modeli analize signifikantni (p-vrednost < 0,000 1). Determinacijski koeficienti (R^2) vseh analiziranih vrednosti nam pokažejo, da lahko izdelan model pojasnimo z nad 92-odstotno verjetnostjo vseh variacij. Prilagojena in predvidena determinacijska koeficienta (R^2_{Pril}, R^2_{Pred}) sta v dobrem medsebojnem razmerju in se gibljeta v okviru odmika 4 %. Z vsemi izbranimi modeli lahko pričakujemo, da bomo pri vseh novih spremenljivkah in z upoštevanjem vseh signifikantnih faktorjev z nad 92-odstotno verjetnostjo na novo napovedali vrednost analizirane geometrijske spremenljivke. Z nekoliko manjšo verjetnostjo (67 % in 83 %) lahko napovemo širjenje globinskega utrjevanja (σ_x, σ_y). Rezultata analize utrjevanja (H_{max}/H_0) in hrapavosti površine (R_a) sta prenizka, da bi ju z dovolj veliko verjetnostjo lahko napovedali, kljub temu pa sta nam dala neke smernice. Vrednosti razmerja med signalom in šumom kažejo ustrezen signal ($S/N > 10$) za vse spremenljivke, razen za zadnji dve omenjeni (H_{max}/H_0 in R_a), da lahko modele uporabimo za navigacijo prostorskega oblikovanja. V nadaljevanju so prikazani rezultati analiz ANOVA za vsako posamično karakteristično vrednost.

4.1.3.1 Analiza ANOVA površine raze na prerezu A_g

Dobljene vrednosti determinacijskih koeficientov (R^2, R^2_{Pril}, R^2_{Pred}) površine raze na prerezu A_g so visoke (nad 95 %) in se med seboj odmikajo le za 2 %. Ugotovili smo, da imata faktor sile orodja F_n in število prehodov orodja N najsignifikantnejši vpliv na A_g. Sila prispeva 49 % in število prehodov orodja 35 % k izbranemu modelu. Radij konice orodja R (prispevek 5 %) ima manjši vpliv, prav tako dvofaktorski interakcijski členi sile s številom prehodov orodja ($F_n \cdot N$), ki prispevajo 8 %. Radij konice orodja s silo orodja ($R \cdot F_n$) in radij konice orodja s številom prehodov orodja ($R \cdot N$) imata zanemarljiv vpliv. Prvi prispeva 1 % in drugi 2 %. Hitrost razenja v_t nima nikakršnega vpliva na A_g. Z upoštevanjem vseh signifikantnih faktorjev smo enačbo modela za A_g zapisali z naslednjo polinomsko obliko*:

$$A_g = -3638 + 21{,}5 \cdot R + 91{,}8 \cdot F_n - 284 \cdot N - 0{,}518 \cdot R \cdot F_n - 0{,}451 \cdot R \cdot N + 9{,}34 \cdot F_n \cdot N \quad (22)$$

Na sliki 84a je prikazan graf porazdelitve rezidualov v razsevnem grafikonu in na sliki 84b graf normalne porazdelitve rezidualov za A_g. S prvega grafa je razvidno, da so vrednosti točk homogeno razporejene znotraj rezidualov in ne tvorijo nobenega pravilnega vzorca, kar pomeni, da je variabilnost za vsako spremenljivko približno enaka. Z drugega grafa je razvidno, da so točke rezidualov dokaj pravilno prilagojene diagonalni liniji, kar pomeni, da podatki prihajajo iz normalne populacije in da so členi v modelu edini, ki so značilni (signifikantni).



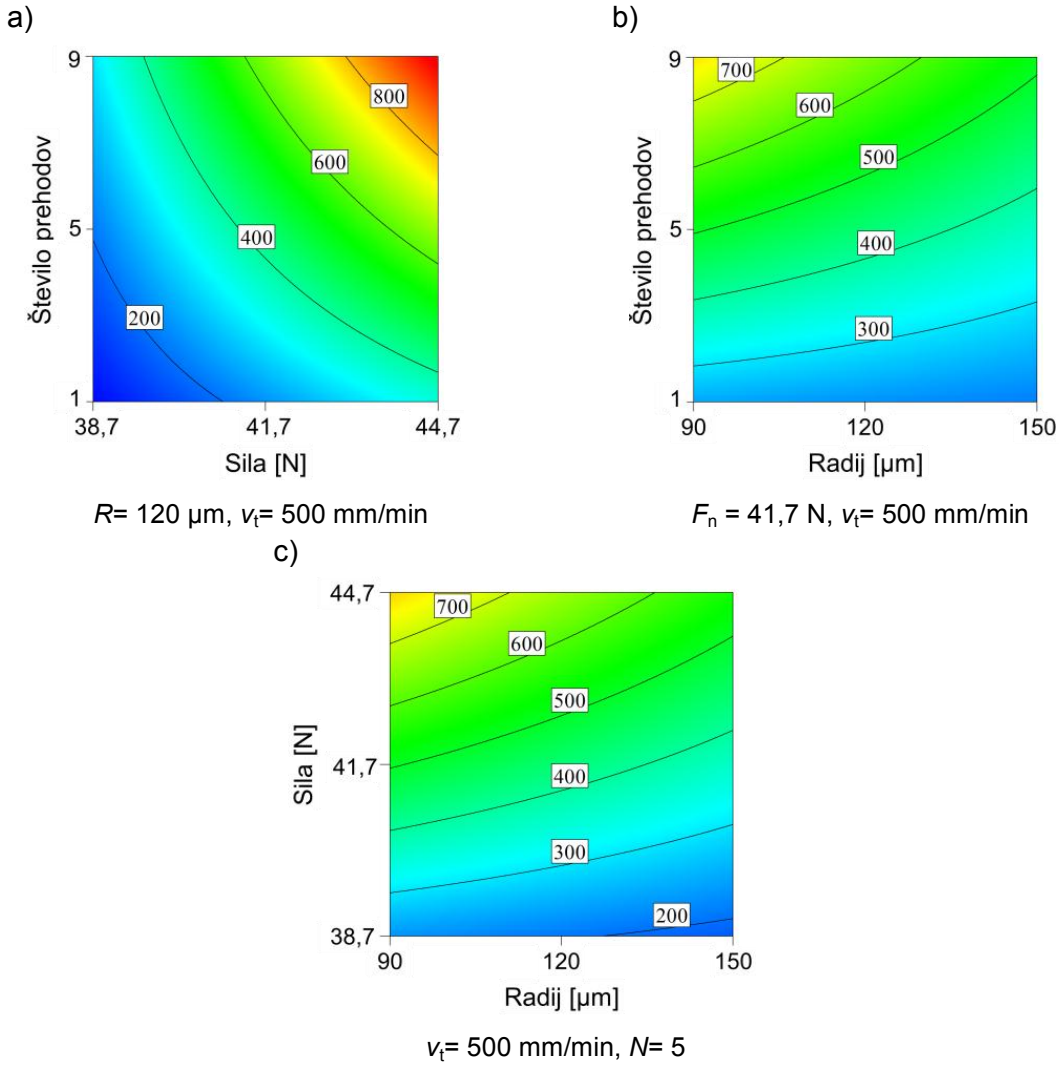
Slika 84: *Graf rezidualov razenja za A_g (a) in graf normalne porazdelitve rezidualov (b)*

Medsebojni vplivi signifikantnih faktorjev na površino raze na prerezu A_g so prikazani na sliki 85. Vpliv sile in števila prehodov orodja na A_g je prikazan na sliki 85a. Oba faktorja imata največji vpliv na A_g. Ugotovili smo, da se z večanjem sile in večanjem števila prehodov orodja površina raze A_g nelinearno povečuje. Če pa želimo imeti večjo površino raze A_g, lahko to dosežemo bodisi z večanjem sile bodisi z večanjem števila prehodov orodja. Z večanjem sile hitreje dosežemo globljo razo, vendar pa je konica orodja bolj obremenjena in s tem obstaja večja verjetnost za lom orodja. Z večanjem števila prehodov orodje ne obremenjujemo toliko, se pa podaljšuje čas izdelave.

Slika 85b prikazuje vpliv radija orodja in števila prehodov orodja na A_g, slika 85c pa vpliv radija orodja in sile orodja na A_g. Obe odvisnosti sta si zelo podobni in kažeta, da se

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: A_g (μm^2), R (μm), F_n (N), N (brezdimenzijska količina)

z večanjem radija orodja površina raze A_g manjša. Čim večji je radij konice orodja, tem večja bo kontaktna površina orodja z obdelovancem, zato potrebujemo bodisi večjo silo bodisi večje število prehodov orodja za globljo vdolbino v materialu.



Slika 85: *Vpliv faktorjev obdelave na površino raze na prerezu A_g; vpliv sile orodja in števila prehodov orodja (a), radij konice orodja in število prehodov orodja (b) ter radij konice orodja in sila orodja (c)*

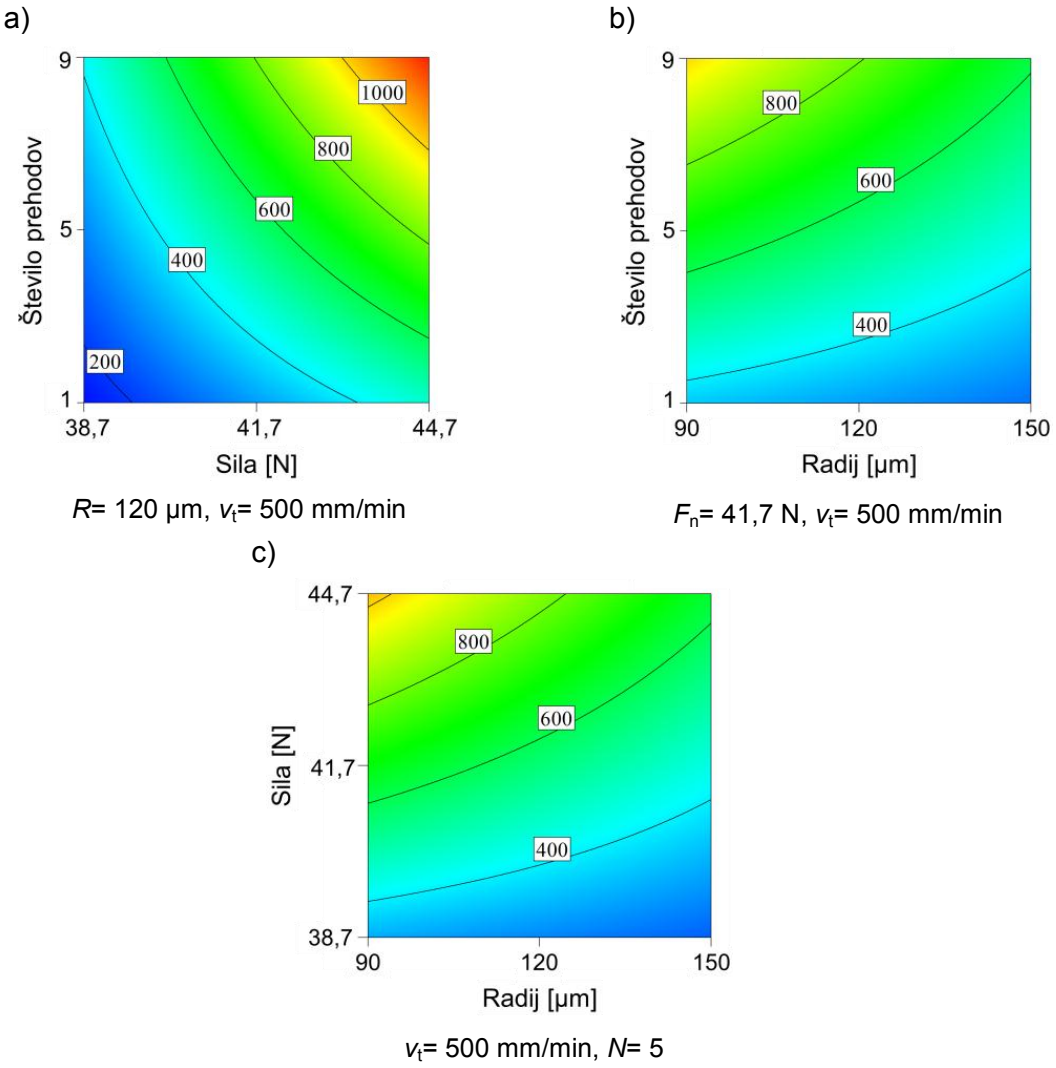
4.1.3.2 Analiza ANOVA površine grebena raze na prerezu A_r

Vrednosti determinacijskih koeficientov in vpliv posameznih faktorjev na površino grebena raze na prerezu A_r so zelo podobne vrednostim za A_g. To je bilo tudi pričakovati in nekako potrjuje našo trditev (poglavje 4.1.1), da so z geometrijskega vidika spremenljivke med seboj odvisne.

Iz analize ANOVA površine grebena raze na prerezu je razvidno, da sta sila in število prehodov orodja najsignifikantnejša faktorja v modelu. Sila F_n prispeva 47 %, medtem ko število prehodov N prispeva 34 %. Manjši vpliv v modelu pomeni radij konice orodja R s prispevkom 8 % in trije dvofaktorski interakcijski členi: sila s številom prehodov ($F_n \cdot N$) s prispevkom 6 %, radij s silo ($R \cdot F_n$) s prispevkom 3 % in radij s številom prehodov ($R \cdot N$) s prispevkom 2 %. Podobno kot pri A_g hitrost pomika v_t nima vpliva na A_r. Vrednost S/N (36,1) pokaže ustrezen signal, da smo lahko model uporabili za navigacijo prostorskega oblikovanja. Tako smo enačbo modela za A_r zapisali v naslednji obliki*:

$$A_r = -5673 + 35{,}1 \cdot R + 145 \cdot F_n - 281 \cdot N - 0{,}865 \cdot R \cdot F_n - 0{,}597 \cdot R \cdot N + 9{,}95 \cdot F_n \cdot N \quad (23)$$

Usmeritve vplivov signifikantnih faktorjev na A_r so zelo podobne tistim pri analizi A_g. Te so prikazane na sliki 86. Hitrost pomika orodja nima vpliva na A_r, zato ta ni vključen v grafičnem prikazu. Z grafov lahko razberemo, da se z večanjem števila prehodov orodja in z večanjem sile orodja greben raze povečuje, medtem ko se z večanjem radija orodja površina grebena zmanjšuje. Ugotavljamo, da se z večanjem globine raze proporcionalno viša tudi njen greben.



Slika 86: *Vpliv faktorjev obdelave na površino grebena raze na prerezu A_r; vpliv sile orodja in števila prehodov orodja (a), radija konice orodja in števila prehodov orodja (b) ter radija konice orodja in sile orodja (c)*

4.1.3.3 Analiza ANOVA globine raze h_g

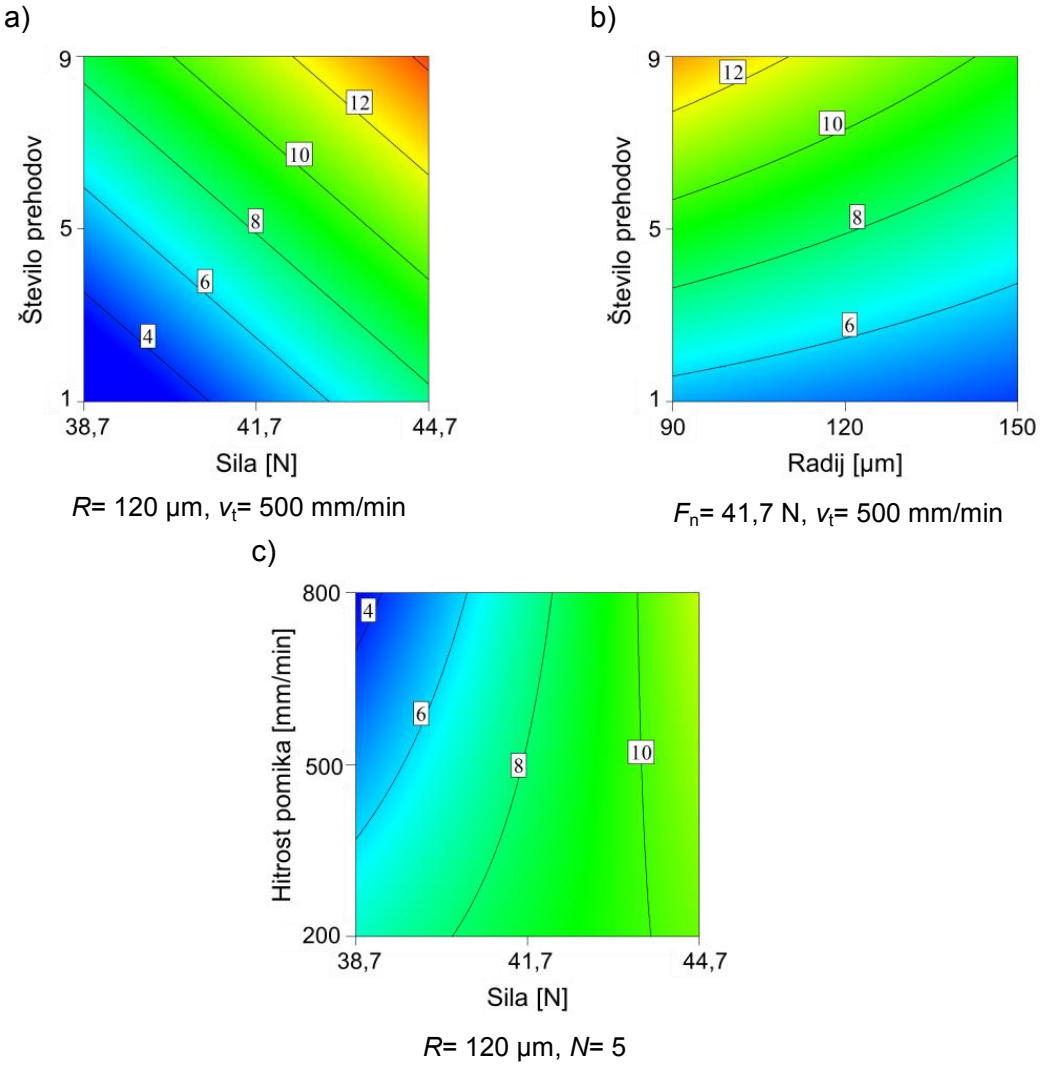
Pričakovati je bilo, da bo analiza ANOVA globine raze h_g pokazala podobne rezultate kakor analiza A_g. Vrednosti determinacijskih koeficientov so sicer nekoliko nižje (R^2_{Pred} = 0,912) v primerjavi z analizo za A_g, vendar kljub temu dovolj visoke, da lahko zanesljivo (91 %) napovemo globino raze pri upoštevanju vseh signifikantnih faktorjev.

[*] Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: A_r (µm^2), R (µm), F_n (N), N (brezdimenzijska količina)

Najsignifikantnejša faktorja, ki se pojavljata v modelu, sta podobno kakor pri A_g sila orodja F_n (prispevek 49 %) in število prehodov orodja N (prispevek 36 %). Manjši vpliv na h_g ima radij konice orodja R (prispevek 9 %) in hitrost pomika orodja v_t (prispevek 2 %), ki ga v modelu za A_g ni bilo. Manjši vpliv imata tudi dva mešana dvofaktorska člena: sila orodja s hitrostjo orodja ($F_n \cdot v_t$) s prispevkom 3 % ter radij konice orodja s številom prehodov orodja ($R \quad N$) s prispevkom 1 %. Drugi členi nimajo vpliva na h_g. Vrednost S/N (27,1) kaže ustrezen signal za navigacijo prostorskega oblikovanja. Enačbo modela za h_g smo zapisali v naslednji obliki*:

$$h_g = -6{,}37 - 0{,}0161 \cdot R + 0{,}321 \cdot F_n - 0{,}0555 \cdot v_t + 1{,}43 \cdot N - 5{,}05 \cdot 10^{-3} \cdot R \cdot N - 1{,}28 \cdot 10^{-3} \cdot F_n \cdot v_t \quad (24)$$

Vpliv faktorjev obdelave na globino raze h_g je prikazan na sliki 87.



Slika 87: *Vpliv faktorjev obdelave na globino raze h_g; vpliv sile orodja in števila prehodov orodja (a), radija konice orodja in števila prehodov orodja (b) ter sile in hitrosti pomika orodja (c)*

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: h_g (µm), R (µm), F_n (N), v_t (mm/min), N (brezdimenzijska količina)

Podobno kot pri analizi A_g smo pri analizi h_g ugotovili, da se z večanjem sile in števila prehodov orodja globina raze povečuje. Vpliv obeh faktorjev je nasprotno od A_g linearen, kar prikazuje graf na sliki 87a. Pojasnjuje nam, da če uporabimo manjšo silo orodja, potrebujemo večje število prehodov orodja za dosego dovolj globoke raze. Če želimo raziti z večjim radijem orodja, je treba število prehodov orodja povečati za dosego enake globine, kar prikazuje graf odvisnosti obeh faktorjev od h_g na sliki 87b. Njun vpliv je zelo podoben tistemu od obeh faktorjev na A_g. Vpliv sile orodja in hitrosti pomika orodja na h_g prikazuje grafična slika 87c. Z grafa je razvidno, da pri manjših silah h_g pada z večanjem hitrosti pomika orodja, medtem ko pri večjih silah (F_n nad 43,4 N) h_g narašča, vendar pa to ni tako izrazito kot njegovo padanje. Pri izbiri ustreznih faktorjev je treba najti dober kompromis, saj je z večanjem sile orodja in večanjem hitrosti pomika to bolj obremenjeno. Pri orodjih z manjšim radijem je obremenitev konice orodja toliko bolj izrazita in obstaja velika verjetnost, da bo prišlo do loma konice.

4.1.3.4 Analiza ANOVA višine grebena raze h_r

Analiza ANOVA višine grebena raze h_r je zelo primerljiva z analizo A_r, njuna korelacija pa je podobna, kot je korelacija med h_g in A_g. Determinacijski koeficienti se v primerjavi z A_r gibljejo v okviru odmika 2 %. Podobno je bilo tudi v tem primeru pričakovati, da bo največji vpliv imela sila orodja F_n (prispevek 46 %) in število prehodov orodja N (prispevek 30 %). Manjši vpliv, vendar kljub temu skoraj še enkrat večji kot pri A_r, ima radij konice orodja R (prispevek 15 %), hitrost pomika v_t (prispevek 2 %) pa ima enak vpliv. Mešana dvofaktorska interakcijska člena, ki dodatno vplivata na h_r, sta: radij konice orodja s silo orodja ($R \cdot F_n$) s prispevkom 4 % ter sila orodja s hitrostjo pomika orodja ($F_n \cdot v_t$) s prispevkom 2 %. Drugi členi nimajo vpliva na h_r. Enačbo modela za h_r smo zapisali v naslednji obliki*:

$$h_r = -65{,}9 + 0{,}432 \cdot R + 1{,}83 \cdot F_n - 0{,}0466 \cdot v_t + 0{,}752 \cdot N - 0{,}0117 \cdot R \cdot F_n + 1{,}06 \cdot 10^{-3} \cdot F_n \cdot v_t \quad (25)$$

Kot smo že omenili, obstajajo določene medsebojne odvisnosti med vrednostmi A_r, h_g in A_g. Iz analize ANOVA za h_r ugotavljamo, da sta usmeritvi sile orodja in število prehodov orodja ter sile orodja in hitrosti pomika orodja na h_r podobna obema usmeritvama kot pri h_g (slika 87a in c). Usmeritev vpliva radija orodja in sile orodja na h_r pa je podobna usmeritvi kot pri analizi A_r (slika 86c). Zato vpliva faktorjev razenja na h_r v grafični obliki nismo posebej prikazovali.

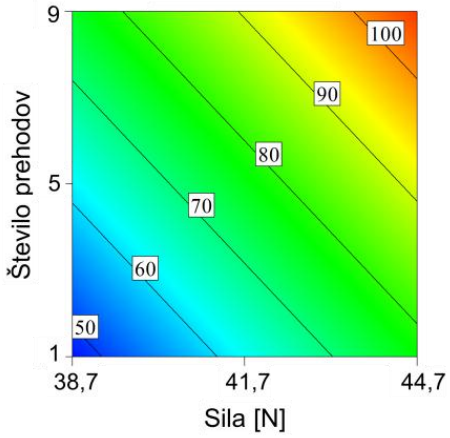
4.1.3.5 Analiza ANOVA širine raze na ničelni višini w_0

Z analizo ANOVA širine raze na ničelni višini w_0 smo ugotovili, da lahko z linearnim modelom z 91-odstotno verjetnostjo napovemo rezultat pri upoštevanju vseh signifikantnih faktorjev. Po pričakovanju sta to sila orodja F_n (prispevek 55 %) in število prehodov orodja N (prispevek 45 %). Radij konice orodja R in hitrost pomika orodja v_t ter vse druge interakcije faktorjev nimajo signifikantnega vpliva na w_0. Enačbo modela za w_0 smo zapisali z naslednjo linearno obliko*:

$$w_0 = -148 + 4{,}98 \cdot F_n + 3{,}52 \cdot N \quad (26)$$

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: h_r (µm), R (µm), F_n (N), v_t (mm/min), N (brezdimenzijska količina), w_0 (µm)

Slika 88 prikazuje vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na w_0 in kaže podobno usmeritev kakor vpliv obeh faktorjev na h_g. Z večanjem sile in števila prehodov orodja širina raze w_0 narašča in obratno, kar velja tudi za A_g.



R= 120 µm, v_t= 500 mm/min

Slika 88: *Vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na širino raze na ničelni višini* w_0

4.1.3.6 Analiza ANOVA širine med grebenoma raze w_1

Rezultati analize ANOVA širine med grebenoma raze w_1 so primerljivi z rezultatom širine raze na ničelni višini w_0. Tudi vpliv obeh faktorjev sile orodja F_n (prispevek 54 %) in števila prehodov orodja N (prispevek 46 %) na w_1 je zelo podoben vplivu na w_0 (slika 88), zato te odvisnosti grafično nismo posebej prikazali. Enačbo modela za w_1 smo zapisali v obliki*:

$$w_1 = -195 + 6{,}81 \cdot F_n + 4{,}93 \cdot N \qquad (27)$$

4.1.3.7 Analiza ANOVA hrapavosti površine na dnu raze R_a

Pri analizi ANOVA hrapavosti površine na dnu raze R_a smo dobili precej nizke vrednosti determinacijskih koeficientov (R^2 = 42 %, R^2_{Pril} = 34,4 % in R^2_{Pred} = 19,6 %), vrednost razmerja med signalom in šumom pa ni zadostna (S/N = 8,3) za oblikovanje modela, zato tega nismo oblikovali. Ne glede na slabše rezultate nam rezultati analize ANOVA dajo neke smernice, kateri faktorji so pomembni za obravnavo hrapavosti površine raze. Ti nam kažejo, da ima na hrapavost raze največji vpliv hitrost pomika orodja v_t, ki prispeva 51 % v modelu. Z večanjem hitrosti pomika orodja se spreminjajo kontaktne razmere, kar pripelje do povečane hrapavosti površine. Podobno se zgodi s spremembo sile orodja F_n in radijem orodja R, ki imata sicer nekoliko manjši vpliv (vsak približno prispevek 25 %). Z večanjem sile orodja in manjšanjem radija orodja se veča kontaktni tlak. Ker smo ugotovili, da hrapavost površine raste s silo orodja in pada z radijem, lahko sklepamo, da na hrapavost površine vpliva kontaktni tlak.

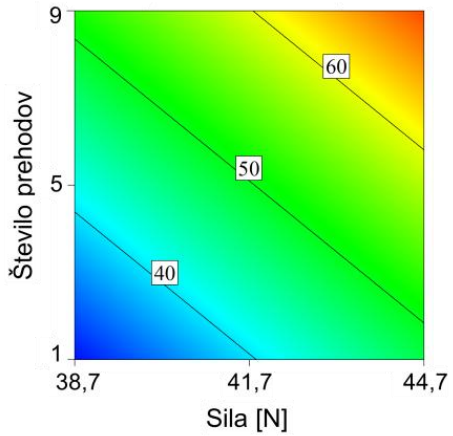
* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: w_1 (µm), F_n (N), N (brezdimenzijska količina)

4.1.3.8 Analiza ANOVA razpona globinskega utrjevanja v prečni smeri σ_x

Analiza ANOVA razpona globinskega utrjevanja v prečni smeri σ_x nam je pokazala, da lahko model pojasnimo z 86,2 % vseh variacij. Tudi v tem primeru sta edina faktorja vpliva na σ_x število prehodov orodja N, katerega prispevek je 58 %, in sila orodja F_n, ki prispeva preostalih 42 %. Drugi faktorji in interakcije med njimi nimajo vpliva na σ_x. Enačba modela je tako izražena v linearni obliki*:

$$\sigma_x = -76{,}9 + 2{,}74 \cdot F_n + 2{,}52 \cdot N \qquad (28)$$

Linearni vpliv sile in števila prehodov orodja na razpon globinskega utrjevanja v prečni smeri σ_x je prikazan na sliki 89 in je podoben usmeritvi na sliki 87a in sliki 88. To je nekako logično, saj sta obe spremenljivki orientirani v prečni smeri. Z grafa lahko razberemo, da se utrjevanje v prečni smeri razširi za 10 µm, če bodisi povečamo silo orodja za 3,7 N ali povečamo število prehod orodja za 4.



R= 120 µm, v_t= 500 mm/min

Slika 89: *Vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na širjenje utrjevanja v prečni smeri σ_x*

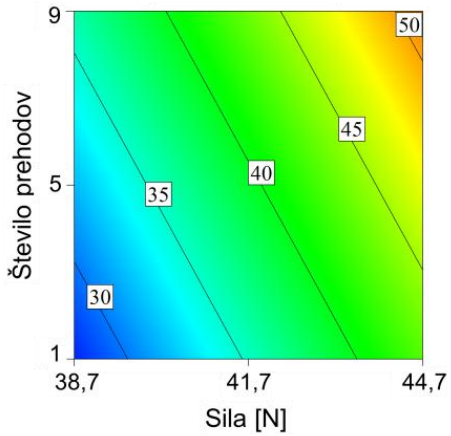
4.1.3.9 Analiza ANOVA razpona globinskega utrjevanja v vzdolžni smeri σ_y

Model analize ANOVA za razpon globinskega utrjevanja v vzdolžni smeri σ_y je nekoliko slabši kakor tisti za prečno smer, saj pojasnjuje le 73,6 % vseh variacij. Pri tem ima sila orodja (F_n) nekoliko večji prispevek (78 %) v primerjavi s σ_x, medtem ko ima število prehodov orodja (N) nekoliko manjši vpliv (22 %). Enačba modela za σ_y je izražena v obliki*:

$$\sigma_y = -71{,}4 + 2{,}53 \cdot F_n + 1{,}04 \cdot N \qquad (29)$$

Linearni vpliv sile in števila prehodov orodja na razpon utrjevanja v vzdolžni smeri σ_y je prikazan na sliki 90. Usmeritev je podobna tisti za σ_x, vidno pa je, da je pri tem izrazitejši vpliv sile orodja. To pomeni, da se z manjšo spremembo sile material hitreje globinsko utrjuje v vzdolžni smeri, kot če bi dodali kakšen prehod orodja več.

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: σ_x (µm), F_n (N), N (brezdimenzijska količina), σ_y (µm)



Slika 90: *Vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na širjenje utrjevanja v vzdolžni smeri* σ_y

4.1.3.10 Analiza ANOVA intenzivnosti globinskega utrjevanja H_{max}/H_0

Intenzivnost globinskega utrjevanja H_{max}/H_0 pomeni razmerje med ekstrapolirano maksimalno trdoto in trdoto osnovnega materiala. Nasprotno od predhodnih analiz ANOVA so vrednosti R^2 (0,214), R^2_{Pril} (0,182) in R^2_{Pred} (0,071) za H_{max}/H_0 nesprejemljivo nizke. Edini signifikanten faktor, ki vpliva na H_{max}/H_0, je radij konice orodja, medtem ko so vsi drugi faktorji nesignifikantni. To z drugimi besedami pomeni, da je utrjevanje neodvisno od razmer pri razenju in je odvisno zgolj od radija. Čim večji je radij konice orodja, tem večji so kontaktni tlaki in maksimalna bo plastična deformacija materiala. Poleg slabših rezultatov determinacijskih koeficientov je doseženo razmerje med signalom in šumom (S/N = 4,4) prav tako nesprejemljivo. Predvidevamo, da je bila analiza izpostavljena določenemu šumu, ker vrednosti meritev niso bile neposredno merjene. Uporabljen je bil Gaussov model utrjevanja, za katerega si lahko razlagamo, da ni dovolj dober za modeliranje sprejemljivega modela utrjevanja. V tem primeru enačbe modela nismo zapisali.

4.1.4 Sklep

Izračunani determinacijski koeficienti so nam pokazali, da lahko pri razenju geometrijske spremembe pojasnimo z verjetnostjo nad 90 %, medtem ko hrapavosti razene površine ni mogoče predvideti s tolikšno gotovostjo. Razpon globinskega utrjevanja lahko pojasnimo z manjšo gotovostjo (≈ 70– 80 %), medtem ko je variacija intenzivnosti utrjevanja majhna, primerljiva s šumom, zato je ni mogoče predvideti.

Ugotavljamo, da lahko na velikost geometrijskih sprememb razene gravure (površina, globina, višina, širina) v največji meri vplivamo s silo razenja in številom prehodov orodja. Sila orodja ima sicer največji vpliv (≈ 50 %), vendar pa je orodje izpostavljeno tudi večjim obremenitvam, kar negativno vpliva na njegovo obstojnost (obraba, lom). Torej pomembno vlogo igra tudi izbira materiala orodja in mazalnih sredstev za zmanjševanje triboloških vplivov. Teh v tem delu sicer nismo analizirali, lahko pa so predmet nadaljnjih raziskav. V primeru, kot je naš, torej ko smo izbirali orodje z diamantno konico in mazali z oljnim lubrikantom WD40, bi bila priporočljiva sila razenja do 45 N. Pri izbiri večjih obremenitev bo površina raze bolj hrapava, obstajala pa bo velika verjetnost loma orodij. Ker so ta precej draga (≈ 200 €) lahko stroški tudi ekstremno hitro narastejo, kakovost površine pa bo dvomljiva.

Če želimo dobiti izrazitejšo gravuro in ne želimo preobremeniti orodja, povečamo število prehodov orodja. S tem ne bomo vplivali na hrapavost razene površine, pač pa na čas izdelave želene gravure. Ta se lahko podaljša do 15 %, zato lahko pomeni določeno omejitev, ko je produktivnost procesa bolj pomembna. Čas izdelave lahko skrajšamo z večanjem hitrosti razenja in pri tem ne bomo vplivali na geometrijo gravure. Ponovno pa je treba biti previden na tribološke vplive in izbiro mazalnih sredstev. Čim večja je hitrost, tem večje trenje se ustvarja in s tem večja obremenitev orodja in večja verjetnost za obrabo ali lom orodja.

Radij orodja v največji meri določa profil gravure, ima pa manjši vpliv na velikost geometrijskih sprememb. Z večanjem radija orodja se kontaktna površina povečuje, zato za izrazitejše gravure potrebujemo večjo silo orodja, kar ponovno negativno vpliva na obremenitev orodja. Lahko sicer povečamo število prehodov orodja, kar pa ponovno podaljša čas izdelave. Ugotavljamo, da je treba pri izbiri ustreznih procesnih faktorjev iskati dober kompromis med obremenitvijo orodja in želenim časom izdelave.

4.2 Mikrofrezanje

Metoda mikrofrezanja je postopek z odvzemanjem materiala, kjer obliko gravure definira oblika orodja (v našem primeru radij (R) dvoreznega mikrofrezala) in globina reza (h_g). Drugi dva pomembna faktorja obdelave sta vrtilna hitrost (v_c) in podajalna hitrost orodja (v_t). Karakterizacijo postopka mikrofrezanja smo izvajali po enakem principu kot pri razenju.

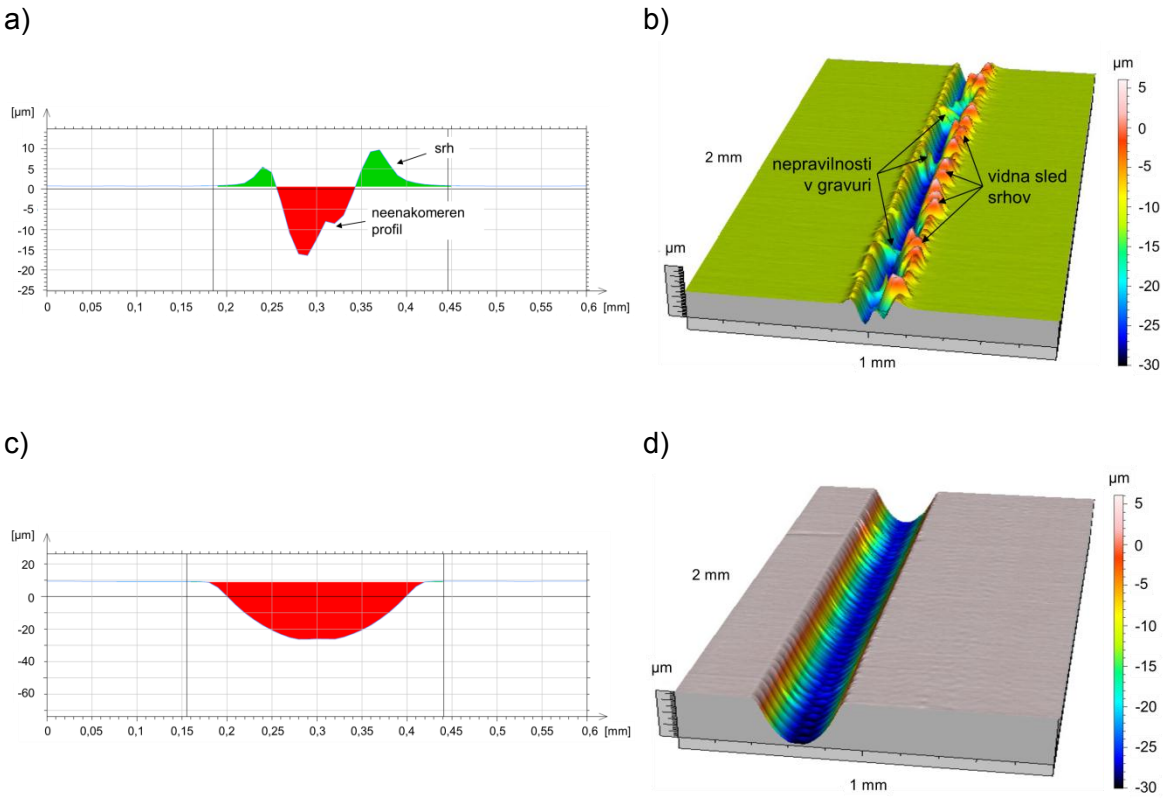
Tudi v tem primeru smo po eksperimentalnem načrtu DoE izvedli skupaj 27 eksperimentov. Analizirali smo topografske spremembe vzorcev, le da smo tu statistično analizirali le hrapavost površine na dnu gravure (R_a). Vrednosti, kot so globina gravure (h_g), širina gravure na ničelni višini (w_0) in površina gravure na prerezu (A_g), so neposredno določene s parametri obdelave (z R in h_g), zato teh vrednosti tudi nismo posebej analizirali. Ker se pri mikrofrezanju greben gravure ne pojavi, odpadejo analize višine grebena (h_r), širine med grebenoma (w_1) in površine grebena (A_r). Načeloma utrjevanja materiala v globino pri mikrofrezanju ni, kljub temu pa smo meritve trdote na prerezu izvedli po enakem principu kakor pri razenju. Izmerjene vrednosti hrapavosti površine R_a po eksperimentalnem načrtu DoE prikazujemo v tabeli 13. Izmerjene vrednosti so vhodni podatki za nadaljnjo statistično analizo ANOVA, izvedeno s programom Design-Expert 8.

Tabela 13: *Eksperimentalni načrt DoE in rezultati izmerjenih vrednosti pri mikrofrezanju*

Set	R/µm	v_c/min^{-1}	v_t/(mm/s)	h_g/µm	R_a/µm^2
1	100	60 000	6	30	0,207
2	100	60 000	1	10	6,260
3	100	30 000	1	10	1,850
4	100	30 000	4	20	0,142
5	100	60 000	4	20	0,237
6	100	30 000	6	30	0,250
7	100	90 000	4	20	0,060
8	100	90 000	1	10	0,148
9	100	90 000	6	30	0,325
10	150	90 000	6	30	0,086
11	150	30 000	1	10	0,197
12	150	30 000	6	30	0,277
13	150	60 000	4	20	0,097
14	150	90 000	4	20	0,104
15	150	30 000	4	20	0,403
16	150	60 000	1	10	0,169
17	150	60 000	6	30	0,082
18	150	90 000	1	10	0,270
19	200	30 000	6	30	0,076
20	200	60 000	6	30	0,117
21	200	90 000	4	20	0,273
22	200	60 000	4	20	0,055
23	200	30 000	1	10	0,127
24	200	60 000	1	10	0,307
25	200	30 000	4	20	0,057
26	200	90 000	1	10	0,069
27	200	90 000	6	30	0,233

4.2.1 Topografske značilnosti

Z orodjem radija R, vrtilno hitrostjo v_c, podajalno hitrostjo v_t in globino reza h_g smo obdelovali material po vnaprej določeni konturi vzorca, prikazani na sliki 50. Pri spremenljivih razmerah pri delu smo ustvarili karakteristične profile vzorcev. Dva tipična profila prikazuje slika 91. V prvem primeru na slikah 91a in b je prikazan profil gravure, izdelane pri naslednjih razmerah obdelave: z najmanjšim radijem orodja (R = 100 µm), manjšo vrtilno hitrostjo (v_c = 30 000 min^{-1}), največjo podajalno hitrostjo (v_t = 6 mm/s) in največjo globino reza (h_g = 30 µm). Sliki 91c in d prikazujeta mikrofrezano gravuro pri največjem radiju orodja (R = 200 µm), največji vrtilni hitrosti (v_c = 90 000 min^{-1}), največji podajalni hitrosti (v_t = 6 mm/s) in največji globini reza (h_g = 30 µm).



Slika 91: *2D-profil (a, c) in 3D-profil (b, d) dveh karakterističnih primerov mikrofrezanih vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah: R = 100 µm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (a, b) in R = 200 µm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (c, d)*

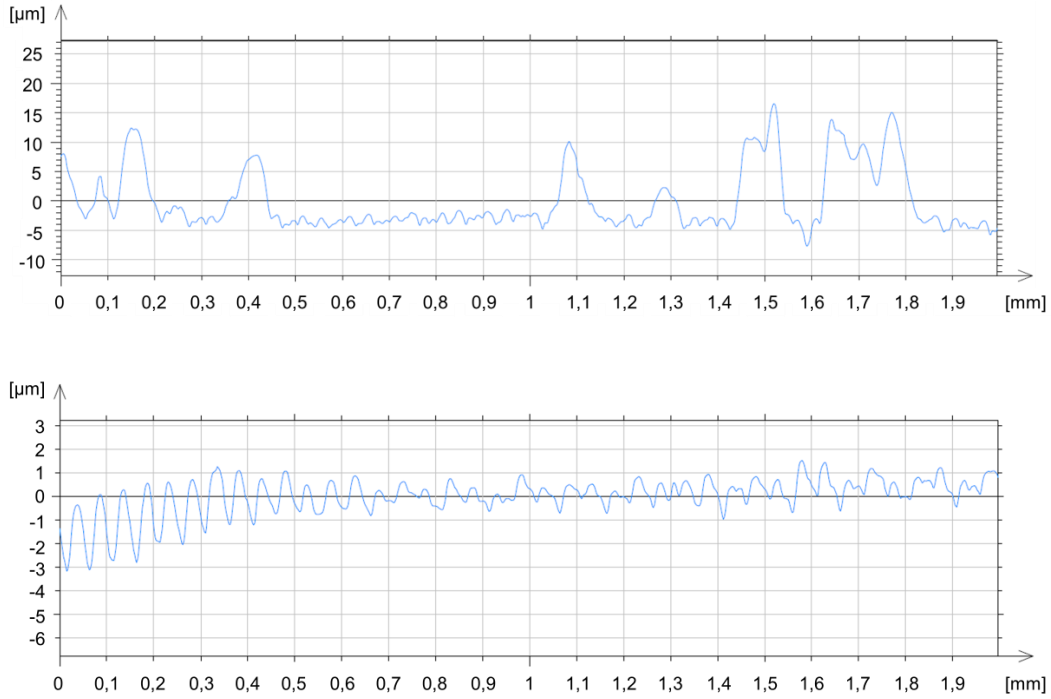
Iz prikazanega profila na slikah 91a in b lahko sklepamo, da obdelovalne razmere niso bile primerne. Na robovih gravure so se pojavili neželeni srhi, profil gravure je bil neenakomeren, hrapavost površine na dnu gravure pa prav tako. Profil hrapavosti slednje je prikazan na sliki 92a. Topografsko sliko istega vzorca, zajeto s konfokalnim mikroskopom, prikazuje slika 93. Dobro je vidna sled mikrofrezanja in neenakomeren profil, ki bi lahko nastal kot posledica opletanja orodja. Ta je pri mikroobdelavi, kjer obdelujemo z visokimi vrtilnimi hitrostmi, toliko bolj izrazit. Srhi na robovih gravure so prav tako dobro vidni.

Nasprotno od prvega primera je na slikah 91c in d prikazan primer bistveno bolj enakomernega profila. Globina gravure je enakomerna, hrapavost površine na dnu gravure prav tako (slika 92b), nastajanja srhov pa ni zaznati. Topografijo gravure tega

primera prikazuje slika 94. S prikazanih slik (slika 91b in c, slika 92b in slika 94) lahko sklepamo, da je v takšnih delovnih razmerah orodje bistveno manj obremenjeno, zato lahko tudi predvidevamo, da bo trajnostna doba orodja za tak primer bistveno daljša. Prav tako lahko z veliko gotovostjo predvidimo hrapavost profila na dnu gravure, medtem ko v prvem primeru ni tako. V tabeli 13 so zapisane vrednosti hrapavosti površine R_a na dnu gravure za vse izvedene eksperimentalne primere, ki so tudi vhodni podatki za statistično analizo ANOVA.

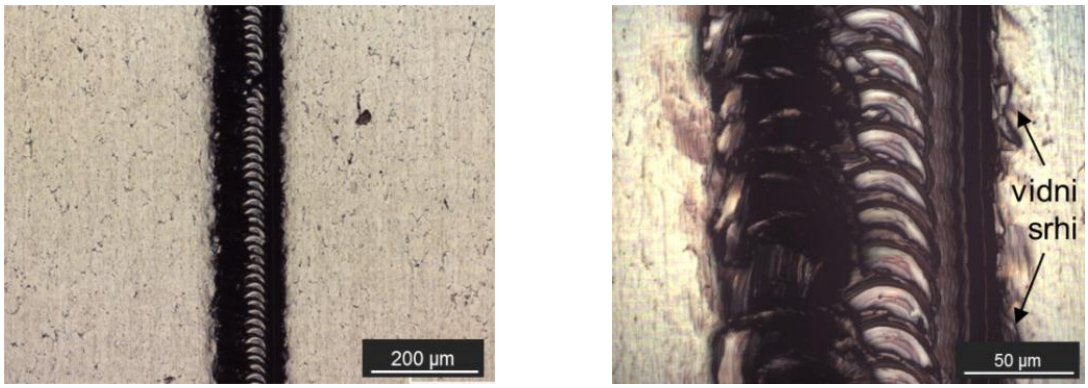
a)

b)



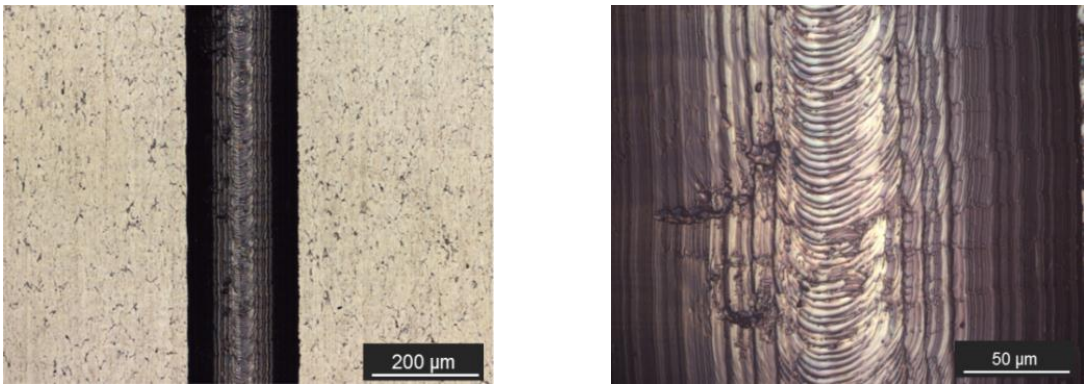
Slika 92: *Primer hrapavosti površine na dnu mikrofrezane gravure v različnih obdelovalnih razmerah: R= 100 µm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (a) in R = 200 µm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (b)*

a) b)



Slika 93: *Značilna topografija mikrofrezanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b); R = 100 µm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm*

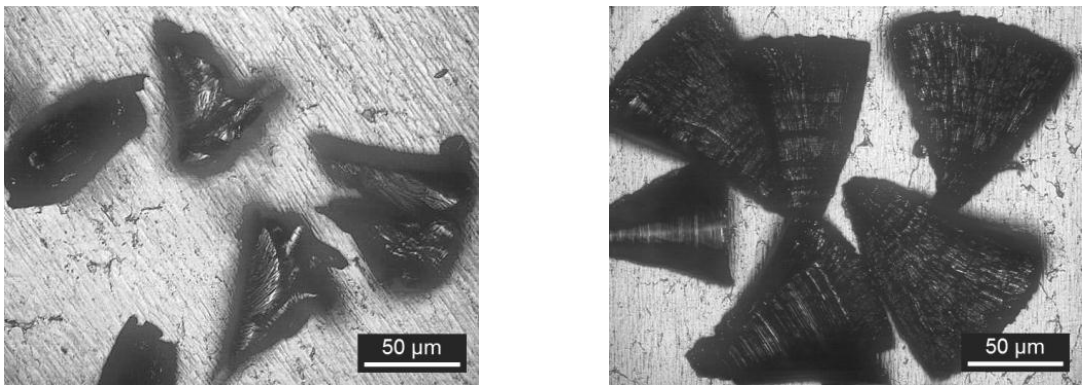
a) b)



Slika 94: *Značilna topografija mikrofrezanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b); R = 200 µm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm*

Pri mikrofrezanju se tvorijo odrezki s karakteristično stožčasto obliko. Tisti z relativno dobro izbiro parametrov obdelave imajo pravilno obliko, medtem ko imajo tisti, nastali pri neprimernih obdelovalnih parametrih, nesimetrično (deformirano) obliko. Na sliki 95 sta prikazana oba primera, posneta s konfokalnim optičnim mikroskopom. Prvi primer odrezkov na sliki 95a ustreza obdelavi profila na sliki 91a, drugi primer odrezkov na sliki 95b pa ustreza profilu obdelave na sliki 91b. Velikost odrezkov je 50–100 µm.

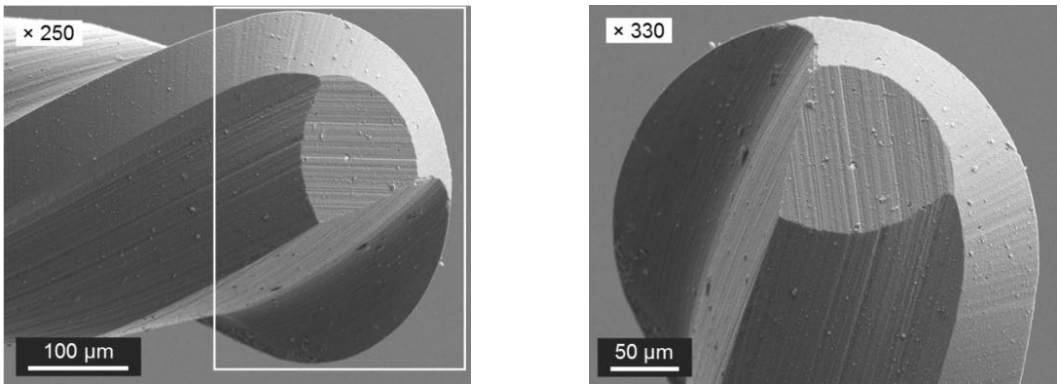
a) b)



Slika 95: *Topografski posnetki tipičnih mikrofrezanih odrezkov vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah pri 50-kratni povečavi: R = 100 µm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (a) in R = 200 µm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (b)*

Obraba orodja lahko bistveno vpliva na kakovost obdelane površine (povečanje hrapavosti), zato smo se ji želeli izogniti. Ob koncu izvedenih eksperimentov smo zato izvedli še SEM-analizo orodij in ocenili stopnjo obrabe. Ugotovili smo, da ta ni bila tolikšna, da bi vplivala na kakovost površine. Slika 96 prikazuje SEM-posnetek orodja z radijem 200 µm, ki je bil narejen po obdelavi vzorca.

a) b)

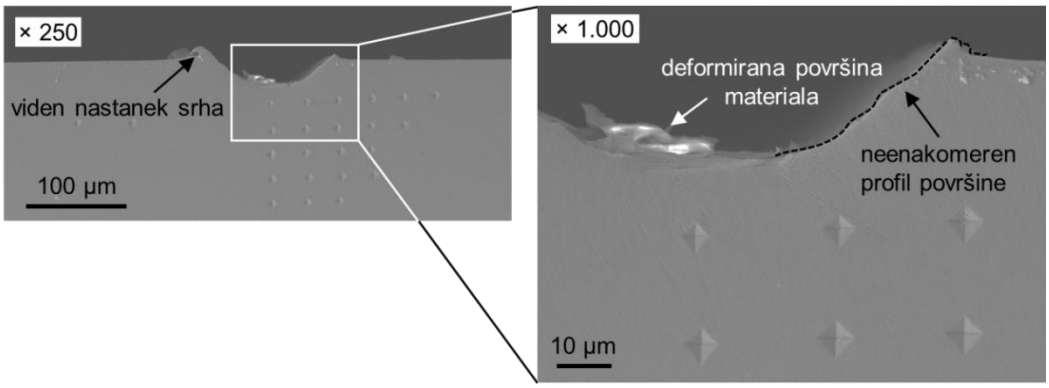


Slika 96: *SEM-posnetek mikrofrezala radija 200 µm po obdelavi pri 250- (a) in 330-kratni povečavi (b)*

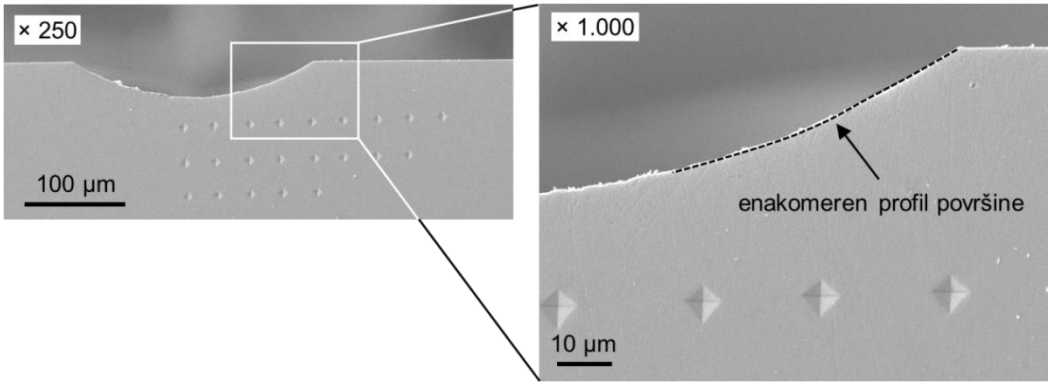
4.2.2 Utrjevanje

Načeloma pri mikrofrezanju ne nastaja utrjevanje materiala v globino. Ne glede na to smo pri vzorcih izmerili trdoto na prerezu gravure, če bi morebiti nastalo utrjevanje materiala na račun visokih vrtilnih hitrosti in s tem povezanega segrevanja materiala, ki jim je bil ta izpostavljen. Trdoto smo merili po enakem principu kakor pri razenju. Vizualno analizo smo opravili z vrstičnim elektronskim mikroskopom. Oba obravnavana vzorca z vidnimi vtisi merjenja trdote prikazuje slika 97.

a)



b)



Slika 97: *SEM-posnetek mikrofrezanega vzorca in vidni vtiski merjenja trdote v različnih obdelovalnih razmerah: R = 100 µm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (a) in R = 200 µm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 µm (b)*

V splošnem ugotavljamo, da se material v globino ne utrjuje. V kritičnih obdelovalnih razmerah, kot je primer na sliki 97a, se sicer pojavi določeno utrjevanje materiala, vendar pa to ne seže globlje od ≈ 20 μm. Kot smo že omenili, razmere pri tem profilu površine niso bile optimalne, zato bi lahko iskali vzrok za utrjevanje v preobremenitvi materiala oz. preveliki globini reza in premajhni vrtilni hitrosti. V drugem primeru, ko smo material obdelovali z večjim radijem orodja (R = 200 μm) in večji vrtilni hitrosti (v_c = 90 000 min^{-1}) efekta utrjevanja ni bilo zaznati. Trdoto na prerezu smo sicer merili, nismo pa je statistično analizirali.

4.2.3 Analiza ANOVA vplivnih parametrov

Podobno kot pri razenju smo analizo ANOVA izvajali po metodologiji DoE, prikazani v tabeli 13. Analizirali smo vpliv faktorjev mikrofrezanja na hrapavost obdelane površine R_a. Vhodni podatki oz. spremenljivi faktorji obdelave so bili: radij orodja (R), vrtilna hitrost orodja (v_c), podajalna hitrost orodja (v_t) in globina reza (h_g). Podobno kakor pri razenju smo analizo ANOVA izvajali pri 95-odstotni stopnji značilnosti. Za izvedbo analize smo uporabili dvofaktorski interakcijski (2FI) model in model vzvratne eliminacije. Da bi lahko dobili dobro prilagojen model z najvišjimi vrednostmi determinacijskih koeficientov, smo morali točke, ki so vidno izstopale v grafu rezidualov (točke 4, 6, 17, 23), eliminirati iz analize ANOVA. Te točke ustrezajo vzorcem, kjer je že sam profil vzorcev (pojav srhov in neenakomeren profil) nakazoval, da so obdelovalni parametri neustrezni. Rezultati analize ANOVA za hrapavost površine R_a in vpliv posameznih členov so prikazani v tabeli 14.

Tabela 14: *Rezultati analize ANOVA in vpliva posameznih faktorjev na signifikantnost spremenljivke R_a pri mikrofrezanju*

Faktor	R_a/HV
R/%	8
v_c/%	22
v_t/%	17
h_g/%	24
$R \cdot v_c$/%	-
$R \cdot v_t$/%	8
$R \cdot h_g$/%	8
$v_c \cdot v_t$/%	-
$v_c \ h_g$/%	12
$v_t \cdot h_g$/%	-
R^2	0,903
R^2_{Pril}	0,857
R^2_{Pred}	0,770
S/N	13,1

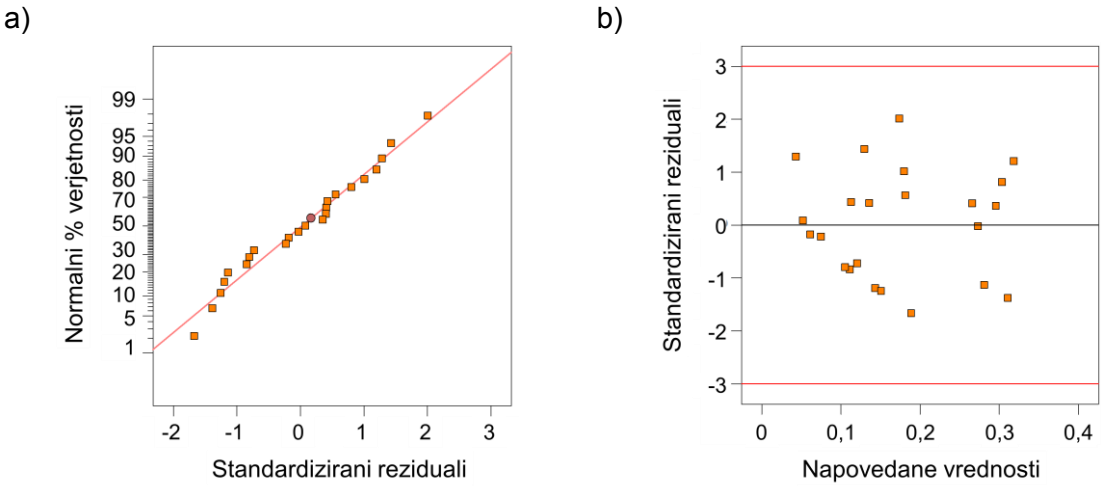
4.2.3.2 Analiza ANOVA hrapavosti obdelane površine R_a

Analiza ANOVA za hrapavost obdelane površine R_a nam je pokazala, da je izdelan model analize signifikanten. Pojasnimo ga lahko s 90,3 % vseh variacij. Prilagojeni in predvideni determinacijski koeficient sta dokaj visoka (R^2_{Pril} = 85,7 % in R^2_{Pred} = 77,0 %) in v dobrem medsebojnem razmerju (v okviru 10 %). Vrednost razmerja med signalom in šumom je tudi v sprejemljivih vrednostih (S/N = 13,1), tako da smo model lahko uporabili za navigacijo prostorskega oblikovanja.

Kljub povprečnim vrednostim analize ANOVA lahko z dovolj veliko gotovostjo interpretiramo dobljene statistične rezultate. Ugotavljamo, da je vpliv signifikantnih faktorjev dokaj enakomerno porazdeljen med posameznimi faktorji. Najsignifikantnejši vpliv na hrapavost obdelave imajo: globina reza h_g (prispevek 24 %), vrtilna hitrost v_c (prispevek 22 %), podajalna hitrost v_t (prispevek 17 %) in dvofaktorska interakcija vrtilne hitrosti in globine reza ($v_t \cdot h_g$), ki prispeva 12 %. Manjši vpliv ima radij orodja (R) kot samostojni člen in dvofaktorska interakcijska člena radija s podajalno hitrostjo ($R \cdot v_t$) ter radija z globino reza ($R \cdot h_g$). Vsak od teh prispeva 8 %. Model hrapavosti površine R_a smo zapisali z naslednjo polinomsko enačbo*:

$$R_a = 0{,}54 - 3{,}18 \cdot 10^{-3} \cdot R - 3{,}54 \cdot 10^{-6} \cdot v_c + 0{,}200 \cdot v_t - 0{,}0513 \cdot h_g - 2{,}15 \cdot 10^{-3} \cdot R \cdot v_t + 5{,}51 \cdot 10^{-4} \cdot R \cdot h_g + 1{,}26 \cdot 10^{-7} \cdot v_t \cdot h_g \quad (30)$$

Z grafa normalne verjetnosti rezidualov hrapavosti površine R_a (slika 98a) lahko ugotovimo, da so vrednosti točk dokaj pravilno prilagojene diagonali z minimalnimi odmiki, kar kaže linearno zvezo vrednosti. Graf normalne populacije (slika 98b) oz. graf napovedanih vrednosti z reziduali pa nam pokaže, da so vrednosti v prostoru dobro porazdeljene.



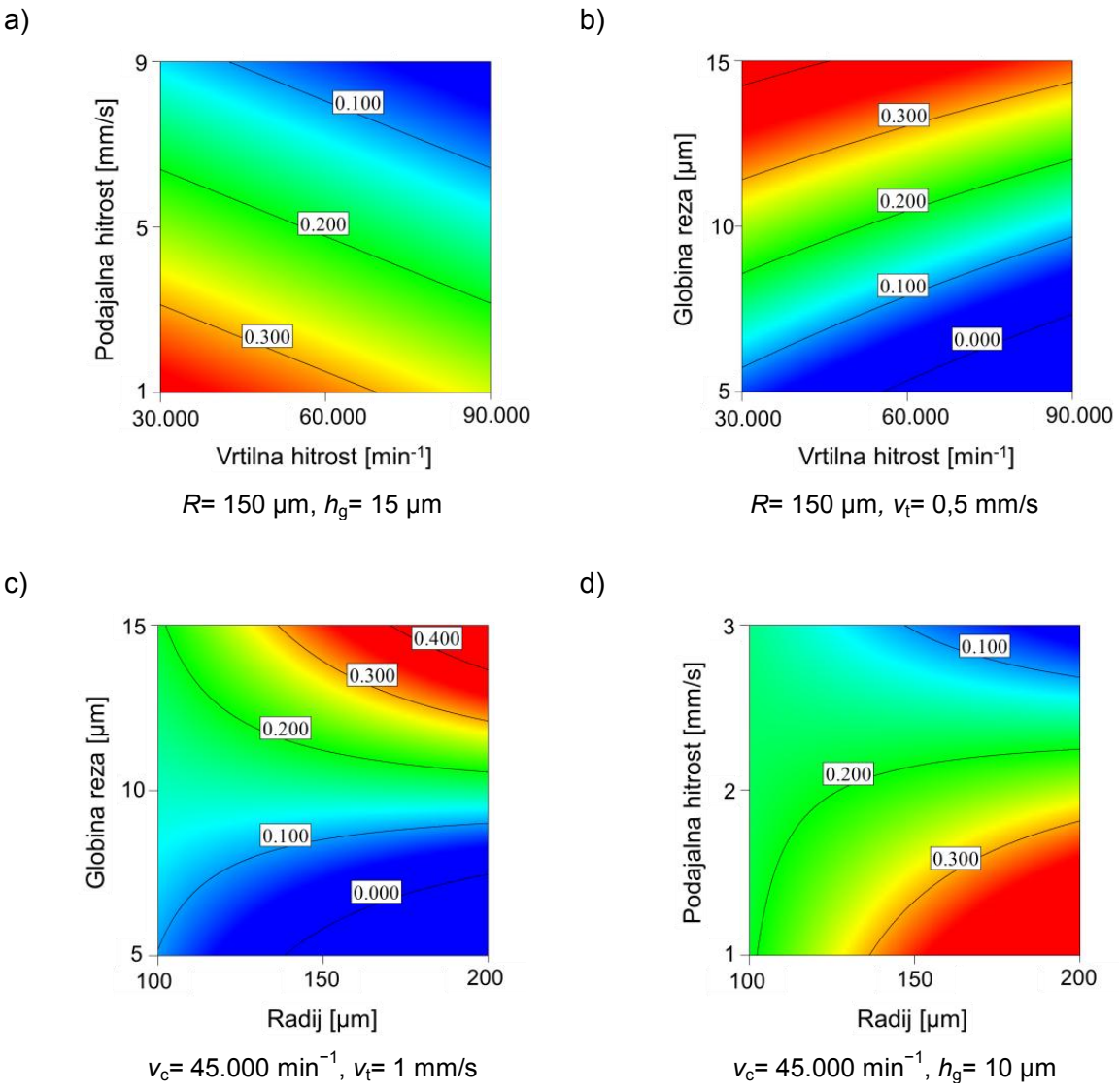
Slika 98: *Graf rezidualov razenja za R_a (a) in graf normalne porazdelitve rezidualov (b)*

Slika 99 prikazuje linearen vpliv signifikantnih faktorjev obdelave na hrapavost obdelane površine R_a. Graf na sliki 99a prikazuje, kako se z večanjem vrtilne hitrosti in podajalne hitrosti hrapavost površine linearno znižuje (izboljšuje). Toda slika 99b pa nakazuje, da se z večanjem globine reza hrapavost površine povečuje (slabša), ne glede na vrtilno hitrost orodja. Ta je sicer precej odvisna od velikosti orodja. Sprememba globine

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: R_a (µm), R (µm), v_c (min^{-1}),v_t (mm/s), h_g (µm)

reza pri orodjih z manjšim radijem bistveno manj vpliva na spremembo hrapavosti površine, kot ta vpliva pri orodjih z večjim radijem (R nad ≈ 200 µm), kar prikazuje slika 99c. Istočasno pa je s slike 99d razvidno, da ima pri manjših radijih sprememba podajalne hitrosti manjši vpliv na hrapavost površine kot ta pri orodjih z večjim radijem. Grafi prikazujejo zgolj hrapavost površine ob predpostavki, da se orodje ne obrablja.

V obzir je treba vzeti, da so mikrofrezala izpostavljena velikim obremenitvam in da lahko njihova obraba posledično vpliva tudi na kakovost obdelave. Na primer večja podajalna in vrtilna hitrost sicer omogočata boljšo hrapavost površine, istočasno pa povečujeta obremenitev orodja. Tako je iz vrste faktorjev obdelave treba poiskati dober kompromis med njimi, tako z vidika kakovosti površine, produktivnosti kot z vidika obstojnosti orodja.



Slika 99: *Vpliv faktorjev obdelave na hrapavost površine R_a; vpliv vrtilne hitrosti in podajalne hitrosti (a), vrtilne hitrosti in globine reza (b), radija orodja in globine reza (c) ter radija orodja in podajalne hitrosti (d)*

4.2.5 Sklep

Statistična analiza ANOVA hrapavosti obdelane površine pri mikrofrezanju nam je dala manj zanesljive rezultate. Nizke vrednosti determinacijskih koeficientov lahko pripišemo najmanj trem dejavnikom: izbiri faktorjev obdelave, določanju izhodiščne točke obdelave in togosti stroja.

V eksperimentalnem delu smo želeli zajeti kar največji razpon obdelovalnih parametrov, ki jih stroj omogoča. S tem smo želeli v največji mogoči meri izkoristiti tehnične zmožnosti stroja in povečati produktivnost izdelave gravur. Tako smo eksperimente izvajali v precej širokem razponu vrtilne hitrosti od 30 000 min^{-1} do 90 000 min^{-1}. Na račun povečane vrtilne hitrosti smo globino reza povečali za ≈ 15 μm nad priporočljivo vrednostjo (≈ 15 μm) in maksimalno podajalno hitrost za 2 mm/s nad maksimalno priporočljivo ≈ 4 mm/s.

Nižjim statističnim vrednostim lahko pripišemo tudi odsotnosti merilnega senzorja, namenjenega pozicioniranju izhodiščne (ničelne) točke obdelave. Ta je nujen pri zagotavljanju želene globine obdelave. Sistem, ki smo ga v našem eksperimentalnem delu uporabili, je sicer funkcionalen, vendar ne dovolj zanesljiv, da bi lahko z dovolj veliko natančnostjo zagotavljali stabilnost obdelavo. Globina odrezovanja v našem primeru variira v razponu ± 5 μm, kar je skoraj toliko, kolikor je bil razpon med globinami odrezovanja.

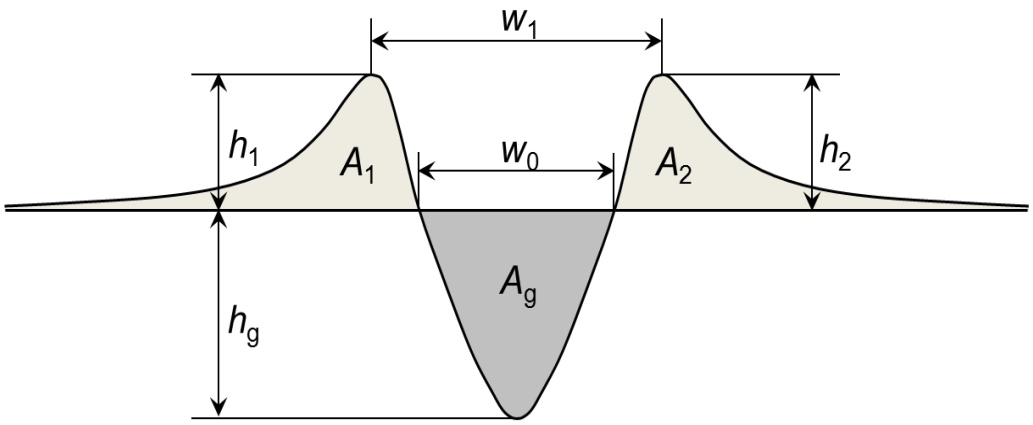
Pri obdelavi se je pojavilo tudi neželeno opletanja orodja. To je razvidno s slik 91a in b, 93 in 97a, kjer je viden neenakomeren profil gravure. Natančnejši obdelovalni centri zagotavljajo stabilnost obdelave v okviru 1 μm, opletanje pa 1,5 μm. Predvidevamo, da je za natančnejšo obdelavo (kot je naša) stroj premalo tog.

Kljub omenjenim pomanjkljivostim lahko sklepamo naslednje: na hrapavost obdelave v primerljivi meri vplivajo tako vrtilna hitrost, podajalna hitrost in globina odrezovanja. Slednja ima sicer največji vpliv. Če bi torej želeli dobiti finejšo hrapavost obdelane površine (bolj gladko površino), bi bilo treba frezati z manjšo globino reza. Pri tem sicer podaljšamo čas obdelave, vendar pa je površina kvalitetnejša, obremenitve orodja pa manjše.

4.3 Laserska mikroobdelava

Pri laserski obdelavi nastane pretaljevanje in odparevanje materiala, zato pravimo, da gre za termično obdelavo z odvzemanjem materiala. Pri laserski obdelavi se na mestu obsevanja z laserskim žarkom material segreje do te stopnje, da na tem mestu nastane kanal površine A_g. Pri premikanju laserskega žarka po materialu se na vsaki strani kanala tvorita grebena (A_1 in A_2) s skupno površino A_r. Nasprotno od razenja sta iz geometrijskega vidika vrednosti obeh površin (A_g in A_r) neodvisni. To lahko pripišemo pretaljevanju in odparevanju materiala, ki nastaja pri laserski obdelavi. V eksperimentalnem delu smo poleg teh dveh veličin analizirali tudi globino kanala (h_g), višino grebena (h_r), izračunano kot povprečno vrednost obeh grebenov $(h_1 + h_2)/2$, širino kanala na ničelni višini (w_0), širino kanala od grebena do grebena (w_1) in hrapavost obdelane površine (R_a). Geometrijske vrednosti so shematično prikazane na sliki 100.

Utrjevanje vzorcev smo spremljali po enakem postopku in z enakimi karakterističnimi vrednostmi kakor predhodna dva postopka, in sicer z naslednjimi vrednostmi: razpon utrjevanja v prečni smeri (σ_x), razpon utrjevanja v vzdolžni smeri (σ_y) in razmerje med ekstrapolirano maksimalno trdoto in trdoto osnovnega materiala (H_{max}/H_0).



Slika 100: *Analizirane mere profila kanala laserske obdelave*

Eksperimente smo izvajali po načrtu DoE, prikazanem v tabeli 4, faktorji obdelave so prikazani v tabeli 10, eksperimentalni rezultati pa v tabeli 15. Načeloma se pri laserski obdelavi material lahko tudi utrdi, vendar pa je utrjevanje odvisno od vnesene energije in kemijske sestave materiala [64, 65]. V našem primeru obdelujemo nerjavno jeklo z relativno nizkimi energijami, kjer kanal gravure ne presega globine 5 µm. Predvidevamo, da se material sicer na površini nekoliko utrdi, vendar pa utrjevanje ne bi smelo segati globlje od 5 µm. Trdoto smo sicer izmerili, vendar pa je nismo posebej analizirali, ker je bila globina utrjevanja premajhna. Podobno kot predhodna dva eksperimentalna postopka smo tudi pri tem s programskim paketom Design-Expert statistično analizirali značilne eksperimentalne vrednosti.

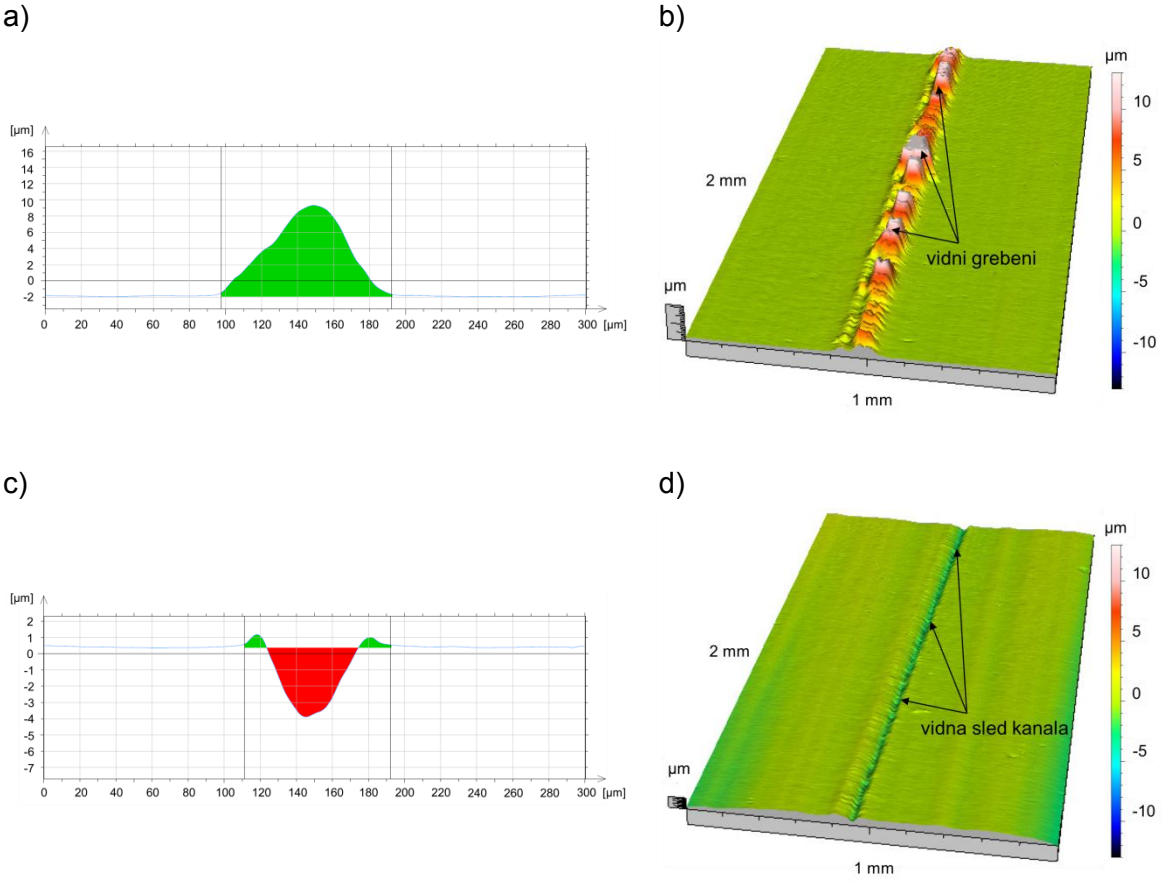
Tabela 15: *Eksperimentalni načrt DoE in rezultati izmerjenih vrednosti pri laserski obdelavi*

Set	f_p/ kHz	P/ W	v_t/ (mm/s)	z/ µm	A_p/ %	A_g/ µm^2	A_r/ µm^2	h_g/ µm	h_r/ µm	w_0/ µm	w_1/ µm	R_a/ µm
1	50	10	5	0	99,5	140	61,3	4,71	1,11	50,9	61,9	3,80
2	50	10	15	1	98,5	4,98	107	0,34	1,10	35,5	71,4	0,178
3	50	10	30	2	97,0	0,00	0,02	0,00	11,7	14,6	64,1	0,108
4	50	12	5	1	99,5	167	111	3,68	1,30	75,7	88,3	0,255
5	50	12	15	2	98,5	12,9	123	0,85	1,31	0	1,00	1,173
6	50	12	30	0	97,0	0,00	539	0	1,10	0	1,43	0,898
7	50	15	5	2	99,5	202	149	3,85	1,40	96,9	122	0,296
8	50	15	15	0	98,5	11,2	471	1,52	8,04	20,2	71,3	1,86
9	50	15	30	1	97,0	0	668	0	11,7	0	2,30	3,28
10	100	10	5	0	99,8	119	78	3,94	9,14	52,7	63,2	0,185
11	100	10	15	1	99,3	0,03	120	0,01	1,28	21,6	61,4	0,178
12	100	10	30	2	98,5	0	83,6	0	1,65	10,2	48,7	0,033
13	100	12	5	1	99,8	148	95,5	4,43	1,66	65,4	89,5	0,135
14	100	12	15	2	99,3	8,42	147	0,86	1,54	36,9	75,9	0,209
15	100	12	30	0	98,5	4,97	50,5	0,58	1,24	43,9	55,3	0,137
16	100	15	5	2	99,8	168	159	3,95	1,36	80,3	119	0,145
17	100	15	15	0	99,3	15,0	530	1,86	1,06	18,0	66,1	5,15
18	100	15	30	1	98,5	1,93	119	0,28	1,29	29,5	61,0	0,088
19	150	10	5	0	99,8	116	93,9	3,86	5,59	54,0	62,8	0,256
20	150	10	15	1	99,5	2,37	119	0,26	1,29	21,6	62,1	0,166
21	150	10	30	2	99,0	0	106	0	1,65	0	53,6	0,137
22	150	12	5	1	99,8	119	144	3,91	1,02	62,0	90,1	0,189
23	150	12	15	2	99,5	6,71	141	0,62	1,44	31,7	77,2	0,19
24	150	12	30	0	99,0	0,03	75,8	0,02	1,21	31,2	57,5	0,175
25	150	15	5	2	99,8	132	203	4,26	1,54	68,5	123	0,176
26	150	15	15	0	99,5	37,9	524	3,91	1,22	29,5	69,8	3,17
27	150	15	30	1	99,0	0,46	123	0,10	1,25	22,9	59,2	0,151

4.3.1 Topografske značilnosti

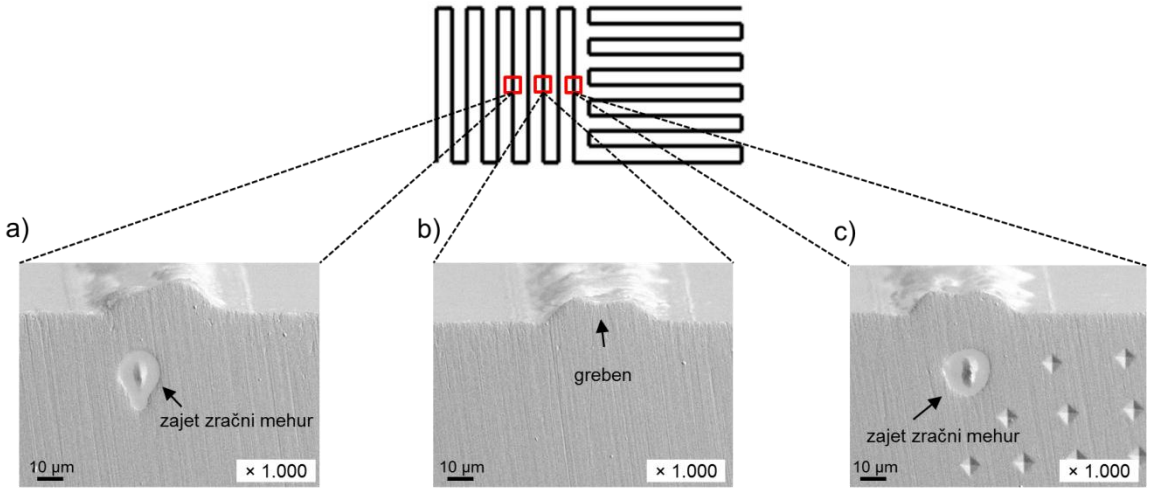
Pri interakciji laserskega žarka s površino materiala pri spremenljivih faktorjih obdelave smo ugotovili, da dobimo različne profile vzorcev (netipične in tipične). Sicer smo se pri izvedbi eksperimentov skušali izogniti faktorjem laserske obdelave, pri katerih se pojavi na površini materiala samo greben (netipičen profil). Od skupno 27 izvedenih vzorcev so se pojavili tudi štirje takšni (vzorec 6, 9, 12 in 21), kot prikazuje profil na sliki 60a. V tem primeru je prišlo do netipičnega mehanizma pretaljevanja in strjevanja materiala [64].

V nadaljevanju dela smo analizirali vse obravnavane vzorce, podrobneje pa sta predstavljena le dva (netipičen in tipičen) eksperimentalna vzorca. V prvem primeru na slikah 101a in b je prikazan linijski in 3D-profil obdelanega vzorca, kjer se na površini materiala pojavi samo greben. V drugem primeru je prikazan profil vzorca s kanalom in grebenoma na vsaki strani kanala (sliki 101c in d).



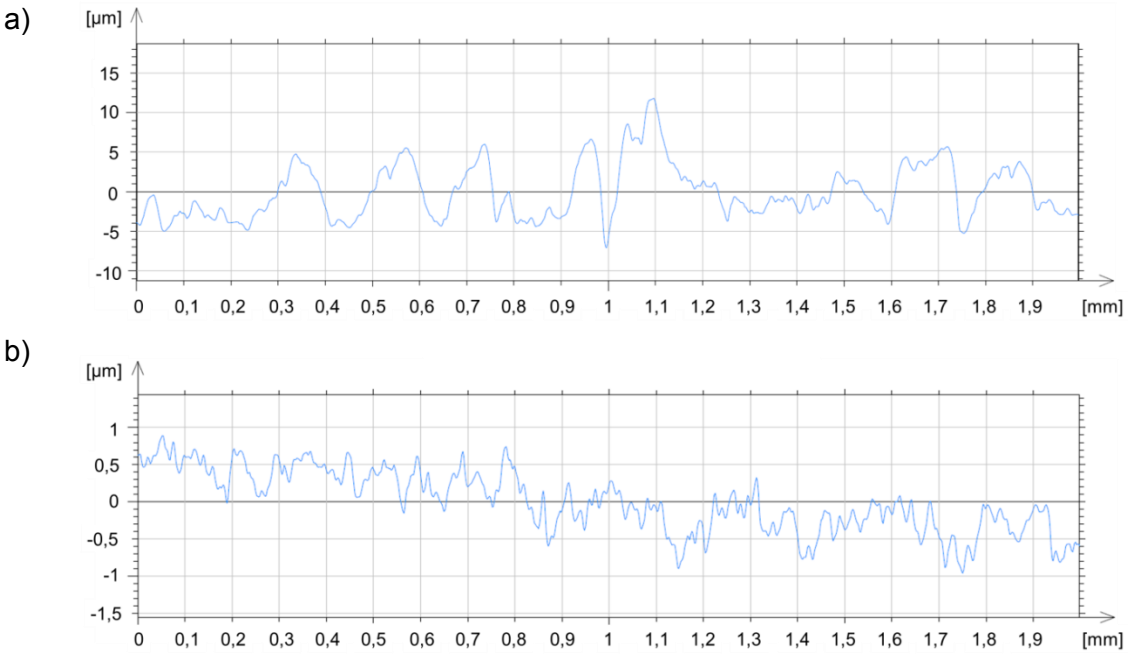
Slika 101: *2D-profil (a, c) in 3D-profil (b, d) dveh karakterističnih lasersko obdelanih vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah:* f_p *= 50 kHz,* P *= 15 W,* v_t *= 30 mm/s,* z *= 1 mm (a, b) in* f_p *= 100 kHz,* P *= 10 W,* v_t *= 5 mm/s,* z *= 0 mm (c, d)*

Prerez gravure vzorca s slike 101a smo podrobneje analizirali z vrstičnim elektronskim mikroskopom. Iz SEM-analize smo ugotovili, da se je na mestu grebena v materialu na globini ≈ 20 µm pojavil zajet zračni mehur prereza ≈ 177 µm^2. Primer tega je prikazan na sliki 102. Na podlagi analize lahko trdimo, da gre za mehur, ki ne tvori sklenjene votline, kar prikazuje posnetek na sliki 102b.



Slika 102: *SEM-posnetek lasersko obdelanega vzorca z zajetim zračnim mehurjem in nastalim grebenom, f_p = 50 kHz, P = 15 W, v_t = 30 mm/s, z = 1 mm*

Nehomogenost v materialu se navzven izraža v obliki neenakomernega profila površine materiala (hrapavost površine), kar nam prikazuje profil hrapavosti površine (profil grebena) na sliki 103a. Profil hrapavosti površine, kjer se pojavljata tako kanal kot greben, nam prikazuje slika 103b. S primerjavo obeh profilov lahko ugotovimo, da je hrapavost površine slednjega bistveno manjša in se razlikuje za faktor velikosti 2–3-krat.

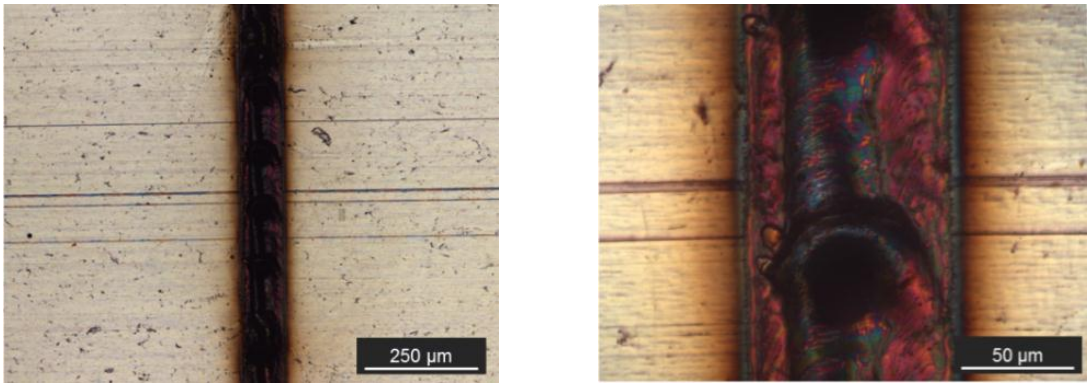


Slika 103: *Primer hrapavosti površine na dnu laserske gravure: f_p = 50 kHz, P = 15 W, v_t = 30 mm/s, z = 1 mm; R_a = 3,28 µm (a) in f_p = 100 kHz, P= 10 W, v_t = 5 mm/s, z = 0 mm; R_a = 0,185 µm (b)*

Vzorce smo pregledali in posneli s konfokalnim optičnim mikroskopom. Na sliki 104 in sliki 105 sta prikazana oba primera si iz slike 101. Iz prvega primera, kjer je na vzorcu nastal greben (slika 104), je razvidno, da se nepravilnosti na površini materiala

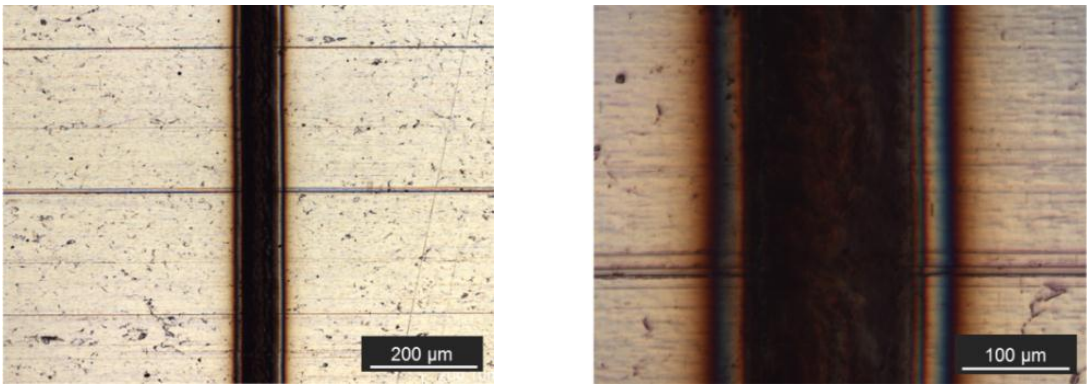
pojavljajo na videz v enakomernih presledkih (≈ 100 µm). V drugem primeru na sliki 105 ni vidnih večjih površinskih nepravilnosti, obdelana površina pa je v tem primeru bolj enakomerna.

a) b)



Slika 104: *Značilna topografija lasersko obdelanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b);* f_p *= 50 kHz, P = 15 W,* v_t *= 30 mm/s, z = 1 mm*

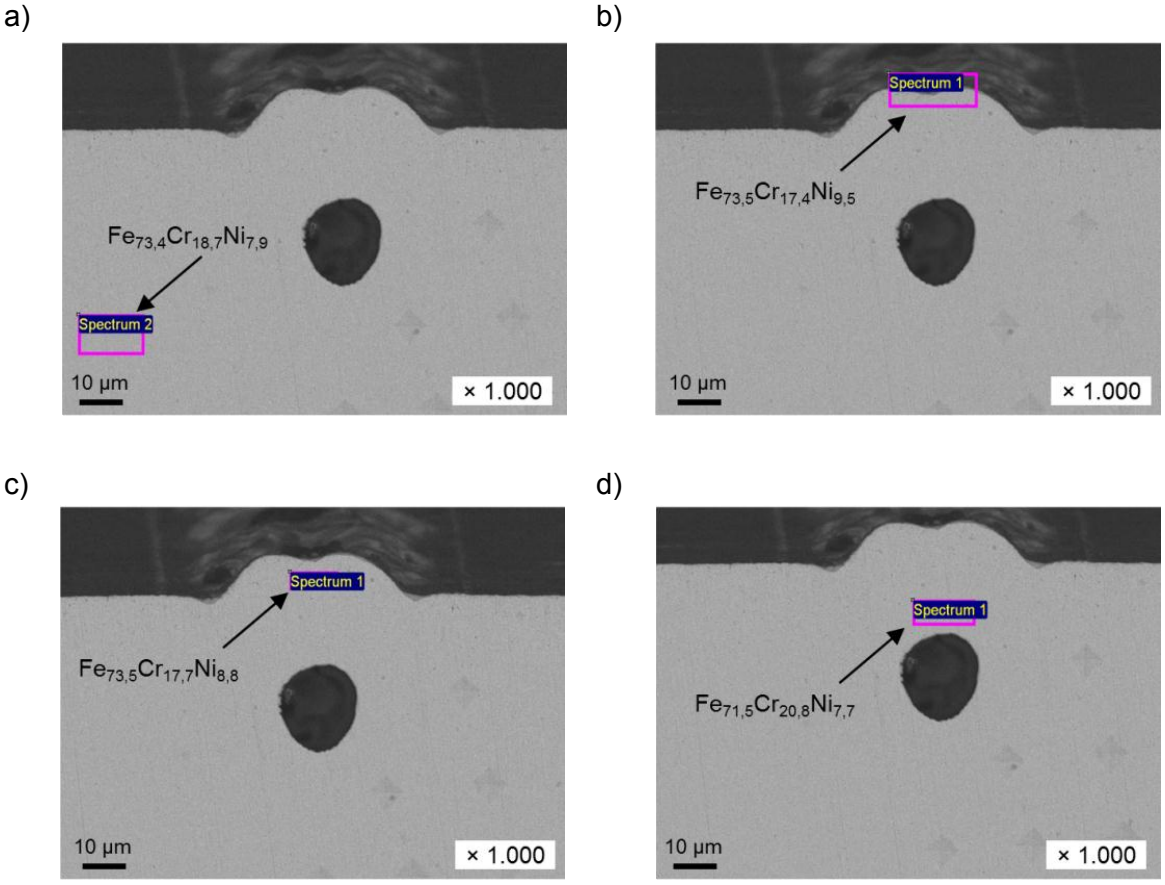
a) b)



Slika 105: *Značilna topografija mikrofrezanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b);* f_p *= 100 kHz, P = 10 W,* v_t *= 5 mm/s, z = 0 mm*

4.3.2 Kemijski procesi in utrjevanje

Analizirali smo vpliv laserske obdelave in pretaljevanja materiala na kemijsko sestavo. Na sliki 106 so prikazana merilna mesta in kemijska sestava materiala na nekaterih mestih. Slika 106a prikazuje vrednosti osnovnega materiala. V nadaljevanju so prikazane tri zaporedne meritve, in sicer na mestu laserske obdelave tik pod površino materiala (slika 106b), na globini ≈ 10 µm (slika 106c) in ≈ 20 µm (slika 106d). Ugotovili smo, da se kemijska sestava lasersko obdelanega vzorca v globino bistveno ne spreminja. V primerjavi z vrednostjo osnovnega materiala je na površini laserske obdelave materiala sicer zaznati nekoliko povečan delež kroma (≈ 10 %), v globini do 20 µm pa nekoliko manjši (≈ 5 %). Nasprotno velja za vsebnost niklja. Ta ima tik pod površino laserske obdelave podobno vrednost kot osnovni material, medtem ko se na mestu obdelave v globini nekoliko poveča (≈ 10– 20 %).

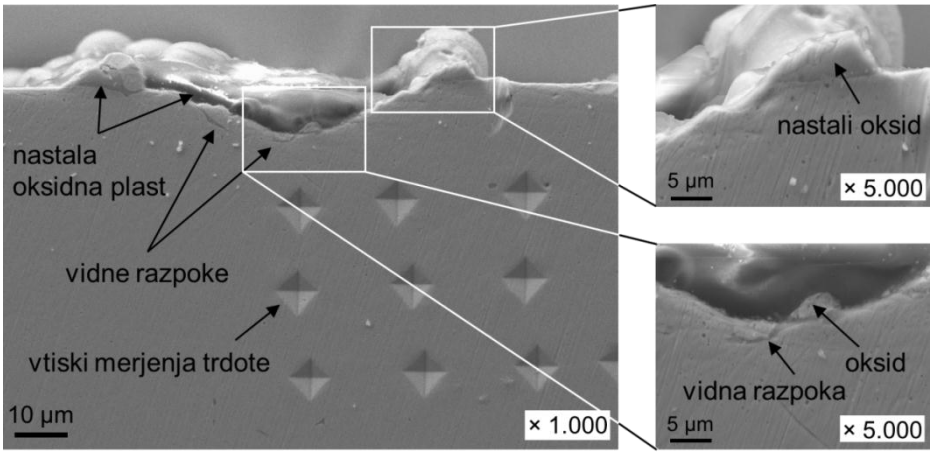


Slika 106: *Analiza kemijske sestave lasersko obdelanega vzorca*

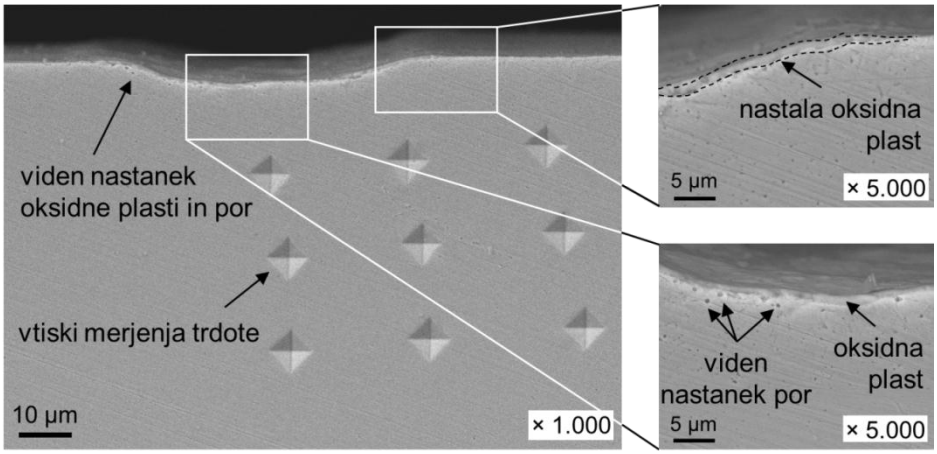
Iz SEM-analize smo ugotovili, da se je kot posledica laserske obdelave in oksidacije pri visoki temperaturi na površini materiala tvorila tanka oksidna plast. Njena debelina ni presegla 3 µm. Podobno velja za nastajanje razpok in por v materialu. Čim večja je intenziteta laserskega žarka, tem večja je velikost gravure (kanala in grebena), oksidna plast je izrazitejša, nevarnost nastajanja por in razpok v materialu pa je tudi večja. Zgled takšnega vzorca prikazuje slika 107a (vzorec 26). Moč laserskega žarka je bila v tem primeru 15 W, frekvenca pulziranja 150 kHz, žarišče laserskega žarka pa je bilo pozicionirano na površini obdelovanca. V drugem primeru na sliki 107b, ko je bila moč laserskega žarka nižja (10 W), hitrost pomika prav tako (5 mm/s), je profil obdelane površine bistveno bolj enakomeren, tipičnih grebenov gravure pa skorajda ni videti. Oksidna plast in pore se sicer pojavijo, večjih razpok v materialu pa pri takšnih faktorjih obdelave tudi ni.

Z obeh slik (slika 107a in b) je tudi razvidno, da so merilni odtisi približno enako veliki, kar nakazuje, da pri laserski obdelavi materiala AISI 304 ne nastane utrjevanje materiala v globino.

a)



b)



Slika 107: *SEM-posnetka lasersko obdelanih vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah z vidnimi napakami in vtiski merjenja trdote: f_p = 150 kHz, P = 15 W, v_t = 15 mm/s, z = 0 mm (a) in f_p = 150 kHz, P = 10 W, v_t = 5 mm/s, z = 0 mm (b)*

4.3.3 Analiza ANOVA vplivnih parametrov

Rezultati meritev, prikazani v tabeli 15, so bili vhodni podatki statistične analize programa Design-Expert. Vrednosti pri vzorcih, kjer so se pojavili samo grebeni (vzorec št. 6, 9 in 21) so vidno izstopale v grafu rezidualov, zato smo te eksperimente izločili iz analize ANOVA. Ugotovili smo, da ima izbran kvadratni model ANOVA najvišje vrednosti determinacijskih koeficientov (R^2), zato smo ga tudi uporabili za izvedbo analize. Podobno kakor predhodna eksperimentalna postopka smo analizo ANOVA izvajali pri 95-odstotni stopnji značilnosti in modelu vzvratne eliminacije. Na osnovi izvedene analize smo za vsako spremenljivko posebej zapisali značilno polinomsko enačbo modela. Izračunane vrednosti ANOVA in vpliv posameznih faktorjev na analizirane spremenljivke so prikazani v tabeli 16.

ANOVA nam je za vsako analizirano vrednost pokazala, da so vsi izdelani modeli analize signifikantni. Iz rezultatov analize lahko ugotovimo, da nam je za vse spremenljivke, razen za hrapavost obdelane površine (R_a), uspelo dobiti sprejemljive vrednosti determinacijskih koeficientov. Te so za vse primere razen za R_a večji od prvotno izbrane (S/*N* > 10). V nadaljevanju so prikazani rezultati posameznih analiz.

Tabela 16: *Rezultati analize ANOVA in vpliva posameznih faktorjev na signifikantnost spremenljivk pri laserski mikroobdelavi*

Faktor	A_g	A_r	h_g	h_r	w_1	w_0	R_a
f_p/%	-	-	-	-	-	9	100
P/%	3	35	9	22	8	2	-
v_t/%	69	17	74	15	57	51	-
z/%	-	12	4	22	23	2	-
$f_p \cdot P$/%	-	-	-	-	-	-	-
$f_p \cdot v_t$/%	-	-	-	-	-	-	-
$f_p \cdot z$/%	-	-	-	-	-	7	-
$P \cdot v_t$/%	2	-	2	-	-	-	-
$P \cdot z$/%	-	36	-	41	-	3	-
$v_t \cdot z$/%	-	-	2	-	9	4	-
f_p^2/%	-	-	-	-	-	-	-
P^2/%	-	-	-	-	-	4	-
v_t^2/%	26	-	9	-	3	17	-
z^2/%	-	-	-	-	-	-	-
R^2	0,957	0,860	0,943	0,828	0,958	0,978	0,225
R^2_{Pril}	0,949	0,833	0,923	0,790	0,947	0,963	0,188
R^2_{Pred}	0,931	0,794	0,878	0,707	0,925	0,917	0,035
S/N	24,4	16,1	16,3	14,9	27,1	29,1	4,33

4.3.3.1 Analiza ANOVA površine kanala na prerezu A_g

Dobljena vrednost determinacijskega koeficienta (R^2) za A_g razlaga 96,4 % vseh variacij z upoštevanjem vseh signifikantnih faktorjev, opisanih z modelom. Druga dva determinacijska koeficienta R^2_{Pril} in R^2_{Pred} sta visoka (nad 93 %) in v dobrem medsebojnem razmerju. Eksperimentalni rezultati in analiza ANOVA so nam pokazali, da ima skenirna hitrost v_t najsignifikantnejši vpliv na A_g (linearni prispevek 69 % in kvadratni prispevek 26 %). Manjši vpliv na A_g ima moč laserskega žarka P in dvofaktorski interacijski člen moči in skenirne hitrosti ($P \cdot v_t$). Prvi faktor prispeva 3 % in drugi 2 %. Frekvenca pulziranja f_p in pomik žarišča z (v okviru 2 mm) nimata vpliva na A_g, kakor tudi vsi drugi mešani členi faktorjev. Model za A_g je zapisan z naslednjo polinomsko enačbo[002A]:

$$A_g = 82{,}3 + 18{,}0 \cdot P - 19{,}7 \cdot v_t - 0{,}608 \cdot P \cdot v_t + 0{,}577 \cdot v_t^2 \qquad (31)$$

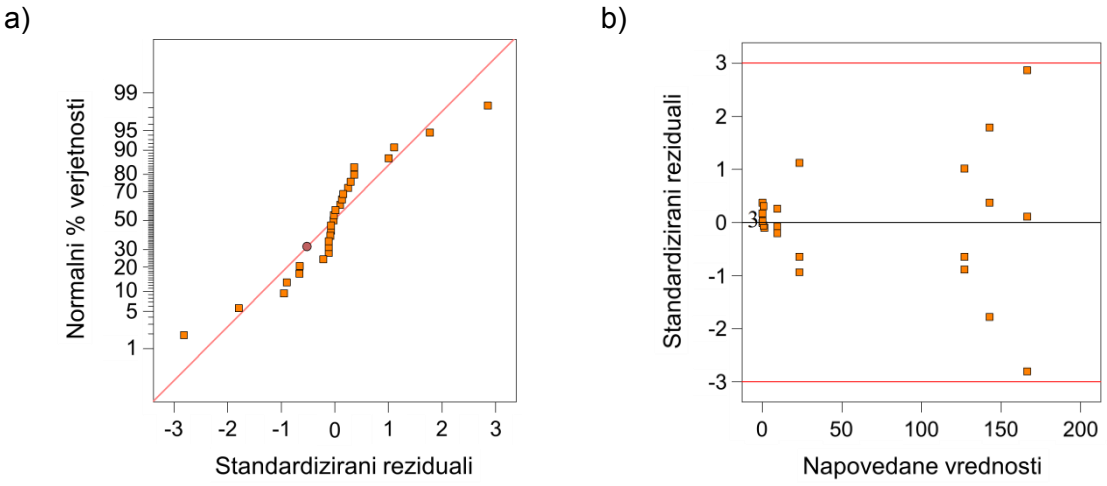
Kot smo že omenili, smo morali za korektno analizo ANOVA nekaj vrednosti vzorcev eleminirati (vzorce 6, 9 in 21). Tako smo dobili dobro razporeditev točk, ki jo prikazujeta graf porazdelitve rezidualov za A_g v razsevnem grafikonu na sliki 108a in graf normalne porazdelitve rezidualov na sliki 108b.

Vpliv skenirne hitrosti in moči laserskega žarka na A_g nam prikazuje graf na sliki 109. Z grafa je razvidno, da A_g narašča z močjo laserskega žarka in pada s skenirno hitrostjo, kar je bilo pričakovati [116]. Na primer, če bi želeli kanal v materialu povečati za ≈ 25 μm^2, bi bilo treba moč laserskega žarka povečati za ≈ 5 W, kar je veliko za te tipe laserjev. Enak učinek lahko dosežemo, če skenirno hitrost laserskega žarka zmanjšamo za

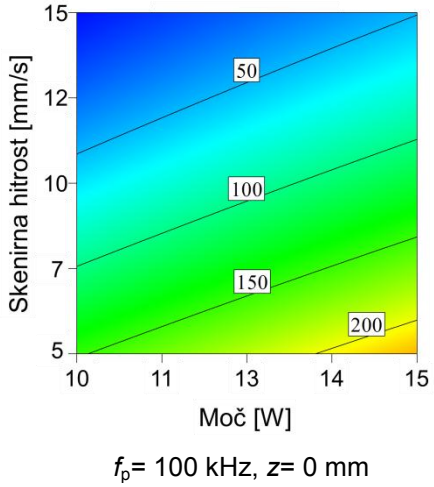
[*] Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: A_g (μm^2), P (W), v_t (mm/s)

samo ≈ 1,3 mm/s. Z drugega vidika pa to pomeni, da moramo biti pri doseganju želene velikosti kanala zelo pozorni pri izbiri ustrezne skenirne hitrosti. Že majhni odmiki skenirne hitrosti nam lahko dajo bistveno drugačne rezultate od želenih.

Do podobnih ugotovitev sta prišla Saklakoglu in Kasman [116], ki sta poleg moči, frekvence pulziranja in hitrosti skeniranja spremljala vpliv prekrivanja žarkov (prekrivanje med dvema zaporednima laserskima žarkoma), ki je bilo v njunem primeru od ≈ 45 % do 99 %. Skenirna hitrost je močno povezana s prekrivanjem laserskih žarkov, kot je to bilo predstavljeno v poglavju 3.1.5. Ta je skupaj s frekvenco neposredno povezana s prekrivanjem. Pri manjših hitrostih je prekrivanje laserskih žarkov večje, kar pomeni, da laserski žarek vpliva na predhodno območje laserskega žarka (predhodni laserski pulz), s tem je segrevanje površine materiala izdatnejše, ohlajanje materiala pa počasnejše. Do podobnih sklepov so prišli tudi Campanelli in sodel. [121], Wendland in sodel. [122] ter Leoneja [123].



Slika 108: *Graf rezidualov laserske mikroobdelave za A_g (a) in graf normalne porazdelitve rezidualov (b)*



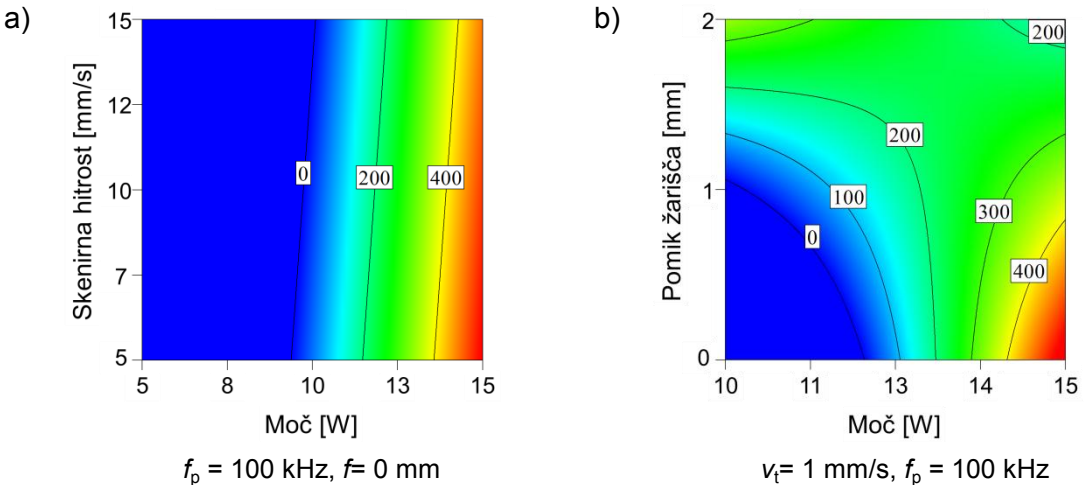
Slika 109: *Vpliv moči in skenirne hitrosti na površino kanala A_g*

4.3.3.3 Analiza ANOVA površine grebena na prerezu A_r

Analiza ANOVA površine grebena na prerezu A_r nam je dala nekoliko nižje vrednosti determinacijskih koeficientov, vendar so ti kljub temu v sprejemljivih mejah za oblikovanje njenega modela. Ugotovili smo, da ima nasprotno od analize A_g moč laserskega žarka P bistveno večji vpliv na A_r. Ta prispeva 35 % v modelu, v interakciji s pomikom žarišča ($P \cdot z$) pa 36 %. Pomemben vpliv na A_r imata skenirna hitrost v_t (prispevek 17 %) in pomik žarišča z (prispevek 12 %). Frekvenca pulziranja f_p kot samostojni faktor in vse druge interakcije nimajo vpliva na A_r. Enačbo modela za A_r smo zapisali v naslednji obliki*:

$$A_r = -860 + 95{,}3 \cdot P - 6{,}83 \cdot v_t + 652 \cdot z - 56{,}7 \cdot P \cdot z \qquad (32)$$

Na sliki 110 je prikazan vpliv faktorjev laserske obdelave na površino grebena A_r. V prvem primeru na sliki 110a je prikazan linearen vpliv moči in skenirne hitrosti na A_r. Ugotavljamo, da A_r z večanjem moči laserskega žarka narašča, medtem ko s skenirno hitrostjo pada. Vpliv skenirne hitrosti ni tako izrazit, kot je vpliv moči. Na primer, že majhna sprememba moči, npr. za 1 W, lahko povzroči povišanje grebenov za ≈ 100 µm^2, medtem ko bi morali skenirno hitrost za isto vrednost A_r zmanjšati za ≈ 10 mm/s. Ugotavljamo tudi, da pri moči manjši od ≈ 9–10 W greben ne nastane, izbrati pa je treba tudi večjo skenirno hitrost. Iz prejšnjega primera pa smo ugotovili, da ima slednja izrazit vpliv pri določanju velikosti površine kanala. Torej pri določanju primerne gravure je treba iskati kompromis med obema spremenljivkama. Iz drugega primera na sliki 110b pa je razvidno, da s pomikom žarka iz žarišča pri nižjih močeh A_r narašča in pri višjih močeh laserskega žarka (P < 12,5 W) ta pada.



Slika 110: *Vpliv faktorjev obdelave na površino grebena raze A_r; vpliv moči in skenirne hitrosti (a) ter moči in pomika žarišča (b)*

4.3.3.4 Analiza ANOVA globina kanala h_g

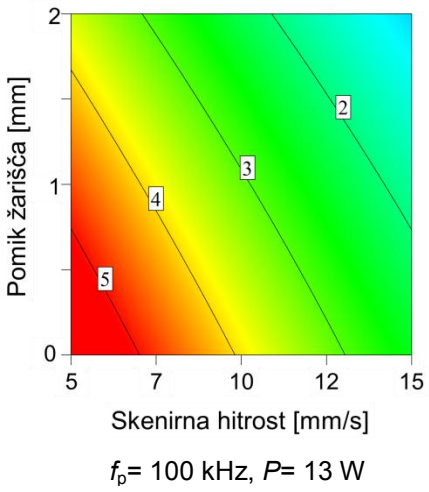
Visoke vrednosti determinacijskih koeficientov za h_g so nam potrdile velik delež pojasnjene variance (R^2 = 96,8 %, R^2_{Pril} = 96,2 %, R^2_{Pred} = 94,9 %). Analiza ANOVA nam je pokazala močno korelacijo obeh vrednosti h_g in A_g, saj je vpliv faktorjev obdelave na obe vrednosti zelo podoben. Skenirna hitrost v_t (linearni prispevek 74 % in kvadratni

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: A_r (µm^2), P (W), v_t (mm/s), z (mm)

prispevek 9 %) ter moč P (prispevek 9 %) sta najvplivnejša faktorja s to razliko, da na h_g vpliva tudi pomik žarišča laserskega žarka z (prispevek 4 %) in dvofaktorski interakcijski člen skenirne hitrosti in pomika žarišča ($v_t \cdot z$). Slednji prispeva 2 % v modelu. Podobno kot pri A_g ima na h_g manjši vpliv tudi dvofaktorski interakcijski člen moči s skenirno hitrostjo ($P \cdot z$). Ta tudi prispeva 2 % v modelu, medtem ko frekvenca pulziranja f_p nima vpliva na h_g. Te ugotovitve so v dobrem soglasju z nekaterimi ugotovitvami Saklakogla in Kasmana [116], Campanellija s sodel. [121] in Krutha in Yasa [124] ter Zaka in Shiuja [125].
Saklakoglu in Kasman [116] sta izvajala eksperimente pri dosti nižjih frekvencah pulziranja (20–40 kHz) in ugotovila, da imata tako skenirna hitrost kot moč laserskega žarka največji vpliv na globino kanala, medtem ko ima frekvenca pulziranja minimalen vpliv (prispevek manjši od 0,5 %). Campanelli s sodel. [121] je ugotovil, da ima prekrivanje laserskih žarkov pomemben vpliv na globino kanala. Na tega vpliva tudi frekvenca pulziranja, vendar le do velikosti ≈ 30 kHz, ko ta doseže maksimalno vrednost. Pri njenem večanju (do ≈ 100 kHz) se globina kanala skorajda ne spreminja več. Enačbo modela za h_g smo zapisali v naslednji polinomski obliki*:

$$h_g = 0{,}495 + 0{,}605 \cdot P - 0{,}293 \cdot v_t - 1{,}29 \cdot z - 0{,}0158 \cdot P \cdot v_t + 0{,}0425 \cdot v_t \cdot z + 0{,}00794 \cdot v_t^2 \quad (33)$$

Vpliv faktorjev obdelave na h_g izkazuje podoben odziv kakor vpliv na A_g. Edinega vpliva, ki ga pri A_g ni, je vpliv pomika laserskega žarka iz žarišča. Ta je skupaj s skenirno hitrostjo prikazan na sliki 111. Z grafa lahko razberemo, da se bo pri premiku laserskega žarka iz njegovega žarišča za 1 mm globina kanala zmanjšala za ≈ 1 µm. Podobno spremembo dosežemo pri povečanju skenirne hitrosti za ≈ 3 mm/s. V osnovi bi pričakovali, da bi lahko bil pri spremembi žarišča kanal bistveno bolj plitev, saj se intenziteta laserskega žarka v točki obsevanja zmanjša. Po drugi strani si lahko rezultat razlagamo v smislu, da je kakovost laserskega žarka tako dobra, da se pri premiku tega iz žarišča do 2 mm globina kanala h_g le minimalno spremeni (zmanjša). Kljub temu pa moramo biti pozorni na druge geometrijske vrednosti, na katere sprememba žarišča lahko vpliva (npr. širina kanala). To nam bo v nadaljevanju pokazala analiza ANOVA širine kanala.



Slika 111: *Vpliv skenirne hitrosti in pomika žarišča na globino kanala* h_g

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: h_g (µm), P (W), v_t (mm/s), z (mm)

4.3.3.5 Analiza ANOVA višine grebena h_r

Analiza ANOVA višine grebena h_r je primerljiva z analizo A_r. Največji vpliv na h_r imata moč laserskega žarka P in premik žarišča z s prispevkom vsakega 22 %. Vpliv interakcije obeh faktorjev ($P \cdot z$) pa prispeva 41 % k izbranemu modelu. Frekvenca pulziranja f_p nima vpliva na h_r, model pa je zapisan v naslednji polinomski obliki*:

$$h_r = -14{,}2 + 1{,}55 \cdot P - 0{,}102 \cdot v_t + 11{,}6 \cdot z - 1{,}03 \cdot P \cdot z \qquad (34)$$

Vpliv posameznih faktorjev na h_r je zelo podoben vplivu na A_r, kot to prikazuje slika 110, zato grafičnih vplivov v tem primeru nismo posebej prikazali.

4.3.3.6 Analiza ANOVA širine kanala na ničelni višini w_0

Vrednosti determinacijskih koeficientov za širino kanala na ničelni višini w_0 so prav tako visoki. Iz analize ANOVA ugotavljamo, da ima najsignifikantnejši vpliv na w_0 skenirna hitrost v_t (linearni prispevek 51 % in kvadratni prispevek 17 %). Frekvenca pulziranja f_p, moč P in pomik žarišča z kot samostojni faktorji so prav tako signifikantni, vendar z manjšim vplivom na w_0 [123]. Frekvenca pulziranja f_p prispeva 9 % v modelu, moč P 6 % (linearni prispevek 2 % in kvadratni prispevek 4 %), medtem ko pomik iz žarišča z 2 %. Preostali signifikantni faktorji so dvofaktorska interakcija frekvence pulziranja s pomikom iz žarišča ($f_p \cdot z$) s prispevkom 7 %, moči s pomikom žarišča ($P \cdot z$) ter skenirne hitrosti s pomikom žarišča ($v_t \cdot z$) s prispevkom vsakega 4 %. Vse druge interakcije nimajo vpliva na w_0. Enačbo modela za w_0 smo zapisali v obliki*:

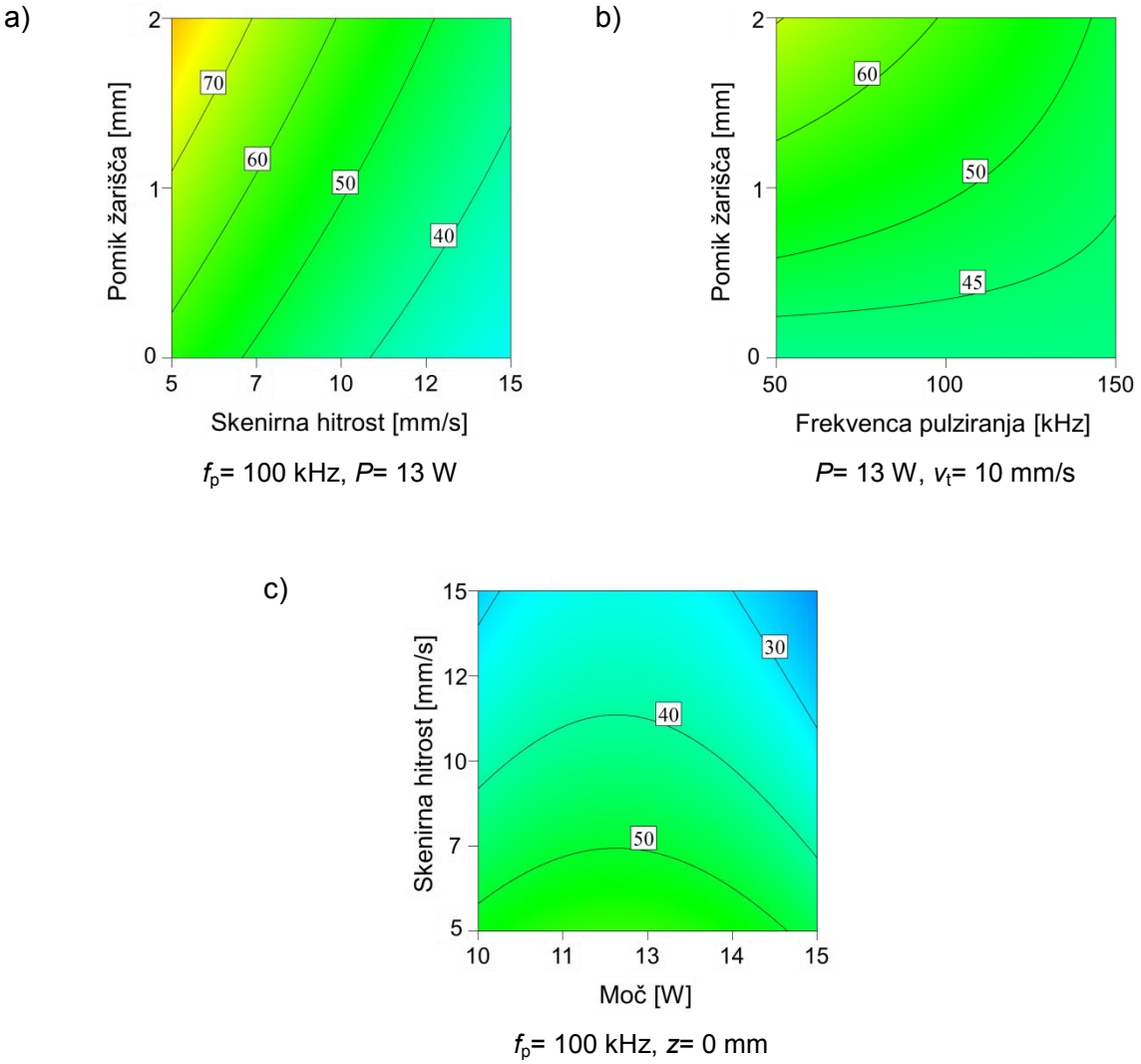
$$w_0 = -102 + 0{,}012 \cdot f_p + 29{,}9 \cdot P - 4{,}58 \cdot v_t - 9{,}16 \cdot z - 0{,}116 \cdot f_p \cdot z + 2{,}77 \cdot P \cdot z - 0{,}653 \cdot v_t \cdot z - 1{,}24 \cdot P^2 + 0{,}108 \cdot v_t^2. \qquad (35)$$

Na sliki 112 je predstavljen nelinearen vpliva faktorjev laserske obdelave na širino kanala na ničelni višini w_0. S slike 112a lahko razberemo, da s pomikom žarišča širina kanala w_0 narašča, medtem ko z večanjem skenirne hitrosti ta pada. Pri zvečanja skenirne hitrosti za 4 mm/s se bo širina kanala w_0 zožila za ≈ 10 μm.

S slike 112b ugotavljamo, da če je žarišče žarka na površini obdelovanca (z = 0 mm), se širina kanala w_0 z višanja frekvence pulziranja bistveno ne spreminja, kar se sklada z ugotovitvijo Leoneja s sodel. [123]. Ta je izvajal eksperimente pri bistveno nižjih frekvencah pulziranja (pod 40 kHz) in ugotovil, da ima ta frekvenca pri svojih nizkih vrednostih zelo majhen vpliv na širino kanala, medtem ko pri višjih frekvencah (nad 15 kHz) ta skorajda nima vpliva. Z grafa na sliki 112b lahko tudi razberemo, da pri spremembi žarišča in z višanjem frekvence pulziranja w_0 pada. Pri večjih pomikih žarišča je sprememba w_0 bolj izrazita že pri nižjih frekvencah (pod 100 kHz).

Slika 112c nam prikazuje vpliv moči in skenirne hitrosti na w_0. Širina kanala w_0 narašča pri nižji moči, medtem ko pri višji moči (P nad 12,5 W) pada. Ta interakcija je bolj intenzivna pri večji skenirni hitrosti.

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: h_r (μm), P (W), v_t (mm/s), z (mm), w_0 (μm), f_p (kHz),



Slika 112: *Vpliv faktorjev obdelave na širino kanala na ničelni višini w_0; vpliv skenirne hitrosti in pomika žarišča (a), frekvence pulziranja in pomika žarišča (b) ter moči in skenirne hitrosti (c)*

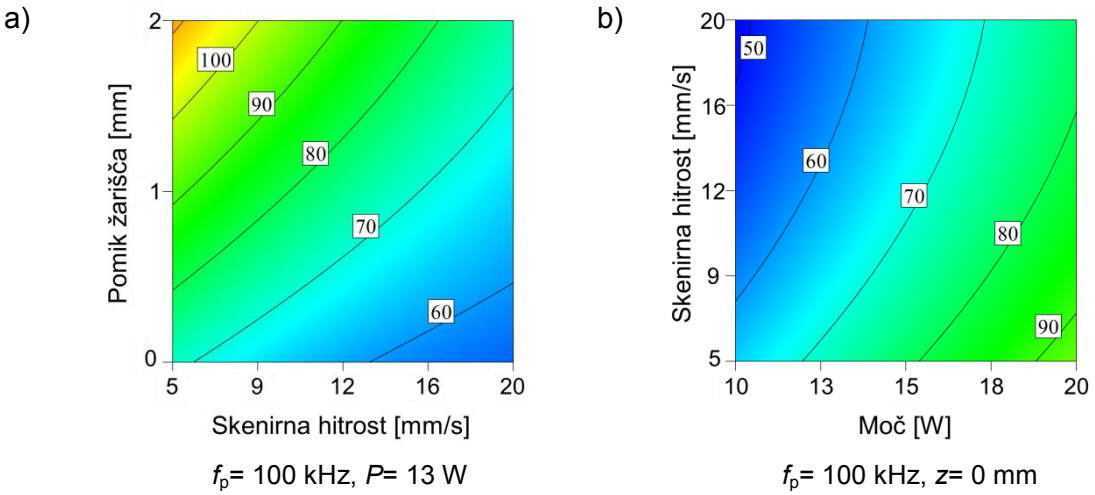
4.3.3.7 Analiza ANOVA širine med grebenoma w_1

Analiza ANOVA za širino med grebenoma w_1 je primerljiva z analizo w_0. Vrednosti determinacijskih koeficientov so dovolj visoke, da lahko z modelom dovolj zanesljivo napovemo rezultate za vse nove spremenljivke. Najsignifikatnejši vpliv na w_1 ima skenirna hitrost v_t (linearni prispevek 57 % in kvadratni prispevek 3 %). Nasprotno od analize w_0 imata v tem primeru pomik iz žarišča z (prispevek 23 %) in moč laserskega žarka P (prispevek 8 %) nekoliko večji vpliv, medtem ko frekvenca pulziranja f_p nima vpliva na w_1. Manjši vpliv ima še dvofaktorski interakcijski člen skenirne hitrosti s pomikom žarišča ($v_t \cdot z$), ki prispeva 9 % v modelu. Drugi faktorji nimajo vpliva na w_1, zato smo model lahko zapisali z naslednjo polinomsko obliko*:

$$w_1 = 44.9 + 2{,}92 \cdot P - 2{,}20 \cdot v_t + 23{,}8 \cdot z - 0{,}752 \cdot v_t \cdot z + 0{,}0464 \cdot v_t^2 \quad (36)$$

* Koeficienti enačbe so zapisani za uporabo naslednjih enot: w_1 (µm), P (W), v_t (mm/s), z (mm)

Vpliv skenirne hitrosti in pomik laserskega žarka iz žarišča na w_1 je podoben vplivu na w_0, kar prikazuje graf na sliki 113a. S pomikom žarišča širina med grebenoma w_1 narašča, medtem ko ta z večanjem skenirne hitrosti pada. Vpliv moči in skenirne hitrosti laserskega žarka na w_1 pa prikazuje graf na sliki 113b. Ta pojasnjuje, da se s spremembo moči (večanjem) širina med grebenoma w_1 približno enakomerno povečuje.



Slika 113: *Vpliv faktorjev obdelave na širino med grebenoma w_1; vpliv skenirne hitrosti in pomika žarišča (a) ter moči in skenirne hitrosti (b)*

4.3.3.8 Analiza ANOVA hrapavosti obdelane površine R_a

Vrednosti analize ANOVA, ki smo jih dobili za hrapavosti površine R_a, so bile prenizke, da bi lahko določili zanesljivo korelacijo faktorjev obdelave in zapis funkcijskega modela. Iz analize je razvidno, da je frekvenca pulziranja edini faktor, ki vpliva na R_a. Pričakovali bi vpliv še kakšnega drugega faktorja, kot je to ugotovil Wendland s sodel. [122]. Ta pravi, da frekvenca pulziranja sicer vpliva na hrapavost obdelane površine, vendar pa ima tudi skenirna hitrost bistven vpliv. Obe skupaj namreč določata delež prekrivanja točk laserskega žarka, ki je bistven za hrapavost laserske obdelave.

Sklepamo, da je za raziskavo analize hrapavosti površine izbran nivo frekvence pulziranja previsok. Predvidevamo, da bi se morali opredeliti na frekvence pulziranja nižje od 50 kHz. Velika večina raziskav se osredinja na velikosti frekvence od 10 kHz do 100 kHz. Na primer Wendland s sodel. [122] je raziskoval vpliv hrapavosti površine pri frekvencah pulziranja med 10 kHz in 50 kHz, Saklakoglu in Kasman [116] med 20 kHz in 40 kHz, Campanelli s sodel. [121] med 1 kHz in 100 kHz ter Leone s sodel. [123] med 1 kHz in 30 kHz.

4.3.4 Sklep

Rezultati statistične analize ANOVA so nam pokazali, da lahko pri laserski mikroobdelavi s povprečno izhodno močjo laserskega žarka do 20 W z veliko gotovostjo napovemo geometrijske spremembe nerjavnega jekla AISI 304. Na osnovi eksperimentalnih rezultatov smo ugotovili, da je kakovost laserskega žarka dobra, namreč pri premiku laserskega žarka iz njegovega žarišča (do 2 mm) se intenziteta laserskega žarka na površini materiala le malenkostno spremeni. To pomeni, da je uporabljeni laserski sistem primeren za proizvodnjo, kjer so potrebne hitre nastavitve parametrov

obdelave, kakovost obdelave pa bo kljub temu še vedno dobra.

Slaba stran eksperimentalnega dela je analiza hrapavosti lasersko obdelane površine. Te ne moremo napovedati, saj so dobljeni rezultati statistične analize preskromni, da bi lahko postavili dovolj dober model za R_a. Predvidevamo, da je za slabši rezultat krivo, da smo material obdelovali s precej visokimi frekvencami pulziranja laserskega žarka in v njenem velikem razponu (od 50 kHz do 150 kHz). Frekvenca pulziranja in skenirna hitrost namreč določata prekrivanje laserskih pulzov med obdelavo, kar pomeni, da pulz laserskega žarka vpliva na njegov predhodni pulz. V našem primeru je bilo prekrivanje laserskih pulzov med 97 % in 99,8 %, za kar bi že lahko trdili, da gre za lasersko mikroobdelavo s kontinuirnim laserskim žarkom. Druga mogoča razlaga za slabši rezultat je izvajanje eksperimentov brez zaščitne atmosfere. Namreč, pri visoki temperaturi laserske obdelave se tvori tanka oksidna plast na površini vzorca. Izmerjena vrednost hrapavosti površine je dejansko hrapavost površine oksidne plasti.

Iz analize smo ugotovili, da ima skenirna hitrost najsignifikantnejši vpliv na geometrijske spremembe obdelovanca. Pri manjši skenirni hitrosti je odvzem materiala večji in pri večji obratno. Prav tako smo ugotovili, da z višanjem moči laserskega žarka površina kanala ne narašča tako intenzivno kot ta narašča s hitrostjo skeniranja. Slednja ima bistveno večji vpliv na velikost kanala.

Skenirna hitrost ne vpliva samo na velikost kanala (globina in površina), ampak tudi na njegovo širino. Ugotovili smo, da ima ta še vseeno večji vpliv kakor pomik iz žarišča laserskega žarka. Torej, če želimo kontrolirati globino in širino kanala, moramo največjo pozornost nameniti skenirni hitrosti laserskega žarka. Že majhna sprememba skenirne hitrosti nam lahko bistveno spremeni rezultate.

Na primer, če bi želeli izdelati zelo tanko in berljivo črko (npr. mikrotekst) v nerjavni pločevini, bi morali material obdelovati z nizko skenirno hitrostjo laserskega žarka. Pri skenirni hitrosti med 14 mm/s in 18 mm/s bomo dosegli minimalni premer kanala ($\approx 20\ \mu m$). Frekvenca pulziranja bi morala biti v tem primeru okoli 150 kHz. Z nižjo močjo (< 10 W) bomo dosegli, da bo površina grebenov minimalna, na globino in širino kanala pa ne bomo vplivali.

5 Zaključki

V raziskovalnem delu smo preučili mehanizme preoblikovanja hladno valjane pločevine iz nerjavnega jekla (AISI 304), in sicer z razenjem z diamantno konico, s frezanjem in z laserskim strukturiranjem. Eksperimente smo izvajali po metodi eksperimentalnega načrtovanja DoE in pri tem uporabili ortogonalno tabelo L_{27} (3^4). Analizo ANOVA smo izvajali pri 95-odstotni stopnji značilnosti. Analizirali smo geometrijske spremembe gravur (površino na prerezu, globino, višino, širino, hrapavost) in utrjevanje materiala na prerezu (širjenje in intenzivnost).

Izračunani determinacijski koeficienti so nam pokazali, da lahko pri **razenju** z veliko verjetnostjo (> 92 %) pojasnimo geometrijske spremembe gravure, kar pa ne velja za hrapavost razene površine R_a. Razpon globinskega utrjevanja se da pojasniti z manjšo gotovostjo, medtem ko intenzivnosti utrjevanja ni mogoče predvideti. Sicer pa smo ugotovili, da se površina materiala utrdi tudi za več kot 100 %, samo utrjevanje pa lahko seže do globine ≈ 120 µm. Največji vpliv na analizirane vrednosti ima sila razenja in število prehodov orodja. Z višjo silo dobimo izrazitejšo gravuro, vendar pa je orodje izpostavljeno tudi večjim obremenitvam. Radij konice orodja določa profil gravure in ima manjši vpliv na geometrijske spremembe, medtem ko hitrost razenja nima posebnega vpliva.

Pri **mikrofrezanju** smo podrobneje analizirali hrapavost površine in utrjevanje materiala. Ugotovili smo, da imata togost stroja in opletanje orodja, poleg parametrov obdelave, pomemben vpliv na geometrijo gravure. Statistično analizo ANOVA smo izvedli le za hrapavost površine R_a. Ta nam je pokazala, da na R_a v največji meri vplivamo z globino reza orodja in vrtilno hitrostjo orodja. V nekoliko manjši meri vplivamo s podajalno hitrostjo in velikostjo radija orodja ter s posameznimi medsebojnimi interakcijami faktorjev obdelave. Ugotovili smo, da se pri tem postopku v splošnem material v globino ne utrjuje, razen v posameznih primerih, ko ta ne seže dlje kot ≈ 20 µm v globino.

Pri **laserskem strukturiranju** smo analizirali geometrijske spremembe materiala pri enem prehodu laserskega žarka. Ugotovili smo, da se kemijska sestava v globino bistveno ne spreminja. Rezultati statistične analize ANOVA geometrijskih vrednosti so nam pokazali, da lahko te z veliko gotovostjo tudi napovemo. Ugotovili smo, da je skenirna hitrost najsignifikantnejši faktor obdelave. Pri manjši skenirni hitrosti je odvzem materiala največji (večja globina, širina in površina). Prav tako smo ugotovili, da z večanjem moči laserskega žarka površina kanala narašča, vendar ne tako intenzivno, kot ta narašča s skenirno hitrostjo. Pomik žarka iz žarišča ima manjši vpliv na geometrijske spremembe obdelovanca, medtem ko frekvenca pulziranja (nad 50 kHz) nima posebnega vpliva. Rezultati analize ANOVA za hrapavost površine so bili preskromni, da bi lahko zanesljivo določili njen model.

Ugotovili smo, da lahko kljub različnim fizikalnim postopkom mikroobdelave vse tri obravnavane metode analiziramo po enakem principu in z dovolj veliko verjetnostjo napovemo geometrijske spremembe obdelave. Pri določanju geometrije gravure je treba iskati kompromis med vsemi štirimi vhodnimi parametri ob predpostavki, da imata ključno vlogo dva. Pri razenju sta to sila in število prehodov, pri mikrofrezanju globina reza in vrtilna hitrost orodja ter pri laserski obdelavi skenirna hitrost in moč laserskega

žarka.

Z obravnavanimi postopki mikroobdelave in z izbranimi geometrijskimi modeli smo se izognili dolgotrajnemu eksperimentalnemu preizkušanju in pripomogli k hitrejši, enostavnejši in cenovno ugodnejši izdelavi zaščitnih elementov na laminacijskih in intaglio ploščah. Ti se izražajo kot otipni elementi na varnostnih tiskovinah, kot so identifikacijske kartice, bankovci, potne listine ipd. Z obravnavanimi modeli lahko z velikim približkom napovemo čas izdelave posameznih zaščitnih elementov, pomaga pa nam lahko pri uporabi drugih podobnih tipih materialov.

6 Zahvala

Ob tej priložnosti se želim zahvaliti vsem, ki so mi med študijem stali ob strani in na kakršen koli način pomagali pri nastajanju tega dela.

Najprej se zahvaljujem predsedniku uprave mag. **Romanu Žnidariču** iz podjetja Cetis, d. d., ter **Barbari Sušin**, ki sta me uspešno prijavila na razpis javne agencije Republike Slovenije Spirit in mi tako omogočila doktorski študij. Zahvaliti se želim sodelavcem, ki so med pripravo doktorskega dela z razumevanjem sprejeli mojo odločitev in odsotnost ter poskrbeli, da je delo v podjetju potekal nemoteno.

Javni agenciji Republike Slovenije **Spirit** se zahvaljujem za sofinanciranje podiplomskega študija.

Posebno zahvalo namenjam pedagoškemu mentorju doc. dr. **Mihi Čekada**. Vodenje raziskovalnega dela, pomoč, koristni nasveti ter napotki, ki mi jih je dajal med študijem, še posebej pri izdelavi doktorske disertacije, so neprecenljivi. Prav tako je neprecenljiva skrb, ki jo je imel, da so mi bili merilni inštrumenti ves čas dostopni, prav tako tudi strokovna podpora pri izvajanju eksperimentalnih meritev. Iskrena hvala!

Za pomoč pri izvajanju eksperimentalnih meritev se zahvaljujem dr. **Srčku Paskvaleju in Jožku Fišerju** z Odseka za tanke plasti in površine Instituta »Jožef Stefan«ter študentki Fakultete za matematiko in fiziko Univerze v Ljubljani **Nastji Poljanšek**. Za strokovne nasvete se zahvaljujem tudi dr. **Petru Panjanu**, ki je s svojim znanjem in izkušnjami vselej pomagal poiskati odgovor na kakšno odprto vprašanje. Vsem skupaj hvala!

Nazadnje se želim zahvaliti svoji družini. Staršem **Svetlani** in **Aci** ter bratu **Predragu** gre zahvala za vztrajnost, ki so mi jo dali med mojim šolanjem. Moč, energija in volja, ki smo jo potrebovali, da smo dosegli to kar smo, je spoštovanja vredna. Ženi **Nuši** in svojima otrokoma **Luki** in **Enji** gre posebna zahvala. Vsi skupaj so mi s svojo pojavo in ljubeznijo vlili še tisti kanček energije, ki sem jo v težkih trenutkih zelo potreboval, da je doktorska disertacija dokončno spisana. To delo posvečam prav njim. Hvala, ker so vsi skupaj verjeli vame!

7 Literatura in viri

[1] Biermann, D.; Steiner, M.; Krebs, E. Investigation of different hard coatings for micromilling of austenitic stainless steel. *Procedia CIRP* **7**, 246–251 (2013).

[2] Sahin, Y. Comparison of tool life between ceramic and cubic boron nitride (CBN) cutting tools when machining hardened steels. *J Mater Process Tech* **209**(7), 3478–3489 (2009).

[3] Pintaude, G.; Hoechele, A. R. Experimental analysis of indentation morphologies after spherical indentation. *Mat Res* **17**(1), 56–60 (2013).

[4] Nelson, L. Engraving tool with a very strong cutter tip to reduce breakage, Patent No. US 8021085 B1, (2011).

[5] Loh, N. H.; Tam, S. C. Effects of ball burnishing parameters on surface finish—A literature survey and discussion, *Precis Eng* **10**(4), 215–220 (1988).

[6] Burnett, P. J.; Rickerby, D. S. The relationship between hardness and scratch adhesion. *Thin Solid Films* **154**(1–2), 403–416 (1987).

[7] Bull, S. J.; Rickerby, D. S. New developments in the modelling of the hardness and scratch adhesion of thin films. *Surf Coat Tech* **42**(2), 149–164 (1990).

[8] Heinke, W.; Leyland, A.; Matthews, A.; Berg, G.; Friedrich, C.; Broszeit, E. Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests. *Thin Solid Films* **270**(1–2), 431–438 (1995).

[9] Jardret, V.; Zahouani, H.; Loubet, J. L.; Mathia, T. G. Understanding and quantification of elastic and plastic deformation during a scratch test. *Wear* **218**(1), 8–14 (1998).

[10] Mahajan, D.; Tajane, R. A Review on Ball Burnishing Process. *International Journal of Scientific and Research Publications* **3**(4), 1–8 (2013).

[11] Vukelić, Đ.; Miljanić, D.; Randjelović, S.; Budak, I.; Đunić, D.; Erić, M.; Pantić, M. A burnishing process based on the optimal depth of workpiece penetration. *Material Tehnol* **47**(1), 43–51 (2013).

[12] Gauthier, C.; Schirrer, R. Time and temperature dependence of the scratch properties of poly (methylmethacrylate) surfaces. *J Mater Sci* **35**(9), 2121–2130 (2000).

[13] Anželak, R. *Določanje odvisnosti in zakonitosti postopka odrezovanja* (Diplomsko delo – Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, 2011).

[14] Lee, K.; Dornfeld, D. A., *A Study of Surface Roughness in the Micro-End-Milling Process*. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. UC Berkeley: Laboratory for Manufacturing and Sustainability, 1–8 (2004).

[15] Zaman, M. T.; Kumar, A. S.; Rahman, M.; Sreeram, S. A Three-Dimensional Analytical Cutting Force Model for Micro End Milling Operation. *Int J Mach Tool Manu* **46**, 695–705 (2006).

[16] Vogler, M. P.; Kapoor, S. G.; DeVor, R. E. On the Modeling and Analysis of Machining Performance in Micro-Endmilling. Part II: Cutting Force Prediction. ASME. *J Manuf Sci Eng* **126**, 695–705 (2005).

[17] Chae, J.; Park, S. S.; Freiheit, T. Investigation of micro-cutting operations. *Int J*

Mach Tool Manu **46**, 313–332 (2006).

[18] Huang, B. W.; Yu, P. P.; Kuang, J. Using Finite Element Analysis on Dynamic Characteristics in a Micro Stepping Mill. *World Academy of Science, Engineering and Technology* **70**, 718–722 (2010).

[19] Faassen, R. P. H.; Van de Wouw, N.; Oosterling, J. A. J.; Nijmeijer, H. Prediction of regenerative chatter by modelling and analysis of high-speed milling. *Int J Mach Tool Manu* **43**(14), 1437–1446 (2003).

[20] Chiou, J.; Hong, M. S.; Ehmann, K. F. Instantaneous shear plane based cutting force model for end milling. *J Mater Process Tech* **170**(1–2), 164–180 (2005).

[21] Yang, K.; Liang, Y. C.; Zheng, K. N.; Bai, Q. S.; Chen, W. Q. Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process. *Int J Adv Manuf Tech* **52**(9–12), 905–912 (2011).

[22] Abrari, F.; Elbestawi, M. A.; Spence, A. D. On the dynamics of ball end milling: modeling of cutting forces and stability analysis. *Int J Mach Tool Manu* **38**(3), 215–237 (1998).

[23] Damazo, B. N.; Davies, M. A.; Dutterer, B. S.; Kennedy, M. D., A summary of micro-milling studies. V: 1st International Conference and General Meeting of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Bremen, Germany, May 31 – Jun 04, 1999. Objavljeno v: *Precision Engineering, Nanotechnology*, 322–325 (1999).

[24] Friedrich, C. R.; Vasile, M. J. Development of the micromilling process for high–aspect-ratio microstructures. *J Microelectromech S* **5**(1), 33–38 (1996).

[25] Schaller, T.; Bohn, L.; Mayer, J.; Schubert, K. Microstructure grooves with a width of less than 50 μm cut with ground hard metal micro end mills. *Precis Eng* **23**(4), 229–235 (1999).

[26] Benavides, G. L.; Adams, D. P.; Yang, P. Meso-Machining Capabilities. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, *Sandia Report, Sand 2001–1708*, 1–33 (2001).

[27] Howe, R. T.; Allen, M. G.; Berlin, A. A.; Hui, E. E.; Monk, D. J.; Najafi, K.; Yamakawa, M. *Microsystems Research in Japan*. Loyola Coll Baltimore MD International Technology Research Inst, (2003).

[28] El-Fatatry, A., EUSPEN Vision Online: Transfering Microsystems Technology. *NEXUS report*, (2003).

[29] Tanaka, M., Development of desktop machining microfactory. *Riken Review* **34**, 46–49 (2001).

[30] Bang, Y. B.; Lee, K.; Oh, S. 5-Axis micro milling machine for machining micro parts. *Int J Adv Manuf Tech* **25**(9–10), 888–894 (2004).

[31] Okazaki, Y.; Mishima, N.; Ashida, K. Microfactory—Concept, History, and Developments. ASME. *J Manuf Sci Eng* **126**(4), 837–844 (2005).

[32] Kussul, E.; Baidyk, T.; Ruiz-Huerta, L.; Caballero-Ruiz, A.; Velasco, G.; Kasatkina, L. Development of micromachine tool prototypes for microfactories. J. *Micromech Microeng* **12**(6), 795–812 (2002).

[33] Tönshoff, H. K.; Wulfsberg, J. P.; Kals, H. J. J.; König, W.; Van Luttervelt, C. A. Developments and trends in monitoring and control of machining processes. *CIRP Ann-Manuf Techn* **37**(2), 611–622 (1988).

[34] Bissacco, G., Hansen, H. N.; De Chiffre, L. Micromilling of hardened tool steel for mould making applications. *J Mater Process Tech* **167**, 201–207 (2005).

[35] Bissacco, G. *Surface generation and optimization in micromilling*. PhD Thesis (Department of Manufacturing Engineering and Management, Technical University

of Denmark, 2004).

[36] Aramcharoen, A.; Mativenga, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precis Eng* **33**(4), 402–407 (2009).

[37] Kussul, E., Rachkovskij, D. A.; Baidyk, T. N.; Talayev, S. A. Micromechanical engineering: a basis for the low-cost manufacturing of mechanical microdevices using microequipment. *J Micromech Microeng* **6**(4), 410 (1996).

[38] Vogler, M. P.; Liu, X.; Kapoor, S. G.; DeVor, R. E.; Ehmann, K. F. Development of meso-scale machine tool (mMT) systems. *Technical Papers-Society of Manufacturing Engineers-All Series-MS02-181*, 1–9 (2002).

[39] Shaw, M. C. Precision Finishing*. *CIRP Ann-Manuf Techn* **44**(1), 343–348 (1995).

[40] Schmitz, T. L.; Davies, M.; Kennedy, M. D. Tool point frequency response prediction for high-speed machining by RCSA. *J Manuf Sci Eng* **123**(4), 700–707 (2001).

[41] Furukawa, Y.; Moronuki, N. Effect of material properties on ultra precise cutting processes. *CIRP Ann-Manuf Techn* **37**(1), 113–116 (1988).

[42] Lucca, D. A.; Rhorer, R. L.; Komanduri, R. Energy dissipation in the ultraprecision machining of copper. *CIRP Ann-Manuf Techn* **40**(1), 69–72 (1991).

[43] Ng, C. K.; Melkote, S. N.; Rahman, M.; Kumar, A. S. Experimental study of micro- and nano-scale cutting of aluminum 7075-T6. *Int J Mach Tool Manu* **46**(9), 929–936 (2006).

[44] Uhlmann, E.; Schauer, K. Dynamic load and strain analysis for the optimization of micro end mills. *CIRP Ann-Manuf Techn* **54**(1), 75–78 (2005).

[45] Kim, J. D.; Kim, D. S. Theoretical analysis of micro-cutting characteristics in ultra-precision machining. *J Mater Process Tech* **49**(3), 387–398 (1995).

[46] Manjunathaiah, J.; Endres, W. J. A study of apparent negative rake angle and its effect on shear angle during orthogonal cutting with edge-radiused tools. *Transaction-North American Manufacturing Research Institution of SME* **28**, 197–202 (2000).

[47] Son, S. M.; Lim, H. S.; Ahn, J. H. Effects of the friction coefficient on the minimum cutting thickness in micro cutting. *Int J Mach Tool Manu* **45**(4), 529–535 (2005).

[48] Ducobu, F.; Filippi, E.; Rivière-Lorphèvre, E. Chip formation and minimum chip thickness in micro-milling. V: Proceedings of the 12th CIRP conference on modeling of machining operations, Donostia-San Sebastián, Spain, May 2009. (*CIRP 2009*, 339–346) 2009.

[49] Guo, Y. D. Wear Rule of TiAlN Coated Cutting Tool when Milling Material with High Hardness at High Speed. *Key Eng Mat* **458**, 106–112 (2011).

[50] Gan, W. M.; Xie, X. L.; Xu, B.; Huang, W. B., Research on NC Electrochemical Mechanical Complex Machining Stainless Steel. *Key Eng Mat* **458**, 331–336 (2011).

[51] Aramcharoen, A.; Mativenga, P. T. Tool wear modes in micro/mesoscale milling of hardened die steel. V: Proc. 3rd CIRP High Performance Cutting Conference, Dublin, Ireland, June 12–13, 2008. (*CIRP 2008* **1**, 179–188), 2008.

[52] Li, P.; Aristimuno, P.; Arrazola, P.; Hoogstrate, A. M.; Oosterling, J. A. J.; Langen, H. H.; Schmidt, R. H. A study of factors affecting the performance of micro square endmills in milling of hardened tool steels. V: *Proceedings of the Int. Conf. on Multi-Material Micro Manufacture (4M), Cardiff, UK, Sept. 2008*, 9–11 (2008).

[53] Noordin, M. Y.; Venkatesh, V. C.; Sharif, S.; Elting, S.; Abdullah, A. Application of response surface methodology in describing the performance of coated carbide

tools when turning AISI 1045 steel. *J Mater Process Tech* **145**(1), 46–58 (2004).

[54] Bissacco, G.; Hansen, H. N.; De Chiffre, L. Size effects on surface generation in micro milling of hardened tool steel. *CIRP Ann-Manuf Techn* **55**(1), 593–596 (2006).

[55] Hinds, B. K.; Tyreanor, G. M. Analysis of Stress in Micro-Mills Using the Finite Element Method. *Int J Mach Tool Manu* **40**, 1443–1456 (2000).

[56] Chyan, H. C.; Ehmann, K. F. Development of Curved Helical Micro-Mill Point Technology for Micro-Hole Milling. *Mechatronics* **8**, 337–358 (1998).

[57] Hecht, E. *Optics*, 3rd ed. (Addison Wesley–Longman, 1998).

[58] Guinther, R. D. *Modern Optics* (John Wiley and Sons, New York, 1990).

[59] Yariv, A.; Yeh, P. Confinement and stability in optical resonators employing mirrors with Gaussian reflectivity tapers. *Opt Commun* **13**(4), 370–374 (1975).

[60] Ready, J.F. *Industrial Applications of Lasers* (Academic press, London, 1997).

[61] Hebatalrahman, A. The Effect of Laser Parameters on The Surface Characteristic of Irradiated Stainless Steel 304. *Academia Arena* **4**(2), 16–24 (2012).

[62] Sun, Z.; Annergren, I.; Pan, D.; Mai, T. A. Effect of laser surface remelting on the corrosion behavior of commercially pure titanium sheet. Mater Sci Eng*: A* **345**(1), 293–300 (2003).

[63] Khalfallah, I. Y.; Rahoma, M. N.; Abboud, J. H.; Benyounis, K. Y. Microstructure and corrosion behavior of austenitic stainless steel treated with laser. *Opt Laser Technol* **43**(4), 806–813 (2011).

[64] Zupanič, F.; Bončina, T.; Pipić, D.; Henč-Bartolić, V. Površina zlitine Cu-Sn-Zn-Pb po obsevanju z ultravijoličnim dušikovim laserjem. *Mater Tehnol* **41**(5), 243–247 (2007).

[65] Dobrev, T.; Dimov, S. S;. Thomas, A. J. Laser milling: modeling crater and surface formation. V: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J Mech Eng Sci* **220**(11), 1685–1696 (2006).

[66] Von Allmen, M.; Blatter, A. *Laser-beam interactions with solid materials: Physical principles and applications* (Springer Berlin Heidelberg, New York, 1995).

[67] Muhič, T.; Tušek, J.; Možina, J.; Pleterski, M.; Kosec, L. Poliranje z laserskim žarkom. *Vakuumist* **29**(1–2), 4–8 (2009).

[68] Bäuerle, D. *Laser processing and chemistry* (Springer, Berlin, 2000).

[69] ASM Handbook, Metals. Vol. 6: *Welding, Brazing, and Soldering* (ASM International, Materials Park, OH, 1993).

[70] Qi, J.; Wang, K. L.; Zhu, Y. M. A study on the laser marking process of stainless steel. *J Mater Process Tech* **139**(1), 273–276 (2003).

[71] Mack, M. E.; Woodroffe, J. A. *U.S. Patent No. US4170762 A*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, (1979).

[72] Škrbec, J. *Analiza možnosti povezovanja računalniških omrežij s prostozračnimi optičnimi povezavami* (Doctoral dissertation, Univerza v Ljubljani, 2010).

[73] Augier, Á. G.; Sánchez, R. B. Hologravure as a computer-generated and laser engraved scratch hologram. *Opt Commun* **284**(1), 112–117 (2011).

[74] Rozman, M. *Termični pojavi pri laserski obdelavi materialov* (Seminar, Univerza v Ljubljani, FGG Fizika II: Ljubljana, 2001).

[75] Katzir, A.; Yariv, A.; Yen, H. W.; Nakamura, M., Aiki, K.; Umeda, J. I. Corrugated laser structures. *J Vac Sci Technol* **12**(4), 865–868 (1975).

[76] Selvas-Aguilar, R. D. J. *Cladding-pumped neodymium and ytterbium doped fibre lasers* (Doctoral Thesis, University of Southampton, Optoelectronic Research

Centre, 217, 2004).

[77] Jeong, Y. E.; Sahu, J.; Payne, D.; Nilsson, J. Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Opt Express* **12**(25), 6088–6092 (2004).

[78] Kasman, Ş.; Saklakoglu, I. E. Determination of process parameters in the laser micromilling application using Taguchi method: A case study for AISI H13 tool steel. *Int J Adv Manuf Tech* **58**(1–4), 201–209 (2012).

[79] Jakopič, P. *Vlakenski laserji* (Seminar, Univerza v Ljubljani: Fakulteta za matematiko in fiziko, Ljubljana, 2008).

[80] Limpert, J.; Liem, A.; Zellmer, H.; Tünnermann, A. 500 W continuous-wave fibre laser with excellent beam quality. *Electron Lett* **39**(8), 645–647 (2003).

[81] Strnad, J. *Fizika, 4. del.* Molekule, kristali, jedra, delci. DMFA (2000).

[82] Fisher, R. A. *Statistical methods for research workers* (Genesis Publishing Pvt Ltd., 1st edition, 1925).

[83] Fisher, R. A. *Statistical methods for research workers* (Oliver and Boyd, Edinburgh, 1934).

[84] Thompson, B.; Snyder, P. A. Statistical significance testing practices in the Journal of Experimental Education. *J Exp Educ* **66**(1), 75–83 (1997).

[85] Stigler, S. Fisher and the 5% level. *Chance* **21**(4), 12–12 (2008).

[86] Bachmann, K.; Luccio, R.; Salvadori, E.; Tomšič, J. Statistična pomembnost in njen pomen. *Psihološka obzorja* **14**(3), 7–40 (2005).

[87] Turk, G. *Verjetnostni račun in statistika* (SLO, Ljubljana, 2011).

[88] Bajić, D.; Lela, B.; Živković, D. Modeling of machined surface roughness and optimization of cutting parameters in face milling. *Metalurguja* **47**(4),: 331–334 (2008).

[89] Zhang, J. Z.; Chen, J. C.; Kirby, E. D. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. *J Mater Process Tech* **184**(1), 233–239 (2007).

[90] Özel, T.; Karpat, Y. Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks. *Int J Mach Tool Manu* **45**(4), 467–479 (2005).

[91] Bajic, D.; Lela, B.; Cukor, G. Examination and modelling of the influence of cutting parameters on the cutting force and the surface roughness in longitudinal turning. *Stroj Vestn-J Mech E* **54**(5), 322–333 (2008).

[92] Montgomery, D. C. *Design and analysis of experiments* (John Wiley & Sons, NJ, 2008).

[93] Taguchi, G.; Elsayed, E. A.; Hsiang, T. C. *Quality engineering in production systems* (McGraw-Hill, New York, 1989).

[94] Antony, J. *Design of experiments for engineers and scientists* (Elsevier, London, 2014).

[95] Kramer, M. R2 statistics for mixed models. V: *Proceedings of the Kansas State Conference on Applied Statistics in Agriculture* **17**, 148–160 (2005).

[96] Ross, P. J. *Taguchi techniques for quality engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design* (McGraw-Hill Professional, New York, 1996).

[97] Okada, S.; Itoh, Y.; Suzuki T. V: Experimental design to allocate more factors to L27, 6th Asian Network Quality Congress, October 28–31, 2008 (Bangkok), *ANQ*, 2008.

[98] Rauter, A. *Eksperimentalno določanje vpliva procesnih parametrov proizvodnje kefirnih zrn s statistično metodo* (Diplomsko delo, Univerza v Mariboru: Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo, 2009).

[99] Box, G. E.; Wilson, K. B. On the experimental attainment of optimum conditions. J *R Stat Soc B Met* **13**(1), 1–45 (1951).

[100] Montgomery, D. C. *Design and Analysis of Experiments* (John Wiley, New York, 2001).

[101] Walker, C. E.; Parkhurst, A. M. Response surface analysis of bake-lab data with a personal computer. *Cereal foods world*, (1984).

[102] Box, G. E. P.; Draper, N. R. *Empirical model-building and response surfaces* (John Wiley & Sons, New York, 1987).

[103] Öktem, H.; Erzurumlu, T.; Kurtaran, H. Application of response surface methodology in the optimization of cutting conditions for surface roughness. *J Mater Process Tech* **170**(1), 11–16 (2005).

[104] Shiou, F. J.; Chen, C. H. Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process. *J Mater Process Tech* **140**(1), 248–254 (2003).

[105] Seemikeri, C. Y.; Brahmankar, P. K.; Mahagaonkar, S. B. Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool. *Tribol Int* **41**(8), 724–734 (2008).

[106] Hassan, A. M.; Al-Jalil, H. F.; Ebied, A. A. Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components. *J Mater Process Tech* **83**(1), 176–179 (1998).

[107] El-Axir, M. H.; Othman, O. M.; Abodiena, A. M. Study on the inner surface finishing of aluminum alloy 2014 by ball burnishing process. *J Mater Process Tech* 202(1), 435–442 (2008).

[108] El-Axir, M. H. An investigation into roller burnishing. *Int J Mach Tool Manu* **40**(11), 1603–1617 (2000).

[109] Lalwani, D. I.; Mehta, N. K.; Jain, P. K. Experimental investigations of cutting parameters influence on cutting forces and surface roughness in finish hard turning of MDN250 steel. *J Mater Process Tech* **206**(1), 167–179 (2008).

[110] Choudhury, I. A.; El-Baradie, M. A. Machinability assessment of inconel 718 by factorial design of experiment coupled with response surface methodology. *J Mater Process Tech* **95**(1), 30–39 (1999).

[111] Alauddin, M.; El Baradie, M. A.; Hashmi, M. S. J. Optimization of surface finish in end milling Inconel 718. *J Mater Process Tech* **56**(1), 54–65 (1996).

[112] Sahin, Y.; Motorcu, A. R. Surface roughness model in machining hardened steel with cubic boron nitride cutting tool. *Int J Refract Met H* **26**(2), 84–90 (2008).

[113] Kaye, J. E.; Yan, D. H.; Popplewell, N.; Balakrishnan, S. Predicting tool flank wear using spindle speed change. *Int J Mach Tool Manu* **35**(9), 1309–1320 (1995).

[114] Davim, J. P. Study of drilling metal–matrix composites based on the Taguchi techniques. *J Mater Process Tech* **132**(1), 250–254 (2003).

[115] Chen, Y.; Tam, S. C.; Chen, W. L.; Zheng, H. Y. Application of Taguchi method in the optimization of laser micro-engraving of photomasks, *Int J Materials Prod Tech* **11**(3–4), 333–344 (1996).

[116] Saklakoglu, I. E.; Kasman, S. Investigation of micro-milling process parameters for surface roughness and milling depth. Int J Adv Manuf Tech **54**(5–8), 567–578 (2011).

[117] Dagnall, H. *Exploring surface texture* (Rank Taylor Hobson Ltd, Leicester, 1980).

[118] Michalski, J.; Pawlus, P. Characteristic features of roughness measurement by Form

Talysurf Intra profile measurement gauge. *Manuf Eng* **6**(3), 59–63 (2007).

[119] *Design-Expert Software, Version 8, User's Guide, Technical Manual*, (Stat-Ease Inc., Minneapolis, 2000).

[120] Lou, M. S.; Chen, J. C.; Li, C. M. Surface roughness prediction technique for CNC end-milling. *Journal of Industrial Technology* **15**(1), 1–6 (1998).

[121] Campanelli, S. L.; Ludovico, A. D.; Bonserio, C.; Cavalluzzi, P.; Cinquepalmi, M. Experimental analysis of the laser milling process parameters. *J Mater Process Tech* **191**(1), 220–223 (2007).

[122] Wendland, J.; Harrison, P. M.; Henry, M.; Brownell, M. Deep engraving of metals for the automotive sector using high average power diode pumped solid state lasers. V: *Proceedings of ICALEO*, 2005.

[123] Leone, C.; Genna, S.; Caprino, G.; De Iorio, I. AISI 304 stainless steel marking by a Q-switched diode pumped Nd: YAG laser. *J Mater Process Tech* **210**(10), 1297–1303 (2010).

[124] Kruth, J. P.; Yasa, E. Experimental analysis of process and laser parameters in laser marking, V: *9th Biennial ASME 2008 Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, July 7–9, 2008 (Haifa), American Society of Mechanical Engineers, 361–371 (2008).

[125] Shiu, P. P. M. *Controlled-depth laser cutting of aluminium sheet for laminated-object manufacturing* (M. Sc. Thesis, Queen's University: Department of Mechanical Engineering, Kingston, Ontario, Canada, 2001).

Kazalo slik

Slika 1: *Shema razenja; orodje razenja (a) in značilna oblika raze (b)* 5
Slika 2: *Velikost kontaktne površine v odvisnosti od trdote materiala: mehka podlaga (a) in trda podlaga (b)* 5
Slika 3: *Vrste drsnega trenja pri preoblikovanju: suho trenje (a), mejno (b), mešano (c) in mokro trenje (d)* 6
Slika 4: *Shematski prikaz orodij za razenje: orodje s konično konico (a) in piramidno konico (b)* 6
Slika 5: *Topografija osnovnega (a) in razenega materiala AISI 304 (b) posnetega s konfokalnim mikroskopom* 7
Slika 6: *2D shematski prikaz čelnega (a) in obodnega frezanja (b)* [13] 7
Slika 7: *Nekaj shematskih primerov frezalnih orodij: ostrorobi (a), vogalni radij (b), posnet rob (c), polni radij (d), konični s polnim radijem (e), konični oster (f), 250-stopinjski rezkar (g) in radialni (h)* 8
Slika 8: *Vrste čelnega frezanja: protismerno (a), istosmerno (b), simetrično (c)* 8
Slika 9: *Vrste obodnega frezanja: istosmerno (a) in protismerno (b)* 9
Slika 10: *Rezalne sile pri istosmernem (a) in protismernem (b) obodnem frezanju* 9
Slika 11: *Shematski diagram porazdelitve sil pri postopku frezanj* 10
Slika 12: *Primer obdelane površine z mikrofrezanjem (dimenzija obdelovanca 60 mm × 60 mm × 20 mm, trdota 52* HRC*, hrapavost površine R_a = 11 nm) (vir: tehnična dokumentacija Makino Milling Machine Co.,Ltd. 2014)* 11
Slika 13: *Grafični prikaz stabilnosti mikro-frzalnega obdelovalnega centra v smeri x-y-z pri 12-urnem obratovanju (vrtilni hitrosti 45 000 min^{-1}, podajanje v smeri x-y 16 000 mm/min in v smeri z 8 000 mm/min) (vir: tehnična dokumentacija Makino Milling Machine Co.,Ltd. 2014)* 11
Slika 14: *Mikrofrezalo z radijem 100 µm (zgoraj) in konvecionalno frezalo velikosti 6 mm (spodaj)* 11
Slika 15: *Geometrija mikrofrezala* [28] 11
Slika 16: *Vpliv radija rezalnega roba na velikost odrezka pri konvencionalnem odrezovanju (a) in mikroodrezovanju (b)* [36] 12
Slika 17: *Nastanek odrezka v povezavi z minimalno debelino odrezka pri mikroobdelavi (radij rezalnega orodja r_e, nedeformirana debelina odrezka h, minimalna debelina odrezka h_m)* [36] 13
Slika 18: *Obraba dvoreznega mikrofrezala premera 700 µm, pri rezu volumna 7,875 mm^3, jekla trdote 45* HRC [51] 13
Slika 19: *Delež loma orodij v odstotkih pri naraščajočem volumnu mikrofrezanja* [51] .. 14
Slika 20: *Temperaturna porazdelitev mikrofrezala pri ostrem orodju (a), orodju s konico radija (r_e) 3,2 µm (b), 5,0 µm (c) in 7,0 µm (d)* [21] 15
Slika 21: *Shematski prikaz atomov v različnih energijskih stanjih* 16

Slika 22: *Prerez žarka z oznakami količin* [59]....17
Slika 23: *Odvisnost intenzitete Gaussovega pramena od širine v grlu in točkah oddaljenih z_R in $2z_R$*....18
Slika 24: *Osnovna zgradba laserja*....19
Slika 25: *Dvoosni skenirni sistem*....20
Slika 26: *Primer laserskega sistema primernega za strukturiranje*....20
Slika 27: *Shematski prikaz obsevanega materiala debeline h_s in laserskega žarka* [60]....21
Slika 28: *Porazdelitev temperature po površini kovinskega materiala pri energiji laserskega žarka 0,0286 J/mm^2* [65]....22
Slika 29: *Simulirana globina kanala pri različnih jakostih laserskega žarka* [65]....22
Slika 30: *Grafični prikaz vpliva časa in intenzitete laserskega žarka I na globino* [68]....22
Slika 31: *Prerez pretaljene laserske strukturne cone* [62]....23
Slika 32: *Mikrostruktura pretaljene cone (povečava 100-kratna)* [62]....23
Slika 33: *Korelacija med hitrostjo pretaljevanja in globino pretaljene cone titanu* [62]....23
Slika 34: *SEM-posnetki mikrostruktur pri različnih frekvencah pulziranja* [70]....24
Slika 35: *Valovne dolžine laserjev*....24
Slika 36: *Shematski prikaz He-Ne-laserja*....25
Slika 37: *Stimulirana emisija He-Ne-laserja*....26
Slika 38 *Shematski prikaz preprostega CO_2-laserja*....27
Slika 39: *Stimulirana emisija CO_2-laserja*....27
Slika 40: *Shematski prikaz ekscimerskega laserja in pretoka plina (a) ter fizikalnim principom proizvajanja laserskega žarka (b)*....28
Slika 41: *Shematski prikaz trdninskega laserja* [60]....29
Slika 42: *Shematski prikaz rubinskega laserja* [74]....29
Slika 43: *Stimulirana emisija rubinskega laserja*....30
Slika 44: *Stimulirana emisija Nd:YAG-laserja*....30
Slika 45: *Shematstki prikaz polprevodniškega laserja* [74]....32
Slika 46: *Shema polprevodnika p in n-tipa s primanjkljajem elektronov*....32
Slika 47: *Polprevodniška laserska palica*....32
Slika 48: *Primer modelov vpliva faktorjev v Taguchijevi ortogonalni tabeli*....38
Slika 49: *Struktura (hrapavost) osnovnega materiala vzorca v smeri valjanja (a) in pravokotno na to smer (b)*....46
Slika 50: *Vnaprej določena kontura vzorca, označena s smerjo strukturiranja in mestom analize vzorca*....46
Slika 51*: Mehanski gravirni stroj IS7000XP za izvedbo eksperimentov razenja z gravirno iglo*....47
Slika 52: *Senzor PCB 208CO3 za merjenje sile razenja*....47
Slika 53: *Risba diamantne igle (a) in meritev profilov diamantnih konic; R90 μm, R130 μm in R150 μm (b)*....47
Slika 54: *Shematski prikaz mikrofrezala za izvedbo eksperimentov*....48

Slika 55: *Mikroskopski posnetek mikrofrezalnih orodij radija: 100 μm (a), 150 μm (b) in 200 μm (c)* ... 49
Slika 56: *Izvedbe eksperimenta s postopkom mikrofrezanja na stroju Gavograph IS7000XP* ... 49
Slika 57: *Izvedba eksperimenta s vlaknasti laserskim sistemom: laser Gravograph FL300 (a), obdelava z laserskim žarkom (b), nastanek plazme (c) in končno obdelan vzorec (d)* ... 50
Slika 58: *Shema laserskega žarka in pomik iz žarišča* ... 51
Slika 59: *Sled laserskega žarka in prekrivanje laserskih sledi* ... 51
Slika 60: *Profili preliminarnih preizkusov lasersko obdelanih vzorcev s pojavom grebena (a) ter kanala kot grebena (b)* ... 52
Slika 61: *Shematski primer razreza vzorca za analizo na prerezu* ... 53
Slika 62: *Vzorec ulit v valjasto dvokomponentno transparentno maso, za analizo na prerezu (A–A)* ... 53
Slika 63: *Shematski prikaz profilometra* ... 54
Slika 64: *Shematski prikaz profila in hrapavosti površine R_a* ... 54
Slika 65: *Profilometer Taylor Hobson, tipa Form Talysurf Series 2* ... 54
Slika 66: *Konfokalni optični mikroskop Axio CSM 700 (Carl Zeiss)* ... 55
Slika 67: *Fotografija merilnika nanotrdote po Vickersu, proizvajalca Helmut Fischer, tip Fischerscope H100C* ... 56
Slika 68: *Shematski prikaz meritve trdote vzorca (a) in SEM slika tipične meritve (b)* ... 56
Slika 69: *Vrstični elektronski mikroskop (SEM) JEOL FX 7600* ... 57
Slika 70: *Primer meritve kemijske sestave: definiranje merilnega mesta vzorca (a), spekter kemijske sestave na merilnem mestu vzorca (b) in izmerjene vrednosti v masnih deležih (%) (c)* ... 58
Slika 71: *Kvantitativno ovrednotene spremenljivke v Design-Expertu* ... 59
Slika 72: *Izbira modela analize v Design-Expertu* ... 59
Slika 73*: Porazdelitev rezidualov v razsevnem grafikonu ali graf normalne populacije: pred prilagajanjem (a) in po njem (b)* ... 60
Slika 74: *Normalni graf rezidualov: pred prilaganjem (a) in po njem (b)* ... 60
Slika 75: *Zgled 2D in 3D grafičnega prikaza odvisnosti faktorjev na odziv* ... 61
Slika 76: *Analizirane mere profila gravure razenja* ... 63
Slika 77: *2D-profil (a) in 3D-profil razenih vzorcev z najmanjšo (b) in največjo razo (c)* ... 65
Slika 78: *Zgled hrapavosti površine na dnu najplitvejše (a) in najgloblje raze (b)* ... 65
Slika 79: *Značilna topografija najmanjše (a, c) in največje raze (b, d), posnete s konfokalnim mikroskopom pri 10-kratni povečavi: optična slika (a, b) in topografija površine (c, d)* ... 66
Slika 80: *Značilna topografija najmanjše (a, c) in največje raze (b, d), posnete s konfokalnim mikroskopom pri 50-kratni povečavi: optična slika (a, b) in topografija površine (c, d)* ... 67
Slika 81: *SEM-posnetek vzorca z najglobljo razo* ... 67
Slika 82: *SEM-posnetek prečnega prereza raze z vidnimi vtisi merjenja trdote po Vickersu* ... 68

Slika 83: *Primer utrjevanja materiala po globini raze (a) in porazdelitve trdote na prerezu raze (b)*.....69
Slika 84: *Graf rezidualov razenja za A_g (a) in graf normalne porazdelitve rezidualov (b)*.....71
Slika 85: *Vpliv faktorjev obdelave na površino raze na prerezu A_g; vpliv sile orodja in števila prehodov orodja (a), radij konice orodja in število prehodov orodja (b) ter radij konice orodja in sila orodja (c)* 72
Slika 86: *Vpliv faktorjev obdelave na površino grebena raze na prerezu A_r; vpliv sile orodja in števila prehodov orodja (a), radija konice orodja in števila prehodov orodja (b) ter radija konice orodja in sile orodja (c)* 73
Slika 87: *Vpliv faktorjev obdelave na globino raze h_g; vpliv sile orodja in števila prehodov orodja (a), radija konice orodja in števila prehodov orodja (b) ter sile in hitrosti pomika orodja (c)* 74
Slika 88: *Vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na širino raze na ničelni višini w_0*.....76
Slika 89: *Vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na širjenje utrjevanja v prečni smeri σ_x* 77
Slika 90: *Vpliv sile orodja in števila prehodov orodja na širjenje utrjevanja v vzdolžni smeri σ_y* 78
Slika 91: *2D-profil (a, c) in 3D-profil (b, d) dveh karakterističnih primerov mikrofrezanih vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah: R = 100 μm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (a, b) in R = 200 μm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (c, d)* 81
Slika 92: *Primer hrapavosti površine na dnu mikrofrezane gravure v različnih obdelovalnih razmerah: R= 100 μm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (a) in R = 200 μm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (b)*.....82
Slika 93: *Značilna topografija mikrofrezanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b); R = 100 μm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm*.....82
Slika 94: *Značilna topografija mikrofrezanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b); R = 200 μm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm*.....83
Slika 95: *Topografski posnetki tipičnih mikrofrezanih odrezkov vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah pri 50-kratni povečavi: R = 100 μm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (a) in R = 200 μm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (b)* 83
Slika 96: *SEM-posnetek mikrofrezala radija 200 μm po obdelavi pri 250- (a) in 330-kratni povečavi (b)*.....84
Slika 97: *SEM-posnetek mikrofrezanega vzorca in vidni vtiski merjenja trdote v različnih obdelovalnih razmerah: R = 100 μm, v_c = 30 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (a) in R = 200 μm, v_c = 90 000 min^{-1}, v_t = 6 mm/s, h_g = 30 μm (b)*.....84
Slika 98: *Graf rezidualov razenja za R_a (a) in graf normalne porazdelitve rezidualov (b)*.....86
Slika 99: *Vpliv faktorjev obdelave na hrapavost površine R_a; vpliv vrtilne hitrosti in podajalne hitrosti (a), vrtilne hitrosti in globine reza (b), radija orodja in globine reza (c) ter radija orodja in podajalne hitrosti (d)*.....87
Slika 100: *Analizirane mere profila kanala laserske obdelave*.....89

Slika 101: *2D-profil (a, c) in 3D-profil (b, d) dveh karakterističnih lasersko obdelanih vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah: f_p = 50 kHz, P = 15 W, v_t = 30 mm/s, z = 1 mm (a, b) in f_p = 100 kHz, P = 10 W, v_t = 5 mm/s, z = 0 mm (c, d)* 91

Slika 102: *SEM-posnetek lasersko obdelanega vzorca z zajetim zračnim mehurjem in nastalim grebenom, f_p = 50 kHz, P = 15 W, v_t = 30 mm/s, z = 1 mm* 92

Slika 103: *Primer hrapavosti površine na dnu laserske gravure: f_p = 50 kHz, P = 15 W, v_t = 30 mm/s, z = 1 mm; R_a = 3,28 µm (a) in f_p = 100 kHz, P= 10 W, v_t = 5 mm/s, z = 0 mm; R_a = 0,185 µm (b)* 92

Slika 104: *Značilna topografija lasersko obdelanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b); f_p = 50 kHz, P = 15 W, v_t = 30 mm/s, z = 1 mm*..... 93

Slika 105: *Značilna topografija mikrofrezanega vzorca pri 10- (a) in 50-kratni povečavi (b); f_p = 100 kHz, P = 10 W, v_t = 5 mm/s, z = 0 mm*..... 93

Slika 106: *Analiza kemijske sestave lasersko obdelanega vzorca*..... 94

Slika 107: *SEM-posnetka lasersko obdelanih vzorcev v različnih obdelovalnih razmerah z vidnimi napakami in vtiski merjenja trdote: f_p = 150 kHz, P = 15 W, v_t = 15 mm/s, z = 0 mm (a) in f_p = 150 kHz, P = 10 W, v_t = 5 mm/s, z = 0 mm (b)* 95

Slika 108: *Graf rezidualov laserske mikroobdelave za A_g (a) in graf normalne porazdelitve rezidualov (b)*..... 97

Slika 109: *Vpliv moči in skenirne hitrosti na površino kanala A_g*..... 97

Slika 110: *Vpliv faktorjev obdelave na površino grebena raze A_r; vpliv moči in skenirne hitrosti (a) ter moči in pomika žarišča (b)*..... 98

Slika 111: *Vpliv skenirne hitrosti in pomika žarišča na globino kanala h_g*..... 99

Slika 112: *Vpliv faktorjev obdelave na širino kanala na ničelni višini w_0; vpliv skenirne hitrosti in pomika žarišča (a), frekvence pulziranja in pomika žarišča (b) ter moči in skenirne hitrosti (c)* 101

Slika 113: *Vpliv faktorjev obdelave na širino med grebenoma w_1; vpliv skenirne hitrosti in pomika žarišča (a) ter moči in skenirne hitrosti (b)* 102

Kazalo tabel

Tabela 1: *Dimenzijske vrednosti mikrofrezala premerov 0,8 mm in 1,0 mm* 11
Tabela 2: *Valovne dolžine polprevodniških laserjev* 31
Tabela 3: *Primerjalna tabela treh najpogostejših tipov laserjev* 33
Tabela 4: *Ortogonalna tabela $L_{27}(3^{13})$ eksperimentalnega načrtovanja DoE*..... 37
Tabela 5: *Kemijska sestava jekla AISI 304 v masnih deležih (%) (iz tehniškega lista materiala)*..... 45
Tabela 6: *Mehanske lastnosti jekla AISI 304 (iz tehniškega lista materiala)*..... 46
Tabela 7: *Eksperimentalni parametri razenja z diamantno konico*..... 48
Tabela 8: *Karakteristične dimenzije mikrofrezal, uporabljenih za izvedbo eksperimentov*..... 48
Tabela 9: *Eksperimentalni parametri razenja z diamantno konico*..... 50
Tabela 10: *Eksperimentalni parametri laserske obdelave*..... 52
Tabela 11: *Eksperimentalni načrt DoE in rezultati izmerjenih vrednosti pri razenju* 64
Tabela 12: *Rezultati analize ANOVA in vpliva posameznih faktorjev na signifikantnost spremenljivk pri postopku razenja*..... 70
Tabela 13: *Eksperimentalni načrt DoE in rezultati izmerjenih vrednosti pri mikrofrezanju* 80
Tabela 14: *Rezultati analize ANOVA in vpliva posameznih faktorjev na signifikantnost spremenljivke R_a pri mikrofrezanju* 85
Tabela 15: *Eksperimentalni načrt DoE in rezultati izmerjenih vrednosti pri laserski obdelavi* 90
Tabela 16: *Rezultati analize ANOVA in vpliva posameznih faktorjev na signifikantnost spremenljivk pri laserski mikroobdelavi*..... 96

Priloge

Objave

[1] **Mladenovič, V.** Panjan, P.; Paskvale, S.; Çalişkan, H.; Poljanšek, N.; Čekada, M. Investigation of the laser engraving of AISI 304 stainless steel using a Response surface methodology, *Technical Gazette* **23**(1), *TV-20150504150446*, Sprejeto: 22. Junij 2015

[2] **Mladenovič, V.**; Čekada, M; Panjan, P. Characteristics of grooving by diamond needle-tip with various tip shapes and grooving parameters. V: TechConnect World 2013 Conference and Expo - Nanotech 2013, May 12-16, 2013, Washington, DC. Objavljeno v: *Nanotech 2013: Technical Proceedings of the 2013 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, (Vol. 1)*, (2013).

[3] Đokić, M.; Radonić, V.; **Mladenovič, V**.; Pleteršek, A.; Kavčič, U.; Hladnik, A.; Crnojević-Bengin, V.; Muck, T. The influence of lamination and conductive printing inks on smart-card operability, *Mater Tehnol* **48**(4), 497-504 (2014).

[4] Klanjšek-Gunde, M.; **Mladenovič, V.**; Čekada, M.; Panjan, P., Maček, M.; Drnovšek, A.; Poberaj, I.; Kavčič, B.; Sušin, B. Some possibilities for preparation of diffractive optically variable security structures and their properties. V: SLONANO 2011, October 26-28, 2011, Ljubljana, Slovenia. Objavljeno v *SLONANO* **10**, str.56, (2011).

[5] Klanjšek-Gunde, M.; Panjan, P.; Čekada, M.; Rogelj, N.; Sušin, B.; **Mladenovič, V.** *Spektrofotometrična identifikacija optično variabilnih zaščitnih elementov* (Delovno poročilo Kemijskega inštituta 2720, Kemijski inštitut: Ljubljana, 2011).

[6] Klanjšek-Gunde, M.; Panjan, P.; Čekada, M.; Faktor, D.; Sušin, B.; Maček, M.; **Mladenovič, V.** *Preučitev struktur in materialov za pripravo master originala za optično variabilne zaščitne elemente* (Delovno poročilo Kemijskega inštituta 2719, Kemijski inštitut: Ljubljana, 2011).

Nagrade

[1] Leta 2010; Zlato priznanje Regionalne gospodarske zbornice Celje za inovacijo z nazivom »Nova generacija intaglio tiskarskih plošč«

[2] Leta 2010; Srebrno priznanje Gospodarske zbornice Slovenije za inovacijo z nazivom »Nova generacija intaglio tiskarskih plošč«

[3] Leta 2013; Zlato priznanje Regionalne gospodarske zbornice Celje za inovacijo z nazivom »NanoTech Intaglio tiskarska plošča«

[4] Leta 2013; Srebrno priznanje Gospodarske zbornice Slovenije za inovacijo z nazivom »NanoTech Intaglio tiskarska plošča«