

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej CIMPERMAN

**ANALIZA VPLIVA OBRABE ORODJA NA KAKOVOST  
NOVONASTALE POVRŠINE PRI VRTANJU LESNIH  
KOMPOZITOV**

DIPLOMSKO DELO

Visokošolski strokovni študij

Ljubljana, 2015

UNIVERZA V LJUBLJANI  
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA  
ODDELEK ZA LESARSTVO

Andrej CIMPERMAN

**ANALIZA VPLIVA OBRABE ORODJA NA KAKOVOST  
NOVONASTALE POVRŠINE PRI VRTANJU LESNIH  
KOMPOZITOV**

DIPLOMSKO DELO  
Visokošolski strokovni študij

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF TOOL WEAR ON A QUALITY OF  
NEW MADE SURFACE IN DRILLING OF WOOD PANELS**

GRADUATION THESIS  
Higher professional studies

Ljubljana, 2015

Diplomsko delo je zaključek Visokošolskega strokovnega študija lesarstva na Biotehniški fakulteti v Ljubljani. Opravljeno je bilo na Katedri za mehanske obdelovalne tehnologije, Oddelka za lesarstvo, Biotehniške fakultete, Univerze v Ljubljani.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorico diplomskega dela imenoval doc. dr. Dominiko Gornik Bučar, somentorja asist. dr. Bojana Gospodariča in za recenzenta prof. dr. Sergeja Medveda.

Mentorica: doc. dr. Dominiko Gornik Bučar

Somentor: asist. dr. Bojan Gospodarič

Recenzent: prof. dr. Sergej Medved

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Naloga je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Podpisani Andrej Cimperman se strinjam z objavo svojega diplomskega dela v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Cimperman Andrej

### KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD	Vs
DK	UDK 674.05:630*862.3
KG	iveral/razslojevanje/obraba orodja/pritisna sila/delaminizacijski faktor
AV	CIMPERMAN, Andrej
SA	GORNIK BUČAR, Dominika (mentor)/GOSPODARIČ, Bojan (somentor)/ MEDVED, Sergej (recenzent)
KZ	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
ZA	Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo
LI	2015
IN	ANALIZA VPLIVA OBRABE ORODJA NA KAKOVOST NOVONASTALE POVRŠINE PRI VRTANJU LESNIH KOMPOZITOV
TD	Diplomsko delo (visokošolski strokovni študij)
OP	IX, 42 str., 6 pregl., 49 sl., 12 vir.
IJ	sl
JI	sl/en
AI	Pri obdelavi ivernih plošč je značilna zelo nizka življenjska doba orodja. Zagotavljanje visoke kakovosti robu na izstopni strani orodij pri vrtanju skoznjih izvrtin v obložene plošče je zelo težavno. V primeru, da so obremenitve pri vrtanju luknje skozi kompozit večje od sile iztrganja površinskega sloja, pride na izstopni strani do delaminizacije kompozita. Obremenitve pri vrtanju so odvisne od tehnikoških parametrov obdelave in sicer: podajalne hitrosti, hitrosti vrtenja orodja, kota konice orodja ter lastnosti obdelovanca. Z obrabo orodja naraščata sila v smeri vrtanja ter moment okoli osi vrtanja. Pri večjih obremenitvah pričakujemo slabšo kakovost novonastalih površin izvrtin; predpostavljamo, da je z meritvijo obremenitve orodja mogoče predvideti kakovost novonastale površine. Na obloženi iverni plošči smo z vrtalnima orodjem izvrtali 3842 oz. 5365 lukenj in z piezo dinamometrom izmerili pritisno silo ter določili faktor delaminizacije. Ugotovili smo, da je optimalna velikost delaminizacijskega koeficiente 1, kar znaša pri pritisni sili 60 N; tu še ne pride do delaminizacije površine, nad temi vrednostmi pa so že vidne manjše poškodbe površine. Ocenujemo, da je vrtanje še smiselno in kakovost površine še sprejemljiva do pritisne sile približno 82N ter delaminizacijskega koeficiente 1,08.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN	Vs
DC	UDC 674.05:630*862.3
CX	particleboard/delamination/tool wear/thrust force/delamination factor
AU	CIMPERMAN, Andrej
AA	GORNIK BUČAR, Dominika (supervisor)/GOSPODARIČ, Bojan (co-advisor)/ MEDVED, Sergej (reviewer)
PP	SI-1000 Ljubljana, Rožna dolina, c. VIII/34
PB	University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology
PY	2015
TI	ANALYSIS OF INFLUENCE OF TOOL WEAR ON A QUALITY OF NEWLY MADE SURFACE IN DRILLING OF WOOD PANELS
DT	Graduation Thesis (Higher professional studies)
NO	IX, 42 p., 6 tab., 49 fig., 12 ref.
LA	sl
AL	sl/en
AI	<p>It is typical in processing of particleboards that the tool wear is very high. Drilling through holes in a particleboard presents big problems in providing high quality edge on the exit side of the holes. In case that loads caused by drilling holes through particleboards are higher than delamination value of the surface layer the result is delamination on the exit side of the particleboard. Loads by drilling depend on cutting parameters: spindle speed, feed rate, tool point angle and workpiece characteristics. Tool wear increases the force in the direction of drilling, and the torque around axis of drilling. Higher loads caused by drilling holes lower the quality of surfaces. We can assume that measuring the tool loads the quality of such surfaces can be predicted. We have drilled 3842 and 5365 holes on coated particleboards with 2 clockwise drilling tools, and measured thrust force with piezo dynamometer. We also determined delamination factor. The optimal delamination factor with no surface delamination is 1, coming to approximately 60N of thrust force. Crossing that line causes minor damage on surface. The drilling is sensible till thrust force reaches approximately 82N, and delamination factor 1.08.</p>

## KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA .....	III
KEY WORDS DOCUMENTATION .....	IV
KAZALO VSEBINE .....	V
KAZALO SLIK .....	VIII
KAZALO PREGLEDNIC .....	X
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2 PREGLED LITERATURE.....</b>	<b>2</b>
<b>3 SPLOŠNI DEL .....</b>	<b>8</b>
3.1 KINEMATIKA VRTANJA .....	8
<b>3.1.1 Osnovni elementi obdelave pri vrtanju .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.2 Rezalna sila .....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.3 Vrtilni moment.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1.4 Moč pri vrtanju.....</b>	<b>12</b>
3.2 OBRABA IN OBSTOJNOST ORODIJ .....	12
<b>3.2.1 Obraba na prosti ploskvi .....</b>	<b>12</b>
<b>3.2.2 Obstojnost orodja .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.3 Taylorjeva enačba obstojnosti orodja .....</b>	<b>16</b>
<b>3.2.4 Obrabni volumen .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.5 Obraba na cepilni ploskvi.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.6 Oblikovanje zarez .....</b>	<b>18</b>
<b>3.2.7 Vzroki za nastanek zarez.....</b>	<b>19</b>
3.3 RAZLIKE IN PODOBNOSTI MED ODREZOVANJEM KOVIN TER LESA.....	20
<b>3.3.1 Glede na obdelovani material.....</b>	<b>20</b>
3.3.1.1 Homogenost .....	21
3.3.1.2 Izotropnost.....	21
3.3.1.3 Vlažnost .....	21
3.3.1.4 Trdnost.....	21
3.3.1.5 Trdota.....	21

3.3.1.6	Zahtevana natančnost.....	22
<b>3.3.2</b>	<b>Orodja .....</b>	<b>22</b>
3.3.2.1	Geometrija orodja .....	22
3.3.2.2	Material orodij .....	22
<b>3.3.3</b>	<b>Tehnološki parametri .....</b>	<b>23</b>
3.3.3.1	Rezalna hitrost.....	23
3.3.3.2	Podajalna hitrost .....	23
3.3.3.3	Globina rezanja.....	23
<b>4</b>	<b>MATERIALI IN METODE DELA .....</b>	<b>24</b>
4.1	MATERIALI .....	24
<b>4.1.1</b>	<b>Iveral (debelina 18mm, bele barve).....</b>	<b>24</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Sveder.....</b>	<b>24</b>
4.2	METODA DELA.....	26
<b>5</b>	<b>REZULTATI .....</b>	<b>28</b>
<b>6</b>	<b>ANALIZA REZULTATOV .....</b>	<b>34</b>
6.1	PRVI SVEDER.....	34
6.2	DRUGI SVEDER .....	35
<b>7</b>	<b>SKLEPI.....</b>	<b>39</b>
<b>8</b>	<b>POVZETEK .....</b>	<b>40</b>
<b>9</b>	<b>VIRI .....</b>	<b>41</b>
	<b>PRILOGA</b>	

## KAZALO SLIK

Slika 1: Shematični prikaz postopka vrtanja z vsemi osnovnimi elementi obdelave (Sokovič, 1990: 84) .....	9
Slika 2: Rezalne sile in vrtilni moment pri vrtanju (Sokovič, 1990: 86) .....	11
Slika 3: Obraba na prosti ploskvi orodja (Kopač, 2008: 79).....	13
Slika 4: Obraba svedra pri vrtanju (Kopač, 2008: 78) .....	14
Slika 5: Sprememba širine obrabne ploskve (VB) na prosti ploskvi orodja s časom (t) za različne rezalne hitrosti (v) (Kopač, 2008: 80).....	15
Slika 6: Dejanski in približni potek krivulje obstojnosti orodja (Kopač, 2008: 80).....	16
Slika 7: Oblikovanje zarez na orodju pri struženju (Kopač, 2008: 85) .....	19
Slika 8: Žareči robovi odrezka pri struženju visokotemperaturne zlitine (Kopač, 2008: 86) ...	20
Slika 9: Iveral.....	24
Slika 10: Desnosučni prebijalni sveder znamke Leitz .....	25
Slika 11: Shema dimenzij svedra.....	25
Slika 12: Mere svedrov glede na premer svedra.....	25
Slika 14: Dinamometer (Kistler, 2014 a) .....	27
Slika 13: Blokovna shema merilnega sistema .....	27
Slika 16: Grafični prikaz določevanja faktorja delaminizacije .....	28
Slika 17: Primer potisne sile pri vrtanju.....	30
Slika 19: Izmerjena povprečja sile v smeri vrtanja (drugi sveder) .....	31
Slika 20: Potek faktorja delaminizacije v odvisnosti od števila izvrtin (prvi sveder) .....	32
Slika 21: Potek faktorja delaminizacije v odvisnosti od števila izvrtin (drugi sveder) .....	32
Slika 22: Potek pritisne sile v odvisnosti od števila izvrtin (prvi sveder) .....	33
Slika 24: Primer poškodovane površine po 558 izvrtinah za 1. sveder .....	34
Slika 25: Primer poškodovane površine po 1008 izvrtinah za 1. sveder .....	35
Slika 26: Primer poškodovane površine po 3707 izvrtinah za 1. sveder .....	35
Slika 27: Primer poškodbe izhodne površine po 636 izvrtinah za 2. Sveder .....	36
Slika 28: Primer poškodbe izhodne površine po 1191 izvrtinah za 2. sveder .....	36
Slika 29: Primer poškodbe izhodne površine po 2301 izvrtinah za 2. sveder .....	37
Slika 30: Primer poškodbe izhodne površine po 5026 izvrtinah za 2. sveder.....	37
Slika 31: Razlika v pritisni sili glede na število lukanj med 1. in 2. svedrom .....	38
Slika 32: Razlika v količniku glede na število lukanj med 1. in 2. svedrom .....	38

## KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Meritve izmerjene in predvidene potisne sile Fz .....	3
Preglednica 2: Razlike med lastnostmi obdelovanca iz lesa ter obdelovanca iz kovine.....	20
Preglednica 3: Razlika med orodjem za obdelavo lesa ter orodjem za obdelavo kovin .....	22
Preglednica 4: Razlike pri tehnoloških parametrih za obdelavo lesa in obdelavo kovin.....	23
Preglednica 5: Izmerjen faktor delaminizacije kompozita 5 testnih vzorcev po N izvrtinah (prvi sveder) .....	29
Preglednica 6: Izmerjen faktor delaminizacije kompozita 5 testnih vzorcev po N izvrtinah (drugi sveder) .....	29

## 1 UVOD

V pohištveni industriji pohištvo najpogosteje izdelujejo iz obloženih ivernih (PB) in srednje gostih (MDF) plošč. Vrtanje skoznjih izvrtin v plošče predstavlja velike težave pri zagotavljanju visoke kakovosti na izstopni strani izvrtine. Groba površina, krušenje površinskega sloja, trganje robov so poškodbe izstopne površine vrtanja, ki jih lahko preprečimo s pravilno izbiro ustreznih parametrov pri vrtanju.

Obstojnost orodja je zelo povezana s kvaliteto materiala izbranega orodja, njegovim vzdrževanjem in seveda pravilnim izborom obdelovalnih parametrov pri določenem procesu obdelave. Neustrezni obdelovalni parametri imajo negativen vpliv na obrabo orodja. V primeru, da so obremenitve pri vrtanju luknje skozi kompozit večje od sile iztrganja površinskega sloja, pride na izstopni strani do delaminacije, kar pa najpogosteje ni sprejemljivo.

Obremenitve pri vrtanju so odvisne od tehnikalnih parametrov obdelave in sicer podajalne hitrosti, hitrosti vrtenja orodja in geometrije orodja ter lastnosti obdelovanca. Predvsem zgradba in sestava obložene plošče močno vplivata na obrabo orodja. Obstojnost orodja lahko definiramo kot čas efektivnega dela orodja do stopnje obrabe, po kateri delo ni več smotrno. Obraba orodij pri obdelavi ivernih plošč je dosti večja kot pri obdelavi masivnega lesa. Za obdelavo ivernih plošč je značilna zelo nizka življenska doba orodja. Uporaba orodja iz volframovega karbida ima prav tako visoko stopnjo obrabe. Pri obdelavi ivernih plošč je dotično orodje nagnjeno k obrabi zaradi oksidacije pri visoki temperaturi ter abrazivne obrabe rezila.

V današnjem času lahko obložene plošče vsebujejo tudi delež recikliranega lesa in lahko tako vsebujejo tudi razmeroma veliko delcev, ki niso lesnega in ligno celulognega izvora. Najpogosteje so to zmleti kovinski konstrukcijski elementi (vijaki, tečaji vrat, kovinska vodila) recikliranega pohištva ali pa pesek in kamni, ki so pri transportu in manipulaciji odsluženega pohištva pred procesom reciklaže zašli v surovino za izdelavo plošče. V primeru da v procesu vrtanja pride orodje v kontakt s kakšnim tujkom v plošči, se orodje hipoma poškoduje, kar pa močno spremeni geometrijo orodja in poveča pritisno silo ter posledično vpliva na delaminacijo plošče na izstopni strani izvrtine.

V primeru avtomatizirane proizvodnje je smiselno imeti sistem za prepoznavo stanja orodja, ki v primeru poškodbe orodja ali obrabe orodja proizvodnjo ustavi.

Z obrabo orodja naraščata sila v smeri vrtanja ter moment okoli osi vrtanja. Pri večjih obremenitvah pričakujemo slabšo kakovost novonastalih površin izvrtin ter predpostavljamo, da je z meritvijo obremenitve orodja mogoče predvideti kakovost novonastale površine.

Cilj diplomske naloge je bil zasnovati in izvesti eksperiment, ki omogoča merjenje sile v smeri vrtanja in moment okoli osi vrtanja, zasnovati metodo za vrednotenje kakovosti novonastale površine, ter ovrednotenje merilnih rezultatov obremenitev glede na kakovost novonastale površine izvrtine.

## 2 PREGLED LITERATURE

Najpogostejsi metodi, ki se uporablja za ugotavljanje pritisne sile in s tem tudi obrabe orodja sta Responce surface methodology (RSM) in Taguchijeva tehnika v povezavi s statističnima metodama analiza pomena (ANOM) in analiza odstopanj (ANOVA).

Avtorji članka (Valarmathi in sod., 2012) navajajo, da se lahko poškodbe površine pri vrtanju, ki se kažejo kot delaminizacija, trganje robov in ostali nezaželeni efekti, zmanjšajo s pravilno izbiro parametrov vrtanja. Tako so v svoji študiji uporabili t.i. »Responce surface methodology« (RSM) metodo, ki je bila razvita z namenom ugotavljanja odvisnosti med tehnološkimi spremenljivkami in odzivi. RSM je v bistvu zbirka matematičnih in statističnih tehnik, ki se uporablja za analiziranje odnosa med vhodnimi spremenljivkami in odhodnimi odzivi. Model parametrov vrtanja v iverno ploščo je bil izведен z uporabo polinoma drugega reda odzivnosti površine:

$$Fz = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots \dots + \beta_{11} X_1^2 + \beta_{22} X_2^2 \dots \dots + \beta_{n-1n} X_{n-1} X_n \quad \dots(1)$$

Fz je pritisna sila;  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  so koeficienti;  $X_1, X_2, X_n$  so vhodne spremenljivke. Z uporabo Design Expert programa je bila razvita enačba odzivnosti površine pri vrtanju lamiliranih ivernih plošč. Od treh vrst modelov, ki so: kvadratni model, linearni model ter model interakcije dveh faktorjev, se je za najbolj učinkovitega izkazal kvadratni model (2). Kvadratni model je bil ustvarjen za ohranjanje razmerja med pritisno silo in parametri vrtanja.

Koeficienti modelov so:

- Rsquared(Rsq), ki je koeficient soodnosa med podatki in modelom oziroma koeficient za ocenitev, kako podatki ustrezajo modelu.
- Adjusted Rsq, ki je spremenjeni Rsq in je prilagojen številčnim pogojem v modelu.
- Predicted Rsq se uporablja za testiranje modelnih napovedi odzivov.
- Press ocenjuje sposobnost predvidevanja modela in z manjšanjem vrednosti se povečuje sposobnost predvidljivosti modela.

Enačba kvadratnega modela je sledeča:

$$Fz = -104.20592 + 4.67684E-003 * N - 0.30750 * f + 1.94586 * \varphi - 1.02944E-005 * N * f - 4.20199E-005 * N * \varphi + 1.90319E-003 * f * \varphi - 0.68056E-008 * N^2 + 8.09383E-004 * f^2 - 7.26569E-003 * \varphi^2 \quad \dots(2)$$

kjer je N vrtilna hitrost, f je podajalna hitrost ter  $\varphi$  je kot konice vrtenja orodja.

Primernost modela predvidevanja pritisne sile pri vrtanju v iverne plošče potrjujejo tudi rezultati prikazani v preglednici 1, ki prikazuje izmerjene potisne sile ter predvidene – modelirane potisne sile, saj so predvidene vrednosti zelo blizu izmerjenim vrednostim.

Preglednica 1 Meritve izmerjene in predvidene potisne sile Fz

MERITEV	IZM. POTISNA SILA(N)	PREDV. SILA(N)	POTISNA
1	13,39	13,1236	
2	21,35	21,45145	
3	25,48	24,99356	
4	20,46	17,22159	
5	26,56	28,11875	
6	29,22	34,08743	
7	27,89	30,42514	
8	44,93	43,89161	
9	56,32	52,28686	
10	11,46	11,99469	

Taguchijeva tehnika kombinira statistične in inženirske metode. Valarmathi in sod. (2012) navajajo, da je prednost metode v tem, da je število eksperimentov zreducirano. Uporaba ortogonalne zbirke metode eksperimentov pa pomeni tudi zmanjšanje časa in stroškov

eksperimenta. Ortogonalna zbirka sestoji iz vrstic in stolpcev. Število eksperimentov predstavlja vrstice, število faktorjev pa stolpce. Vsaka kombinacija vnesenih kontrolnih parametrov se pojavi za vsak stolpec z namenom uravnavanja eksperimenta.

Valarmathi in sod. (2012) navaja, da se šum lahko izniči z uporabo treh razmerij S/N (Signal to Noise): smaller-the-better, nominal-the-better, larger-the-better. V študiji so uporabili razmerje smaller-the-better (3) :

$$=-10 \log_{10}[-\sum_{i=1}^n y_i^2] \text{ kjer so,} \quad (3)$$

Y opazovani podatki, n je pa število opazovanj.

Pri razlagi poskusnih rezultatov v analizi karakteristik optimalnih nastavitev, Taguchijeva metoda uporablja namesto povprečnih vrednosti S/N razmerje.

Glede na Taguchijeve optimizacijske rezultate je bilo razvidno, da bi morala biti optimalna vrednost podajalne hitrosti nizka, vrtilna hitrost pa bi morala biti na visoki stopnji, če bi želeli minimalizirati deliminizacijski faktor. Dokazano je, da je nujno imeti visoko vrtilno hitrost za zmanjšanje delaminizacije na vhodni in izhodni strani luknje.

Očitno je, da se aksialna sila svedra zmanjša z večanjem vrtilne hitrosti. Znano je tudi, da večja vrtilna hitrost povzroča višje temperature, kar pomaga pri mehčanju materiala. Analiza podatkov z uporabo Taguchijeve metode vključuje analizo pomena (ANOM), ki pomaga pri določanju optimalnih nastavitev parametrov vrtanja kot rezultat S/N razmerja.

Valarmathi in sod. (2012) so za meritve in analizo pritisne sile pri vrtanju v iverne plošče uporabili oplaščeni iverni plošči debeline 12mm. Za eksperiment so uporabili tri svedre iz karbida, premera 10mm ter s koti vrtanja  $100^\circ, 118^\circ$  in  $135^\circ$ . Vrtali so z vertikalnim cnc strojem (VMC100), z vrtilno hitrostjo orodja do 5000vrt/min, podajalno hitrostjo pa do 4000mm/min. Pritisno silo so merili s 3 osnim piezo dinamometrom proizvajalca Kistler, ki je bil priključen na ojačevalnik Kistler, preko katerega so se signali shranjevali v računalnik.

Eksperiment je potekal v treh stopnjah glede na različne hitrosti vrtenja, podajalne hitrosti ter kota konice vrtanja in sicer:

1. Stopnja(1000vrt/min, 75mm/min,  $100^\circ$ ).
2. Stopnja(3000vrt/min, 150mm/min,  $118^\circ$ ).
3. Stopnja(5000vrt/min, 225mm/min,  $135^\circ$ ).

Pri tem so ugotovili, da se pritisna sila zmanjšuje s povečanjem hitrosti vrtenja, saj se pri večji vrtilni hitrosti bolj segreva material, ki ga vrtamo in se posledično zmehča matrika materiala, kar zmanjša pritisno silo vrtanja.

Dvig podajalne hitrosti poveča pritisno silo, saj povečanje podajalne hitrosti poveča območje kontakta orodja z delovno površino in obremenitve orodja pri vrtanju.

Pri vrtanju z manjšim kotom konice vrtanja je pritisna sila manjša. Večji kot je kot konice vrtanja, večje je območje kontakta orodja z delovno površino, kar poveča pritisno silo.

Delaminacijski faktor je definiran kot razmerje med maksimalnim premerom poškodovane površine ter premerom luknje (slika 18) in je proporcionalen pritisni sili, ki nastane med procesom vrtanja. Ugotovitev kažejo, da povečanje vrtilne hitrosti zmanjša delaminacijski faktor podobno kot pri pritisni sili. Delaminacijski faktor se s povečanjem kota konice vrtalnega orodja in podajalne hitrosti prav tako poveča. Pritisna sila ima velik vpliv na kvaliteto izvrtine pri vrtanju. Z ustreznimi parametri pa je možno delaminacijski faktor in pritisno silo zmanjšati.

Na končni rezultat vrtanja ima poleg posameznih parametrov vrtanja velik vpliv tudi sama interakcija med posameznimi parametri. Pritisna sila narašča z naraščanjem podajalne hitrosti in pada s padanjem vrtilne hitrosti. Za najbolj primerno kombinacijo se izkaže nizka podajalna hitrost (75mm/min), visoka vrtilna hitrost (5000vrt/min) s  $100^0$  kotom konice orodja. Prav tako so ugotovili, da je največja interakcija med kotom konice orodja ter podajalno hitrostjo.

Tudi za modeliranje pritisne sile pri vrtanju v MDF ploščo so Valarmathi in sod., (2012) uporabili Taguchijevo metodo eksperimentov. Uporabili so MDF ploščo debeline 12 mm, svedre iz jekla za visoke vrtilne hitrosti, premera 10mm in s koti konice 100, 118 in 135 stopinj. Vrtanje so izvedli z vertikalnim CNC strojem (VMC 100), pritisno silo so merili s 3 osnim piezo dinamometrom.

V tej študiji so za ugotovitev vpliva raznih kontrolnih parametrov kot so vrtilna hitrost, podajalna hitrost in kot konice vrtalnega orodja, uporabili Taguchi L27 ortogonalno zbirkko. L27 ortogonalna zbirka je sestavljena iz 27 vrstic in 13 stolpcev, ki predstavljajo preizkuse in faktorje in se lahko uporabi za preizkuse do 13 parametrov. V tem eksperimentu so bili upoštevani 3 nivoji in 3 faktorji.

Eksperiment je potekal v treh stopnjah glede na različne hitrosti vrtenja, podajalne hitrosti ter kote konice vrtanja in sicer:

1. Stopnja(1000vrt/min, 75mm/min, 100°).
2. Stopnja(3000vrt/min, 150mm/min, 118°).
3. Stopnja(5000vrt/min, 225mm/min, 135°).

Glede na interakcijo vrilne in podajalne hitrosti s S/N razmerji je bilo ugotovljeno, da povečanje vrilne hitrosti in zmanjšanje podajalne hitrosti zmanjša pritisno silo Fz. Meritve ANOVA so tudi pokazale da je razviti RSM model učinkovit za predvidevanje vplivov vhodnih parametrov vrtanja na pritisno silo Fz. Iz eksperimentalnih rezultatov, kot tudi iz RSM modela, je razvidno, da so optimalni pogoji pri vrtanju za zmanjšanje pritisne sile, nizka podajalna hitrost ter visoka vrilna hitrost.

Avtorji članka (Prakash in Palanikumar, 2010) so za predvidevanje grobosti površine pri vrtanju v MDF plošče uporabili Taguchijeve  $L_{24}$  ortogonalne zbirke z upoštevanjem treh faktorjev na treh nivojih. Upoštevali so podajalno in vrilno hitrost ter premer svedra. Obseg parametrov je bil določen iz preteklih poizkusov in iz razpoložljivih virov.

Parametri, ki so se uporabili za ocenjevanje grobosti površine so podajalna hitrost, vrilna hitrost ter premer svedra in so potekali v treh nivojih:

1. 100mm/min, 1000vrt/min, 4mm.
2. 300mm/min, 3000vrt/min, 8mm.
3. 500mm/min, 5000vrt/min, 12mm.

V tej študiji je bila uporabljeni MDF plošča debeline 9 mm, vrtalo pa se je z vertikalnim CNC strojem (VMC 100) z možnostjo vrilne hitrosti 60-5000vrt/min ter podajalno hitrostjo do 4000mm/min. Svedri, ki so se uporabljali so stopenjski, prevlečeni s titanom, premerov 4, 8 in 12mm.

Merili so grobost površine Ra z namenom analize kvalitete končne površine. Definicija povprečne aritmetične višine (Ra) je izražena v matematični enačbi (4):

$$R_a = \int_0^L [Y(x)] dx \quad \dots(4)$$

Ra je povprečen aritmetični odklon grobosti površine od srednje linije, Y je ordinata profila krivulje in L je vzorčna dolžina.

Ugotovili so, da grobost površine naraste s povečano podajalno hitrostjo, upade pa z naraščanjem vrilne hitrosti pri čemer je podajalna hitrost še zmeraj dominantni faktor.

ANOVA pri modelu kaže, da je vrtilna hitrost najmanj pomemben parameter, vendar pri posameznem ciklu vrtanja povečanje vrtilne hitrosti omogoči izboljšanje glede grobosti površine.

Iz enačbe (enačba 4) je razvidno, da ima podajalna hitrost največji vpliv na grobost površine, sledita pa ji premer orodja ter vrtilna hitrost.

Davim in sod., (2007) so pri vrtanju v MDF ploščo izvedli študijo parametrov (vrtilna hitrost in podajalna hitrost) ter njihov vpliv na delaminizacijo. Načrt eksperimenta je bilo vrtanje dveh MDF plošč z vnaprej določenimi obdelovalnimi parametri. Cilj je bil določitev korelacije med podajalno in vrtilno hitrostjo ter delaminizacijo okoli luknje v MDF plošči.

Eksperiment se je izvajal na vertikalnem obdelovalnem stroju VCE500 MIKRON z 11 kW vrtilne moči in maksimalno vrtilno hitrostjo 7500 vrt/min. Testirani sta bili dve MDF plošči: LAMIPAN PB (oplaščen s plastjo iz lesa) in SUPERPAN D ECOR (oplaščen s plastjo iz melamina). Eksperiment se je izvajal na MDF plošči debeline 16 mm, ter s svedri iz karbidne trdine, premera 5mm, 20° spiralo ter kotom konice 60°.

Ugotovili so, da se delaminacijski faktor pri plošči LAMIPAN PB veča z večanjem podajalne hitrosti ter manjša z večanjem vrtilne hitrosti. Glede na rezultate je razvidno, da je delaminacija večja na izstopni strani luknje kot pri vstopu. Pri plošči SUPERPAN D ECOR se delaminacijski faktor prav tako zmanjšuje s povečanjem vrtilne hitrosti ter narašča s podajalno hitrostjo, vendar s to razliko, da je delaminacija skoraj enaka na vstopni, kakor tudi na izstopni strani luknje.

Gaitonde in sod.,(2007) so izvajali eksperiment Taguchijeve optimizacije multi-odzivnih karakteristik pri vrtanju v MDF ploščo z namenom zmanjšanja delaminizacije z uporabo koncepta uporabnosti.

Za eksperiment se je uporabljal vertikalni obdelovalni stroj VCE500 MIKRON, z 11kW vrtilne moči in maksimalno vrtilno hitrostjo 7500 vrt/min. Eksperiment se je izvajal na SUPERPAN D ECOR (oplaščeno z melaminom) MDF plošči. Eksperimenti so potekali po Taguchijevi l<sub>9</sub> ortogonalni zbirkvi. Plošče so bile debeline 16mm, orodje pa je bilo iz karbidne trdine premera 5mm, vrste K20, spirale 20° in kotom konice 60°. Delaminacijo okoli luknje so merili z mikroskopom z 1µm resolucijo in 30x povečavo .

Ugotovili so, da sta tako vrtilna kot tudi podajalna hitrost, pomembne za kontrolo delaminacijskega faktorja. Zmanjšanje delaminizacije je odvisno od interakcije med podajalno in vrtilno hitrostjo oz. ustrezne kombinacije vrtilne hitrosti (v višjem območju) in podajalne hitrosti (v nižjem območju).

### 3 SPLOŠNI DEL

#### 3.1 KINEMATIKA VRTANJA

Vrtanje je neprekinjen postopek odrezovanja z dvema reziloma. Orodje-vijačni sveder ima obe gibanji: glavno gibanje, tj. vrtenje in podajalno, tj. premočrtno gibanje kinematično povezano z glavnim gibanjem.

Vrtanje rabimo za izdelavo lukenj (vrtanje v »polno«), včasih pa tudi z vijačnimi svedri razširjamo (grezimo) že obstoječe lunkne (Sokovič, 1990).

##### 3.1.1 OSNOVNI ELEMENTI OBDELAVE PRI VRTANJU

Rezalna hitrost ( $V_c$ ):

$$V_c = \text{---} \quad m/min] \quad \dots(5)$$

kjer je  $n$  [vrt/min] vrtilna hitrost in  $D$ (mm) premer svedra.

Podajalna hitrost ( $V_f$ ):

$$V_f = n * f \quad [mm/min] \quad \dots(6)$$

kjer je  $f$  [mm/vrt] podajanje.

Strojni čas: ( $T_g$ )

$$T_g = \text{---} \quad [min] \quad \dots(7)$$

Količina odrezka v časovni enoti ( $q$ ):

$$q = \text{---} * f * n \quad [cm^3/min] \quad \dots(8)$$

kjer je  $L$  [mm] globina vrtanja in  $\Phi$  [ $^\circ$ ] kot konice svedra.

Nastavni kot ( $K$ ):

$$K = \phi/2 \quad \dots(9)$$

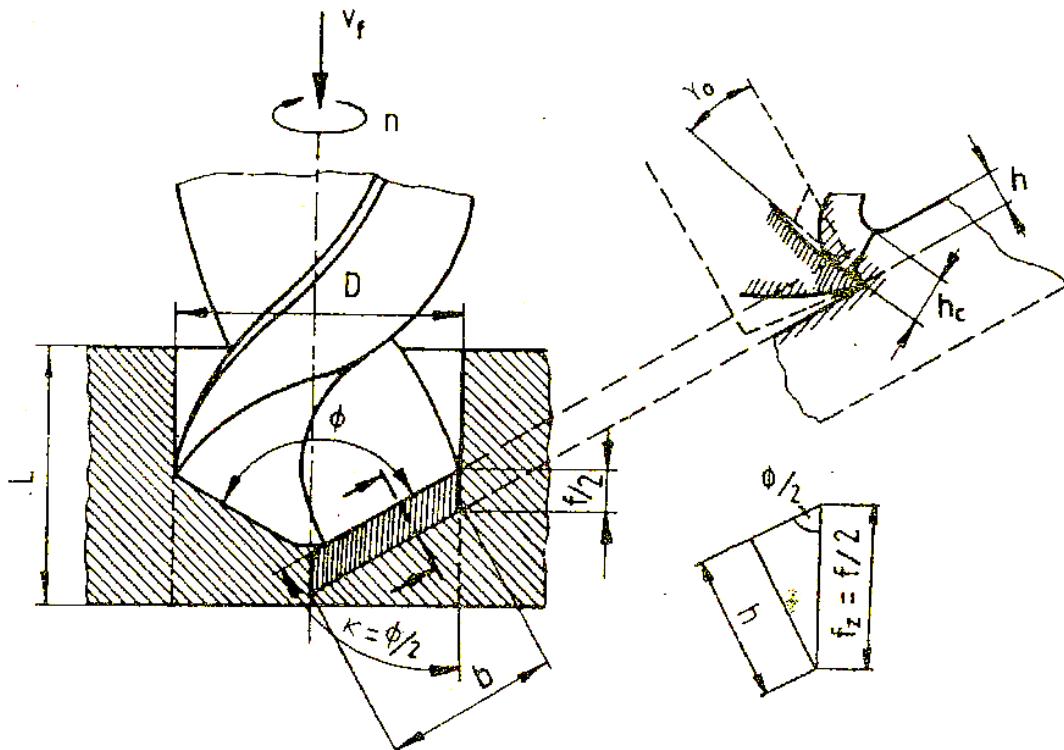
Širina odrezka ( $b$ ):

$$b = \text{---} [mm] \quad \dots(10)$$

Geometrijska debelina odrezka ( $h$ ):

$$h = - * \cos K [mm/vrt] \quad \dots(11)$$

kjer je  $h_c$  [mm] dejanska debelina odrezka.



Slika 1: Shematični prikaz postopka vrtanja z vsemi osnovnimi elementi obdelave (Sokovič, 1990: 84)

Teoretično je sveder osnosimetrično orodje, ki ima dve rezili, zato vsako rezilo odreže svoj odrezek (Sokovič, 1990).

Prerez odrezka za en rezalni rob Az:

$$A_z = \frac{\pi}{4} d^2 [mm^2] \quad \dots(12)$$

Celotni prerez odrezka pri vrtanju (A):

$$A = 2 * A_z = \frac{\pi}{2} d^2 [mm^2] \quad \dots(13)$$

Prerez odrezka lahko izrazimo tudi z geometrično debelino odrezka. Pri tem izhajamo iz osnovnih elementov obdelave pri vrtanju:

$$h = \frac{d}{2} \sin \theta \Rightarrow \theta = \frac{h}{\frac{d}{2}} \quad \dots(14)$$

Če enačbo (14) vstavimo v enačbi (12) in (13) dobimo:

$$A = 2 * A_z = \frac{\pi}{2} \frac{d^2}{\sqrt{1 + \left(\frac{2h}{d}\right)^2}} \quad \dots(15)$$

Rezalna hitrost pri glavnem vrtilnem gibanju (Vc):

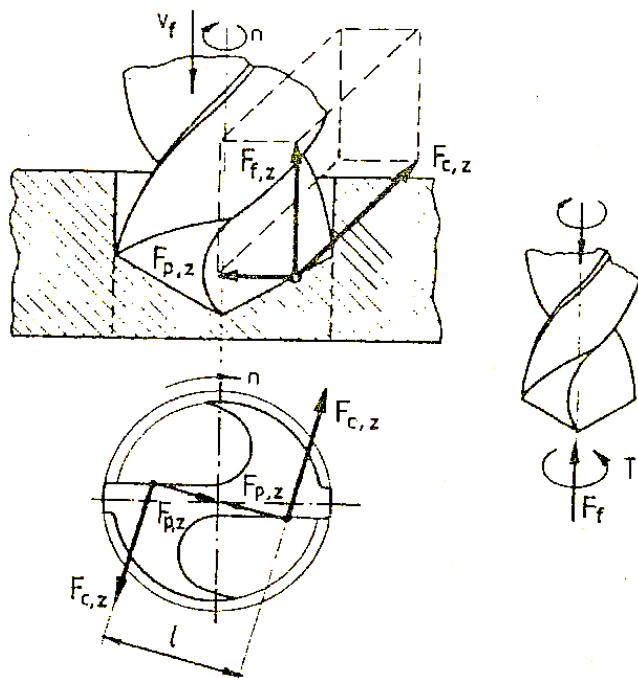
$$V_c = r * \omega = r * 2\pi * n = d * \pi * n \quad \dots(16)$$

Pri vrtanju je ta hitrost na obodu svedra. Ker se premer svedra proti jedru zmanjšuje, se zmanjšuje tudi hitrost, ki je v vrhu svedra enaka nič. V praksi računamo s povprečno rezalno hitrostjo (Vc):

$$V_c = \frac{d}{2} \pi n \quad \dots(17)$$

Vijačni sveder reže z dvema rezalnima robovoma. Prostorska krivulja, po kateri sta oblikovana cepilna žleba, je vijačnica. Kot srednje vijačnice in kot konice svedra sta odvisna od obdelovalnega materiala.

Na posamezni rezalni rob svedra deluje določena odrezovalna sila, ki jo podobno kot pri struženju razstavimo na komponente:



Slika 2: Rezalne sile in vrtilni moment pri vrtanju (Sokovič, 1990: 86)

### 3.1.2 REZALNA SILA

Rezalna sila ( $F_c$ ) na vsakem od obeh rezalnih robov je:

$$F_{c,z} = A_z * k_c = \dots * k_c \quad \dots(18)$$

Pri čemer je  $k_c$  specifična rezalna sila, ki je pri vrtanju običajno podana v odvisnosti od podajanja (Sokovič, 1990).

### 3.1.3 VRTILNI MOMENT

Vrtilni moment  $T$  povzročata rezalni sili  $F_{c,z}$  (moment dvojice):

$$T = F_{c,z} * l [Nm] \quad \dots(19)$$

Težave povzroča določitev prijemališča sil na rezalnih robovih. V praksi pogosto poenostavljeno računamo s  $l=d/2$  in če še upoštevamo enačbo (18) dobimo:

$$T = \text{——} * k_c [Nm] \quad \dots(20)$$

### 3.1.4 MOČ PRI VRTANJU

Moč pri vrtanju  $P_N$  določimo po znanem vrtilnem momentu:

$$P_N = T * \omega = \text{——} [W] \quad \dots(21)$$

Pri čemer smo upoštevali, da je:

$$Q = 2\pi * n \quad \text{in} \quad \dots(22)$$

$$n = \text{——} \quad \dots(23)$$

Potrebna moč elektromotorja  $P_e$  za vrtanje:

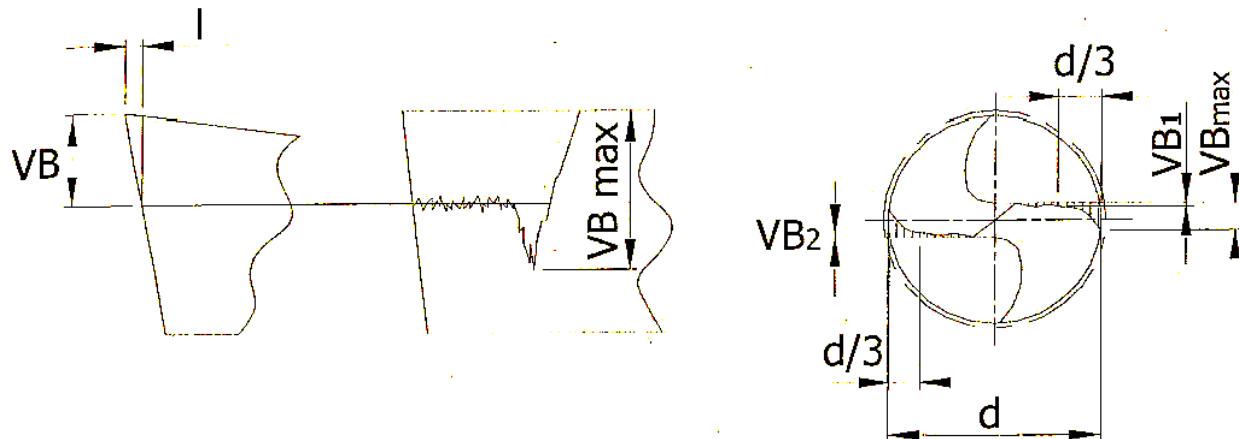
$$P_e \geq P_B = \text{——} [W] \quad \dots(24)$$

## 3.2 OBRABA IN OBSTOJNOST ORODIJ

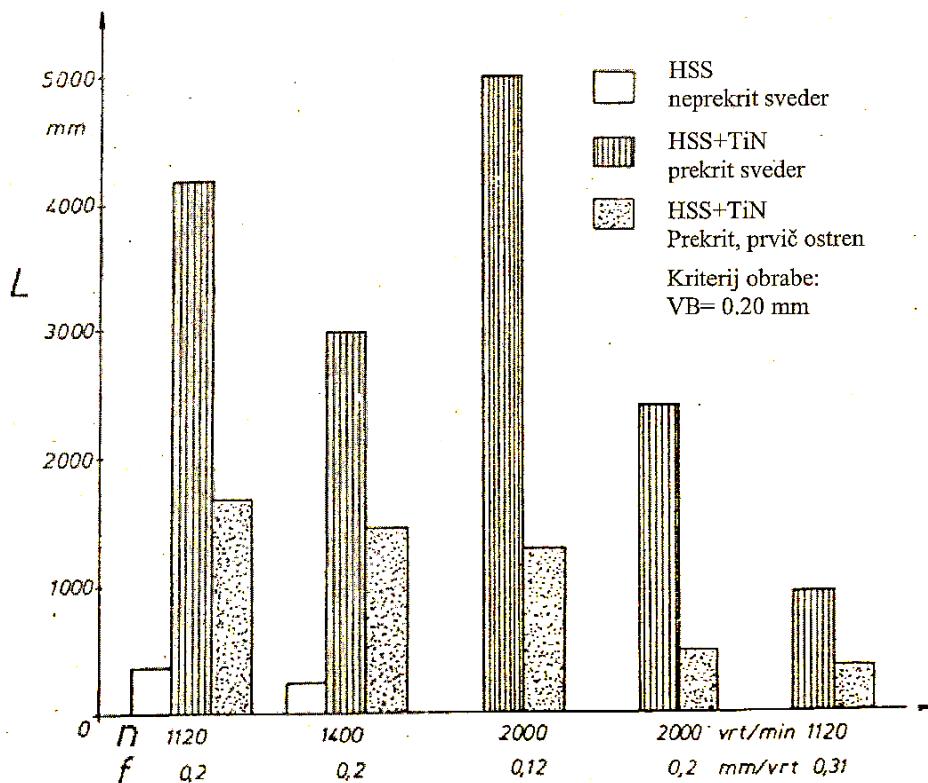
### 3.2.1 OBRABA NA PROSTI PLOSKVI

Obraba na prosti ploskvi se vedno pojavlja na več ali manj podoben način, kot prikazuje slika 3. Na prosti ploskvi nastane obrabna površina s povprečno širino VB. Zaradi obrabe se rezalni rob orodja pomakne nazaj za razdaljo  $\Delta l$ . Kvaliteta obdelane površine obdelovanca se poslabša, ker rezalni rob ni več pravilen, zaradi umika vrha orodja pa se spremenijo tudi dimenzijske obdelovanca. Obraba ploskev ni geometrično pravilna in nima jasno določene spodnje meje. Spodnji rob te ploskve je nazobčan, zelo pogosto pa se pojavljajo tudi posamezne globlje in daljše zareze. Običajno se oblikuje posebno izrazita zareza na mestu,

kjer rezalni rob reže površino obdelovanca (včasih celo malo izven območja rezanja). Širino obrabne ploskve VB na prosti ploskvi orodja zelo pogosto jemljemo kot kriterij, ki nam pove zakaj in kdaj je orodje toliko skrhano, da ga je potrebno ponovno naostriti ali zamenjati. Obrabo proste ploskve je težko zasledovati in meriti med samim delom, ker je celotna obrabna površina pokrita z obdelovancem. Običajno obrabo zasledujemo tako da obdelavo prekinemo in z merilnim mikroskopom izmerimo širino obrabljenih ploskv (Kopač,2008).



Slika 3: Obraba na prosti ploskvi orodja (Kopač, 2008: 79)



Slika 4: Obraba svedra pri vrtanju (Kopač, 2008: 78)

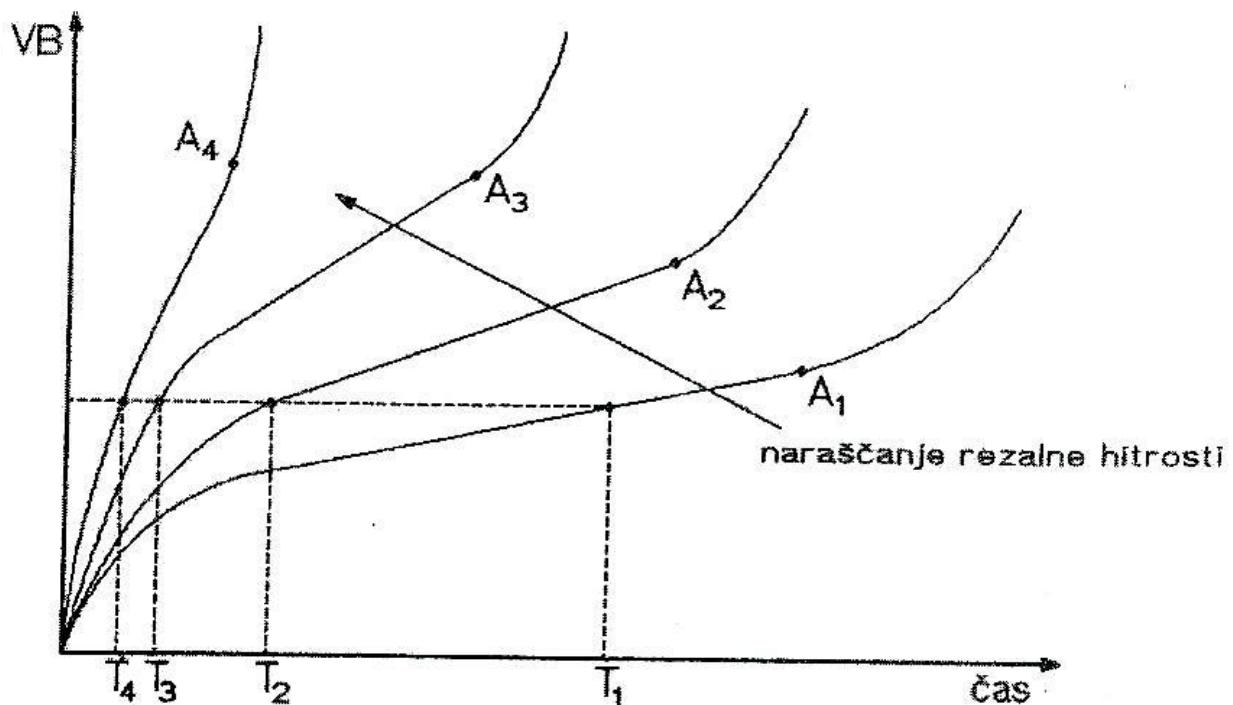
Poleg oblikovanja obrabne površine, se obraba na prosti ploskvi orodja odraža tudi v izgubi prostega kota, kar povzroči povečanje upornosti zaradi trenja. Obrabljeno površino orodja običajno smatramo kot malo obremenjen drsnik z maksimalno temperaturo na zadnjem robu. Temperatura narašča z večanjem širine obrabne ploskve (VB) skladno z enačbo (Kopač, 2008):

$$\Theta = \Theta_m / 2 = \mu / J(P/b * l) * \sqrt{v * l / k * \rho * C} \quad \dots(25)$$

Obrabo na prosti ploskvi običajno zasledujemo z opazovanjem spremembe širine obrabne ploskve (VB) po času (t). V angleško govorečih deželah se obraba označuje z oznako W (wear).

Slika (5) prikazuje skupino krivulj naraščanja širine obrabe proste ploskve (VB) po času (t) za različne vrednosti rezalnih hitrosti (v). Te krivulje so na splošno podobne krivulji naraščanja obrabe koničnega drsnika pri drsenju po rotirajočem disku. Obseg področja majhne hitrosti obrabljanja pada z naraščajočo rezalno hitrostjo. Hitrost obrabe skokovito naraste, ko

temperatura na zadnjem robu obrabne površine doseže točko topotnega omehčanja obdelovalnega materiala. Razmerje  $A_R/A$  hitro naraste s časom in s hitrostjo obrabljanja.

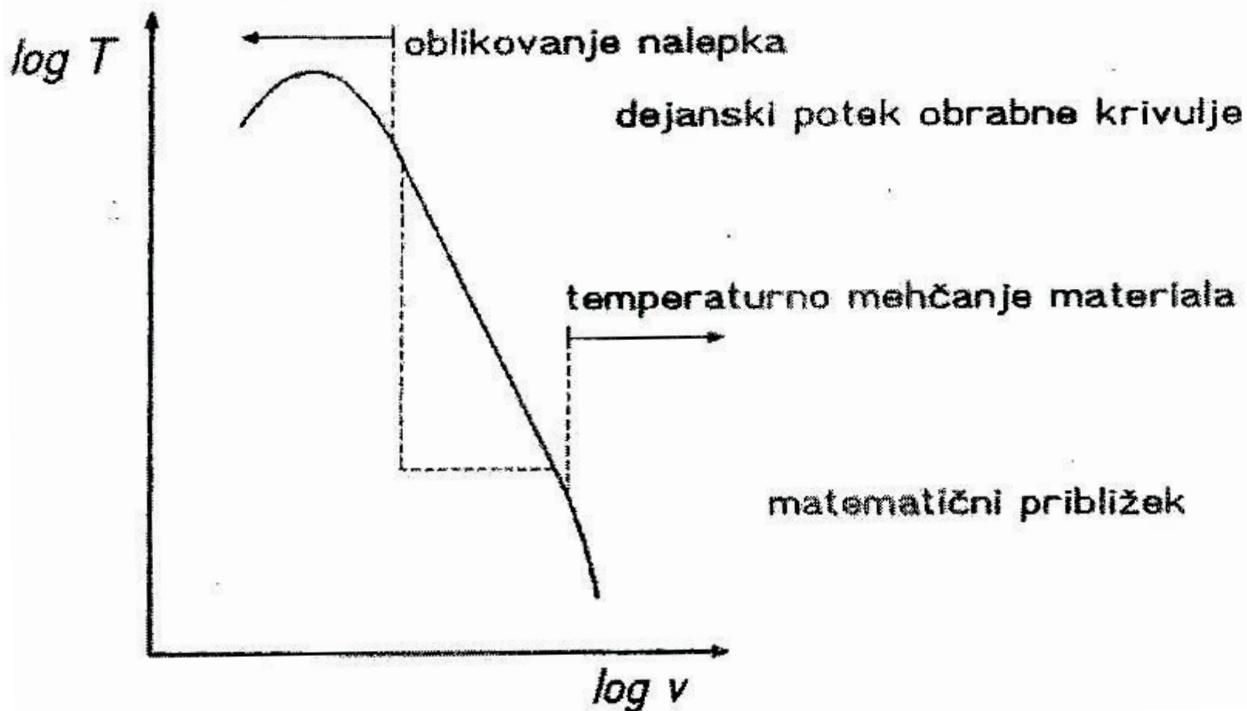


Slika 5: Sprememba širine obrabne ploskve (VB) na prosti ploskvi orodja s časom (t) za različne rezalne hitrosti (v) (Kopač, 2008: 80)

### 3.2.2 Obstojnost orodja

Obstojnost orodja pri rezalni hitrosti lahko definiramo kot čas efektivnega rezanja  $T(\text{min})$  do meje področja nizke hitrosti obrabljanja (čas, ki ustreza točkam  $A_i$ ), to je predvsem značilno za orodja iz hitroreznega jekla. Obstojnost orodja je lahko tudi čas do doseganja določene vrednosti obrabe na prosti ploskvi (VB) (čas ustreza točkam pri  $T_i$ ), ki je tipična za orodja iz karbidnih trdin. Običajna mejna vrednost za obrabo na prosti ploskvi orodij iz karbidnih trdin pri obdelavi mehkih jekel je 0,75mm. Bolj kot je material obdelovanca težaven za obdelavo, bolj temperaturno obstojne orodne materiale uporabljamo (so bolj krhki), ali pa zmanjšamo debelino odrezka. Poleg tega je priporočljivo uporabljati manjše dopustne vrednosti za obrabo na prosti ploskvi orodja (Kopač, 2008).

Kadar obstojnost orodja  $T$ , ki sloni ali na popolnem uničenju (točka A) ali na omejeni vrednosti obrabe površine (točka T), narišemo v logaritemskem diagramu dobimo rezultat kot ga kaže slika 6.



Slika 6: Dejanski in približni potek krivulje obstojnosti orodja (Kopač, 2008: 80)

### 3.2.3 Taylorjeva enačba obstojnosti orodja

Za praktično uporabno območje rezalnih hitrosti je ta krivulja linearna in ustreza enačbi:

$$V*T^n = C \quad \dots(26)$$

kjer sta  $n$  in  $C$  konstanti za preizkušen obdelovalni in rezalni material ter za obdelovalne pogoje, razen rezalne hitrosti (podajanje, globina rezanja, rezalno mazalna tekočina in geometrija orodja). Ta enačba se imenuje tudi Taylorjeva enačba obstojnosti orodja. Ker je običajno določena v minutah, predstavlja konstanta  $C$  rezalno hitrost, pri kateri je obstojnost orodja ena minuta. Vrednost eksponenta  $n$  se veča z večanjem temperaturne obstojnosti rezальнega materiala in sicer za:

- Hitrorezna jekla(HSS) -n=0,1
- Karbidne trdine(WC) -n=0,2
- Keramiko( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) -n=0,3

Taylorjevo enačbo lahko preuredimo in razširimo v obliko, ki upošteva tudi druge parametre rezanja. Tako imenovana razširjena Taylorjeva enačba se glasi:

$$T^*v^{l/n}*f^{d/m}*a^{l/l} = C' , \quad \dots(27)$$

kjer je: f- podajanje in a globina rezanja.

### 3.2.4 Obrabni volumen

Volumen zaradi obrabe odnesenega rezalnega materiala na prosti ploskvi ( $B_r$ ) je za določeno obrabno površino (VB), globino rezanja (a) in prosti kot ( $\alpha$ ) (pri  $y=0^0$ ):

$$B_r = \dots \quad \dots(28)$$

Za določeno obrabno površino (obstojnost orodja) vidimo, da se obrabni volumen povečuje, če se veča tan  $\alpha$ . Potemtakem je s stališča obrabnega volumna primernejši veliki prosti kot. Trdnost rezalnega robu, sposobnost absorbiranja toplotne energije in sposobnosti ohranjanja dimenzijske natančnosti pa z naraščanjem prostega kota padajo, zato je optimalni prosti kot v območju med 5 in  $10^0$  (Kopač, 2008).

### 3.2.5 OBRABA NA CEPILNI PLOSKVI

Ta oblika obrabe se lahko pojavi na tri različne načine:

1. Izdolbenost v obliki kotanje,
2. obraba na cepilni ploskvi,
3. zaokrožitev rezalnega robu.

Obraba v prvi obliki nastopi običajno pri velikih hitrostih rezanja in velikem podajanju. Če se dva parametra zmanjšujeta, se obraba najprej pojavi v drugi in končno še v tretji obliki. Zadnja izmed oblik nastopi včasih kot posledica prevelikih pritiskov (velike obremenitve rezalnega robu)

Zanimivo je, da se kotanja pojavlja na določeni razdalji od rezalnega robu, sredina kotanje pa sovpada z mestom, kjer so največje temperature na orodju. Z napredovanjem obrabe se kotanja približa rezальнemu robu in zelo pogosto v takšnem primeru pride do zloma zaradi zmanjšane mehanske trdnosti (karbidne trdine), pri orodjih iz hitroreznega jekla pa do zmehčanja rezalnega robu zaradi prevelike koncentracije toplotne, ki se ne odvaja v zadostni meri. Ta pojav pri orodjih iz hitroreznega jekla nastopi pogosto skoraj nepričakovano in kot popolna obraba.

Razmere na cepilni ploskvi orodja so veliko bolj ostre kakor na prosti ploskvi orodja. Temperature, tlaki in razmerja površin  $A_R/A$  so večja, tako da predstavlja cepilna ploskev orodja močno obremenjen drsnik. Pri velikih rezalnih hitrostih prevladuje difuzijska obraba in značilna oblika obrabne površine je kotanja. Največja oblika kotanje se običajno pojavi na sredini kontaktne dolžine (a), ker je običajno v tej točki temperatura na cepilni ploskvi orodja maksimalna.

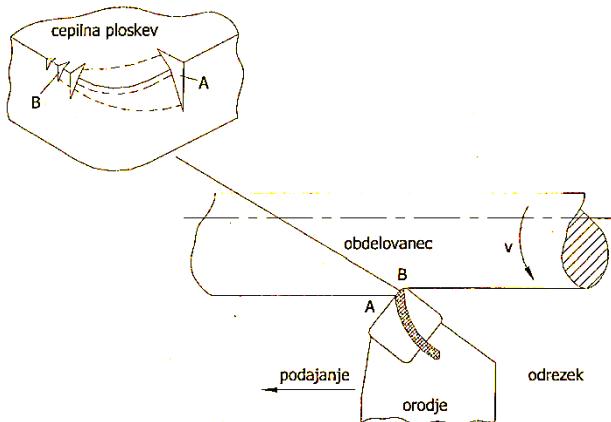
Če izrišemo vrednosti naraščanja globine kotanje po času, so vrednosti podobne tistim za obrabo na prosti ploskvi (VB). Ko kotanja doseže rezalni rob, temperatura orodja naraste in tako tudi hitrost večanja globine kotanje (d). Obstojnost orodja glede na oblikovanje kotanje lahko določimo z ozirom na popolno porušitev orodja, to je do trenutka, ko kotanja doseže rezalni rob in se pojavi krušenje rezalnega robu (točka  $A_i$ ). Ali pa do trenutka, ko globina kotanje (d) doseže neko mejno vrednost (točka  $T_i$ ). Krivulja obstojnosti za kotanjasto obrabo je podobna krivulji obstojnosti za obrabo na prosti ploskvi (VB). Tudi za obstojnost orodja pri kotanjasti obrabi velja enačba Taylorjevega tipa, seveda z drugačnimi vrednostmi konstant n in C.

Volumen, ki se lahko odstrani pri obrabljanju preden pride do popolne porušitve, je veliko večji pri kotanjasti obrabi kakor pri obrabi na prosti ploskvi, kar prispeva h kompenzaciji veliko večje hitrosti obrabljanja na cepilni ploskvi. Posledica tega je, da sta obstojnosti zaradi kotanjaste obrabe oziroma potega obrabe na prosti ploskvi približno enaki, navkljub veliki razliki v »volumski hitrosti obrabljanja« (Kopač, 2008).

### 3.2.6 OBLIKOVANJE ZAREZ

Zelo pogosto se pri obdelavi visokotemperturnih zlitin, zelo mehkih jekel ali pa pri drugih materialih, ki imajo močno nagnjenost k oblikovanju deformacijsko utrjenih odrezkov, pojavi obraba v obliki globokih zarez (slika 7). Velika zareza se običajno oblikuje na prostem robu odrezka na glavnem rezальнem robu, medtem ko se manjše zareze oblikujejo na prosti površini

sekundarnega rezalnega robu. Če je na zadnjem (sekundarnem) rezalnem robu prisotnih več zarez potem si le-te sledijo v razdalji, ki ustreza podajanju na vrtljaj. Material, ki ga ni odnesla prva zareza na zadnjem rezalnem robu, drgne brez prostega kota po orodju in oblikuje drugo zarezo, itd. Prisotnost zarez na zadnjem rezalnem robu je en od izvorov hrapavosti na obdelani površini in pogojuje obstojnost orodja pri končni obdelavi (Kopač, 2008).



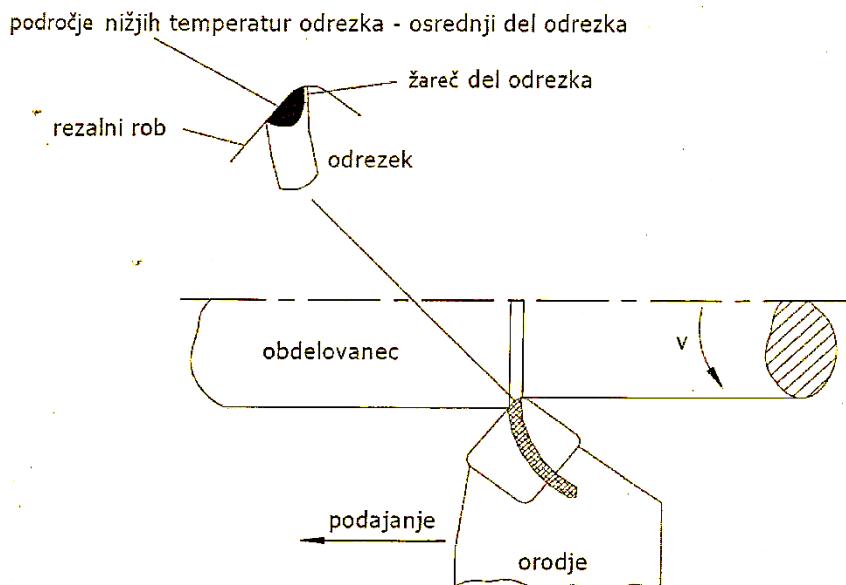
Slika 7: Oblikovanje zarez na orodju pri struženju (Kopač, 2008: 85)

### 3.2.7 VZROKI ZA NASTANEK ZAREZ

Ker je oblikovanje zarez zelo kompleksen pojav se zdi, da je v prvi vrsti to temperaturno odvisen pojav. Do tega zaključka so raziskovalci prišli, ko so obdelovali visokotemperaturne zlitine (Waspaloy) v popolni temi in so sevanje z odrezka fotografirali na hitrotekočem infrardečem filmu. S fotografije je bilo razvidno, da sta v točki oblikovanja dva rdeča (vroča) robova odrezka s temnejšim (hladnejšim) osrednjim področjem (slika 8). Ker lahko pričakujemo večje razmerje prenosa toplote iz robov odrezka kakor iz osrednjega področja, lahko opazovani visoko temperaturni robovi pomenijo le, da se več energije pri oblikovanju odrezka potroši v bližini robov odrezka kakor drugod (Kopač, 2008).

Raziskovalci so razložili visoke temperature na prostih robovih odrezka upoštevajoč, da se robovi deformirajo pri ravninski napetosti, osrednje področje pa se deformira v ravninski deformaciji. Za prvo aproksimacijo so uporabili Lee-Shafferjev model, rezultat analize pa jih pripelje do zaključka, da je material na robovih odrezka dvakrat podvržen strigu. Enkrat vzporedno z rezalnim robom predno je dosežena glavna strižna ravnina in ponovno pri prečkanju strižne ravnine, ko je strigu podvržen tudi glavni del odrezka-osrednje področje. Dodatna energija, ki se potroši za dvakratni strig na robovih odrezka, je le nekoliko višja za materiale, ki se deformacijsko ne utrujujo. Energija pa je izrazito večja za materiale, ki imajo močno tendenco do deformacijskega utrjanja pri visokih deformacijskih hitrostih (Waspaloy).

To tudi pojasnjuje zakaj pri jeklih, ki se deformacijsko ne utrjujejo niso opazili vročih robov odrezka (Kopač, 2008).



Slika 8: Žareči robovi odrezka pri struženju visokotemperатурne zlitine (Kopač, 2008: 86)

### 3.3 RAZLIKE IN PODOBNOSTI MED ODREZOVANJEM KOVIN TER LESA

#### 3.3.1 Glede na obdelovani material

V preglednici 2 so podane razlike v lastnostih, ki so pomembne pri odrezovanju med obdelovancem iz lesa in obdelovancem iz kovine (8):

Preglednica 2: Razlike med lastnostmi obdelovanca iz lesa ter obdelovanca iz kovine

	LES	KOVINA
HOMOGENOST	nehomogena	homogena(v večini primerov)
IZOTROPNOST	ne obstaja	obstaja(v večini primerov)
VLAŽNOST	se spreminja	se ne spreminja
TRDNOST	nizka	visoka
TRDOTA	nizka	visoka
ZAHTEVANA NATANČNOST	nizka	visoka

### 3.3.1.1 Homogenost

Nehomogenost lesa ima vzrok v različnih pogojih rasti lesnega tkiva in v sami strukturi lesnega tkiva. Nemalokrat so v lesu prisotne trde snovi (minerali,...), kar otežuje njegovo odrezovanje. Posledica nehomogenosti je večja možnost za pojav vibracij na obdelovalnem stroju v primerjavi z odrezovanjem kovin.

### 3.3.1.2 Izotropnost

Izrazita anizotropija vsakega lesenega obdelovanca pomeni načeloma večje možnosti za pojav napak na in pod površino obdelovanca. Prav tako anizotropnost pomeni načeloma večjo možnost za pojav vibracij na obdelovalnem stroju. Pomembna je smer odrezovanja glede na orientiranost lesnega tkiva.

### 3.3.1.3 Vlažnost

Vlažnost lesa vpliva na velikost specifične rezalne sile, torej tudi na pojav vibracij med obdelavo. Poleg tega pomeni spremjanje vlažnosti obdelovanca tudi spremjanje njegovih dimenzij, kar mora biti predvideno.

### 3.3.1.4 Trdnost

Zaradi relativno nizke trdnosti lesa je pojav razpok, ki prodirajo v obdelovanec, zelo verjeten. Za preprečevanje tega uporabljamo pravilne rezalne parametre in mehanske pripomočke - pridržala, pravilno vpenjanje, pridržano vodenje obdelovanca.

### 3.3.1.5 Trdota

Zaradi relativno nizke trdote lesenega obdelovanca je treba njegovemu vpenjanju posvetiti še več pozornosti kot vpenjanju kovinskega obdelovanca. Površina vpenjalnih ploskev je v splošnem večja kot pri vpenjanju kovinskih kosov, specifični pritisk na obdelovanca ne sme biti previšok.

### 3.3.1.6 Zahtevana natančnost

Za lesene izdelke je zahtevana natančnost vsaj za razred nižja kot pri kovinah. To načeloma pomeni nižjo zahtevano togost lesno-obdelovalnega stroja, kar pa v praksi ne sme rezultirati v prenizki dinamični togosti stroja.

## 3.3.2 Orodja

V preglednici 3 so prikazane razlike med orodjem za obdelavo lesa ter orodjem za obdelavo kovin:

Preglednica 3: Razlika med orodjem za obdelavo lesa ter orodjem za obdelavo kovin

	LES	KOVINA
GEOMETRIJA ORODJA	pozitivna, negativna, nedefinirana	pozitivna, negativna, nedefinirana
MATERIAL ORODIJ	hitrorezno jeklo, karbidna trdina	hitrorezno jeklo, karbidna trdina, keramika, diamant

### 3.3.2.1 Geometrija orodja

V splošnem ni bistvenih razlik v geometriji orodja za obdelavo lesa in kovin. V obeh primerih lahko uporabljamo rezila s pozitivnim in negativnim cepilnim kotom, pri brušenju pa je geometrija rezil nedefinirana.

### 3.3.2.2 Material orodij

Pri obdelavi lesa je poudarek na uporabi orodij iz hitroreznega jekla in karbidnih trdin. Slednje so občutljive na neugodne vibracijske pojave na obdelovalnem stroju.

### 3.3.3 Tehnološki parametri

V preglednici 4 so prikazane razlike pri tehnoloških parametrih za obdelavo lesa in obdelavo kovin:

Preglednica 4: Razlike pri tehnoloških parametrih za obdelavo lesa in obdelavo kovin

	LES	KOVINA
REZALNA HITROST	visoka	nizka(razen pri visokohitrostni obdelavi)
PODAJALNA HITROST	visoka	nizka(razen pri visokohitrostni obdelavi)
GLOBINA REZANJA	ni bistvenih razlik	ni bistvenih razlik

#### 3.3.3.1 Rezalna hitrost

Zaradi relativno visokih rezalnih hitrosti (pri frezanju je optimalna hitrost rezanja okoli 2500m/min) je vležajenju glavnega vretena pri večini lesno-obdelovalnih strojih treba posvetiti veliko pozornost,

#### 3.3.3.2 Podajalna hitrost

Nemalokrat podajalna hitrost pri obdelavi lesa preseže 20m/min, kar tudi pri visokohitrostni obdelavi kovin v praksi težko dosežemo. Relativno visoka hitrost in natančnost aktuatorjev podajalnega gibanja (motorji,vretena) sta pri lesno-obdelovalnih strojih zaradi tega mnogokrat problematični.

#### 3.3.3.3 Globina rezanja

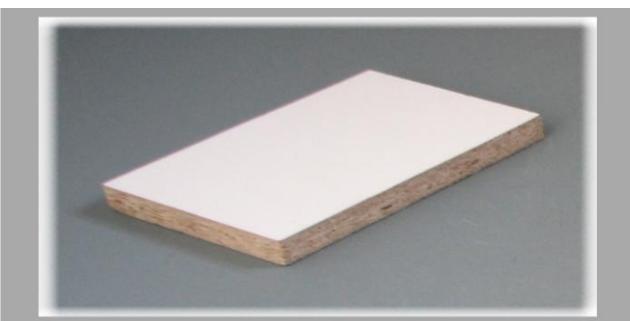
Glede globine rezanja med lesno-odrezovalnimi postopki in postopki za odrezovanje kovin ni bistvenih razlik. Kljub temu pa zaradi značilno manjše specifične rezalne sile pri rezanju lesa, obremenitev orodja (vretena) ni tako velika kot pri odrezovanju kovin.

## 4 MATERIALI IN METODE DELA

### 4.1 MATERIALI

#### 4.1.1 Iveral (debelina 18mm, bele barve)

Iveral ozziroma oplemenitena iverna plošča debeline na kateri smo izvajali eksperiment je iverka, ki jo na zgornji in spodnji strani obložijo z dekorativno plastjo, največkrat melaminsko smolo (melamin), ki je na voljo v številnih dekorjih. Takšno oplemeniteno iverko se uporablja za korpuse (ohišja) omaric, vratca in tudi pulte. Na robovih iverala je vidna iverka, ki se jo zaščiti z različnimi nalepkami (PVC, ABS, melaminski trakovi,...) ali furnirjem.



Slika 9: Iveral

#### 4.1.2 Sveder

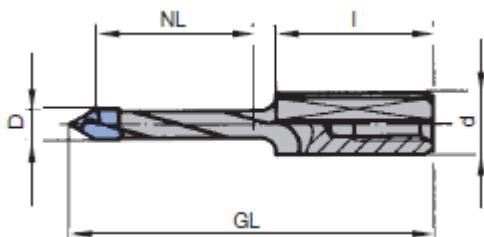
Za eksperiment smo uporabili desnosučno orodje iz volframovega karbida namenjeno izdelavi skoznjih izvrtin proizvajalca Leitz z oznako 34077, premera 8 mm in največjo globino vrtanja 70 mm. Orodja iz karbidne trdine so zelo odporna na obrabo in prenesejo precej višje temperature kot HSS (high speed steel)-orodja. Površine iz karbidne trdine se pogosto uporabljajo za obdelavo materialov, kot so karbidna jekla ali nerjaveča jekla in tudi v primerih, ko bi se druga orodja hitro obrabila, npr. pri serijski proizvodnji. Orodja iz karbidne trdine ohranjajo rezilno ostrino veliko bolje kot druga orodja in imajo navadno boljšo končno obdelavo obdelovanca, njihova odpornost na temperaturo pa omogoča hitrejše režime.

Material za izdelavo orodja se navadno imenuje cementni karbid, trda kovina ali volframov karbid. To je anorganska kemična spojina, sestavljena iz enakih delov atoma volframa in karbida ter iz kobalta kot veziva. Proizvajalci uporabljajo volframov karbid kot glavni material v nekaterih svedrih za velike hitrosti, saj je material zelo odporen na temperaturo in je zelo trd.

Vibracije pri obdelavi so pogost razlog za poškodbe ali zmanjšano rezilno ostrino orodja iz karbidne trdine. Proizvajalci orodja iz karbidne trdine pogosto opozarjajo, da je potrebno usposabljanje uporabnikov obdelovalnih centrov za pravilno uporabo orodja iz karbidne trdine, za izogibanje vibracij pri obdelavi in zaradi krhkosti orodja.



Slika 10: Desnosučni prebijalni sveder znamke Leitz



Slika 11: Shema dimenziij svedra

D mm	GL mm	NL mm	S mm
5	70	35	10x24
7	70	35	10x24
8	70	35	10x24
9	70	35	10x24
10	70	35	10x24

Slika 12: Mere svedrov glede na premer svedra

#### 4.2 METODA DELA

Meritve smo opravili na 3 osnem eksperimentalnem CNC stroju v Laboratoriju za mehanske obdelovalne tehnologije na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Obdelovalni agregat eksperimentalnega CNC stroja je nazivne moči 3,2 KW pri nazivni hitrosti 18000 vrt/min.

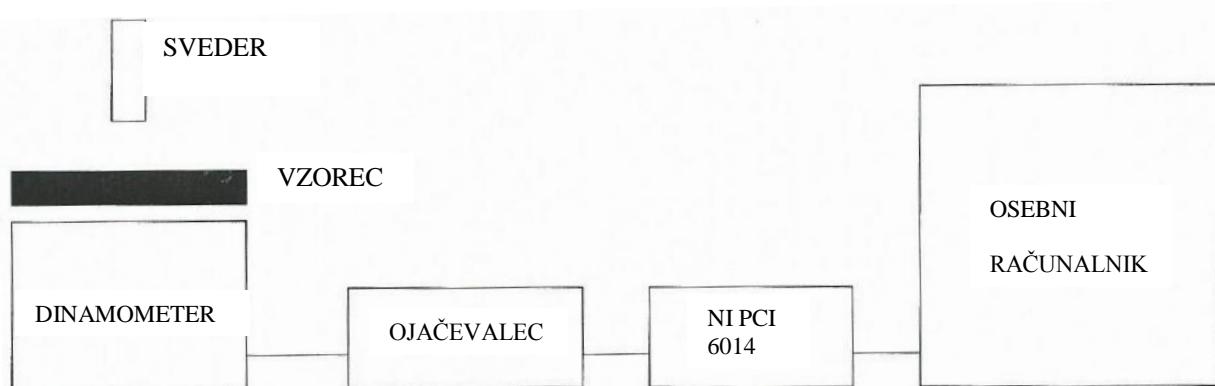
Eksperiment smo izvajali na obloženi iverni plošči bele barve, debeline 18mm. Uporabili smo desnosučno orodje namenjeno izdelavi skoznjih izvrtin proizvajalca Leitz z oznako 34077, premera 8 mm in največjo globino vrtanja 70 mm. Eksperiment smo opravili dvakrat z dvema enakima orodjem.

Podajalna hitrost orodja je znašala 1,8m/min, hitrost vrtenja orodja pa je bila 6000 vrtljajev/minuto. S programom za ciklično vrtanje smo v plošče 700mm x 500mm vrtali serije po 180 oziroma 90 lukenj. S prvim orodjem smo izvrtali 3842 lukenj, z drugim orodjem pa 5365 lukenj. Razdalja med luknjami je znašala 15 mm. Število lukenj se razlikuje zaradi drugačnega pristopa pri odčitavanju prvih trinajstih meritov prvega orodja, kjer smo izvrtali 90 lukenj na meritov, vendar smo se kasneje odločili za 180 lukenj na meritov. Pri prvi meritvi smo izvrtali poleg 90 lukenj še dodatnih 17 lukenj kot posledico nastavljanja računalniškega programa na CNC stroju.

Za prvo orodje tako velja, da smo pri meritvah od 1 do 13 izvrtali 1252 lukenj, pri meritvah od 14 do 27 pa 2590 lukenj, kar bomo prav tako upoštevali pri rezultatih meritov, pri drugem orodju pa smo imeli pri vseh meritvah enako število izvrtanih lukenj, pri čemer znaša razlika v izvrtanih luknjah, med prvim in drugim orodjem, 1523 lukenj. Po vsaki zaključeni seriji vrtanja smo izvedli meritov pritisne sile v smeri osi vrtanja na predhodno pripravljenih petih vzorcih, ki smo jih kasneje uporabili tudi za določevanje faktorja delaminizacije iverne plošče.

Pritisno silo smo merili s 3 osnim piezo dinamometrom proizvajalca Kistler z oznako 7292, ki je bil priključen na ojačevalnik Kistler 5019. Izhod ojačevalnika je bil povezan z multifunkcijskim PCI vmesnikom z oznako NI PCI 6014 proizvajalca National Instruments, ki je omogočal, da smo shranjevali meritve sile s frekvenco vzorčenja 100 KHz za nadaljnjo analizo.

Blokovna shema merilnega sistema je prikazana na sliki 13.



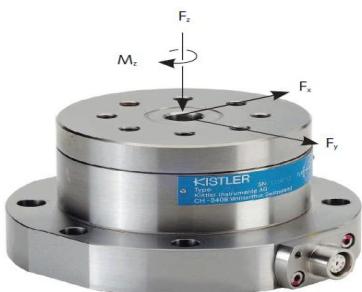
Slika 13: Blokovna shema merilnega sistema

### Dinamometer

Uporabili smo dinamometer znamke Kistler, ki omogoča merjenje treh ortogonalnih komponent sile ter momenta. Okoli te sile smo merili potisno silo  $F_z$  ter moment okoli te sile  $m_z$ . Dinamometer ima visoko trdnost ter posledično visoko naravno frekvenco, njegova visoka resolucija pa omogoča merjenje najmanjših dinamičnih sprememb pri sili ter momentu. Odražajo ga naslednje lastnosti:

1. Je kompakten ter robusten večkomponentni inštrument za merjenje sile.
2. Primeren je za merjenje rezalnih sil med vrtanjem.
3. Primeren je za univerzalno uporabo.

Dinamometer je sestavljen iz štirikomponentnega senzorja nameščenega z visoko prednapetostjo med spodnjo osnovno ter zgornjo ploskvijo. Vse štiri komponente so merjene praktično brez zamikov. V obzir lahko vzamemo, da kombinirane in ekscentrične obremenitve lahko zmanjšajo območje meritev. Senzor ima ozemljitev, tako da zemeljske zanke tudi ne predstavljajo problema.



Slika 14: Dinamometer (Kistler, 2014 a)

## Ojačevalec signalov

Signali, ki jih dobimo pri merjenju z dinamometrom se prenašajo do ojačevalca signalov ter se nato shranijo v računalnik, kjer jih nato dodatno analiziramo. Uporabili smo ojačevalec signalov od Kistlerja in sicer model 5019B.



Slika 15: Ojačevalec signalov (Kistler, 2014 b)

## 5 REZULTATI

Vzorcem, ki smo jih uporabili za merjenje pritisne sile smo določili faktor delaminizacije iverne plošče z enačbo (29):

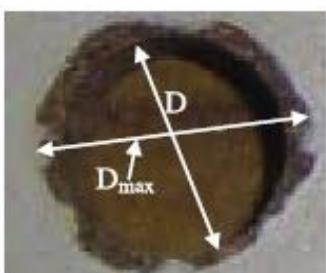
$$F_d = D_{max}/D \quad \dots(29)$$

$F_d$  – delaminacijski faktor

$D_{max}$  – premer očrtanega kroga delaminacijskega področja (mm)

$D$  – premer izvrtine (mm)

Vsak vzorec smo slikali in s pomočjo programa za obdelavo fotografij izmerili območje delaminizacije iverne plošče, kar je prikazano na sliki 16.



Slika 16: Grafični prikaz določevanja faktorja delaminizacije

Rezultati izračunanih delaminacijskih faktorjev za prvo in drugo orodje so zapisani v preglednici 5 in preglednici 6.

Preglednica 5: Izmerjen faktor delaminizacije kompozita 5 testnih vzorcev po N izvrtinah (prvi sveder)

N	558	1008	1367	2087	2627	3167	3707	3887
S1	1,0130	1,3131	1,3365	1,2474	1,4484	1,3295	1,2586	1,1796
S2	1,0130	1,1279	1,1993	1,1626	1,4632	1,2489	1,4491	1,3480
S3	1,0130	1,1900	1,0841	1,1964	1,3130	1,3603	1,2174	1,4477
S4	1,0130	1,2600	1,1989	1,2413	1,3202	1,3660	1,2491	1,3631
S5	1,0130	1,4253	1,1599	1,2282	1,1958	1,3284	1,5607	1,2837
	1,0130	1,2632	1,1957	1,2152	1,3481	1,3266	1,3470	1,3244

Preglednica 6: Izmerjen faktor delaminizacije kompozita 5 testnih vzorcev po N izvrtinah (drugi sveder)

N	181	636	1191	1746	2301	2856	3351	3911	4466	5026	5396
S1	1	1	1,2788	1,1696	1,3135	1,2661	1,27	1,2186	1,2027	1,3452	1,2423
S2	1	1,1109	1,3911	1,2131	1,353	1,3691	1,2778	1,2343	1,2265	1,266	1,3056
S3	1	1,1767 1,1241	1,3472	1,3292	1,2105	1,2897	1,1395	1,1869	1,448	1,2186	
S4	1	1,069	1,2467	1,1797	1,2264	1,3366	1,1947	1,266	1,3056	1,274	1,274
S5	1	1,0769 1,0762	1,2368	1,2332	1,1947	1,2936	1,2812		1,1908	1,2107	1,3214
	1	1,0762	1,266	1,2285	1,2834	1,295	1,2627	1,2146	1,2225	1,3088	1,2724

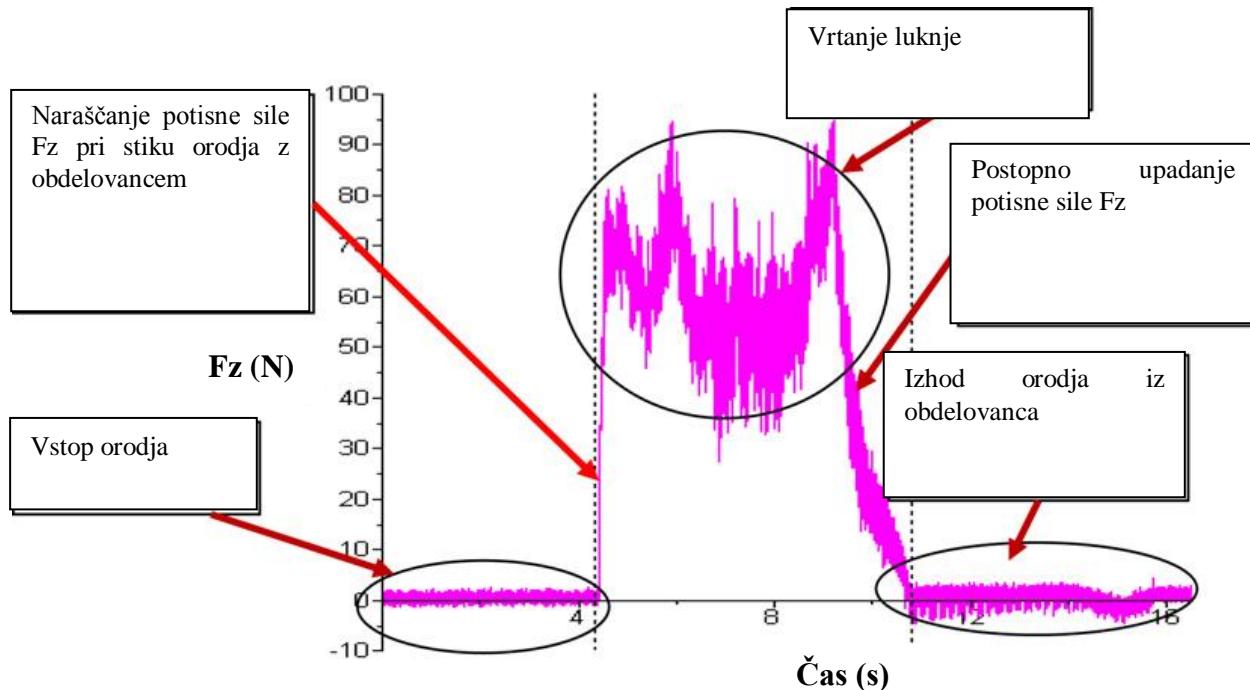
Časovni potek sile ob predpostavki konstantne podajalne hitrosti nam kaže, da v fazi vrtanja sila doseže dva vrha, oba pa predstavlja konstrukcijske lastnosti iverne plošče oziroma njen gostotni profil. Opazili smo, da je potisna sila minimalna na začetku ter na koncu vrtanja, sila začne naraščati z globino vrtanja ter doseže maksimum na sredini luknje. Gostejša sloja na površini iverne plošče imata tako tudi večjo specifično rezalno in pritisno silo.

Nekoliko nižji prvi vrh glede na drugega, ki je na izstopni strani izvrtine, pa lahko pripišemo geometriji uporabljenega orodja, ki je bil namenjen vrtanju skoznjih izvrtin in ima zato zelo majhen kot konice orodja. Drugi vrh nastopi v fazi vrtanja spodnje plasti iverne plošče in ta v primeru, da preseže silo iztrganja površinskega sloja povzroči delaminacijo iverne plošče na izstopni strani izvrtine. Shema naraščanja pritisne sile je prikazana na sliki 17. Sliki 18 in 19 pa prikazujeta časovne poteke povprečij petih izmerjenih pritisnih sil, ki smo jih izmerili na

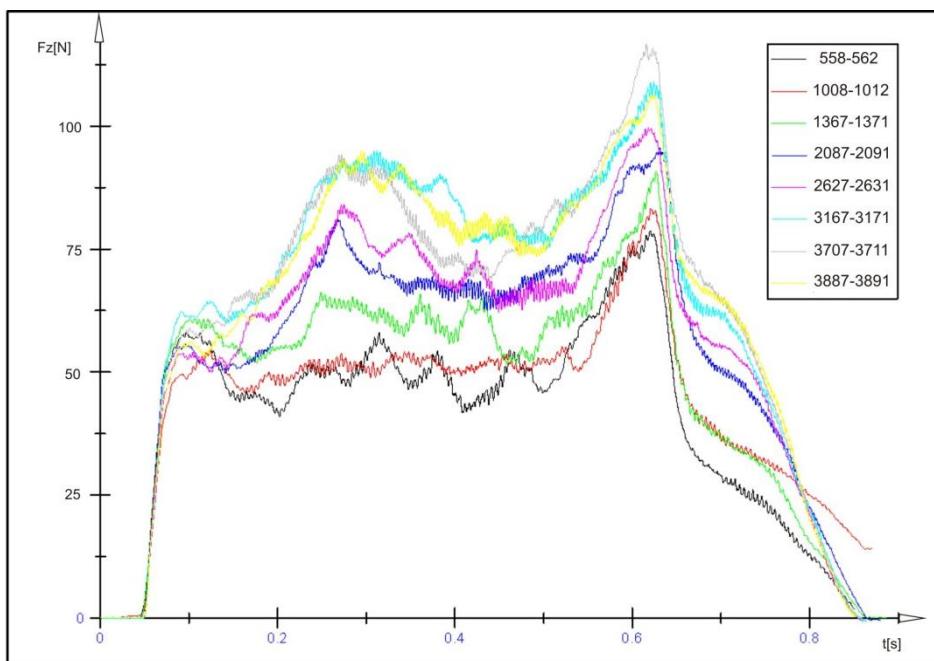
petih vzorcih po opravljenem ciklu vrtanja 180 izvrtin. Zaradi drugačnega pristopa pri izvajanju eksperimenta je začetek meritev za prvi sveder po 558 izvrtinah, kar je tudi razvidno iz preglednice 5.

Na slikah 18 in 19 pa lahko razberemo tudi vpliv obrabe orodja na velikost pritisne sile in sicer se pri prvem orodju po 3887 luknjah, v primerjavi z meritvami po 558 luknjah, poveča za 49%. Pri drugem orodju se prav tako poveča za 50% med prvim ter zadnjim nizom meritev.

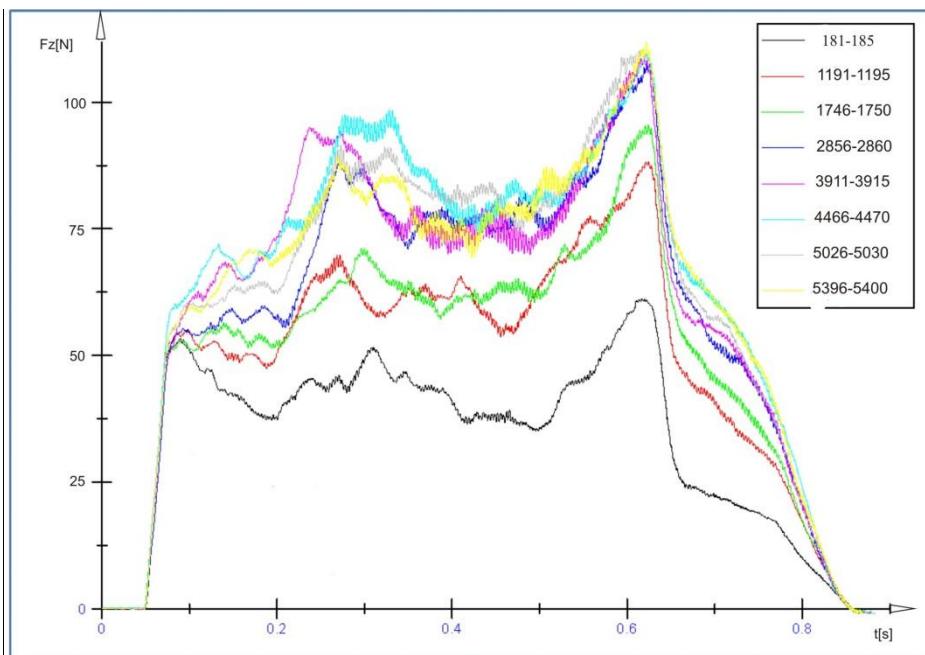
Odvisnost velikosti faktorja delaminizacije od števila izvrtin pa je prikazana na sliki 20 za prvo orodje ter na sliki 21 za drugo orodje. Odvisnost pritisne sile od števila izvrtin pa je prikazana na sliki 22 za prvo orodje ter na sliki 23 za drugo orodje. Meritve kažejo, da je največja dovoljena pritisna sila, ki ne vpliva na delaminizacijo izstopne izvrtine 60N. Na slikah 31-38 so prikazani časovni potekovi povprečij pritisnih sil glede na posamezne cikle vrtanja za prvo orodje, ter na slikah 39-49 za drugo orodje.



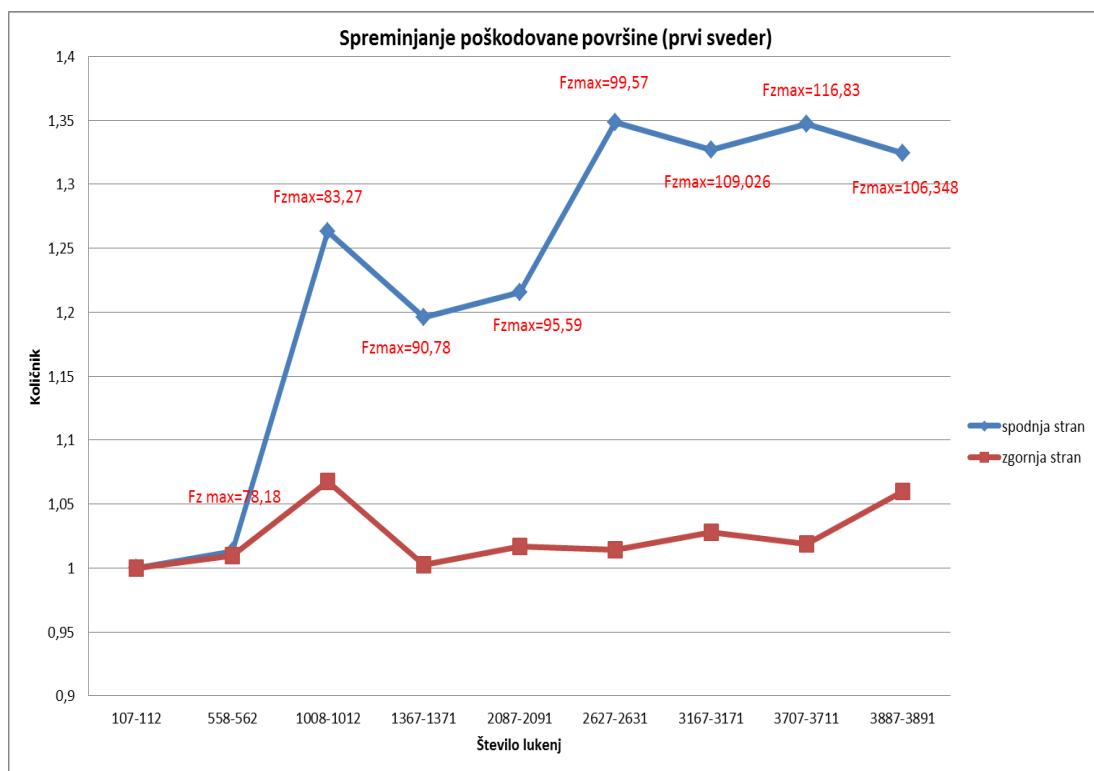
Slika 17: Primer potisne sile pri vrtanju



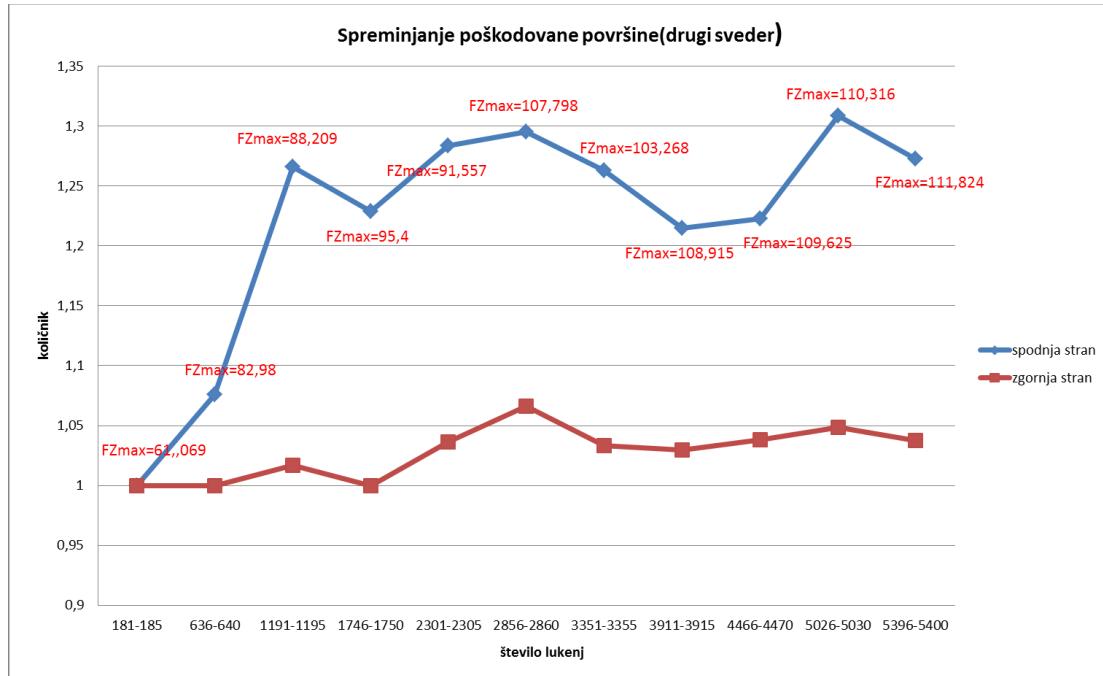
Slika 18: Izmerjena povprečja sile v smeri vrtanja (prvi sveder)



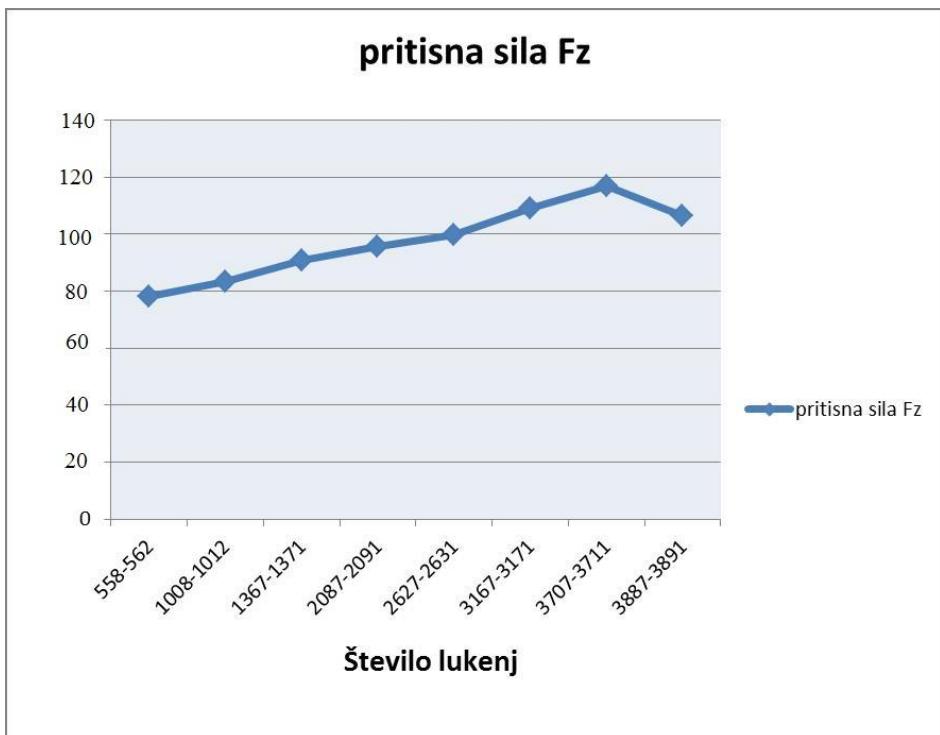
Slika 19: Izmerjena povprečja sile v smeri vrtanja (drugi sveder)



Slika 20: Potek faktorja delaminizacije v odvisnosti od števila izvrtin (prvi sveder)



Slika 21: Potek faktorja delaminizacije v odvisnosti od števila izvrtin (drugi sveder)



Slika 22: Potek pritisne sile v odvisnosti od števila izvrtin (prvi sveder)

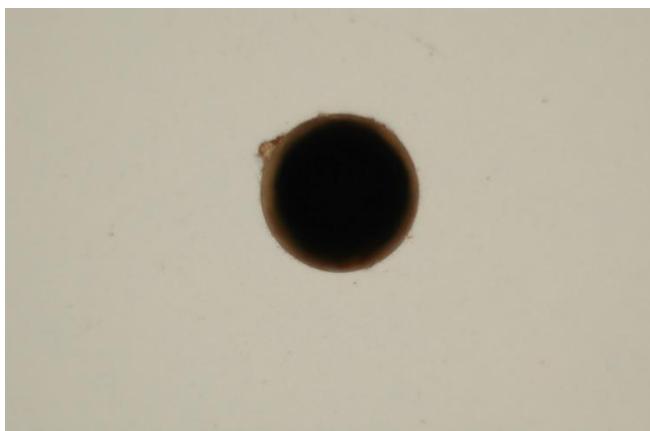


Slika 23: Potek pritisne sile v odvisnosti od števila izvrtin (drugi sveder)

## 6 ANALIZA REZULTATOV

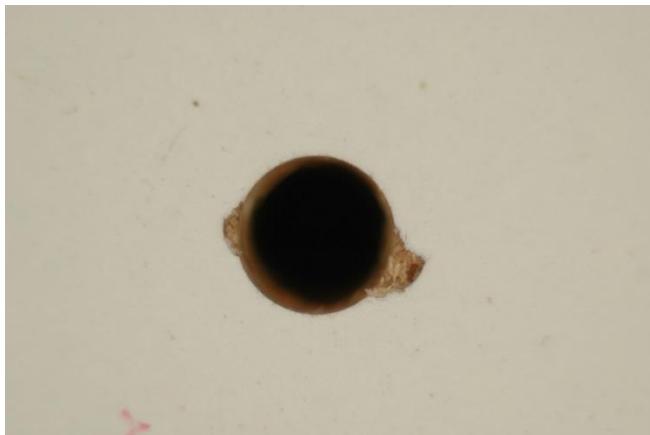
### 6.1 PRVI SVEDER

Pri prvem svedru smo izvedli prve meritve po 558 izvrtinah. Tukaj se že opazijo manjše poškodbe površine na dveh od petih testnih vzorcev, ki so lahko glede na vizualno oceno še sprejemljive. Opazi se tudi porast pritisne sile, ki znaša 78N, kar je že 18N od optimalne pritisne sile. Prav tako pride do porasta delaminizacijskega koeficienta, ki znaša 1,013, kar je tudi že nad optimalno mejo, ki znaša 1. Primer poškodovane površine za prvo meritve 1. Svedra je prikazan na sliki 24.



Slika 24: Primer poškodovane površine po 558 izvrtinah za 1. sveder

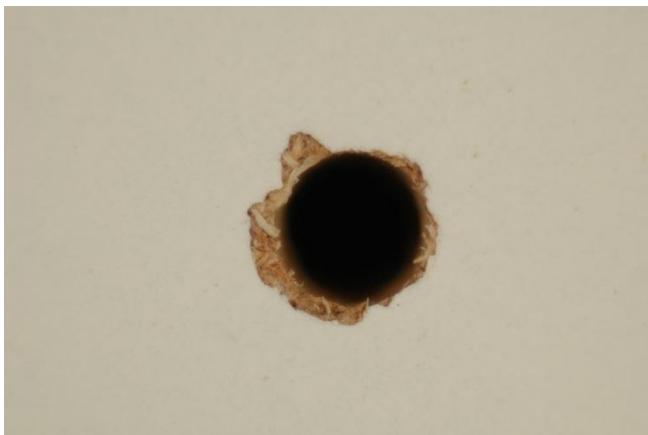
Pri rezultatih druge meritve kar znaša 1008 izvrtin pride spet do porasta delaminizacijskega koeficienta na 1,26 in porasta pritisne sile, ki znaša 0,83N. Na vseh vzorcih so že opazne poškodbe izhodne površine, na dveh od petih vzorcev pa so poškodbe že prevelike, da bi bile sprejemljive. Primer poškodbe izhodne površine je prikazan na sliki 25.



Slika 25: Primer poškodovane površine po 1008 izvrtinah za 1. sveder

Pri četrtri meritvi, kar znaša 2087 izvrtin smo prišli do ugotovitev, da se poškodbe izhodne površine pojavijo na vseh petih vzorcih in so na vseh vzorcih nesprejemljive. Tukaj je prišlo do porasta pritisne sile na 96N, delaminacijski faktor je pa znašal 1,22. To kaže na pomembnost naraščanja pritisne sile na kvaliteto površine.

Do največjih odstopanj je prišlo pri predzadnji meritvi in sicer pri 3707 izvrtinah. Delaminacijski faktor je narastel na 1,34 in pritisna sila na 117N. Poškodbe površine so še dosti bolj izrazite kot pri prejšnjih meritvah, kar je tudi pokazatelj večje obrabe orodja. Primer poškodbe izhodne površine za meritve pri 3707 izvrtinah je prikazan na sliki 26.



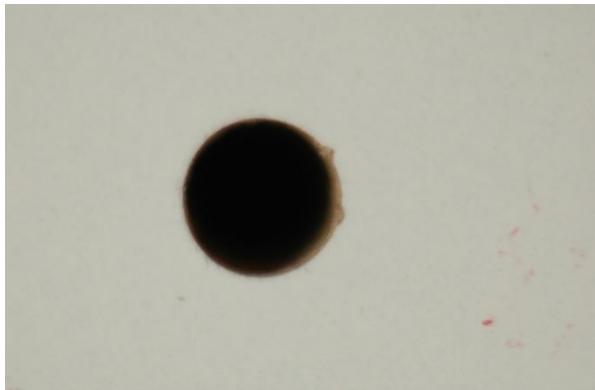
Slika 26: Primer poškodovane površine po 3707 izvrtinah za 1. sveder

## 6.2 DRUGI SVEDER

Pri drugem svedru smo meritve začeli s 181 izvrtinami, kjer je delaminacijski koeficient na optimalni vrednosti 1 ter pritisna sila prav tako optimalna in znaša 61N. Na vseh petih vzorcih

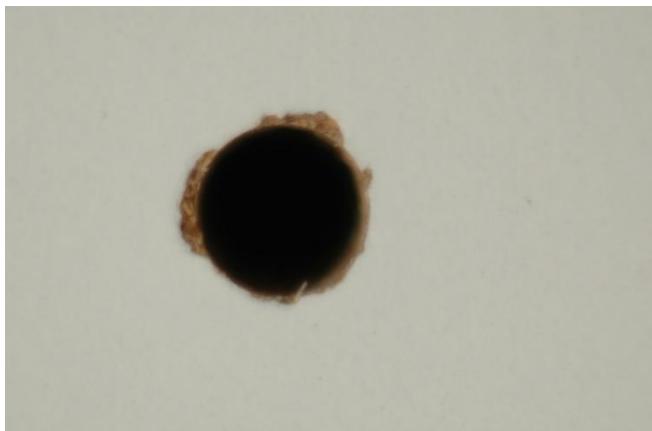
ni bilo vidnih poškodb izhodne površine, kar tudi potrjuje pravilnosti določenih optimalnih vrednosti koeficiente ter pritisne sile.

Drugo meritev smo imeli pri 636 luknjah, kjer je delaminizacijski koeficient narastel na 1,08 ter pritisna sila na 82N. Na dveh od petih vzorcev je videti minimalne poškodbe izhodne površine, ki so še sprejemljive. Primer poškodbe površine je prikazan na sliki 27.



Slika 27: Primer poškodbe izhodne površine po 636 izvrtinah za 2. sveder

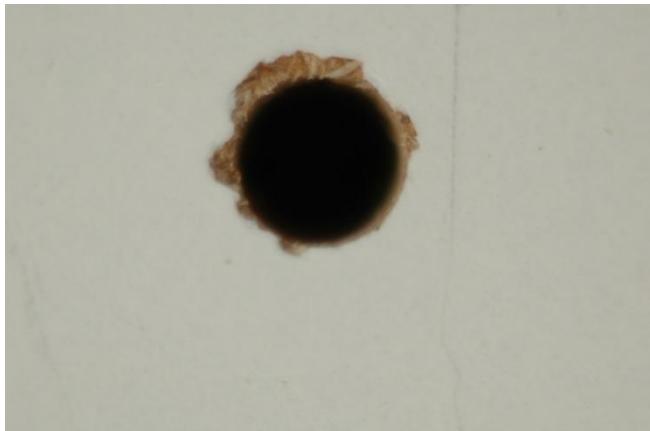
Tretja meritev je bila po 1191 izvrtinah, kjer je prišlo do večjega delaminizacijskega koeficiente in sicer na 1,27 ter pritisne sile na 88N. Poškodbe na izhodni površini so že zelo izrazite na štirih od petih vzorcev, ki so po kvaliteti že nesprejemljivi. Primer poškodbe izhodne površine je prikazan na sliki 28.



Slika 28: Primer poškodbe izhodne površine po 1191 izvrtinah za 2. sveder

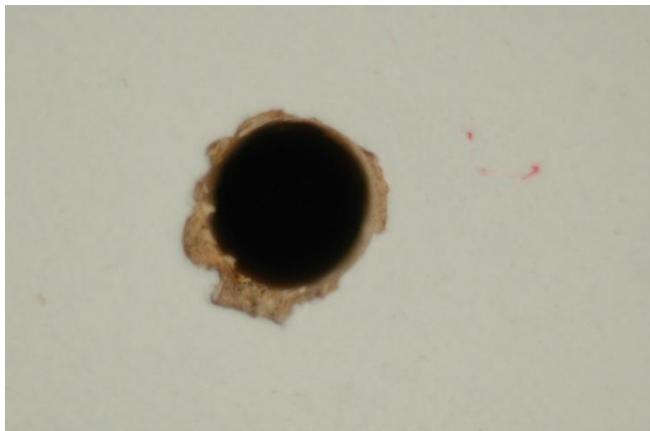
Pri peti meritvi, ki je bila opravljena po 2301 izvrtinah je delaminizacijski koeficient narastel na 1,28, ter pritisna sila na 92N. Poškodbe izhodne površine so opazne na vseh petih vzorcih

in so preveč izrazite, da bi bilo nadaljnjo vrtanje v proizvodnem obratu še smiselno. Primer poškodbe izhodne površine je prikazan na sliki 29.



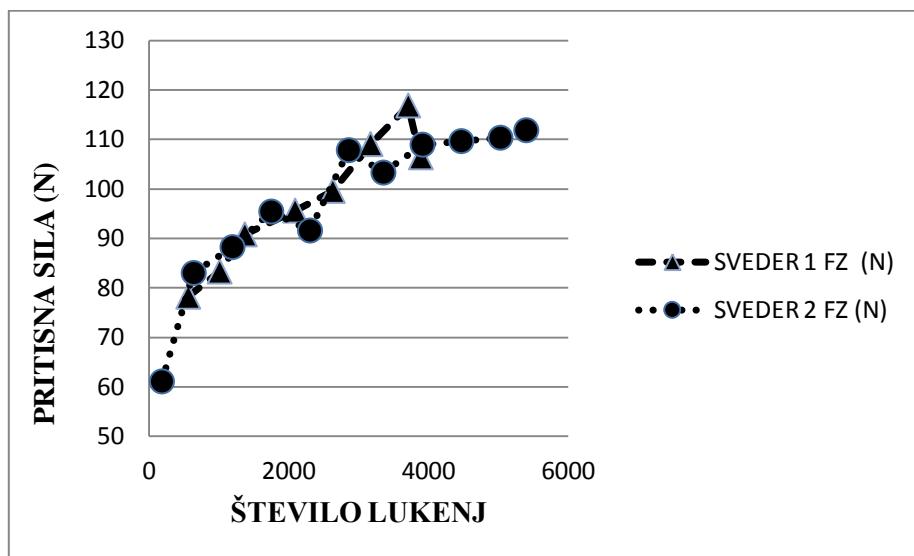
Slika 29: Primer poškodbe izhodne površine po 2301 izvrtinah za 2. sveder

Do največjega odstopanja delaminacijskega koeficienta od optimalne vrednosti je prišlo pri predzadnji meritvi in sicer pri 5026 izvrtinah. Koeficient je narastel na 1,31 ter pritisna sila na 110N. Poškodbe izhodne površine so že ekstremne, kar kaže na zelo veliko obrabo orodja. Primer poškodbe izhodne površine je prikazan na sliki 30.

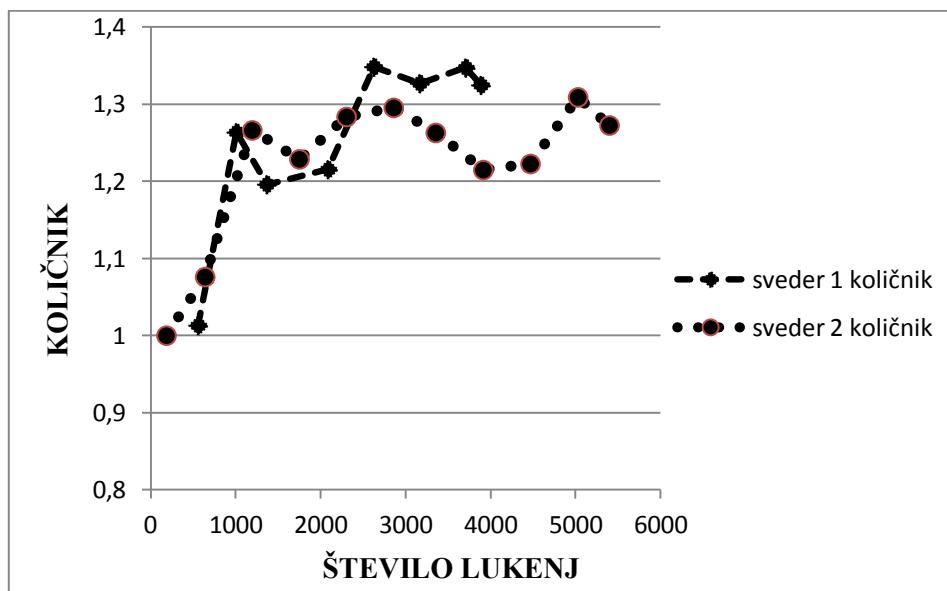


Slika 30: Primer poškodbe izhodne površine po 5026 izvrtinah za 2. sveder

Na slikah 31 in 32 je prikazana primerjava meritve med obema svedroma in sicer glede na pritisno silo Fz v odvisnosti od števila izvrtn, ter glede na delaminacijski količnik v odvisnosti od števila izvrtn. Iz grafov je razvidno, da so meritve pri obeh svedrih dokaj podobne in ni vidnih večjih odstopanj.



Slika 31: Razlika v pritisni sili glede na število lukenj med 1. in 2. svedrom



Slika 32: Razlika v količniku glede na število lukenj med 1. in drugim svedrom

## 7 SKLEPI

Pri pregledu rezultatov pridemo do ugotovitev, da velikost delaminacijskega koeficiente narašča sorazmerno s pritisno silo in sicer konstantno z večanjem števila izvrtnih lukenj. Ugotovili smo, da je optimalna velikost delaminacijskega koeficiente, kjer ne pride do delaminacije površine 1, kar znaša pri pritisni sili 60N. Tako ko se prestopi ta meja, so že vidne manjše poškodbe površine, ki pa so sicer še lahko sprejemljive do določene meje.

Pri obeh orodjih je bilo že po približno 600 izvrtinah opaziti poškodbe izhodne površine na dveh od petih vzorcev, ki pa so lahko še sprejemljive. Iz tega lahko sklepamo, da je vrtanje še smiselno do pritisne sile približno 82N ter delaminacijskega koeficiente 1,08.

Po približno 1100 izvrtinah je že opaziti poškodbe na vseh vzorcih, med katerimi so tudi že poškodbe, ki niso sprejemljive. Tukaj znaša koeficient 1,26 ter pritisna sila okoli 88N, kar lahko vzamemo za že zelo zgornjo mejo tolerance kakovosti izhodne površine pri vrtanju.

## 8 POVZETEK

Namen diplomske naloge je bila analiza vpliva obrabe orodja na kakovost novonastale površine pri vrtanju lesnih kompozitov. Z obrabo orodja naraščata sila v smeri vrtanja ter moment okoli osi vrtanja. Cilj diplomskega dela je bil zasnovati in izvesti eksperiment, ki omogoča merjenje sile v smeri vrtanja in moment okoli osi vrtanja, ter ovrednotiti meritne rezultate obremenitev, glede na kakovost novonastale površine izvrtine. V primeru, da so obremenitve pri vrtanju luknje skozi kompozit večje od sile iztrganja površinskega sloja, pride na izstopni strani do delaminizacije kompozita. Obremenitve pri vrtanju so odvisne od tehnikalnih parametrov obdelave in sicer: podajalne hitrosti, hitrosti vrtenja orodja, kota konice orodja ter lastnosti obdelovalca. Na kakovost novonastale površine v veliki meri vpliva geometrija vrtalnega orodja. Pri vrtanju skozi obloženo ploščo je kakovost robu izvrtine na izstopni strani bistveno slabša od vstopne, zato je izbira ustrezne geometrije orodja ključnega pomena. Obraba orodja pa kljub pravilni izbiri geometrije orodja močno vpliva na kakovost novonastalih površin izvrtin.

Meritve smo opravili na 3 osnem eksperimentalnem CNC stroju v Laboratoriju za mehanske obdelovalne tehnologije na Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani. Obdelovalni agregat eksperimentalnega CNC stroja je nazivne moči 3,2 kW pri nazivni hitrosti 18000 vrt/min.

Eksperiment smo izvajali na obloženi iverni plošči bele barve, debeline 18mm. Uporabili smo desnosučno orodje namenjeno izdelavi skoznjih izvrtin proizvajalca Leitz z oznako 34077 premera 8 mm in največjo globino vrtanja 70 mm. Eksperiment smo opravili dvakrat z dvema enakima orodnjema. Z vrtalnima orodnjema smo izvrtali 3842 oz. 5365 lukanj. Razdalja med izvrtinami je znašala 15 mm, meritve smo opravljali sprva na 90 lukanj vendar smo se kasneje odločili za 180, zato tudi razlike v številu izvrtin med svedromoma. S piezo dinamometrom smo izmerili pritisno silo ter določili faktor delaminizacije. Ugotovili smo, da je optimalna velikost delaminizacijskega koeficiente 1, kar znaša pri pritisni sili 60 N; tu še ne pride do delaminizacije površine, nad temi vrednostmi pa so že vidne manjše poškodbe površine. Ocenujemo, da je vrtanje še smiselno in kakovost površine še sprejemljiva do pritisne sile približno 82N ter delaminizacijskega koeficiente 1,08.

## 9 VIRI

Davim J. P., Clemente V. C., Silva S. 2008. Drilling investigation of MDF (medium density fibreboard). Journal of material processing technology, 203, 1-3: 537–541

Gaitonde V. N., Karnik S. R., Davim J. P. 2008. Taguchi multiple-performance characteristics optimization in drilling of medium density fibreboard (MDF) to minimize delamination using utility concept. Journal of material processing technology, 196, 1-3 : 73–78

Kiestler (measure, analyze, innovate).2014 a

[http://www.kistler.com/si/en/suche/?tx\\_kesearch\\_pi1\[sword\]=5019b&tx\\_kesearch\\_pi1\[page\]=1&tx\\_kesearch\\_pi1\[resetFilters\]=0&tx\\_kesearch\\_pi1\[sortByField\]=&tx\\_kesearch\\_pi1\[sortByDir\]](http://www.kistler.com/si/en/suche/?tx_kesearch_pi1[sword]=5019b&tx_kesearch_pi1[page]=1&tx_kesearch_pi1[resetFilters]=0&tx_kesearch_pi1[sortByField]=&tx_kesearch_pi1[sortByDir])

Kiestler (measure, analyze, innovate).2014 b

[http://www.kistler.com/si/en/suche/?tx\\_kesearch\\_pi1\[sword\]=dynamometer+3&tx\\_kesearch\\_pi1\[page\]=1&tx\\_kesearch\\_pi1\[resetFilters\]=0&tx\\_kesearch\\_pi1\[sortByField\]=&tx\\_kesearch\\_pi1\[sortByDir\]](http://www.kistler.com/si/en/suche/?tx_kesearch_pi1[sword]=dynamometer+3&tx_kesearch_pi1[page]=1&tx_kesearch_pi1[resetFilters]=0&tx_kesearch_pi1[sortByField]=&tx_kesearch_pi1[sortByDir])

Kopač J. 2005. Obdelovalni stroji, orodja in naprave. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 224 str.

Kopač J. 2008. Odrezavanje (teoretične osnove in tehnološki napotki). Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 264 str.

Leitz compact tooling program catalog (Tools and tooling systems for wood and advanced materials). 2014: 36 str.

<http://www.leitztooling.com/downloads/compact-tooling.pdf> (25.5.2014)

Palanikumar K., Prakash S., Manoharan N. 2009. Experimental investigation and analysis on delamination in drilling of wood composite medium density fiber boards. Materials and manufacturing processes, 24, 12: 1341–1348

Prakash S., Palanikumar K. 2011. Modeling for prediction of surface roughness in drilling MDF panels using response surface methodology. Journal of composite materials, 45, 16 : 1639–1646

Sokovič M.1990. Mehanska tehnologija. 2. zvezek, računske vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 129 str.

Valarmathi T. N., Palanikumar K., Latha B. 2013. Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels. *Measurement*, 46, 3: 1220–1230

Valarmathi T. N., Palanikumar K., Sekar S. 2012. Modeling of thrust force in drilling of plain medium density fiberboard (MDF) composite panels using RSM. *Procedia Engineering*, 38: 1828–1835