

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Samo JEREB

**KAKOVOST OBDELAVE POVRŠINE PRI
KLASIČNEM STRUŽENJU IN STRUŽENJU Z
GNANIM ORODJEM**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

Ljubljana, 2016

UNIVERZA V LJUBLJANI
BIOTEHNIŠKA FAKULTETA
ODDELEK ZA LESARSTVO

Samo JEREB

**KAKOVOST OBDELAVE POVRŠINE PRI KLASIČNEM
STRUŽENJU IN STRUŽENJU Z GNANIM ORODJEM**

DIPLOMSKO DELO

Univerzitetni študij

**THE WOOD SURFACE QUALITY IN THE CONVENTIONAL
TURNING AND IN THE DRIVEN-TOOL TURNING**

GRADUATION THESIS

University studies

Ljubljana, 2016

Diplomsko delo predstavlja zaključek izobraževanja Univerzitetne smeri lesarstva na Oddelku za lesarstvo na Biotehniški fakulteti, Univerze v Ljubljani. Opravljeno je bilo na Katedri za mehanske in obdelovalne tehnologije. Praktični del poizkusov je bil izveden v laboratoriju Katedre.

Senat Oddelka za lesarstvo je za mentorico diplomskega dela odobril doc. dr. Dominiko Gornik Bučar, za somentorja dr. Bojana Gospodariča ter za recenzenta doc. dr. Mirana Merharja.

Komisija za oceno in zagovor:

Predsednik:

Član:

Član:

Datum zagovora:

Diplomsko delo je rezultat lastnega raziskovalnega dela. Spodaj podpisani se strinjam z objavo svoje naloge v polnem tekstu na spletni strani Digitalne knjižnice Biotehniške fakultete. Izjavljam, da je naloga, ki sem jo oddal v elektronski obliki, identična tiskani verziji.

Samo Jereb

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

ŠD Dn

DK UDK 630*823.5

KG les/struženje/kakovost površine/tehnološki parametri obdelave

AV JEREB, Samo

SA GORNIK BUČAR, Dominika (mentorica)/GOSPODARIČ, Bojan
(somentor)/MERHAR, Miran (recenzent)

KZ SI- 1000 Ljubljana, Rožna dolina, Cesta VIII/34

ZA Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo

LI 2016

IN KAKOVOST OBDELAVE POVRŠINE PRI KLASIČNEM STRUŽENJU IN
STRUŽENJU Z GNANIM ORODJEM

TD Diplomsko delo (univerzitetni študij)

OP IX, 40 str., 5 pregl., 22 sl., 1 pril., 8 vir.

IJ sl

JI sl/en

AI V diplomski nalogi smo ugotavljali hrapavost novonastale površine pri dveh načinih struženja lesa. Prvi način je klasično struženje, kjer se obdelovanec vrti z visoko vrtilno hitrostjo, rezilo pa se pomika vzdolž obdelovanca in je stalno v stiku z obdelovancem. Drugi način struženja pa je struženje z gnanim orodjem. Pri tem načinu je vrtilna hitrost obdelovanca bistveno počasnejša kot pri klasičnem struženju, orodje pa se z veliko vrtilno hitrostjo počasi pomika vzdolž obdelovanca. Za ta način smo izdelali posebno rezalno orodje. Pri obeh načinih obdelave smo imeli enako obliko osnovnega rezila z velikim prsnim kotom. Poizkuse smo izvajali na vzorcih štirih različnih drevesnih vrst, in sicer na bukovini, hrastovini, javorovini ter jesenovini. Kakovost površine smo nadzorovali z dvema merilnikoma hrapavosti, ki podajata različne parametre izmerjene površine. Ugotovili smo, da je sama površina pri struženju z gnanim orodjem boljša od površine, pridobljene s klasičnim struženjem, vendar dobimo pri tem načinu struženja na površini nezaželene valove.

KEY WORDS DOCUMENTATION

DN Dn

DC UDC 630*823.5

DX wood/turning/surface quality/technological parameters of processing

AU JEREB, Samo

AA GORNIK BUČAR, Dominika (supervisor)/GOSPODARIČ, Bojan (co-advisor)/MERHAR, Miran (reviewer)

PP SI- 1000 Ljubljana, Rožna dolina, Cesta VIII/34

PB University of Ljubljana, Biotechnical Faculty, Department of Wood Science and Technology

PY 2016

TI THE WOOD SURFACE QUALITY IN THE CONVENTIONAL TURNING AND IN THE DRIVEN-TOOL TURNING

DT Graduation thesis (University studies)

NO IX, 40 p., 5 tab., 22 fig., 1 ann., 8 ref.

LA sl

AL sl/en

AB The aim of the thesis was to establish the roughness of wood surface in two different ways of wood turning; the conventional and the driven-tool turning. The processed object in the conventional turning rotates with high rotational speed while the blade moves along the object with which it is constantly in contact. On the other hand, the rotational speed of the processed object in the driven-tool turning is essentially lower. Also, the tool moves slowly along the processed object but with high rotational speed. For this way of turning (i.e. the driven-tool turning), a special cutting tool was made. The same wide tool rake angle was used for both ways of processing. The experiments were carried out on four different tree samples: beech, oak, maple and ash wood. The surface quality was supervised with two roughness measuring instruments which show different parameters of the measured surface. The experiments showed that the surface in the driven-tool turning is of better quality than the surface in the conventional turning, but some unwanted waves on the surface can be noticed.

KAZALO VSEBINE

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA	III
KEY WORDS DOCUMENTATION	IV
KAZALO VSEBINE	V
KAZALO PREGLEDNIC	VII
KAZALO SLIK	VIII
KAZALO PRILOG	IX
1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA.....	1
1.2 DELOVNE HIPOTEZE.....	1
1.3 CILJI NALOGE.....	1
2 SPLOŠNI DEL	2
2.1 STRUŽENJE	2
2.2 KAKOVOST OBDELANE POVRŠINE	4
2.3 DREVESNE VRSTE	7
2.3.1 Bukev- <i>Fagus L.</i>	7
2.3.2 Hrast- <i>Quercus sp.</i>	9
2.3.3 Javor- <i>Acer L.</i>	12
2.3.4 Jesen- <i>Fraxinus L.</i>	13
3 MATERIAL IN METODE	15
3.1 MATERIAL	15
3.1.1 Priprava vzorcev	15
3.2 METODE DELA	15

3.2.1	Klasično struženje	16
3.2.2	Struženje z gnanim orodjem.....	19
3.2.3	Merjenje hrapavosti površine.....	21
4	REZULTATI IN RAZPRAVA.....	23
4.1	OBDELAVA REZULTATOV	23
4.2	PRIMERJAVA REZULTATOV OBEH NAČINOV OBDELAVE	25
4.3	VALOVITOST POVRŠINE PRI STRUŽENJU Z GNANIM ORODJEM	30
4.3.1	Meritve novonastale površine.....	31
4.3.2	Teoretična globina vala	33
4.3.3	Zamik orodja iz idealne postavitve	35
5	SKLEPI	38
6	POVZETEK.....	39
7	VIRI	40
ZAHVALA		

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1:	Gostote ter povprečne širine letnic vzorcev	15
Preglednica 2:	Rezultati obdelave podatkov za bukovino	25
Preglednica 3:	Rezultati obdelave podatkov za hrastovino.....	25
Preglednica 4:	Rezultati obdelave podatkov za javorovino	26
Preglednica 5:	Rezultati obdelave podatkov za jesenovino	26

KAZALO SLIK

Slika 1:	Rezalni koti orodja (Rezalni...,2016)	3
Slika 2:	Aritmetična srednja hrapavost (Aritmetična..., 2016)	5
Slika 3:	Definicija povprečne globine hrapavosti R_z (Definicija...,2016)	5
Slika 4:	Hrapavost in valovitost obdelane površine (Kopač, 2008)	6
Slika 5:	Načrt osnovnega rezila (Vidic D.).....	16
Slika 6:	Klasično struženje	17
Slika 7:	Rezilo za klasično struženje	18
Slika 8:	Površina po klasičnem struženju	18
Slika 9:	Načrt nosilnega telesa orodja (Vidic D.).....	19
Slika 10:	Rezkalno orodje	20
Slika 11:	Struženje z gnanim orodjem.....	21
Slika 12:	Merilnik hrapavosti	22
Slika 13:	R_a pri 95-% intervalu zaupanja za vse meritve pri obeh načinih obdelave	28
Slika 14:	R_z pri 95-% intervalu zaupanja za vse meritve pri obeh načinih obdelave	29
Slika 15:	Valovita površina na vzorcu jesenovine.....	30
Slika 16:	Laserski merilnik hrapavosti	31
Slika 17:	Profil površine bukovine pri struženju z gnanim orodjem.....	31
Slika 18:	Profil površine hrastovine pri struženju z gnanim orodjem	32
Slika 19:	Profil javorovine pri struženju z gnanim orodjem	32
Slika 20:	Profil jesenovine pri struženju z gnanim orodjem	33
Slika 21:	Skice za izračun globine vala	34
Slika 22:	Skica za izračun globine vala pri zamiku orodja.....	36

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: PODATKI MERITEV

1 UVOD

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA

Pri obdelavi lesa s klasičnim struženjem ne moremo doseči dovolj gladke površine, zato je vedno potrebna še dodatna faza obdelave, običajno je to brušenje, kar vpliva na kapaciteto in stroške. S struženjem z gnanim orodjem želimo doseči boljšo površino obdelovanca. Gnano orodje je vpeto v agregat obdelovalnega stroja in ima v našem primeru enako obliko osnovnega rezila kot pri klasičnem struženju. Zasnovano orodje ima dve rezili in se vrti z visoko vrtilno hitrostjo, obdelovanec pa se vrti z bistveno nižjimi vrtljaji kot pri klasičnem struženju. Oba načina obdelave smo izvedli na CNC-stroju, kjer smo lahko natančno nastavljali parametre obdelave. Kakovost obdelave smo primerjali na vzorcih štirih različnih drevesnih vrst.

1.2 DELOVNE HIPOTEZE

Pri struženju z gnanim orodjem bomo dobili boljšo površino obdelave kot pri klasičnem struženju.

Pri struženju z gnanim orodjem se bo kapaciteta obdelave zmanjšala.

1.3 CILJI NALOGE

Pri nalogi želimo ovrednotiti tehnološke parametre pri dveh načinih struženja in vpliv letih na kakovost pridobljene površine ter na kapacitete stroja. To želimo dokazati analitično ter pridobljene rezultate podkrepiti z meritvami na eksperimentih.

2 SPLOŠNI DEL

2.1 STRUŽENJE

Struženje je neprekinjen postopek odrezovanja z enim rezilom, pri katerem ima glavno gibanje, ki je vrtilno, vedno obdelovanec. Podajalno gibanje je največkrat premočrtno; giblje se orodje, izjemoma tudi krivočrtno (pri kopiranju). Za struženje je značilno, da je podajalno gibanje kinematično povezano z glavnim gibanjem.

Struženje je v rabi pretežno za obdelavo okroglih predmetov, možna pa je tudi obdelava ravnih ploskev in nekaterih neokroglih oblik (neokroglo kopiranje) (Soković, 1990).

Obodna hitrost obdelovanca na konici noža določa rezalno hitrost.

Hitrost odrezovanja je 5 do 7 m/s na trd les in 8 do 15 m/s za mehak les. Glede na radij struženja se torej vrtilna hitrost giblje od 150 do 1800 vrtljajev na minuto.

Hitrost pomika vzdolž obdelovanca pri vzdolžnem struženju je prirejena tako, da je debelina odrezka 0,2 do 0,5 milimetra.

Prosti kot noža $\alpha = 12^\circ$ do 15° , kot klina $\beta = 50^\circ$ do 60° za trd les in $\beta = 30^\circ$ za mehak les. Kot $\kappa = 50^\circ$ do 60° . Tudi ta kot je večji za trd les (Medič, 2001).

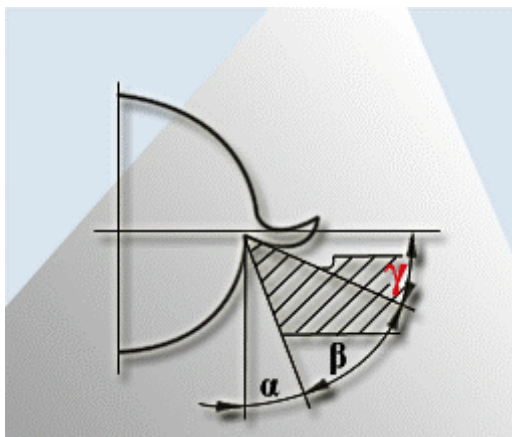
Prosti kot α je med glavno rezalno ploskvijo in tangento na smer obdelave. Vedno je pozitiven in mora imeti vsaj minimalno vrednost, drugače orodje drsi po že obdelani površini.

Kot klina β je kot med rezalno ploskvijo in cepilno ploskvijo. Definira trdnost orodja. Za rezanje mehkih materialov je majhen (več prostora za odrezek, manjše sile), za rezanje trdih materialov pa je velik.

Cepilni kot γ je kot med cepilno ploskvijo in pravokotnico na smer obdelave. Za mehke materiale mora biti velik, da je dovolj prostora za odrezke. Cepilni kot je lahko tudi negativen. V tem primeru so deformacije odrezkov zelo velike, kar povzroča lomljenje odrezkov.

Te tri kote prikazuje Slika 1.

Nastavni kot κ je kot med glavnim rezalnim robom in ploskvijo obdelave oziroma smerjo podajanja. (Rezalni ..., 2016)



Slika 1: Rezalni koti orodja (Rezalni...,2016)

Običajne moči stružnic za les so od 1 do 5 kw.

Poleg vzdolžnega struženja je mogoče tudi radialno struženje, če se nož pomika v radialni smeri.

Na preprostih stružnicah je prislon noža lahko fiksni in je potrebno nož pomikati ročno. Seveda je s takim načinom težko ponoviti isto obliko. Običajno je suport gnan s pomočjo vijačnega vretena in posebnega pogona (Medič, 2001).

Spreminjajoč pojav pri odrezovanju so vibracije, ki so lahko namerne, zaželene ali nezaželene. Z namerno povzročenimi vibracijami skušamo vplivati na ugodnejši potek tvorbe odrezka ali na rezalne sile. Nezaželene vibracije prihajajo na obdelovanec in orodje iz neuravnoteženih in nenatančnih delov stroja ali okolice, od drugih izvorov vibracij, lahko pa so tudi samovzbujene. Te zadnje se pojavijo na videz brez pravega vzroka, pogosto popolnoma nepričakovano. Vse nezaželene vibracije vplivajo neugodno na odrezovanje. Zaradi njih se poslabša predvsem kakovost obdelane površine. Na površini obdelovanca se pojavi značilna valovitost, razen tega pa se občutno zmanjša tudi obstojnost orodij, zlasti tistih, ki so zelo krhka (karbidne trdine, keramika in diamant). Nezaželene vibracije, ki prihajajo od drugih strojev v okolici, lahko v veliki meri izključimo, če postavimo stroj na izoliran temelj ali na dovolj velik betonski blok, ki je obešen na vzmeteh, pri čemer se mora lastna frekvenca tako nastalega sistema močno razlikovati od motilne frekvence (Kopač, 2008).

2.2 KAKOVOST OBDELANE POVRŠINE

Integriteta obdelane površine je zelo pogosto eden od pomembnejših parametrov na izhodu iz obdelovalnega sistema. Pod samo integriteto površine razumemo pojem, ki vključuje številne kriterije:

- kakovost obdelane površine in površino brez razpok,
- kemične spremembe,
- temperaturne poškodbe (zažgan material, transformacije),
- neugodne (natezne) zaostale napetosti.

Prvi od omenjenih, kakovost obdelane površine – hrapavost, je zdaleč najpomembnejši za postopke obdelave z odrezovanjem. Drugi kriteriji pa v glavnem zahtevajo podpovršino obdelanega materiala. Stopnjo hrapavosti površine običajno ocenimo oziroma popišemo z:

- R_a [μm] – aritmetična srednja hrapavost (Slika 2) (merilo povprečnih odklonov vrhov od srednje linije profila hrapavosti: srednja linija je črta nad in pod katero je nastala površina med srednjo linijo in sledjo profila hrapavosti enaka) (Kopač, 2008).

Matematično je izražena z enačbo (1):

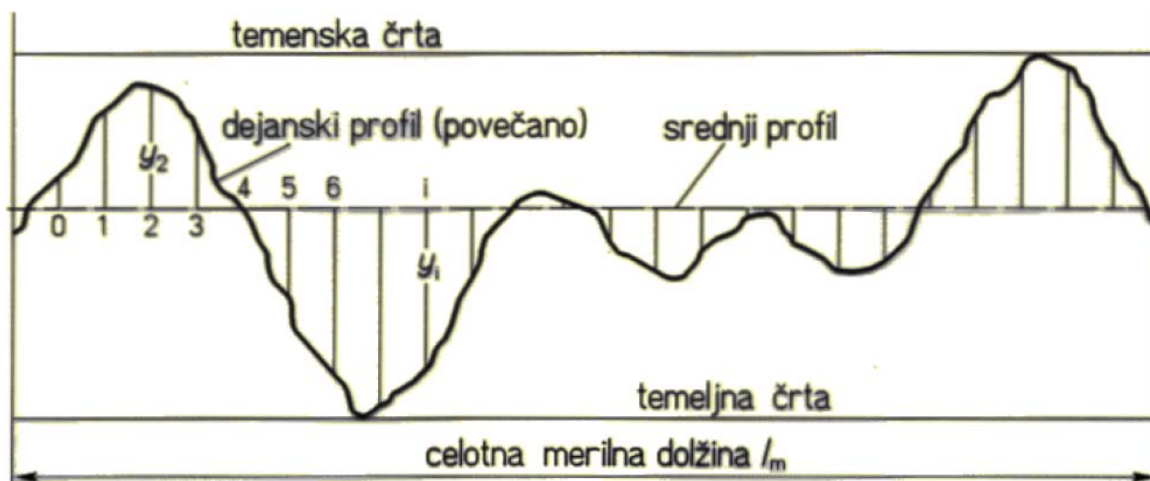
$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad \dots(1),$$

kjer je:

R_a = aritmetična srednja hrapavost [μm],

l = referenčna dolžina, na kateri merimo [μm],

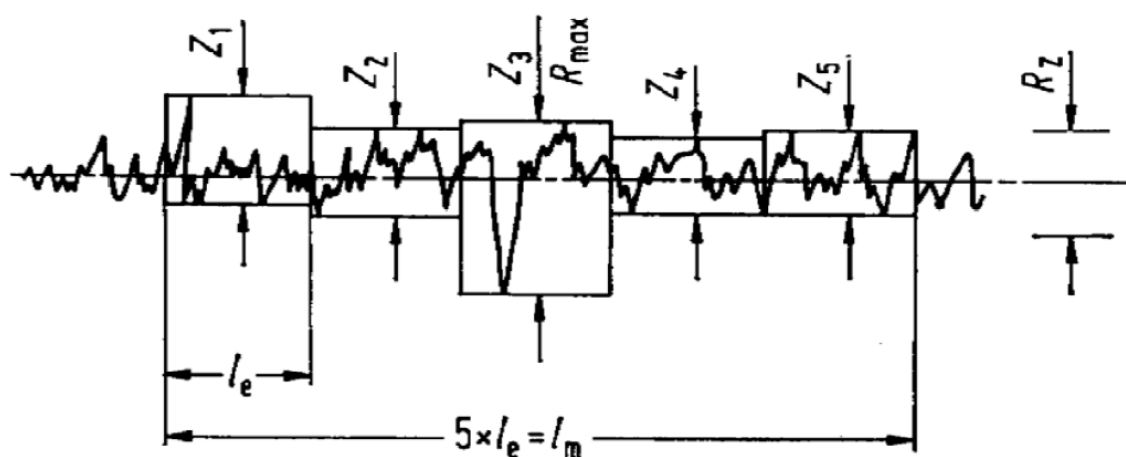
y = višina profila glede na srednjo referenčno črto [μm],



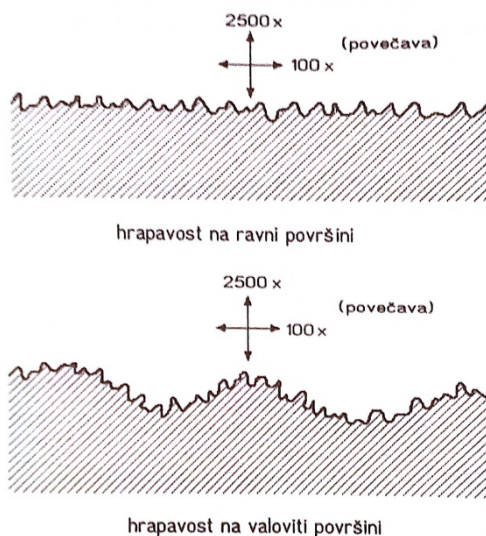
Slika 2: Aritmetična srednja hrapavost (Aritmetična..., 2016)

R_z [μm] – povprečna globina hrapavosti (Slika 3). Dobimo jo kot aritmetično srednjo vrednost petih posamičnih globin hrapavosti na izbrani dolžini merjenja l_m . Njena prednost je v tem, da v manjši meri upošteva povsem izjemno veliko vrednost Z , ki nastopa morda samo na enem mestu. Računamo jo po naslednji enačbi (2):

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad \dots(2)$$

Slika 3: Definicija povprečne globine hrapavosti R_z (Definicija..., 2016)

Poleg hrapavosti lahko površina izkazuje tudi valovitost. Valovitost površine je vertikalna razdalja med vrhovi in dolinami pri sorazmerno velikih dolžinah valov nepravilnosti, medtem ko je ustrezna višina med vrhovi za kratkovalovne nepravilnosti imenovana hrapavost. (Max. dolžina valov za površinsko hrapavost je običajno 0,75 mm). Razlika med hrapavostjo in valovitostjo je prikazana na Sliki 4.



Slika 4: Hrapavost in valovitost obdelane površine (Kopač, 2008)

Glavne značilnosti, ki nas zanimajo in karakterizirajo končno obdelavo, so:

- dimenzijska natančnost,
- hrapavost,
- obstojnost orodja.

Dimenzijska natančnost v glavnem zadeva izogibanje napak v vzdolžni in krožni obliki izdelka (okroglost in cilindričnost). Napake v vzdolžni smeri so rezultat statičnih odklonov vretena in obdelovanca pod vplivom rezalnih sil in temperaturno induciranih napetosti na stroju, medtem ko so napake v krožni obliki rezultat vrtenja vretena in nihanj orodja in/ali obdelovanca. Natančnost, ki jo dosežemo v kateremkoli primeru, je v glavnem odvisna od togosti in stabilnosti obdelovalnega stroja.

Pri struženju naletimo na dva izrazita tipa hrapavosti obdelane površine:

1. končna obdelana površina oziroma hrapavost, ki jo dobimo pri obdelavi s primarnim robom;
2. hrapavost, ki jo dobimo pri obdelavi s sekundarnim rezalnim robom – struženje z orodjem, ki ima zaokroženo konico (radij zaokrožitve rezalnega orodja) (Kopač, 2008).

2.3 DREVESNE VRSTE

2.3.1 Bukev – *Fagus L.*

Drevesa z gladko skorjo imajo na pokončnih poganjkih liste razporejene premenjalno, na stranskih bolj ali manj dvoredno. So enodomne in vetrocvetne vrste. Znanih je okrog 10 vrst v zmerni coni severne poloble. V Evropi raste dve vrsti in ena podvrsta (Brus, 2011).

Bukev je naš najbolj razširjen listavec in naša najpomembnejša lesna vrsta. Do sredine 19. stoletja so jo uporabljali skoraj izključno za kurjavo. Bukev je razširjena po dolinah in sredogorjih zahodne, srednje in južne Evrope do Kavkaza (med 40° in 60° zemljepisne širine).

Dosega višino do 30 m, priložnostno tudi več kot 40 m, in premere 100 – 150 cm. V sestojih rastejo drevesa s polnolesnimi ravnimi debli. Dolžina debla brez vej znaša 15 m in več. Skorja je gladka, v starosti ima biserni lesk in je srebrnosive barve. Pogosto so na deblu vidne brazgotine odpadnih vej, imenovane "kitajski brki".

Les je rdečkastobel, normalno brez obarvane jedrovine (beljava in jedrovina se barvno ne ločita). Pri starejših drevesih se na prečnem prerezu navadno pojavi nepravilno oblikovan, rdečerrjav diskoloriran les imenovan "rdeče srce". Za rdeče srce je značilno močno otiljenje trahej, ki med drugim otežuje impregnacijo lesa. Branike so razločne. Kasni les z manj trahejami je nekoliko temnejši od ranega. Difuzivno razporejene traheje velikostnega reda okoli 100 µm so na prečnem prerezu vidne z lupo. Zelo značilni so številni trakovi, ki so na tangencialni površini vidni kot rdečkasta vretenca, na radialni pa kot očitna, do več milimetrov visoka zrcalca, ki zelo vplivajo na videz lesa. Plamenast (tangencialna

površina) in progast (radialna površina) videz nista tako izrazita kot pri iglavcih. Bukovina nima specifičnega vonja ali okusa.

Les bukve ima visoko gostoto, je trd, se zelo krči in nabreka. Stabilnost je neugodna, trdnostne lastnosti so glede na gostoto nadpovprečno visoke (npr. dobra upogibna trdnost), elastičnost je nižja. Les je zelo žilav, malo elastičen in zelo trden. Dobro se cepi in predvsem po parjenju se dobro upogiba. Nezaščiten bukovina je podvržena okužbi z glivami in insekti in je le zmerno trajna, zato je potrebna hitra in pravilna manipulacija po poseku. Z izjemo rdečega srca se dobro impregnira. S kreozotnimi olji impregnirana bukovina ima posebno dolgo življenjsko dobo. Impregnirani bukovi železniški pragovi dosegajo srednjo življenjsko dobo najmanj 40 let. Delež juvenilnega lesa je zanemarljiv. Možen je obilnejši pojav tenzijskega lesa. Notranje napetosti so lahko znatne, kar ima za posledico zvijanje in pikanje lesa.

Zaradi visoke gostote (r_0 490 ... 680 ... 880 kg/m³) in nagnjenosti k distorcijam, zvijanju, pikanju in nastanku rjavordečih, rdečemu srcu podobnih obarvanj, se za sušenje bukovine priporoča blag režim sušenja.

Bukovino parijo zaradi zmanjšanja notranjih napetosti in izenačenja barve. Tako se po parjenju zmanjša nevarnost pikanja in zvijanja, les pa dobi enakomerno rdečkasto barvo. Les mora biti pred parjenjem vlažen, sicer obstaja nevarnost pojava madežev.

Ročno in strojno je bukovino mogoče lepo obdelati, vendar sta zaradi visoke gostote lesa krhanje in poraba energije nekoliko večja. Lepo se lušči in reže v furnirje. Dobro se struži in polira. Z lahkoto se žeblija, vijači in lepi. Za žebljanje in vijačenje se priporoča uvajalna luknja. Bukovina dobro drži vijake. Površino se brez težav obdeluje z vsemi komercialnimi laki. Bukovino je mogoče izjemno dobro kriviti.

Na trgu se ločeno prodajata neparjena in parjena bukovina, sicer pa so na razpolago hlodovina, žagan les, furnirji, vezan les in razni polizdelki (grobo oblikovani kosi – surovci, prešana bukovina itd.). Uporaba lesa je zelo raznovrstna npr. za gradbeno mizarstvo, stopnice, opaže, parket, pohištvo, pri čemer se uporablja masiven, krivljen ali vezan les. Krivljen in vezan les se uporablja predvsem za šolsko in pisarniško pohištvo, pri katerih je potrebna trda površina. Najbolj znan izdelek iz krivljene bukovine je Thonetov stol, ki ga izdelujejo že okrog 150 let. Bukovina je odlična za izdelavo železniških pragov,

vendar mora biti za ta namen ustrezno impregnirana. Kot gradben im konstrukcijski les se uporablja predvsem pri srednje obremenjenih notranjih konstrukcijah. Bukovina je izhodiščni material za proizvodnjo oplemenitenih lesnih tvoriv, kot prešan masiven les, prešani laminati, uporabljajo ga za furnirske in mizarske plošče in za proizvodnjo ivernih plošč. Uporablja se tudi za delavniške mize, ročaje orodij in aparatur, za gospodinjske pripomočke, za igrače, embalažo, pridobivanje oglja, stružene izdelke, proizvodnjo palet in zabojev, ohišja in v strojni industriji. Skupaj z drugimi lesnimi vrstami se uporablja tudi za pridobivanje celuloze. V preteklosti so bukovino uporabljali predvsem za kurjavo (drva in oglje). Uporaba v ta namen danes zopet narašča (Čufar, 2006).

2.3.2 Hrast – *Quercus sp.*

To so listopadna ali vednozelena drevesa, katerih listi so premenjalno nameščeni, enostavni, pernato krpati ali pernato deljeni, brsti so zgoščeni na koncu poganjkov. Moški cvetovi so sestavljeni iz 6–8 lističev enojnega cvetnega odevala (perigona) in 6–10 prašnikov, združeni so v viseče mačice. Ženski cvetovi so sestavljeni iz 6 lističev cvetnega odevala (perigona) in tridelne plodnice s 6 semenskimi zasnovami, posamezno ali po nekaj skupaj rastejo v kratkih klasih. Plod je orešček (želod) skupaj s skledico, ki ga obdaja na spodnji strani. Rastlinski deli vsebujejo veliko čreslovin. Koreninski sistem razvije močno glavno korenino, poleg njih pa tudi močne stranske. Rod vsebuje od 450 in 600 vrst, največ jih raste v Severni Ameriki. V Evropi je samoniklih 28, v Sloveniji pa 6 vrst (Brus, 2011).

Naši najpomembnejši komercialni vrsti hrasta sta **dob** (*Quercus robur* L., *Quercus pedunculata* Ehrh. (Syn)) in **graden** (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl., *Quercus sessiliflora* Salisb. (Syn.)). Po zgradbi lesa ju prištevamo v skupino t. i. "belih hrastov". Po lesu ju ni mogoče zanesljivo razlikovati, razlikovati pa ju je mogoče od **cera** (*Quercus cerris* L.) in ameriškega **rdečega hrasta** (*Quercus rubra* L.), ki imata zgradbo t. i. "rdečih hrastov".

Dob in graden imata v glavnem podobne lesne lastnosti in ju je anatomsko skorajda nemogoče zanesljivo razločevati. Obe vrsti sta razširjeni po vsej Evropi do male Azije. Dob raste v ravninah in predgorjih, na globokih, plodnih in vlažnih tleh, graden pa predvsem na peščenih, suhih tleh gričevij in sredogorij. Takoj za bukvijo je hrast naš najpomembnejši listavec.

Drevesa iz sestojev so lepo raščena, z ravnimi in cilindričnimi debli. Za graden je značilno bolj vitko, do vrha segajoče deblo in krošnja pravilne oblike z enakomerno razporejenimi vejami. Pri dobi se v območju krošnje deblo razveji na krepke navzven sršeče veje. Prosto rastoči hrasti imajo široke krošnje, kratka čokata debela in so za predelavo manj primerni. V povprečju hrasti dosegajo višine 20 do 40 m in premere nad 1 m. Debla brez vej dosegajo dolžine 12–15 m. Maksimalne dimenzije hrastov na dobrih rastiščih pa so: višine do 50 m, premeri do 2–3 m.

Med evropskimi drevesnimi vrstami prav hrasti dosegajo najvišje starosti, saj 600 do 700 let stara drevesa niso nobena posebnost.

Od domačih gradna in doba moramo ločiti ameriški rdeči hrast (*Quercus rubra* L.), ki se je v Evropi v zadnjih 200 letih zelo uveljavil kot parkovno, obcestno in gozdno drevo.

Les a doba in gradna ni mogoče niti makroskopsko niti mikroskopsko zanesljivo ločevati. Hrast je venčastoporozna drevesna vrsta z obarvano jedrovino (črnjavo), ki se ostro loči od beljave. Beljava je navadno ozka (2,5 do 5 cm) in rumenkastobela. Jedrovina je svetlorjava in na svetlobi potemni. Posebno iskani so primerki s svetlorumenim do medeno rumenim tonom jedrovine. Sveže prerezane površine imajo lahko rdečkast odtenek. Letnice so izrazite. Kot pri vseh venčastoporoznih listavcih se traheje na prečnem prerezu pojavljajo kot grobe, s prostim očesom dobro vidne pore, na vzdolžnih prerezih pa kot žlebiči. Zaradi venčaste razporeditve trahej tangencialna površina izkazuje karakterističen plamenast videz, radialna pa progastega. Traheje kasnega lesa so bistveno manjše in posamezne komajda razločne. Razporejene so radialno, skupaj s traheidami osnovnega tkiva na prečnem prerezu pa tvorijo s prostim očesom vidna svetlejša polja. Traheje jedrovine so navadno otiljene. Poleg zelo finih (enorednih), se v neenakomernih presledkih pojavljajo tudi zelo široki (pogosto nad 1 mm) in do 1 cm visoki trakovi, ki se na tangencialnih površinah vidijo kot dolge svetle proge, na radialnih pa kot izrazita zrcala. Aksialni parenhim, ki pogosto tvori zelo fine tangencialne nize, je viden na prečnem prerezu samo z lupo. Svež les ima nekoliko kiselkast vonj.

Les obeh hrastov je gost in trd. Gostota zelo niha v odvisnosti od rastišča, rastnih posebnosti in starosti (r_0 390 ... 650 ... 930 kg/m³). Širše ko so branike, gostejši, trdnjši in trši je les, nasprotno pa je les z ožjimi branikami redkejši in mehkejši. V širokih

branikah naraste delež kasnega lesa s pretežno debelostenimi vlakni, kar se pokaže v višji gostoti in trdnosti. Širina branike oz. delež ranega (ali kasnega) lesa bistveno vpliva na gostoto in s tem na lastnosti lesa ter njegovo primernost za različne vrste končne uporabe. V splošnem velja, da ima graden z 1 mm širokimi branikami nekaj gostejši les kot dob.

Glede na kakovost lesa v praksi pogosto govorimo o "mehkem" in "trdem" hrastu. "Mehak les" imajo navadno starejša, počasneje rastoča drevesa z branikami, širokimi od 1–2 mm. "Trd" les imajo mlajša do srednje stara drevesa s širinami branik nad 3 mm. Za hrast je značilna tudi nekoliko temnejša barva.

Hrastovina se znatno krči, njene trdnostne lastnosti so odlične, vključno z upogibno trdnostjo. Les je zelo elastičen. Ugodna je izjemna naravna trajnost jedrovine. Hrast velja za skorajda neomejeno trajen les za podvodne konstrukcije. Beljava, ki se sicer glede bistvenih fizikalnih in tehnoloških lastnosti le malo loči od jedrovine, je netrajna in jo pogosto odstranijo ali pa jo ustrezno zaščitijo. Beljava se v splošnem dobro impregnira.

Svež in vlažen les se ob stiku z železom zaradi reakcije s čreslovinami iz lesa bolj ali manj modročrno obarva. Če madeži niso pregloboki, jih je mogoče odstraniti s 7– % raztopino kalijevega oksalata.

Sušenje lesa je treba v začetni fazi voditi previdno, ker je hrastovina nagnjena k zvijanju in pokanju. Pri nepravilnem sušenju lahko pride tudi do nezaželenih obarvanj. V splošnem se hrastovina ročno in strojno z lahkoto obdeluje z vsemi orodji. Izjema je izredno trd hrast (zmotno imenovan "kamniti hrast") z zelo širokimi branikami, ki se le s težavo obdeluje. Hrastovina se lepo struži in rezlja ter brez težav predeluje v luščene in rezane furnirje. Z lahkoto se cepi, dobro se žeblija in vijači, pri čemer so pri tanjših elementih potrebne uvajalne luknje. Tudi lepi se dobro. Pri uporabi alkalnih lepil se občasno pojavljajo madeži. Površinska obdelava poteka brez težav. Pred nanosom krovnih premazov priporočajo predhodno brušenje. Priljubljeni postopki površinske obdelave hrasta so tudi dimljenje, apnenje in dvojno luženje.

Hrastovina je naprodaj predvsem kot hlodovina, žagan les in furnir. Njena uporabnost je zelo raznovrstna, pri čemer je treba ločiti t. i. mehko in trdo hrastovino. Mehka se uporablja za dekorativne namene, kot masiven les ali furnir za notranjo opremo. Tudi za rezbarske in stružene izdelke uporabljajo predvsem mehkejši les. Visoko kakovostna

furnirska hlodovina se odlikuje po ozkih in enakomernih branikah in po svetleje rumeni do medeno rumeni barvi. Rezani furnirji iz mehkega lesa z ozkimi branikami se uporabljajo za luksuzno pohištvo. Masivna hrastovina se uporablja za najrazličnejše pohištvene stile in pode.

”Trda” hrastovina se uporablja tam, kjer so zaželeni predvsem njena visoka trdnost, trdota in trajnost, npr. za gradben in konstrukcijski les pri visokih in nizkih gradnjah, mostove, vodne in jamske konstrukcije, v strojni industriji in za izdelavo kontejnerjev. Primerna je za okvirne konstrukcije, vrata, stopnice, parket in pode iz kock, ročaje orodij in za poljedelsko orodje. Zaželena je za izdelavo sodov in korit. Zaradi enakomernega otiljenja so traheje nepropustne za tekočine (za razliko od ameriškega rdečega hrasta, ki ni zatiljen in tako neprimeren za izdelavo sodov). Omembe vredna je tudi uporabnost za železniške pragove.

Posebnost predstavljajo t. i. močvirski hrasti. To so hlodi, ki so pod vodo ležali več sto do več tisoč let. Zaradi reakcije med čreslovinami v lesu in železom v vodi so obarvani značilno svetlorjavo do temno sivo ali črno s pogosto zelenkastimi ali modrikastimi odtenki. Furnirji, redkeje žagan les, so zelo iskana posebnost za visoko vredno pohištvo in drugo notranjo opremo (Čufar, 2006).

2.3.3 Javor – *Acer L.*

So večinoma drevesa, včasih grmi. Listi so dlanasto krpati, redko enostavni ali pernato sestavljeni. Plodovi (pokovci) so sestavljeni iz dveh krilatih plodičev (oreškov). Izvirni center je vzhodna Azija. Skupaj je znanih 150–200 vrst s severne poloble, v Sloveniji raste 6 vrst samoniklo (Brus, 2011).

Lastnosti

Les javorja je srednje gost (gostota r_0 480 ... 590 ... 750 kg/m³), pri čemer je les poljskega javorja nekoliko gostejši od gorskega. Les se zmerno krči, stabilnost je dobra. Je zmerno trd, trden, žilav in elastičen. Les je zelo homogen. Zelo je podvržen glivam in diskoloracijam. Ni odporen proti atmosferilijam.

Naprodaj je kot visoko vreden rezan furnir in kot žagan les. S hlodovino in žaganim lesom je treba rokovati posebno previdno, da ne pride do nezaželenih obarvanj. Les se z lahkoto in lepo obdeluje, posebno dobro pa se tudi struži in rezlja.

Površinsko se zelo lepo in brez težav obdeluje. Z lahkoto se ga luži v nežne odtenke, s primerno površinsko obdelavo je primeren za imitacijo drugih lesnih vrst (npr. ebenovina). Parjenju se moramo izogibati, ker obstaja nevarnost obarvanja. Mogoče ga je beliti.

Pri javorju se pojavljajo napake, kot so: krivost, necentričnost, spiralen potek aksialnih elementov, odmrli sekundarni poganjki, suhe grče, diskoloriran les – rjavo srce, oksidativna obarvanja, razpokanost, poškodbe pri spravilu, trohnoba, obarvanje zaradi gliv in bakterij (rjavo, zeleno, sivo, rumeno), rovi insektov.

Uporablja se predvsem kot visoko vreden rezan furnir za pohištvo – včasih so bili javorjevi rezani furnirji zelo moderni za svetlo pohištvo spalnic in dnevnih sob. Tradicionalen izdelek je bila tudi javorjeva kmečka miza. Posebno dekorativna sta gorski in ostrolistni javor. Javor je primeren za intarzije, struženje (predvsem ostrolistni javor) in rezljanje, kuhinjske pripomočke in plošče miz. Posebno kakovosten je les gorskega javorja z ozkimi in valovitimi branikami z malo kasnega lesa (resonančen les) za godala in blok flavte. Tudi za parket in ročaje orodij.

Posebno dekorativni in cenjeni so furnirji kot ptičji javor, ki je luščen furnir s številnimi drobnimi grčami, in javor rebraš, ki ima valovit potek aksialnih elementov (Čufar, 2006).

2.3.4 Jesen – *Fraxinus L.*

Listopadna drevesa imajo večinoma navzkrižno razporejene brste in lihopernato sestavljene liste. So vetrocvetke ali žužkocvetke, cvetno odevalo je razvito ali ne, vrste so večinoma poligamne. Plod je podolgovat krilat orešek. 65–70 vrst raste v zmernem pasu severne poloble, v Sloveniji so avtohtone 3. (Brus, 2011)

Les jesena ima gostoto $r_0 = 410 \dots 650 \dots 820 \text{ kg/m}^3$. Variabilnost lastnosti je precejšnja in je v veliki meri odvisna od rastišča. Les je trd, trden in žilav, krči se zmerno in ima dobro stabilnost. Je zelo elastičen in ima dobre dinamične trdnostne lastnosti (boljše lastnosti ima le še ameriški hickory). Les jesena, rastočega na strmih, skalnatih pobočjih, ima krajša vlakna in je bolj krhek, les dreves z vlažnih, dobrih rastišč pa je dolgovlaknat in

izredno elastičen. Trdnost primerkov z diskoloriranim lesom in brez njega se ne razlikuje. Je le malo odporen proti atmosferilijam in dokaj neodporen proti biološkim škodljivcem, posebno na prostem. Svež les ima značilen aromatičen sladkast vonj. Posek in razžagovanje s skorjo priporočajo pred poletjem. Čela furnirske hlodovine je nujno potrebno zaščititi pred pokanjem. Odkloni od premega poteka aksialnih elementov (vejice ...) dajo lesu dekorativen videz in so zaželeni. Poseben, dragocen sortiment predstavlja olivni jesen, ki je po obarvanosti podoben lesu oljke.

Naprodaj je predvsem kot žagan les. Iz posebno dekorativnih primerkov izdelujejo rezan furnir. Možno je tudi luščenje furnirja. Obdelava s stroji in ročnimi orodji je dokaj dobra. Primerki z gostejšim lesom se teže obdelujejo (iztrganine pri skobljanju). Tehnično sušenje poteka dobro, vendar počasi ter brez večjih napak. Površinska obdelava je dobra, luženje je težavno.

Pri jesenu se pojavljajo predvsem naslednje napake: krivost, spiralen potek aksialnih elementov, sekundarni poganjki, razpoke, diskoloriran les – rjavo srce, trohnoba, rovi insektov, velike razlike v gostoti in barvi. Les je nagnjen k porumenitvi.

Uporablja se predvsem za splošno mizarstvo, srednje obremenjene, predvsem notranje konstrukcije, pode, parket, stružene in rezbarske izdelke, pohištvo, luščen in rezan furnir, v ladjedelništvu, za vagone, karoserije, v strojogradnji za orodja (ročaji ipd.), lestve in športna orodja (Čufar, 2006).

3 MATERIAL IN METODE

3.1 MATERIAL

3.1.1 Priprava vzorcev

Za poizkus smo uporabili vzorce štirih različnih drevesnih vrst. Vzorci so bili nažagani iz dela debla tako, da niso imeli stržena. S tem smo se hoteli izogniti pokanju vzorcev pri sušenju. Presek vzorcev je bil kvadraten, s stranico približno 120 mm. Vzorce smo nato posušili v konvencionalni sušilnici na približno deset odstotkov ravnovesne lesne vlažnosti. Nato smo jih poskobljali ter jim požagali robove, da so imeli osemkotni presek. Dolžino smo priredili glede na največjo zmožnost dolžine vpetja stroja. Pred prvim testiranjem smo jih postružili, da so imeli okrogel presek, premera približno 100 mm.

Gostote vzorcev pri 10-% lesni vlažnosti ter povprečne širine letnic so podane v Preglednici 1:

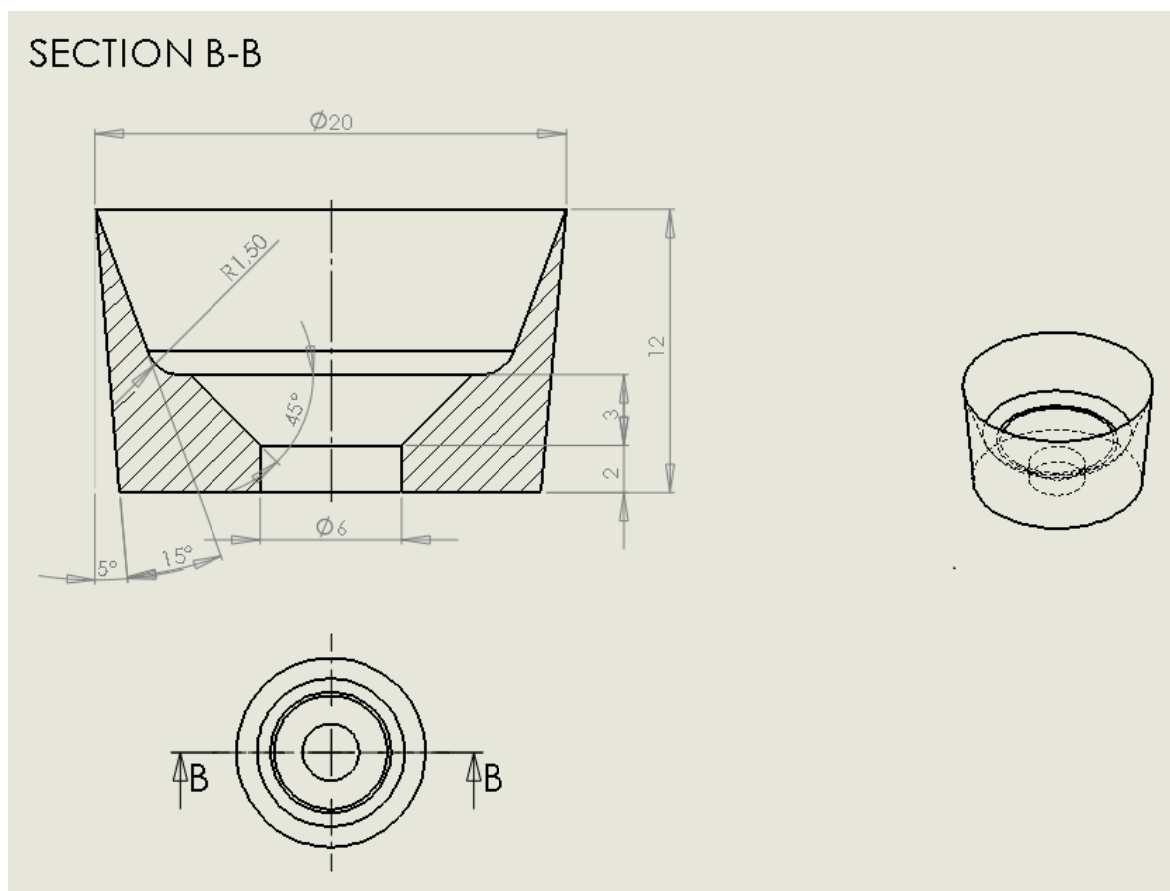
Preglednica 1: Gostote ter povprečne širine letnic vzorcev

Les	Gostota [kg/m^3]	Povprečna širina letnic [mm]
Bukovina	715	1,3
Hrastovina	644	1,7
Javorovina	650	3,3
Jesenovina	728	4,7

3.2 METODE DELA

Vzorci smo obdelovali na štiriosnem CNC-stroju, ki ga poganja program Mach 3 CNC. Četrta os je bila prirejena za struženje.

Osnovno rezilo (Slika 5) je bilo skledaste oblike z velikim prsnim kotom, ki je znašal 70°. Predpostavili smo, da večji prsni kot zagotavlja boljše površine.



Slika 5: Načrt osnovnega rezila (Vidic D.)

3.2.1 Klasično struženje

Pri testiranju za primer klasičnega struženja smo osnovno rezilo privili na nosilec, ki je bil zasnovan za to nalogo (Slika 7). Pritrjen je bil poleg delovnega agregata (Slika 6). S tem smo zagotovili pomike rezila v treh osnovnih smereh: x, y in z. S programom smo lahko natančno nastavljali podajalno hitrost, odvzem in začetno ter končno pozicijo noža. Stroj je bil dodelan tako, da je omogočal tudi vrtenje obdelovancev. Konstrukcija dodelave je omogočala vrtenje obdelovancev na dva načina. Prvi način je omogočal visoke vrtljaje obdelovanca s kratkostičnim asinhronim motorjem ter prenosi. Vrtilno frekvenco obdelovanca smo tako nastavljali s frekvenco električnega toka na motorju. Drugi način vrtenja obdelovanca je zagotavljal koračni elektromotor preko prenosov. Ta način je omogočal manjše vrtilne hitrosti, vendar smo vrtenje obdelovanca lahko natančno nastavljali s programom na stroju. Program je imel to rotacijo nastavljeno kot četrto os. Rotacijo obdelovanca smo nastavljali z zasukom obdelovanca v stopinjah. Za klasično

struženje smo uporabili prvi način. Odvzem materiala je bil pri vseh vzorcih 1 mm. Vrtilno hitrost smo morali prilagajati glede na premer vzorca. Želeli smo doseči isto rezalno hitrost za vse vzorce. Rezalna hitrost je znašala 6 m/s. Podajalno hitrost smo morali rahlo spreminjati za posamezen vzorec, ker smo poleg iste rezalne hitrosti želeli tudi isto podajanje na en obrat e_z . To pa je bistvenega pomena za novonastalo površino. Podajanje na en obrat e_z nam pove, koliko se rezilo pomakne vzdolž obdelovanca v času, ko se obdelovanec zavrti za en vrtljaj. Izračunamo ga lahko po naslednji enačbi (3):

$$e_z = \frac{v_p}{n} \quad \dots(3),$$

kjer je:

e_z [mm] .. podajanje na en obrat,

v_p [m/min] .. podajalna hitrost,

n [min^{-1}] .. vrtilna hitrost obdelovanca.

Podajalna hitrost rezila je bila pri vseh vzorcih približno 1 m/min. S tem zagotovimo pri vseh vzorcih približno enako kapaciteto stroja. Podajanje rezila na en obrat obdelovanca je znašalo 0,84 mm.

Pri takem načinu struženja je odrezovanje izključno prečno na potek vlaken v lesu.

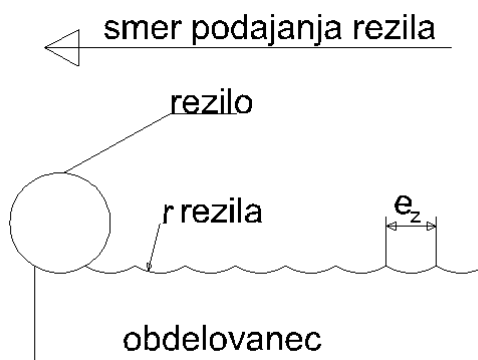


Slika 6: Klasično struženje



Slika 7: Rezilo za klasično struženje

Novonastalo površino pri klasičnem struženju (Slika 8) lahko opišemo kot zaporedje valov, ki potekajo vijačno vzdolž obdelovanca.



Slika 8: Površina po klasičnem struženju



Slika 10: Rezkalno orodje

Steblo orodja smo vpeli v vpenjalno glavo obdelovalnega stroja. Rotacijo obdelovanca je zagotavljal koračni motor preko prenosa, saj je bila vrtilna frekvenca obdelovanca bistveno nižja kakor pri klasičnem struženju.

Pri tem načinu struženja bi lahko orodje glede na obdelovanec postavili na več načinov. Odločili smo se, da je zaradi izvedbe poizkusa najlažje orodje postaviti na zgornjo stran obdelovanca. V tem primeru bi lahko nad os obdelovanca postavili os orodja ali pa bi os orodja zamaknili za polmer orodja od osi obdelovanca, kar je v našem primeru znašalo 50 mm.

V prvem primeru bi bilo odrezovanje izključno prečno na potek vlaken v lesu. Pri taki postavitvi bi orodje prišlo v stik z obdelovancem na dveh točkah. Če gledamo v smeri podajanja, bi bila prva točka na sprednjem spodnjem delu orodja, druga pa bi bila na zadnjem spodnjem delu orodja. Odrezki bi bili v tem primeru najkrajši.

Odločili smo se, da bomo uporabili drugi primer postavitve, ko sta osi orodja in obdelovanca zamaknjeni. Predpostavili smo, da bomo tako dobili boljšo površino obdelave, ker odrezovanje poteka skoraj popolnoma v smeri poteka vlaken v lesu. Odrezki so v tem primeru najdaljši.



Slika 11: Struženje z gnanim orodjem

Pri naših poizkusih se je rezalno orodje vrtilo s 4580 vrtljaji/min. Podajalna hitrost rezila v vzdolžni smeri obdelovanca je bila nastavljena na 0,2 m/min. Obdelovanec se je vrtel z 10 vrtljaji/min. Iz teh nastavitvev je razvidno, da se je rezilo v času enega vrtljaja obdelovanca pomaknilo za 20 mm.

3.2.3 Merjenje hrapavosti površine

Meritve hrapavosti površine smo izvajali z dvema napravama. Prva je Mitutoyo Surftest 211 (Slika 12). Naprava spada med kontaktne merilnike. Tipalo je v obliki konice, ki jo naprava vleče po površini na dolžini 25 mm. Hrapavost površine opiše s parametri R_a in R_z .



Slika 12: Merilnik hrapavosti

Merili smo površino na dvajsetih različnih mestih na vsakem obdelovancu, pri obeh poizkusih. Merilna mesta so bila razdeljena na štiri linije vzdolž osi obdelovanca. Dve liniji sta bili na popolnoma radialnih ploskvah obdelovanca, dve pa na tangencialnih ploskvah. Na vsaki liniji smo izvedli pet meritev. Pri hrastovini in jesenovini smo merili izključno po kasnem lesu. Velike pore ranega lesa so oteževale merjenje, ker so bile že izven merilnega območja merilne naprave.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Pri celotni nalogi smo opravili 160 meritev, kjer smo merili R_a ter 160 meritev za R_z . Vsi rezultati meritev so zabeleženi v prilogi A.

4.1 OBDELAVA REZULTATOV

Rezultate smo obdelali s Studentovo korelacijo. Ta se uporablja za majhno število vzorcev (v našem primeru meritev).

Angleški statistik William Gosset, znan pod psevdonimom Student, je opredelil t -statistiko (5):

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{s/\sqrt{n}} \quad \dots(5).$$

Za njen izračun potrebujemo parameter μ in vzorčni oceni $\bar{x}$ in s . Gosset je ugotovil, da se pri majhnih vzorcih verjetnost porazdelitve t -statistike bistveno loči od standardizirane normalne porazdelitve, pri velikih vzorcih pa je porazdelitev zelo blizu standardizirane normalne porazdelitve. Izpeljal je verjetnostno porazdelitev t -statistik in jo imenoval Studentova oziroma t -porazdelitev. Navajamo naslednji izrek.

Izrek

Na populaciji vzorcev velikosti n je slučajna spremenljivka (6):

$$T = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad \dots(6)$$

porazdeljena po Studentovi porazdelitvi z $n-1$ stopnjami prostosti. To krajše zapišemo takole:

$T \sim t (SP = n-1)$.

Lastnosti Studentove porazdelitve so:

- Gostota verjetnosti za t -porazdelitev je po obliki podobna gostoti verjetnosti za $N(0, 1)$. Funkcija je zvezna, definirana na celotni realni osi, je simetrična okoli 0. Formule za gostoto verjetnosti ne navajamo;
- Parameter Studentove porazdelitve imenujemo *stopnje prostosti*, $SP = 1, 2 \dots \infty$; stopnje prostosti določajo obliko porazdelitve;

- Če je SP majhno število, je t -porazdelitev bolj raztegnjena v levo in desno kot $N(0, 1)$, ko se SP povečuje, postaja t -porazdelitev čedalje bolj podobna $N(0, 1)$;
- V limiti je Studentova porazdelitev enaka standardizirani normalni porazdelitvi: $t(SP = \infty) = N(0, 1)$.

Vrednosti t -porazdelitve so tabelirane. Tabele so drugačne kot pri normalni porazdelitvi (Košmelj, 2001).

Parametri za obdelavo podatkov:

- Za posamezne ravnine na enem vzorcu:

SP	9
α	0,05
$t_{\alpha/2}$	2,262

- Za vse rezultate merjenj za posamezen vzorec:

SP	19
α	0,05
$t_{\alpha/2}$	2,093

Kjer je:

SP .. stopnja prostosti (m), kar je število meritev (n) -1,

α .. stopnja tveganja,

$t_{\alpha/2}$.. vrednost, ki jo dobimo iz tabel.

4.2 PRIMERJAVA REZULTATOV OBEH NAČINOV OBDELAVE

Preglednica 2: Rezultati obdelave podatkov za bukovino

Bukovina	Klasično struženje		Str. z gnanim orodjem	
	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
Povprečje tangencialnih ravnin	12,84	68,5	5,50	32,4
Povprečje radialnih ravnin	11,35	63,1	5,99	30,3
Povprečje vseh ravnin	12,09	65,8	5,75	31,4
Standardni odklon tan. ravnin	2,82	12,2	1,31	8,3
Standardni odklon rad. ravnin	2,24	13,3	1,90	8,9
Standardni odklon vseh ravnin	2,60	12,7	1,60	8,5
Območje za tan. ravnine				
X_1	10,82	59,7	4,57	26,5
X_2	14,86	77,2	6,43	38,4
Območje za rad. ravnine				
X_1	9,74	53,6	4,63	23,9
X_2	12,95	72,6	7,35	36,7
Območje za vse ravnine				
X_1	10,88	59,8	4,99	27,4
X_2	13,31	71,7	6,50	35,3

Preglednica 3: Rezultati obdelave podatkov za hrastovino

Hrastovina	Klasično struženje		Str. z gnanim orodjem	
	R_a [μm]	R_z [μm]	R_a [μm]	R_z [μm]
Povprečje tangencialnih ravnin	11,28	59,8	4,19	28,2
Povprečje radialnih ravnin	7,96	45,0	3,59	21,6
Povprečje vseh ravnin	9,62	52,4	3,89	24,9
Standardni odklon tan. ravnin	2,43	10,1	2,33	16,9
Standardni odklon rad. ravnin	2,11	11,4	0,54	4,9
Standardni odklon vseh ravnin	2,79	12,9	1,68	12,6
Območje za tan. ravnine				
X_1	9,55	52,6	2,52	16,1
X_2	13,02	67,0	5,86	40,3

-se nadaljuje

- nadaljevanje

Območje za rad. ravnine				
X ₁	6,45	36,9	3,20	18,0
X ₂	9,46	53,2	3,97	25,1
Območje za vse ravnine				
X ₁	8,31	46,4	3,10	19,0
X ₂	10,93	58,4	4,67	30,8

Preglednica 4: Rezultati obdelave podatkov za javorovino

Javorovina	Klasično struženje		Str. z gnanim orodjem	
	R _a [μm]	R _z [μm]	R _a [μm]	R _z [μm]
Povprečje tangencialnih ravnin	13,82	76,7	5,14	34,6
Povprečje radialnih ravnin	9,86	55,2	5,83	34,3
Povprečje vseh ravnin	11,84	66,0	5,49	34,4
Standardni odklon tan. ravnin	3,40	15,4	0,83	5,0
Standardni odklon rad. ravnin	1,43	11,4	1,62	10,6
Standardni odklon vseh ravnin	3,25	17,2	1,30	8,0
Območje za tan. ravnine				
X ₁	11,39	65,7	4,55	31,0
X ₂	16,25	87,8	5,74	38,2
Območje za rad. ravnine				
X ₁	8,84	47,0	4,67	26,7
X ₂	10,88	63,3	6,99	41,9
Območje za vse ravnine				
X ₁	10,32	57,9	4,88	30,7
X ₂	13,36	74,0	6,10	38,2

Preglednica 5: Rezultati obdelave podatkov za jesenovino

Jesenovina	Klasično struženje		Str. z gnanim orodjem	
	R _a [μm]	R _z [μm]	R _a [μm]	R _z [μm]
Povprečje tangencialnih ravnin	9,65	55,0	3,92	24,4
Povprečje radialnih ravnin	7,97	44,9	2,85	18,7
Povprečje vseh ravnin	8,81	50,0	3,39	21,5

-se nadaljuje

-nadaljevanje

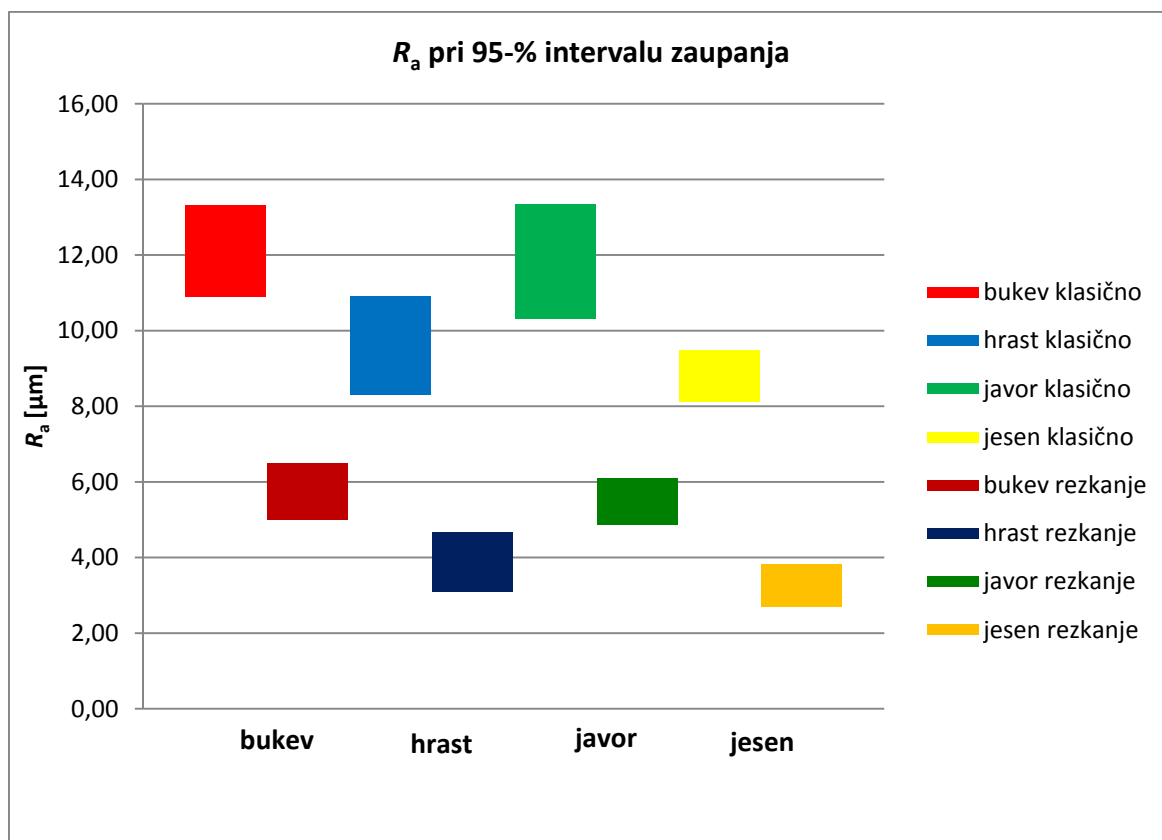
Standardni odklon tan. ravnin	0,83	5,9		1,01	6,0
Standardni odklon rad. ravnin	1,49	8,6		0,36	3,1
Standardni odklon vseh ravnin	1,46	8,8		0,92	5,5
Območje za tan. ravnine					
X ₁	9,06	50,8		3,20	20,1
X ₂	10,25	59,2		4,64	28,7
Območje za rad. ravnine					
X ₁	6,91	38,8		2,60	16,5
X ₂	9,03	51,0		3,11	20,9
Območje za vse ravnine					
X ₁	8,13	45,8		2,96	19,0
X ₂	9,49	54,1		3,82	24,1

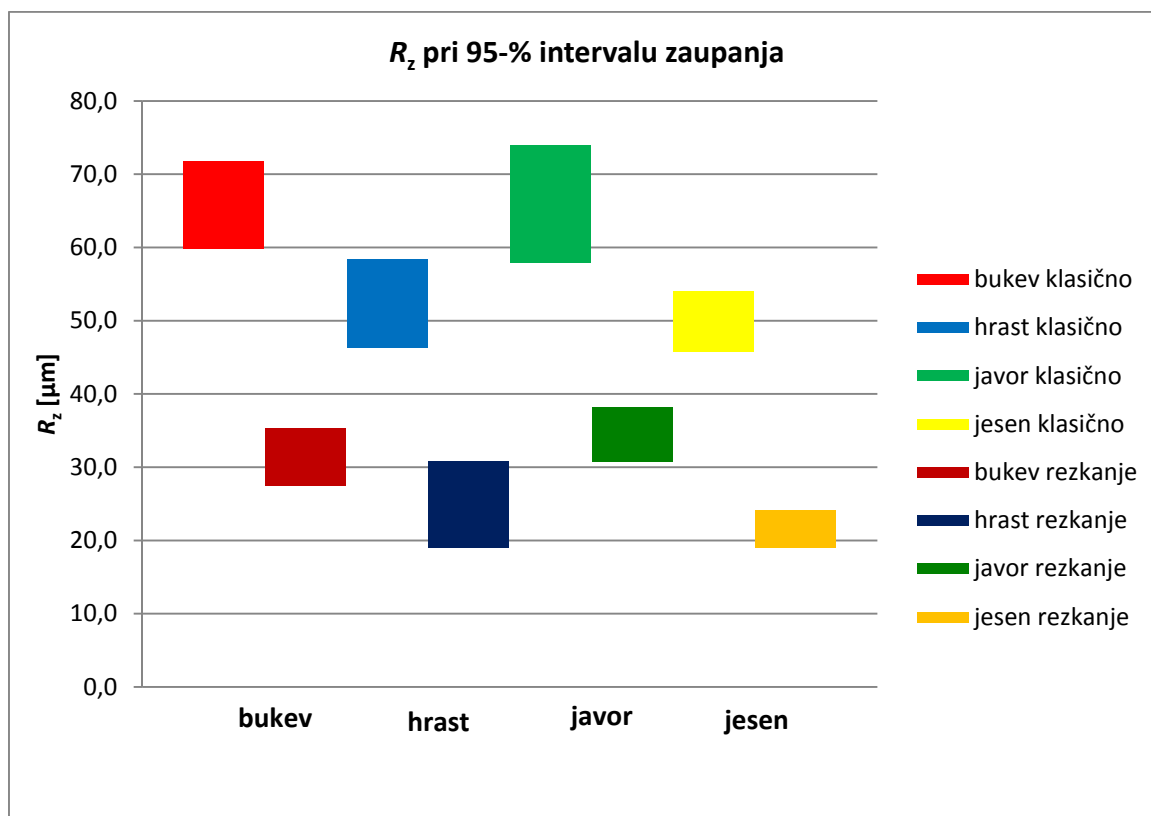
Izračunali smo območja glede na posamezne in skupne ravnine za posamezen vzorec pri obeh načinih obdelave. X₁ predstavlja minimalno vrednost območja, X₂ pa predstavlja maksimalno vrednost območja. Izračunano območje zajema 95-% vseh rezultatov meritev na dotični ravnini.

Povprečne vrednosti ter standardni odklon smo potrebovali za izračune po Studentovi korelaciji.

Iz tabel je razvidno, da so pri vseh vzorcih, pri obeh načinih struženja radialne površine boljše.

Rezultati obdelave podatkov za vse meritve na vseh vzorcih pri obeh načinih obdelave so predstavljeni na naslednjih grafih:

Slika 13: R_a pri 95-% intervalu zaupanja za vse meritve pri obeh načinih obdelave

Slika 14: R_z pri 95-% intervalu zaupanja za vse meritve pri obeh načinih obdelave

Iz grafov (Slika 13 in Slika 14) je razvidno, da so novonastale površine pri struženju z gnanim orodjem približno 50 % boljše kot pri klasičnem struženju. Tudi območja rezultatov meritev so pri struženju z gnanim orodjem bistveno manjša.

Ugotovili smo, da smo najboljše površine pri obeh načinih struženja dobili pri jesenovini. Malenkost slabše površine smo dobili pri hrastovini. Nekaj slabše rezultate, vendar med seboj zelo primerljive, smo dobili pri bukovini in javorovini. Primerljivost med jesenovino in hrastovino ter bukovino in javorovino lahko utemeljimo s podobno strukturo lesa. Moramo pa tudi poudariti, da smo pri venčasto poroznih vzorcih (jesenovina in hrastovina) hrapavost površine merili izključno po kasnem lesu, ker so bile velike pore ranega lesa že večkrat izven merilnega območja kontaktnega merilnika. To bi lahko delno vplivalo na meritve; še namreč, če gledamo celotno strukturo lesa, smo izločili območje, ki zelo poslabša meritvene rezultate. Vsekakor pa so površine pri jesenovini in hrastovini, gledane s prostim očesom, še vedno boljše kakor pri bukovini in javorovini.

4.3 VALOVITOST POVRŠINE PRI STRUŽENJU Z GNANIM ORODJEM

Pri struženju z gnanim orodjem smo na površini nezaželeno dobili valove, ki so potekali vijačno v smeri obdelave (Slika 15). Nastali so kot posledica geometrije orodja in obdelovanca ter njune medsebojne postavitve. Ti valovi predstavljajo velik problem, saj so preveliki za površino, ki jo želimo doseči kot končno površino pred površinsko obdelavo.



Slika 15: Valovita površina na vzorcu jesenovine

Ti valovi so bili izven merilnega območja prve naprave, zato smo morali uporabiti drugo napravo z večjim merilnim območjem. Uporabili smo laserski merilnik hrapavosti Micro-Epsilon LD 1605-05 (Slika 16).

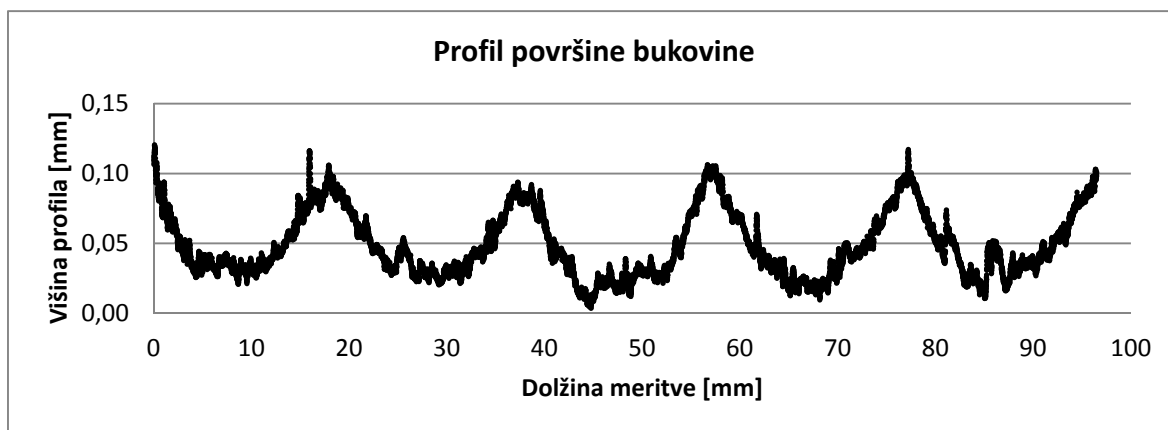
Laserski merilnik hrapavosti ima iglo nameščeno na ročici. Igla drsi po površini vzorca, laser pa meri razdaljo od igle. Merilnik je računalniško voden s programom LabVIEW, ki tudi beleži podatke. Hitrost pomika igle je 0,5 milimetra na sekundo. Frekvenca vzorčenja je 1000 Hz. Merilno območje tega merilnika je $\pm 0,25$ mm. Pridobljene podatke smo nato vnesli v excel, jih obdelali ter iz njih narisali grafe, ki kažejo valovitost površine.



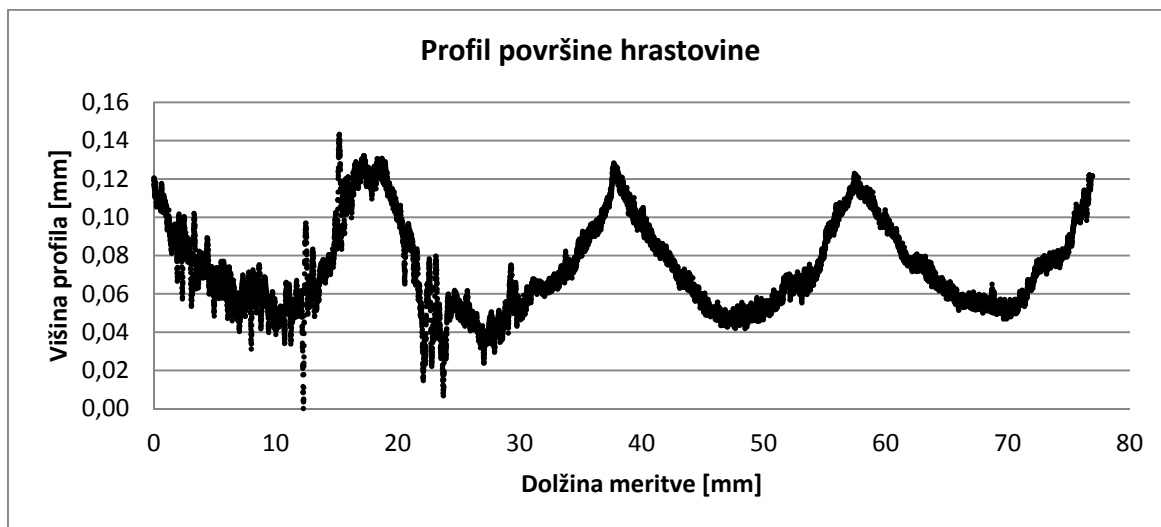
Slika 16: Laserski merilnik hrapavosti

4.3.1 Meritve novonastale površine

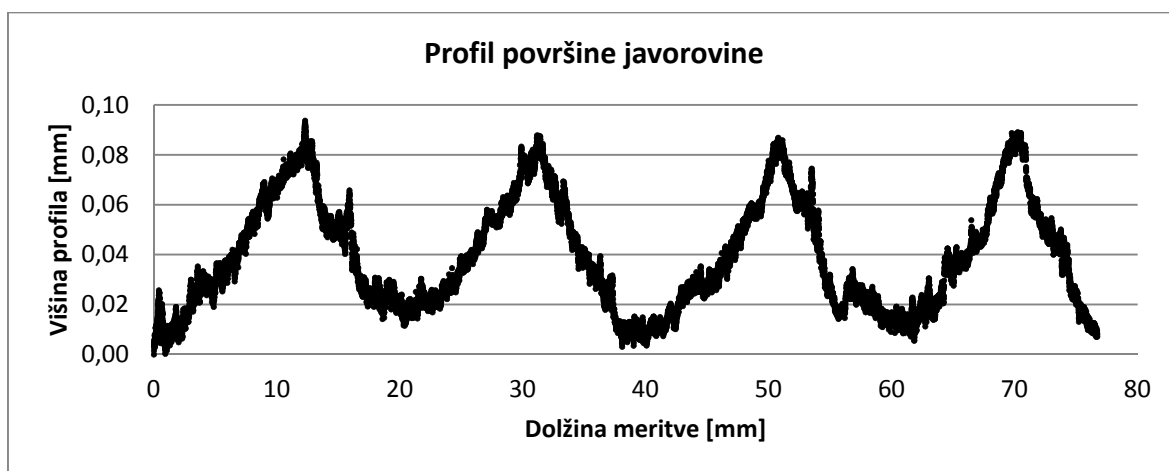
Na naslednjih grafih je prikazan profil površine, ki smo ga dobili pri merjenju z laserskim merilnikom hrapavosti:



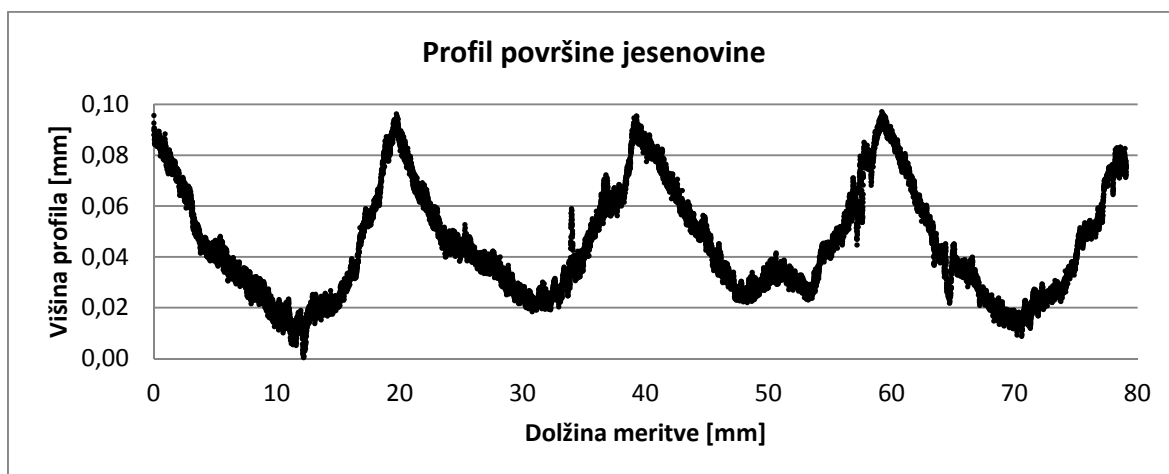
Slika 17: Profil površine bukovine pri struženju z gnanim orodjem



Slika 18: Profil površine hrastovine pri struženju z gnanim orodjem



Slika 19: Profil javorovine pri struženju z gnanim orodjem



Slika 20: Profil jesenovine pri struženju z gnanim orodjem

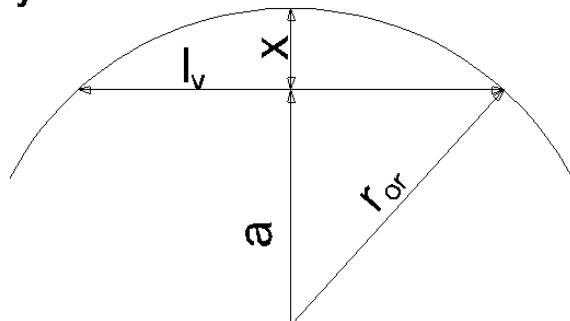
Iz grafov (Slika 17–20) je razvidno, da se valovi pojavljajo na dolžini 20 mm, kar je pogojeno z nastavljen podajalno hitrostjo in vrtilno hitrostjo obdelovanca. Globoki so približno 0,09 mm. Pri hrastovini je prvi del grafa zelo raztresen, kar je najverjetneje posledica merjenja po ranem lesu, ki ima velike pore.

4.3.2 Teoretična globina vala

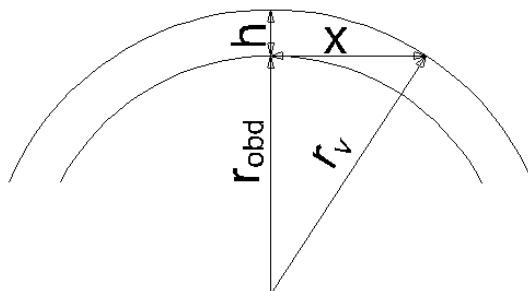
Novonastalo površino smo nato primerjali še z računskimi metodami ter s slikami, ki smo jih naredili v računalniškem programu AutoCAD.

Globino vala smo izračunali po naslednji metodi s pomočjo skic (Slika 21):

orodje



obdelovanec



Slika 21: Skice za izračun globine vala

Kjer je:

l_v [mm] .. dolžina vala,

r_{or} [mm] .. radij orodja,

x [mm] .. širina enega odrezka (podajanje na rezilo v smeri obdelave),

a [mm] .. razlika med radijem orodja in širino enega odrezka,

r_{obd} [mm] .. nazivni radij obdelovanca,

r_v [mm] .. radij obdelovanca na najvišji točki vala,

h [mm] .. višina vala.

Za izračun globine vala smo izpeljali naslednje enačbe:

$$x \text{ [mm]} = r_{\text{or}} - a \quad \dots(7)$$

$$a \text{ [mm]} = \sqrt{r_{\text{or}}^2 - \left(\frac{l_v}{2}\right)^2} \quad \dots(8)$$

$$r_v \text{ [mm]} = \sqrt{x^2 + r_{\text{obd}}^2} \quad \dots(9)$$

$$h \text{ [mm]} = r_v - r_{\text{obd}} \quad \dots(10)$$

Ko smo v enačbo (10) vpeljali enačbe (7–9), smo dobili naslednjo enačbo (11):

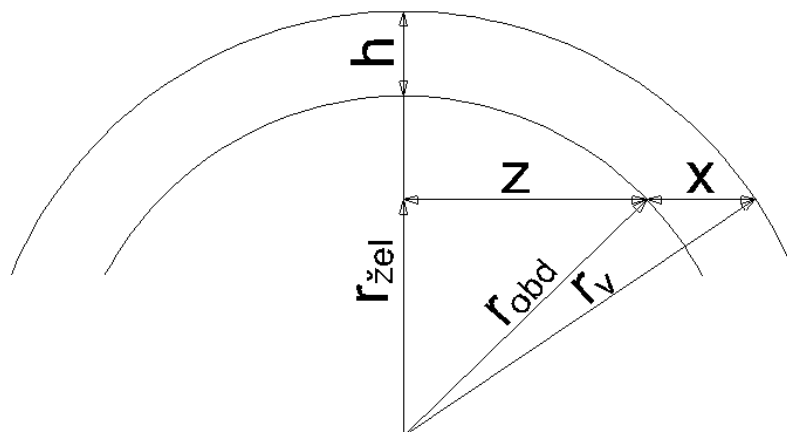
$$h \text{ [mm]} = \sqrt{r_{\text{obd}}^2 + \left(r_{\text{or}} - \sqrt{r_{\text{or}}^2 - \left(\frac{l_v}{2}\right)^2}\right)^2} - r_{\text{obd}} \quad \dots(11)$$

V enačbo (11) smo vstavili parametre, kot so radij orodja, radij obdelovanca ter dolžina vala. Po izračunih smo dobili globino vala približno 0,01 mm. To se je sicer ujemalo z globino vala na slikah, ki smo jih narisali v AutoCAD-u, vendar je bila dejanska izmerjena globina valov približno 9-krat večja.

4.3.3 Zamik orodja iz idealne postavitve

Pri primerjavi rezultatov, pridobljenih z meritvami in teoretičnih izračunih smo naleteli na odstopanja, ki so bila prevelika, da bi lahko potrdili ujemanje meritev s teoretičnimi računi. Predpostavili smo, da so ta odstopanja nastala zaradi optičnega nastavljanja postavitve orodja in obdelovanca. Pri nastavljanju poravnave osi obdelovanca in spodnjega rezalnega roba orodja smo očitno naredili nek zamik, za katerega nismo mislili, da predstavlja tako velik vpliv na novonastalo površino. Orodje smo imeli zamaknjeno za nekaj milimetrov v smeri osi orodja. Globino vala pri zamiku orodja iz idealne postavitve smo računali s pomočjo skic (Slika 21 in Slika 22) ter enačb (12) po naslednjem postopku:

obdelovanec



Slika 22: Skica za izračun globine vala pri zamiku orodja

Kjer je:

$r_{\text{žel}}$ [mm] .. želeni radij obdelovanca

z [mm] .. zamik orodja iz idealne postavitve

S pomočjo skic smo izpeljali naslednji enačbi (12 in 13):

$$r_{\text{obd}} [\text{mm}] = \sqrt{r_{\text{žel}}^2 + z^2} \quad \dots(12)$$

$$r_{\text{v}} [\text{mm}] = \sqrt{r_{\text{žel}}^2 + (z + x)^2} \quad \dots(13)$$

Za izračun globine vala smo ponovno uporabili enačbo (10) in vanjo vpeljali enačbi (12 in 13) ter dobili naslednjo enačbo (14):

$$h [\text{mm}] = \sqrt{r_{\text{žel}}^2 + (z + x)^2} - \sqrt{r_{\text{žel}}^2 + z^2} \quad \dots(14)$$

S pomočjo te enačbe smo ob znani globini vala, katero smo izmerili z laserskim merilnikom površine, izračunali zamik orodja od idealne postavitve. Ta zamik je znašal približno 4 mm. Izračunan položaj orodja ter obdelovanca smo nato še narisali v

AutoCAD-u, kjer smo z nastale slike lahko odčitali globino vala. Ugotovili smo, da so se rezultati izračuna ter rezultati meritev z laserskim merilnikom površine ujemali s sliko.

Iz skice (Slika 22) je razvidno, da pri zamiku orodja iz idealne postavitve pride tudi do netočnosti pri nastavitvi premera obdelovanca. Pri idealni postavitvi orodja običajno nastavljamo novi premer z nastavljanjem orodja le v vertikalni smeri – po z osi. Kadar pa pride do zamika, bi pa morali orodje nastavljati tudi v y smeri obdelave. Novi premer je tako večji kot je želeni premer.

5 SKLEPI

Ugotovili smo, da pri struženju z gnanim orodjem dobimo približno 50 % boljše površine kot pri klasičnem struženju. S tem smo potrdili hipotezo, ki smo jo postavili. Ugotovili smo tudi, da pri struženju z gnanim orodjem kot stranski pojav dobimo na površini nezaželene valove v smeri podajanja orodja. Z izračuni ter s pomočjo programov za risanje smo ugotovili tudi, da na globino vala zelo vpliva postavitev orodja. Že nekaj milimetrov zamika od popolne poravnave osi obdelovanca s sredino samega rezila povzroči povečanje globine vala tudi do 10-krat. Iz vseh računov ter skic in računalniških risb lahko sklepamo, da je idealna postavitev orodja glede na obdelovanec naslednja: najnižji rezalni rob orodja mora biti točno nad osjo vrtenja obdelovanca. V takem primeru dobimo najmanjšo globino vala. Kakršnakoli drugačna postavitev orodja glede na obdelovanec povečuje globino vala.

Globina vala se manjša z večanjem premera orodja ter obdelovanca. Zmanjšuje se tudi z zmanjševanjem podajanja orodja na en obrat obdelovanca. To lahko spreminjamo z višanjem vrtilne hitrosti obdelovanca ali pa z zmanjševanjem podajalne hitrosti. Višanje vrtilne hitrosti obdelovanca povečuje podajanje na rezilo e_z , kar pa poslabša kakovost površine. To pomeni, da moramo z višanjem vrtilne hitrosti obdelovanca zvišati tudi vrtilno hitrost orodja. Zmanjševanje podajalne hitrosti pa negativno vpliva na kapaciteto obdelave.

Če primerjamo podajalne hitrosti rezila pri klasičnem struženju ter orodja pri struženju z gnanim orodjem, ugotovimo, da je bila podajalna hitrost pri klasičnem struženju kar 5-krat višja. To pomeni, da ima stroj pri klasičnem struženju 5-krat višjo kapaciteto. S tem smo potrdili drugo hipotezo, pri kateri smo pričakovali zmanjšanje kapacitete obdelave pri struženju z gnanim orodjem.

6 POVZETEK

V diplomski nalogi smo ugotavljali hrapavost novonastale površine pri dveh načinih struženja lesa. Prvi način je bil klasično struženje, kjer se obdelovanec vrti z visoko vrtilno hitrostjo, rezilo pa se pomika vzdolž obdelovanca in je stalno v stiku z obdelovancem. Pri tem načinu je površina preveč hrapava za površinsko obdelavo in je potrebna še dodatna faza obdelave. Običajno je to brušenje. Drugi način struženja pa je struženje z gnanim orodjem. Pri tem načinu je vrtilna hitrost obdelovanca bistveno počasnejša kot pri klasičnem struženju, orodje pa se z veliko vrtilno hitrostjo počasi pomika vzdolž obdelovanca. Za ta način smo zasnovali in izdelali posebno rezalno orodje. S tem smo želeli doseči dovolj kakovostno površino, ki ne bi potrebovala še dodatne faze obdelave pred površinsko obdelavo. Pri obeh načinih obdelave smo za korektne rezultate imeli enako obliko osnovnega rezila z velikim prsnim kotom. Poizkuse smo izvajali na vzorcih štirih različnih drevesnih vrst, in sicer na bukovini, hrastovini, javorovini ter jesenovini. Kakovost površine smo nadzorovali z dvema merilnikoma hrapavosti, ki podajata različne parametre izmerjene površine. Ugotovili smo, da je sama površina pri struženju z gnanim orodjem boljša od površine, pridobljene s klasičnim struženjem, vendar dobimo pri tem načinu struženja na površini nezaželene valove vzdolž obdelovanca. Predstavili smo tudi teorijo, kako bi lahko vplivali na parametre obdelave, da bi te valove naredili čim manjše.

7 VIRI

Brus R. 2011. Dendrologija za gozdarje. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 408 str.

Čufar K. 2006. Anatomija lesa. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 185 str.

Kopač J. 2008. Odrezavanje; Teoretične osnove in tehnološki napotki. Ljubljana, [samoizd.]: 264 str.

Košmelj K. 2001. Uporabna statistika. Ljubljana, Biotehniška fakulteta: 249 str.

Medič M. 2001. Lesarsko strojništvo. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo: 336 str.

Soković M. 1990. Mehanska tehnologija. Zvezek 2, Računske vaje iz odrezovanja. 2. izdaja. Ljubljana, Fakulteta za strojništvo: 129 str.

Rezalni koti orodja. 2016. E-gradiva. Šolski center Novo mesto. (10. jun. 2016)

http://egradivo.ecnm.si/ODR/rezalni_koti.html

Aritmetična srednja hrapavost. 2016. E-gradiva. Fakulteta za strojništvo. (10. jun. 2016)

Definicija povprečne globine hrapavosti R_z . 2016 E-gradiva. Fakulteta za strojništvo. (10. jun. 2016)

<http://lab.fs.uni-lj.si/lat/uploads/metrologija/hrapavost.pdf>

ZAHVALA

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. Dominiki Gornik Bučar za pomoč ter strokovno vodenje pri nastajanju diplomske naloge.

Zahvala gre tudi somentorju dr. Bojanu Gospodariču za strokovno izpeljan praktični del diplomske naloge ter svetovanje pri pisanju.

Zahvaljujem se tudi doc. dr. Miranu Merharju za strokovno recenzijo.

Prav tako se zahvaljujem tehničnemu sodelavcu Dragu Vidicu za pomoč v laboratoriju.

PRILOGA A: PODATKI MERITEV

BUKEV:

Klasično struženje			Struženje z gnanim orodjem		
Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	13,46	72,9		4,52	26,8
	8,11	56,1		5,50	33,0
	13,86	71,6		5,06	26,9
	11,72	60,9		8,12	44,0
	12,16	56,0		7,63	50,2
	15,24	74,4		5,07	27,5
	8,20	48,6		5,22	29,6
	14,37	81,4		4,61	30,8
	16,30	78,5		4,27	24,1
	14,98	84,4		5,00	31,5
Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	13,64	72,4		4,68	20,9
	13,48	76,8		4,56	28,3
	10,76	70,1		5,51	27,2
	14,65	61,4		10,93	51,9
	7,73	44,6		5,93	31,7
	10,62	65,5		6,10	31,2
	9,57	48,3		6,56	35,3
	9,14	47,8		5,91	30,7
	10,97	59,9		5,58	25,6
	12,91	84,2		4,14	20,2

HRAST:

Klasično struženje			Struženje z gnanim orodjem		
Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	12,49	63,2		5,46	33,6
	11,10	67,3		3,80	21,5
	13,97	71,4		4,58	32,0
	6,71	37,8		3,94	22,3
	12,64	63,2		5,35	39,0
	11,92	62,2		1,95	14,7
	14,52	69,8		3,00	20,5
	8,66	51,9		1,56	11,0
	11,47	57,8		9,65	69,3
	9,35	53,2		2,61	17,7
Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	11,65	60,9		2,66	15,7
	5,32	28,0		3,18	20,2
	6,37	35,8		3,89	20,0
	7,15	44,2		3,58	20,9
	8,11	41,2		3,05	16,7
	8,36	48,8		3,25	17,9
	11,39	65,0		3,94	24,7
	6,20	34,8		4,47	29,1
	8,11	46,3		3,96	30,2
	6,92	45,4		3,87	20,2

JAVOR:

Klasično struženje			Struženje z gnanim orodjem		
Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	10,16	60,6		4,61	34,3
	13,49	76,2		4,37	32,7
	11,14	63,2		3,80	24,8
	10,27	54,2		5,40	40,4
	13,76	75,0		6,22	41,2
	16,52	88,0		5,67	36,6
	14,88	73,2		4,24	28,9
	20,99	106,7		6,09	37,1
	11,20	87,5		5,37	36,0
	15,76	82,6		5,67	34,0
Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	8,40	48,5		5,01	28,2
	10,83	62,7		6,95	39,1
	10,07	61,9		6,95	24,6
	9,73	49,1		7,41	56,0
	10,37	68,6		4,88	30,7
	6,77	42,8		5,96	39,2
	11,22	70,1		2,92	21,2
	9,63	38,3		4,43	26,3
	9,88	46,5		8,36	44,6
	11,72	63,4		5,42	33,0

JESEN:

Klasično struženje			Struženje z gnanim orodjem		
Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Tangencialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	9,36	51,7		3,36	18,5
	8,25	50,8		4,18	24,7
	9,93	48,9		3,41	23,1
	8,67	51,9		2,46	15,6
	10,91	59,6		2,66	18,9
	10,41	68,3		4,46	29,3
	9,29	54,4		4,34	25,8
	9,88	57,0		3,96	28,4
	10,47	57,6		5,91	36,3
	9,36	49,9		4,50	23,2
Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]	Radialne ravnine	R_a [μm]	R_z [μm]
	6,96	40,8		2,56	17,9
	10,35	60,4		2,86	21,5
	8,19	46,5		2,82	15,4
	8,90	54,5		3,44	21,3
	9,52	47,6		2,90	19,7
	6,75	41,7		2,26	14,7
	6,75	36,4		3,06	19,3
	7,64	40,7		2,90	24,3
	5,59	31,3		2,46	16,8
	9,03	49,0		3,25	16,0