

**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
ŠUMARSKI FAKULTET**

**PREDDIPLOMSKI STUDIJ
DRVNA TEHNOLOGIJA**

DARKO HERCEG

**USPOREDBA PARAMETARA HRAPAVOSTI I VALOVITOSTI
OBRAĐENE PLOHE S TEORIJSKOM VISINOM KINEMATSKIH
TRAGOVA OBRADE KOD OSNOVNIH PROCESA MEHANIČKE
OBRADE DRVA**

ZAVRŠNI RAD

ZAGREB, RUJAN, 2020

PODACI O ZAVRŠNOM RADU

AUTOR:	Darko Herceg 17.04.1999, Livno 0068233033
NASLOV:	Usporedba parametara hrapavosti i valovitosti obrađene plohe s teorijskom visinom kinematskih tragova obrade kod osnovnih procesa mehaničke obrade drva
PREDMET:	Strojevi za obradu drva
MENTOR:	izv. prof. dr. sc. Igor Đukić
RAD JE IZRAĐEN:	Sveučilište u Zagrebu – Šumarski fakultet Zavod za procesne tehnike
AKAD. GODINA:	2019/2020
DATUM OBRANE:	18.09.2020
RAD SADRŽI:	Stranica: 34 Slika: 25 Tablica: 1 Navoda literature: 14
SAŽETAK: U ovom radu su uspoređeni parametri za determiniranje hrapavosti i valovitosti s teorijskom visine neravnine kod tri različite mehaničke obrade. Posmak po zubu je također uspoređen s nekim parametrima hrapavosti. Prikazano je kako određeni mehanički utjecaji, prilagodbe alata i stroja mogu utjecati na definiranje krajnje visine neravnine kod piljenja, tokarenja i obodnog glodanja.	

PREDGOVOR

Rezultat pisanja završnog rada na ovu temu je želja za dodatnim učenjem i istraživanjem mehaničkih obrada drva, kao i rezultata tih obrada koje se prikazuju na krajnjoj površini u obliku teksture. Smatram da dobro poznavanje parametara hrapavosti i valovitosti, te njihovom usporedbom s teorijskom visinom neravnine, može doprinijeti razvoju nekih novih strojeva i tehnika obrade.

Ovom prilikom se zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Igoru Đukiću na svim savjetima prilikom izrade ovoga rada, te na literaturi koju mi je dodijelio, a koja mi je značajno pomogla u izradi rada.

Također se želim zahvaliti svim djelatnicima Šumarskog fakulteta bez kojih ovaj rad ne bi bio moguć.

Na kraju, želim se zahvaliti svojoj obitelji i prijateljima koji su mi pružali potrebnu podršku u dosadašnjem dijelu studija.

„Izjavljujem da je moj završni rad izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.“

Darko Herceg

U Zagrebu, 18.9.2020.

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. CILJ RADA	2
2. POVRŠINA I TIPOVI POVRŠINE	3
3. MJERENJE I PARAMETRI HRAPAVOSTI I VALOVITOSTI	5
3.1. MJERENJE VISINE NERAVNINE POVRŠINE.....	5
3.2. PARAMETRI HRAPAVOSTI I VALOVITOSTI.....	8
4. MEHANIČKI UTJECAJI NA OBRADU POVRŠINE	13
4.1. PILJENJE	14
4.2. TOKARENJE	20
4.3. BLANJANJE.....	23
5. ZAKLJUČAK	30
6. LITERATURA	32

1. UVOD

„Kvaliteta“ obrađene površine ne postoji, odnosno kvaliteta je subjektivan pojam, te ne postoji određeni tip površine koji se može nazvati kvalitetnim. Kada govorimo o strojno obrađenoj površini, bilo da se radi o drvu ili nekom drugom materijalu, kvalitetu te površine ne možemo definirati na specifičan način. Kvalitetnu površinu može krasiti hrapavost, glatkost, valovitost, te još mnoštvo drugih atributa.

Prvi razlog tomu je, što kvaliteta može jednoj osobi značiti glatko obrađena površina, dok drugom pojedincu kvalitetnu površinu može predstavljati blago hrapava ili valovita površina, odnosno kvaliteta je, u ovom slučaju kao i ljepota, u oku posmatrača.

Drugi razlog koji bilo kakvu vrstu površine čini kvalitetnom je njena funkcija. Funkcija površine, ne samo da opisuje kvalitetu, nego i definira obradu određene površine. Recimo, ukoliko proizvod želimo koristiti u interijeru za namještaj, većina korisnika i proizvođača namještaja će se složiti da kvalitetnu površinu definira njena glatkoća, međutim ukoliko pitamo osobu koja radi kutne spojeve, objasniti će nam da je najkvalitetnija površina na moždaniku valovita ploha. Razlog je tomu upravo njena funkcija, odnosno svrha da spoj učini što čvršćim.

Površinska hrapavost je važan faktor u kvaliteti unutarnjih i vanjskih dekorativnih elemenata proizvedenih od drva i činjenica da niske vrijednost parametara hrapavosti ne utječu pozitivno samo na izgled završnog proizvoda, nego također pozitivno utječu i na adhezijska svojstva materijala (Aslan S., 2008.)

Dok je kvalitetu skoro pa i nemoguće definirati, pojam koji je znatno lakše objasniti bio bi „visina neravnine“. Pojam je to koji definira jedan od četiri osnovna tipa obrađene površine. Njime ćemo se baviti u ovom radu, te ga pokušati pobliže objasniti, istražiti i definirati sve njegove poznate parametre i načine proračunavanja.

Također će se pobliže objasniti svi mehanički utjecaji na visinu neravnine. Vidjet ćemo kako razni načini obrade prave razne teksture i visine neravnine na površini, kako i koliko smjer obrade može utjecati na visinu neravnine.

Kada govorimo o mehaničkoj obradi plohe nekog homogenog materijala kao što je metal, govorimo o utjecajima na njegovu površinu kao što su brzina okretaja alata, posmična brzina, zatupljenost oštrice i sl., odnosno govorimo o mehaničkim utjecajima na obrađenu površinu.

Kod drva, osim mehaničkih utjecaja postoje i neki druge faktori koji mogu biti od presudne važnosti prilikom obrade. Tu pričamo o njegovim fizikalnim i tehnološkim svojstvima. Ta svojstva drva i sav njihov utjecaj na hrapavost odnosno valovitost se neće puno spominjati u ovom radu, nego će se samo objasniti mehanički utjecaji obrade na krajnju površinu.

Da bismo znali predložiti kolika je visina neravnine neke površine, te kojem tipu ta površina pripada, služit ćemo se određenim parametrima kako bismo što jasnije definirali željenu površinu. Valovitost i hrapavost su zapravo jako srodni parametri. Pretežito ih razlikuje duljina vala. Osim parametara, jako su bitni i alati pomoću kojih se mjere isti, te softveri kojima se filtriraju rezultati i prikazuju onoliko jasno koliko je to moguće.

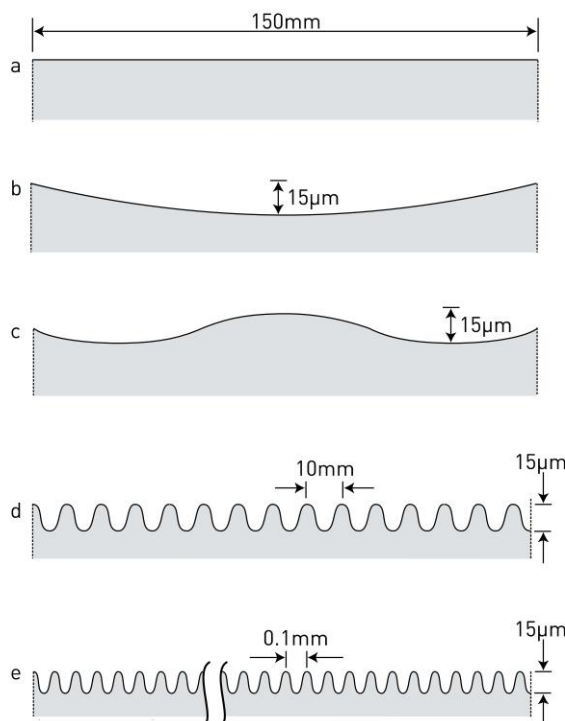
1.1. CILJ RADA

Cilj ovog rada je usporediti i poistovjetiti parametre koji se koriste pri detektiranju hrapavosti i valovitosti s teorijskom visinom kinematskih tragova obrade kod osnovnih procesa mehaničke obrade drva.

2. POVRŠINA I TIPOVI POVRŠINE

Površina se definira kao granica između materijala i zraka. Ovaj rad će se pretežno fokusirati na teksturu površine, odnosno njen oblik, a mehanička svojstva kao što su tvrdoća, elastičnost, čvrstoća itd., neće se uopće spominjati.

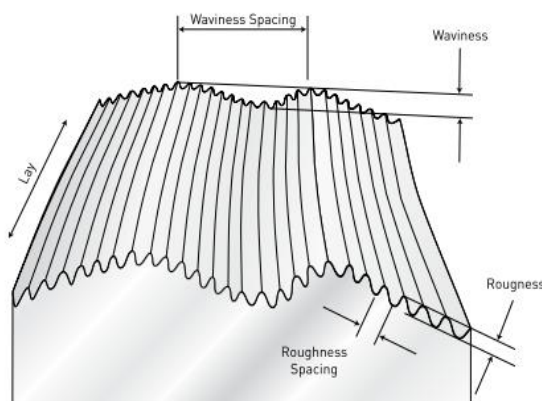
S obzirom na oblik, teoretski postoje četiri vrste površine. Kao primjer ćemo uzeti površinu duljine 150 mm. Prvi tip površine bi bila teoretski savršeno glatka ploha (Slika 1 - a). Ukoliko zamislimo progib od $15\text{ }\mu\text{m}$ na sredini duljine od 150 mm, reći ćemo da je površina glatka, no blago zakrivljena (Slika 1 – b). Ako se nađu dva progiba na istoj površini, međusobno udaljena za određenu duljinu, dobit ćemo valovitu površinu (Slika 1 – c). Ako dodamo još par progiba međusobnog razmaka od po 10 mm, površina će i dalje biti valovita, no ukoliko progibe zgusnemo na samo 0,1 mm međusobne udaljenosti, dobit ćemo hrapavu površinu (Slika 1 – e) (Taylor Hobson Limited, 2003).



Slika 1 - Tipovi površine (Taylor Hobson Limited, 2003)

Može se primijetiti da visina neravnine od 15 μm može činiti svaki tip površine. Naravno, ovdje se radi o teoretskim tipovima površine koje je, skoro pa nemoguće napraviti u praksi. Ovo „skoro“ se slobodno može izbaciti kada se radi o drvu. Drvo je prije svega heterogen i anizotropan materijal koji, ne samo da se razlikuje od vrste do vrste, nego u svakom pojedinom drvu iste vrste postoji mnoštvo različitosti i odstupanja, pa je stoga i mjerenje hrapavosti odnosno valovitosti jako zahtjevan posao.

Naravno, skoro pa uvijek je prisutna kombinacija ovih tipova, pa tako najčešće imamo hrapavo – valovitu površinu (slika 2).



Slika 2 – Hrapavo-valovita površina (Taylor Hobson Limited, 2003)

3. MJERENJE I PARAMETRI HRAPAVOSTI I VALOVITOSTI

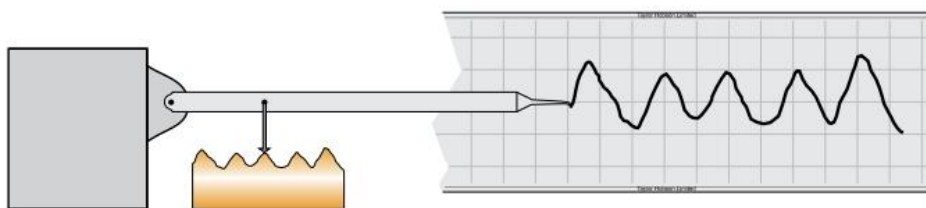
3.1. MJERENJE VISINE NERAVNINE POVRŠINE

Postoje razne metode mjerenja visine neravnina na određenoj plohi.

Najjednostavnije metode su vizualna metoda i metoda ocjenjivanja putem opipa.

Uz najjednostavnije, postoje i složenije metode mjerenja koje se dijele na: posredne (indirektne) i neposredne (direktne) metode mjerenja hrapavosti površine. U posredne metode ubrajaju se: metoda s pastom po Flemmingu, pneumatska metoda, optička metoda, metoda klizanja vodene kapljice i metoda preslikavanja. Kod tih metoda hrapavost se izražava jedinicama kao što su cm^2 , cm^3 , cm^3/s , s postotkom odbijene svjetlosti ili mjerama za kut (Jirouš-Rajković, 1991.).

Neposredne metode se dijele na kontaktne i beskontaktne. Rezultat mjerenja posrednim metodama je određeni profil. Ove se metode zasnivaju na principima optike te se još nazivaju i optičke metode. U njih se ubrajaju: metoda svjetlosnog presjeka, metoda sjene od noža i metoda interferencije svjetlosti (Jirouš-Rajković, 1991.). Najčešća metoda koja se koristi pri detektiranju visine neravnina je neposredna kontaktna metoda. Kod kontaktne metode profil površine dobije se mehaničkim kontaktom između igle i površine gdje igla određenog radijusa zaobljenja i pri određenom pritisku dolazi u stalni ili privremeni kontakt sa ispitivanom površinom, a vertikalno pomicanje igle predstavlja dubinu, odnosno visinu neravnina na površini (Jirouš-Rajković, 1991.) (slika 3).



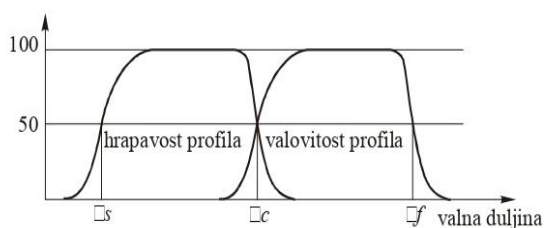
Slika 3 - Princip kontaktnog načina mjerenja visine neravnine (Taylor Hobson Limited, 2003)

Sve navedene metode su pretežito razvijene kako bi se mjerila površinska hrapavosti (ili valovitost) homogenih materijala kao što je plastika ili metal.

Nažalost trenutno ne postoji određena sprava koja je specifično namijenjena za mjerenje visine neravnina na površini drva. Razlog tomu proizlazi iz činjenice što površinska hrapavost na drvenoj plohi također ovisi o faktorima vezanim za svojstva drva i njegovu anatomiju (Hendarto B. et al., 2004.).

Kao što je ranije spomenuto, rezultat mjerenja kontaktnom metodom je određen profil, pa se uređaji koji mjere na ovom principu nazivaju profilometri, a osim profilometara za kontaktno mjerenje hrapavosti koriste se još profilografi i profilografi-profilometri. Kao što se može naslutiti iz same riječi, profil površine predstavlja presjek realne površine sa određenom ravninom (Hrapavost tehničkih površina, 2020.), odnosno on je rezultat sjecišta radne površine s ravninom okomitom na tu površinu i u smjeru koji maksimizira vrijednosti hrapavosti, obično pod pravim kutem u odnosu na smjer strojne obrade (Mitutoyo, 2020.).

S obzirom da se hrapavost i valovitost razlikuju po valnim duljinama, nije moguće samo izmjeriti površinu određenim mjernim alatom i na dobivenim rezultatima iščitati parametre hrapavosti odnosno valovitosti. Granice valnih duljina između kojih se mjeri hrapavost obično se označavaju s λ_s (najniža valna duljina) i λ_c (najviša valna duljina) (Slika 4). Isto tako, postoje granice valnih duljina između kojih se mjeri valovitost. To je gornja granica valne duljine hrapavosti (λ_c), te valna duljina koja se označava s λ_f (Slika 4).



Slika 4 - Valne duljine (Hrapavost tehničkih površina, 2020.)

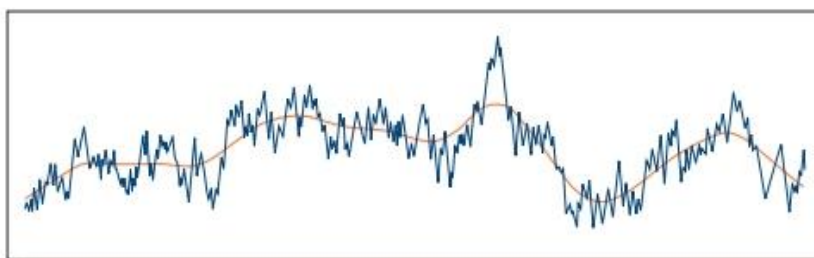
Kako bi se detektirale valne duljine koje su nam potrebne, izmjereni profil mora se provesti kroz određeni filter. U tablici 1 mogu se vidjeti preporučene granične vrijednosti filtra.

REFERENTNA DULJINA	DULJINA VREDNOVANJA	PERIODIČKI PROFIL	NEPERIODIČKI PROFIL	
$l_r(\lambda_c)$ u mm	$l_n = 5 \times l_r$ u mm	RSm u μm	Rz u μm	Ra u μm
0,08	0,4	>0,013 do 0,04	do 0,1	do 0,02
0,25	1,25	>0,04 do 0,13	>0,1 do 0,5	>0,02 do 0,1
0,8	4	>0,13 do 0,4	>0,5 do 10	>0,1 do 2
2,5	12,5	>0,4 do 1,3	>10 do 50	>2 do 10
8	40	>1,3 do 4	>50	>10

Tablica 1 - Preporučene granične vrijednosti filtra (Runje, 2014.)

Nakon što se filtrira izmjereni profil, dobit će se modificirani profili iz kojih se onda može računati hrapavost odnosno valovitost površine.

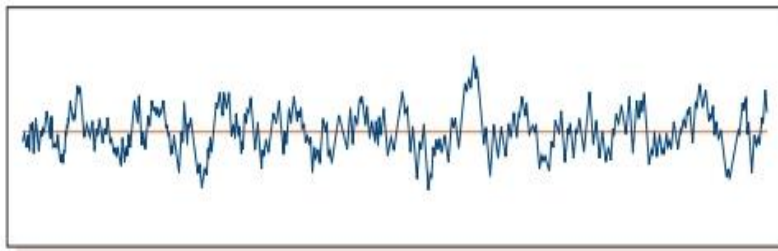
Nakon što se izmjereni profil provuče kroz filter koji briše valne duljine manje od λ_s , dobit će se tzv. *primarni profil* (slika 5).



Slika 5 – Grafički prikaz primarnog profila (Mitutoyo, 2020.)

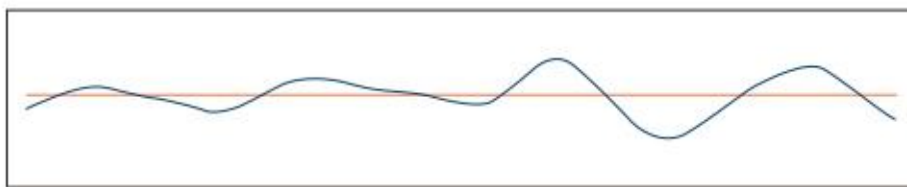
Iz primarnog profila može se primjetiti da je površina hrapavo-valovita.

Ukoliko se želi mjeriti hrapavost površine, primarni profil se filtrira na način da se izbace sve valne duljine iznad λ_c , i tako dobiveni profil naziva se *profil hrapavosti* (Slika 6).



Slika 6 – Grafički prikaz profila hrapavosti (Mitutoyo, 2020.)

Parametri valovitosti mogu se iščitati ukoliko se primarni profil provuče kroz filter koji briše sve valne duljine manje od λ_c , a tako modificiran profil naziva se *profil valovitosti* (Slika 7).



Slika 7 – Grafički prikaz profila valovitosti (Mitutoyo, 2020.)

3.2. PARAMETRI HRAPAVOSTI I VALOVITOSTI

Iako će se u ovom radu objasniti samo parametri hrapavosti, isti parametri vrijede i za determiniranje valovitosti na određenoj površini, samo što se u slučaju valovitosti uzimaju veće valne duljine.

Razlika između hrapavosti i valovitosti kod obrađene površine određena je omjerom visine vala prema posmaku, pa tako za hrapavost taj omjer iznosi do 1:50, a za valovitost od 1:50 do 1:1000 (Šavar Š, 1977.).

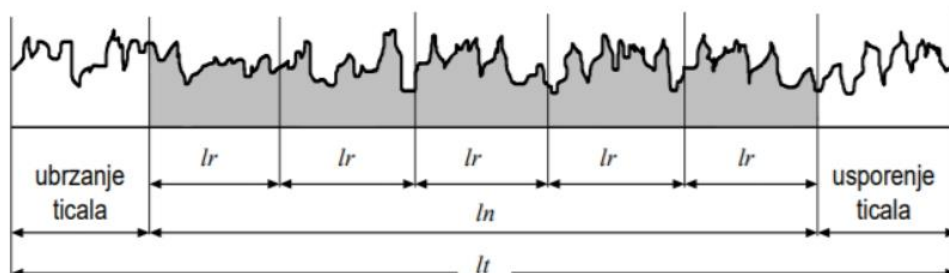
Prema Runje (2014.) parametri hrapavosti profila površine za 2D mjerni sustav mogu biti:

- 1) Amplitudni parametri – opisuju varijacije po visini profila
- 2) Uzdužni parametri – opisuju varijacije uzduž profila

3) Hibridni parametri – opisuju varijacije iz kombinacije uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila

4) Krivuljni i srodni parametri – opisuju varijacije na krivuljama dobivene iz uzdužnih i amplitudnih karakteristika profila

Za lakše razumijevanje ovih parametara, bitno je objasniti karakteristične duljine profila površine dobivenog profilometrom.

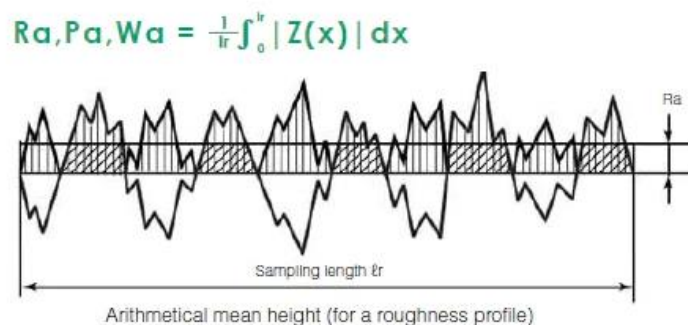


Slika 8 - Karakteristične duljine profila (Runje, 2014)

Duljinu vrednovanja predstavlja l_n i ona je jednaka zbroju referentnih duljina l_r . Duljina vrednovanja (l_n) obično iznosi 5 referentnih duljina (l_r). Kao što možemo vidjeti na slici 8, ukupna duljina profila l_t se još sastoji od ubrzanja i usporenja ticala.

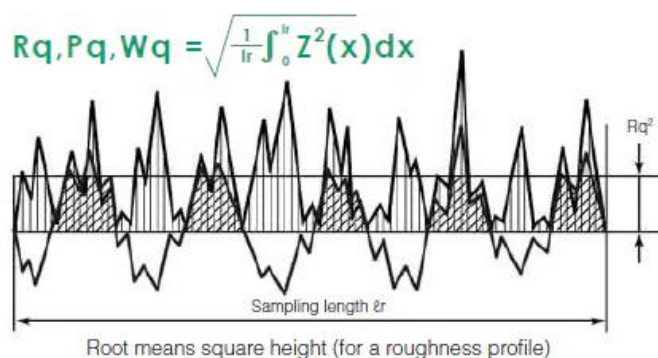
Na duljini l_n se onda hrapavost računa pomoću posebnih parametara za procjenjivanje površine.

Jedan od najbitnijih amplitudnih parametara bi bila aritmetička sredina apsolutnih vrijednosti svih visina na duljini procjene (duljini vrednovanja) R_a . Taj parametar se najčešće uzima za mjerenje hrapavosti, ali on ne daje uvijek baš najbolju sliku o površini.



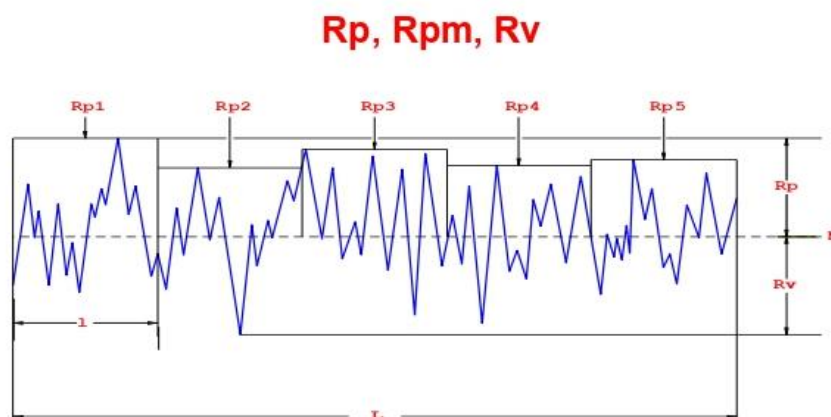
Slika 9 – Prikaz parametra Ra na određenom profilu i formula za njegovo izračunavanje prema ISO 1302-2002

U obzir se također uzima i drugi korijen prosječnih visina profila preko duljine procjene (Rq) i on može poslužiti ukoliko se žele mjeriti dinamička odstupanja na izmjerenom profilu.



Slika 10 – Prikaz parametra Rq na određenom profilu i formula za njegovo izračunavanje prema ISO 1302-2002

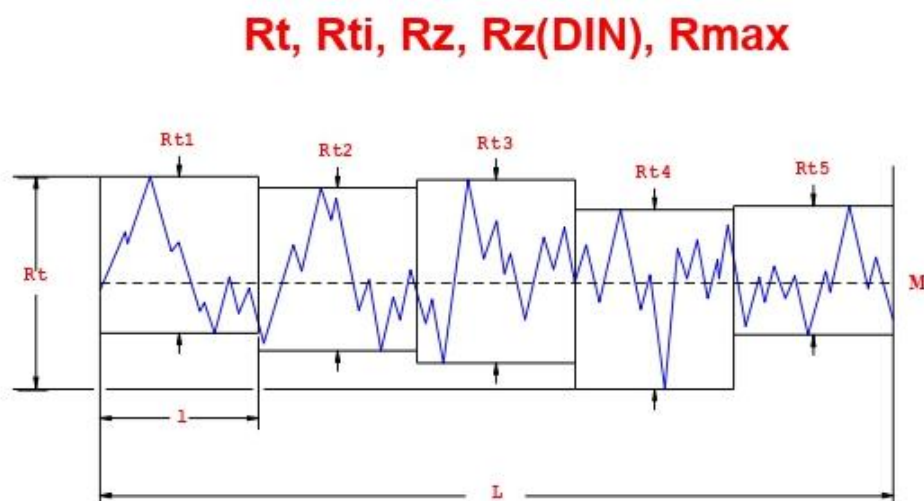
Rp i Rv su također jedni od parametara koji se obično uzimaju u proračun za mjerenje hrapavosti. Rp predstavlja najveću visinu profila na duljini procjene, a Rv označava najdublju točku na duljini procjene (slika 11). Ova dva parametra se mogu uzimati kao prosječne vrijednosti na način, da se svaki od njih izračuna na svakoj pojedinoj duljini uzorka, odnosno na pojedinoj referentnoj duljini, pa se od svih tih vrijednosti uzme aritmetička sredina (kao što je prije navedeno, obično pet referentnih duljina čini jednu duljinu procjene).



Slika 11 - Grafički prikaz značenja izračunatih vrijednosti parametara hrapavosti R_p i R_v s obzirom na izmjereni profil hrapavosti prema ISO 1302-2002

Na slici se također može primijetiti i oznaka M , a ona predstavlja srednju liniju oko koje se mjere devijacije profila. Srednju liniju određuje softver po određenim kriterijima.

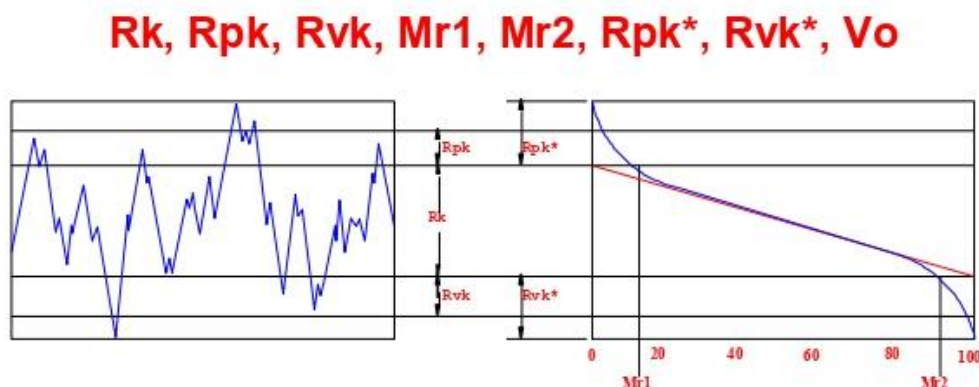
Maksimalna visina profila (R_t) je vertikalna udaljenost između najniže i najviše točke duž duljine procjene. R_t se također može računati po pojedinoj referentnoj duljini (R_{ti}), a prosječna vrijednost parametara R_{ti} na duljini procjene, označava se kao R_z . Maksimalna dubina hrapavosti (R_{max}) je parametar koji označava najveću vrijednost R_{ti} preko duljine procjene (slika 12). U daljnjem radu vidjet će se kako se R_{max} može poistovjetiti s teorijskom visinom neravnine.



Slika 12 – Grafički prikaz parametara R_{max} , R_t , i R_z na izmjenom profilu prema ISO 1302-2002

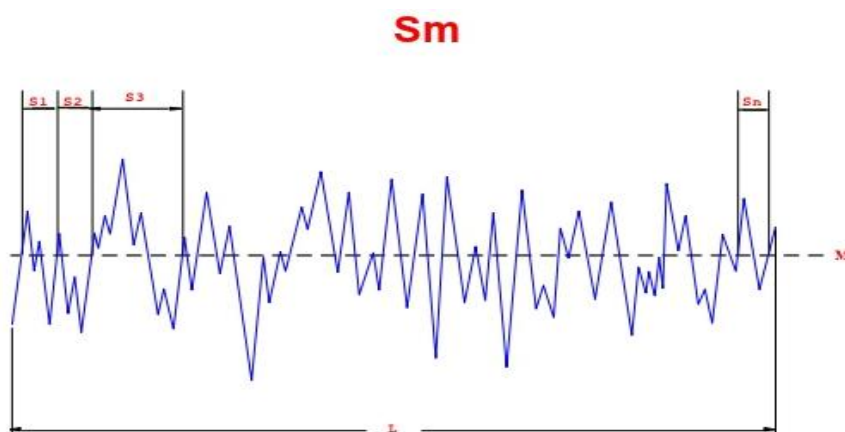
Kod proračunavanja hrapavosti, kao parametar se nešto rjeđe uzima gustoća vrhova P_c , i on predstavlja broj vrhova na jedinici duljine. Postoje još neki parametri koji označavaju udio materijala koji se nalazi iznad odnosno ispod srednje linije (M), kao što su R_{sk} , R_{ku} itd.

Najkorišteniji hibridni parametar je parametar koji opisuje dubinu jezgre hrapavosti, a označava se s R_k . R_{pk} i R_{vk} su njemu srodni parametri.



Slika 13 – Grafički prikaz nekih hibridnih parametara na izmjerenom profilu prema ISO 1302-2002

Iz slike 13 možemo vidjeti da R_k predstavlja „jezgru“ profila, dok R_{pk} i R_{vk} predstavljaju najviši, odnosno najniži udio profila.



Slika 14 – Grafički prikaz S_m parametra na određenom profilu površine prema ISO 1302-2002

Jedan od bitnijih uzdužnih parametara pri određivanju visine neravnina na površini je upravo S_m (Slika 14). On predstavlja srednji razmak nepravilnosti profila, odnosno on je srednja vrijednost razmaka između nepravilnosti profila unutar duljine procjene.

4. MEHANIČKI UTJECAJI NA OBRADU POVRŠINE

Kada se govori o mehaničkim utjecajima na visinu neravnine, govori se o nekakvim utjecajima pri strojnoj (ili ručnoj) obradi. Mehanički utjecaji će utjecati na površinu odnosno teksturu površine bez obzira koji materijal se obrađuje.

Nije bitno radi li se o drvu ili metalu, heterogenom ili homogenom materijalu, mehanička obrada će utjecati na taj materijal na ovaj ili onaj način. Naravno da se različiti materijali različito ponašaju prilikom mehaničke obrade (ili u našem slučaju obradom odvajanja čestica), ali za to su zaslužna neka posebna svojstva materijala koji se obrađuje. U ovom poglavlju će se objasniti isključivo mehanički utjecaji osnovnih strojnih obrada u drvenoj industriji.

Objasnit će se sličnosti i razlike na obrađenu plohu kod operacije piljenja, obodnog glodanja i tokarenja.

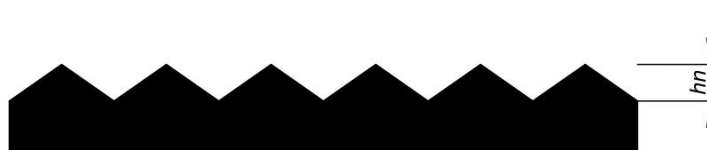
Iako se ranije pisalo o nekakvim osnovnim tipovima površine, ovisno o alatu kojim se obrađuje površina i načinu strojne obrade, teoretski se dobije par različitih tipova površine. Na slici 15 vidljive se površine dobivene nakon tri različite tehnike obrade.



*Teoretska visina neravnine kod površine
nakon piljenja*



*Teoretska visina neravnine kod površine
nakon blanjanja*



*Teoretska visina neravnine kod površine
nakon tokarenja*

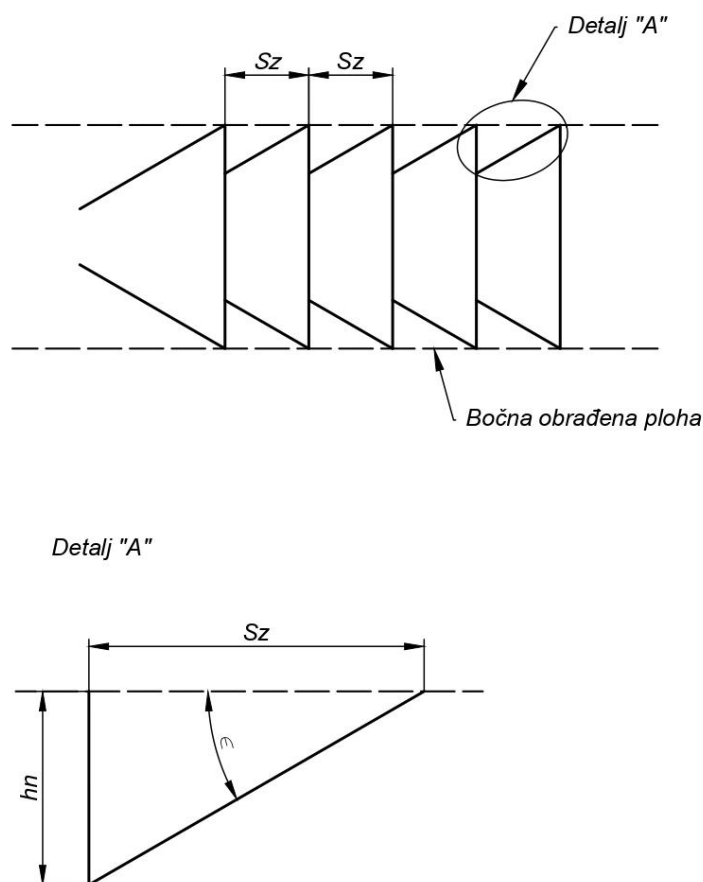
Slika 15 - Teoretska visina neravnine (h_n) kod raznih tehnika obrade

4.1. PILJENJE

Kada govorimo o visini neravnina kod operacije piljenja, govorimo o visini neravnina na bočnim ploham, odnosno ploham koje se nalaze s bočne strane lista pile, bilo da je u pitanju kružna, tračna ili pila jarmača.

Postoji nekoliko faktora koji utječu na teoretsku visinu neravnina kod piljenja. Jedan od tih faktora je svakako tip zubi kojima se vrši piljenje. Pri rezanju drva pilama potrebno je da propiljak, odnosno najmanji razmak među bočnim ploham

rezanja bude veći od debljine lista pile. Time se neposredan dodir između obratka i alata ostvaruje samo na glavnome reznom bridu te na dijelu bočnih ili pomoćnih reznih bridova. Na taj se način sprečava nepotreban dodir ostalih dijelova pile s obratkom, smanjuje zagrijavanje lista, smanjuje jedinični energetske normativ te povećava postojanost alata. Povećanje širine propiljka postiže se na dva načina: razvraćanjem zubi ili povećanjem duljine reznog brida (Goglić V., 1994).



Slika 16 - Visina neravnine kod zubi sa stlačenjem

Iz slike 16 može se vidjeti da je za definiranje visine neravnine kod stlačenog tipa zubi bitan posmak po zubu (s_z), te kut smanjenja prednje plohe (ϵ). Ako se malo bolje pogleda, može se vidjeti da h_n predstavlja neku maksimalnu visinu neravnine. Tu se može uočiti korelacija između pojma h_n i parametra R_{max} . Ako se prisjetimo, R_{max} predstavlja neku maksimalnu vertikalnu udaljenost između najvišeg vrha i najdublje točke na referentnoj duljini, a upravo to označava h_n . Pri proučavanju određenog profila površine, može se zaključiti da upravo taj

parametar predstavlja visinu neravnine koja je obično rezultat proračuna pri računanju teorijske visine neravnine.

Što se posmaka po zubu tiče (s_z), njega se također može povezati s nekim od prethodno navedenih parametara. Može se zaključiti da je on najbližiji S_m parametru visine neravnine. U daljnjem radu, vidjet će se kako s_z može utjecati na obrađenu plohu.

Da bismo definirali posmak po zubu potrebno je povezati sustav posmičnog i glavnog gibanja. Ako se gleda zasebno sustav posmičnog gibanja, posmak po zubu predstavlja nekakav put koji obradak ili alat (ovisno tko obavlja posmično gibanje) prođe nekom posmičnom brzinom v_p u određenom vremenu T , a T predstavlja vrijeme koje je potrebno da sljedeći zub uđe u zahvat, odnosno vrijeme od ulaska jednog, do ulaska drugog zuba u zahvat. Onda se može formirati jednačina

$$s_z = v_p * T \quad (1)$$

Ukoliko gledamo samo sustav glavnog gibanja, može se zaključiti da je razmak između dva zuba t (korak zuba) u ovom slučaju jednak umnošku brzine glavnog gibanja (obodnoj brzini lista pile) v i istom onom vremenu koje je potrebno da sljedeći zub uđe u zahvat T . Iz toga se onda može formirati jednačina

$$t = v * T \quad (2)$$

Sada se vidi da obe jednačine sadržavaju isti faktor T . Ukoliko se izjednači T iz obe jednačine dobit će se

$$\frac{s_z}{v_p} = \frac{t}{v} \quad (3)$$

Nakon što se cijela jednačina pomnoži s v_p , dobit će se

$$s_z = \frac{t * v_p}{v} \quad (4)$$

Iz navedene jednadžbe lako se može zaključiti o čemu ovisi posmak po zubu. Ako se bolje pogleda, može se vidjeti da posmak po zubu raste kako se povećava korak zuba i posmična brzina, a smanjuje se povećanjem brzine rezanja. Ako pogledamo sliku 14, može se zaključiti da će se vrijednost S_m linearno povećavati rastom vrijednosti s_z .

Što se tiče kuta smanjenja prednje plohe (ε), vidimo da on isključivo ovisi o geometriji zuba s kojima se obavlja piljenje. Nakon što smo definirali parametre o kojima ovisi visina neravnina h_n , kod zubi sa stlačenjem može se izraziti kao umnožak posmaka po zubu i tangensa kuta ε

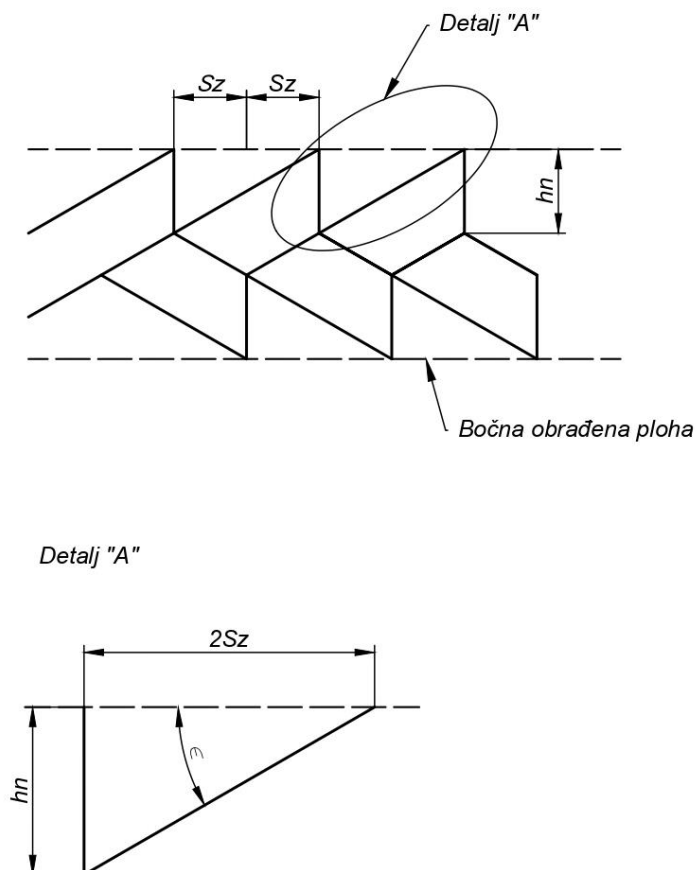
$$h_n = s_z * \tan(\varepsilon) \quad (5)$$

U slici 17 vidi se različit *Detalj „A“* od prethodne slike, odnosno može se vidjeti na koji način različit tip zubi utječe na teorijsku visinu neravnine bočnih ploha kod piljenja.

Iz slike 17 se onda može formirati jednadžba

$$h_n = 2s_z * \tan(\varepsilon) \quad (6)$$

iz koje se može zaključiti da tip zubi zaista ima veliku ulogu u definiranju krajnje površine u smislu visine neravnine.



Slika 17 - Visina neravnina kod zubi s razvrakom

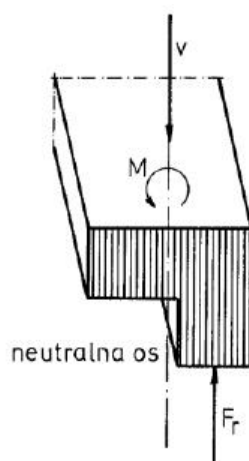
Vidi se da je teorijska visina neravnina kod razvraćenih zubi dvostruko veća od visine neravnina kod zubi povećane duljine reznoga brida odnosno stlačenih zubi pri istim uvjetima rada i pri istom kutu smanjenja prednje plohe (ε) (Goglia V., 1994).

Visine neravnina na bočnim ploham mnogo su veće od teorijskih visina kao što je to prikazano u slikama 16 i 17. Može se reći da se dosadašnji prikazi mogu računati kao hrapavost površine odnosno pomoću R parametara, no postoje određena odstupanja na bočnim ploham koja se mogu prepisati greškama oblika ili pak valovitošću površine (W). Ta odstupanja ne moraju imati veću visinu od prethodno navedenih, ali zasigurno imaju veću valnu duljinu.

Prema V. Goglia (1994), postoji par uzroka takvih odstupanja:

- Pomaknuto težište sile rezanja: Kod razvraćenih zubi površina se presjeka strugotine mijenja po duljini glavnoga reznog brida. Tako se mijenja i

vrijednost jediničnih sila na reznome bridu pa će rezultantna sila biti otklonjena od neutralne osi, stoga će sila rezanja s obzirom na neutralnu os stvarati moment M koji će utjecati na stabilnost lista pile te povećavati bočne pomake, a time i neravnine na bočnim obrađenim plohama (slika 18). Razumljivo je da će taj problem biti to veći što se radi s većim posmičnim brzinama i što je razvraka s obzirom na debljinu lista veća. Problem se također događa pri nejednakoj razvraci zubi, odnosno ukoliko je jedna strana pile razvraćenija od druge (pri ručnom razvraćanju). Jednostrano veća razvraka nastojat će zbog razlike momenata s obzirom na neutralnu os skrenuti pilu u smjeru veće razvrake. Takva će pila davati vijugav rez.



Slika 18 - Oblik strugotine kod razvraćenih zubi (V. Goglia, 1994)

- Različita mehanička svojstva po duljini lista pile: Ovaj utjecaj se javlja kod tračnih pila kod kojih se List pile spaja u beskonačnu traku raznim postupcima. Zajedničko je za sve postupke spajanja to da se na spojnom mjestu ponekad postižu mehanička svojstva različita od mehaničkih svojstava osnovnoga materijala. Tvrdća i čvrstoća na savijanje mogu se povećati u usporedbi s osnovnim materijalom pa pri svakom prelasku spojnoga mjesta s oboda slobodnog kotača u pravocrtno gibanje nastaje val koji se širi duž lista pile. To također uzrokuje povećanje bočnih gibanja lista u propiljku, s posljedicama koje su već spomenute.

- Vibracije pojedinih dijelova stroja: Vibracije koje nastaju zbog neuravnoteženih rotirajućih masa i promjene smjera gibanja kolica kod trupčara prenose se na čitav stroj pa i na sam list pile, uzrokujući povećane bočne pomake.
- Stabilnost lista pile: što je veća debljina lista, to bi on trebao biti stabilniji. Stabilnost lista pile ovisi i o sili napinjanja kojom se zateže list pile, te bi u pravilu stabilnost trebala biti veća, što je veća sila napinjanja lista. Ukoliko sila napinjanja nije dovoljno velika, ili je debljina lista premala, alat može početi vijugati i na taj način izazvati nepravilnosti na bočno obrađenim ploham.

Osim navedenih, postoji još mnoštvo mehaničkih uzroka visine neravnina na obrađenoj plohi prilikom procesa piljenja, bilo da ih uzrokuje alat, bilo stroj, pa tako različita nekontrolirana vlačna i tlačna naprezanja mogu uzrokovati neželjene posljedice na obrađenoj plohi. Uvjeti rada, prevelike sile, frekvencije vrtnje, nekontrolirane brzine (posmične i glave), toplinske dilatacije, te još mnogi drugi faktori mogu imati određenu ulogu u definiranju krajnje plohe obrade kod piljenja.

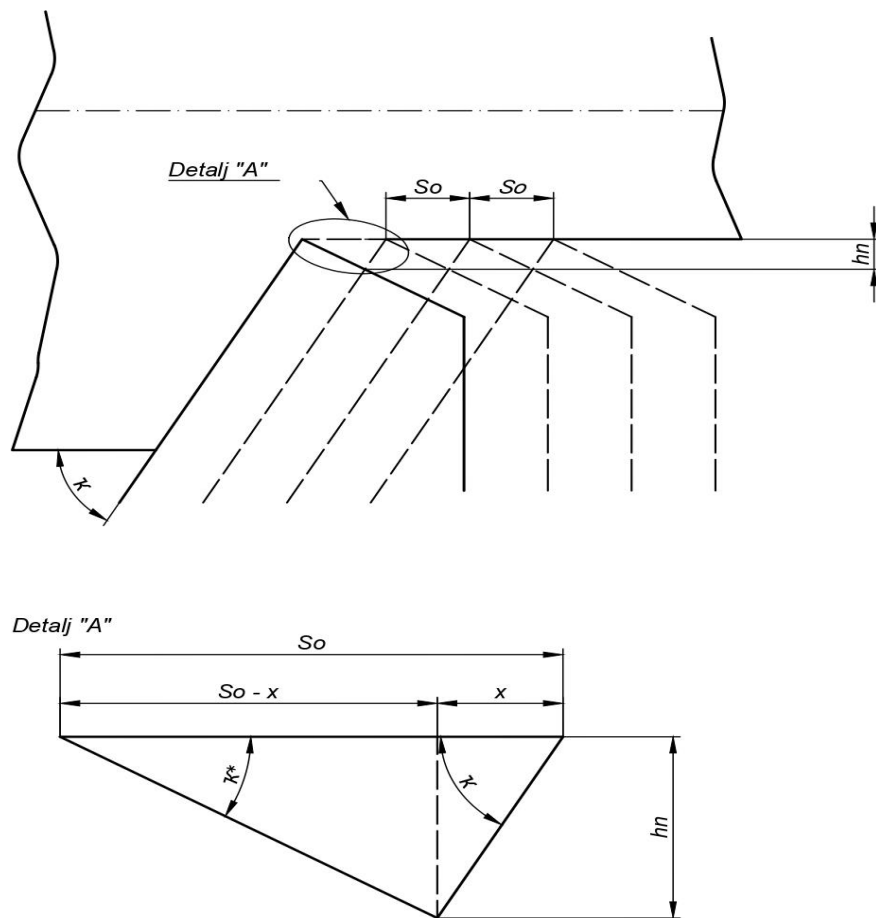
Preporučene vrijednosti posmaka po zubu kod piljenja obično iznose od 0,05 – 1,00 mm. Od svih mehaničkih obrada drva, kod piljenja se obično dobiju najveće vrijednosti visine neravnine na površini

4.2. TOKARENJE

Tokarenje je postupak obrade odvajanjem čestica pretežno rotacijskih površina (simetričnih ili nesimetričnih), ali je moguće obrađivati i ravne površine. Tokarenje ima specifičan način odvajanja čestica jer prilikom obrade obradak osigurava glavno gibanje, a alat vrši pomoćno gibanje.

Ono se može podijeliti uzimajući u obzir više kriterija, pa ga je tako moguće podijeliti s obzirom na kvalitetu obrađene površine. Postoji grubo, fino i završno tokarenje.

Na slici 19 može se vidjeti teoretska visina neravnine kod tokarenja kada nema radijusa na vrhu oštrice.



Slika 19 - Teorijska visine neravnine kod tokarenja

Iz slike 19 na *detalju* „A“ može se vidjeti da je

$$\tan(\kappa^*) = \frac{h_n}{s_o - x} \quad (7)$$

iz čega slijedi

$$h_n = \tan(\kappa^*) * (s_o - x) \quad (8)$$

x se može izraziti preko drugog kuta. Iz slike 19 zaključujemo da je

$$\tan(\kappa) = \frac{h_n}{x} \quad (9)$$

iz čega slijedi

$$x = \frac{h_n}{\tan(\kappa)} \quad (10)$$

Nakon što se jednačba (10) uvrsti u jednačbu (8), dobije se da je

$$h_n = \tan(\kappa^*) * (s_o - \frac{h_n}{\tan(\kappa)}) \quad (11)$$

Kad se izraz sredi dobije se da teorijska visina neravnine kod tokarenja iznosi

$$h_n = s_o * \frac{\tan(\kappa) * \tan(\kappa^*)}{\tan(\kappa) + \tan(\kappa^*)} \quad (12)$$

Iz izraza (12) može se zaključiti da h_n ovisi o posmaku po okretaju s_o , te kutevima κ i κ^* odnosno kutevima tokarskoga noža.

Kod tokarenja posmak po okretaju je jednak posmaku po zubu, obzirom da se radi samo s jednom oštricom i on iznosi

$$s_o = v_p * T \quad (13)$$

gdje v_p predstavlja posmičnu brzinu, a T predstavlja vrijeme koje je potrebno obratku da napravi jedan cijeli krug. Ako umjesto vremena uzmemo frekvenciju vrtnje obratka $n_v (\frac{1}{T})$, dobijemo da je

$$s_o = \frac{v_p}{n_v} \quad (14)$$

iz čega se može zaključiti da se vrijednost posmaka po okretaju povećava kako raste posmična brzina, odnosno smanjuje kako raste frekvencija vrtnje obratka.

Preporučene vrijednosti posmaka po okretaju (Kršljak, 2000.):

- za grubu obradu ($1,25 \div 2,5$) mm/okr.
- za fino tokarenje ($0,75 \div 1,25$) mm/okr.

Kod tokarenja također postoje određeni utjecaji koji izazivaju nepravilnosti na površini kao što su greška oblika ili valovitost na površini, pa tako razne vibracije alata ili obratka mogu uzrokovati neželjene deformacije na krajnjoj površini. Te vibracije mogu biti uzrokovane neadekvatnim silama između alata i obratka, kao i ekscentričnim pričvršćivanjem obratka. Prevelike frekvencije vrtnje također mogu imati neželjene posljedice koje se onda odražavaju na površini u obliku valova ili grešaka oblika.

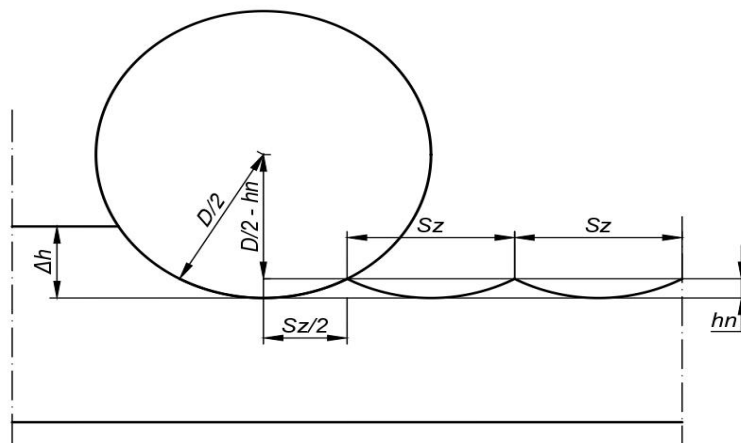
4.3. BLANJANJE

U industrijskoj preradi drva postupcima mehaničke obrade drva odvajanjem čestica pod blanjanjem se uglavnom smatra operacija obodnog glodanja.

Ono se izvodi na alatnim strojevima, pri čemu je glavno (režno) gibanje kružno kontinuirano i pridruženo je alatu. Posmično gibanje je kontinuirano, proizvoljnog oblika i smjera i pridruženo je (najčešće) obratku. Os okretanja glavnog gibanja zadržava svoj položaj prema alatu bez obzira na smjer brzine posmičnog gibanja. Alat za glodanje je glodalo definirane geometrije reznog dijela, s više glavnih reznih oštrica koje se nalaze na zubima glodala. Rezne oštrice periodično ulaze u zahvat s obratkom i izlaze iz njega tako da im je dinamičko opterećenje jedno od osnovnih obilježja (Procesi obrade odvajanjem čestica, 2020.).

Obodno glodanje se također može podijeliti s obzirom na kvalitetu obrađene površine, a dijeli se na grubo, završno i fino glodanje.

Na slici 20 može se vidjeti princip obodnog glodanja, te visina neravnine. Također se vidi da tragovi obrade obodnim glodanjem izgledaju kao male cikloide, a upravo je ovakva površina, definicija valovite plohe.



Slika 20 - Teorijska visina neravnine kod procesa obodnog glodanja

Iz slike 20 može se zaključiti da je po Pitagori

$$\left(\frac{D}{2}\right)^2 = \left(\frac{S_z}{2}\right)^2 + \left(\frac{D}{2} - h_n\right)^2 \quad (15)$$

Nakon što se izraz sredi, dobije se da je

$$h_n = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - S_z^2}) \quad (16)$$

iz čega se može zaključiti da teoretska visina neravnine kod blanjanja ovisi o promjeru alata kojim se obradak obrađuje i posmaku po zubu.

Posmak po zubu se računa kao posmak po okretaju podijeljen s brojem noževa na alatu

$$s_z = \frac{s_0}{z} \quad (17)$$

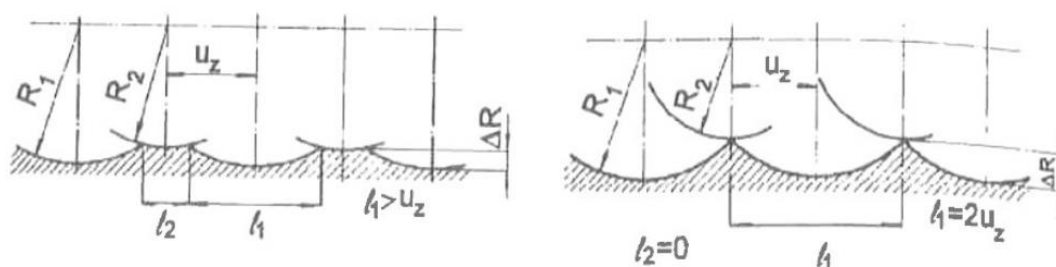
Obzirom da se posmak po okretaju računa na isti način kao kod tokarilica (14), možemo formirati novu jednadžbu za posmak po zubu

$$s_z = \frac{v_p}{n_v \cdot z} \quad (18)$$

Iz navedenog zaključujemo da posmak po zubu raste kako povećavamo posmičnu brzinu, odnosno njegova vrijednost pada ukoliko povećavamo frekvenciju vrtnje alata i broj noževa na alatu.

Kako se povećava broj oštrica na alatu, vrijednost parametara hrapavosti pada (Ors i Baykan 1999.).

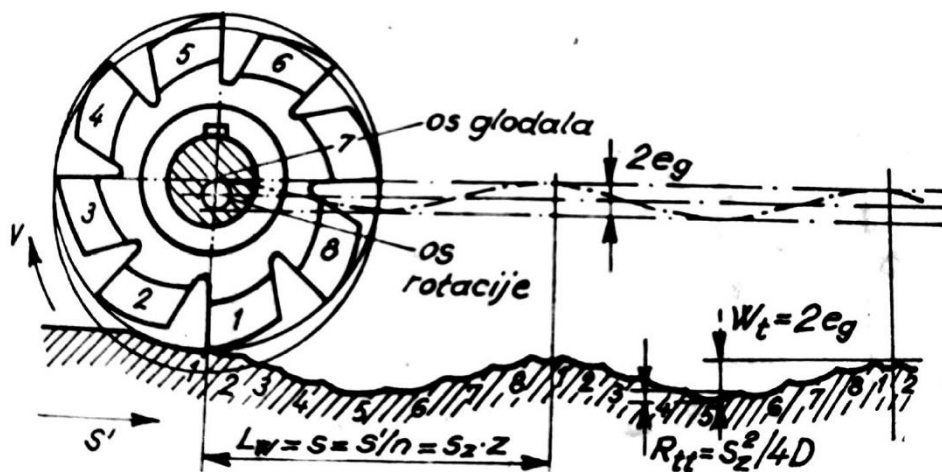
Iako je logično da se povećanjem broja noževa smanjuje visina neravnine na površini, većina alata za obodno glodanje u drvenoj industriji sadrži samo 2-4 oštrice. Problem je što kod obodnog glodanja, bez obzira koliko noževa sadrži alat, većinu posla će nam obavljati 1-2 oštrice jer je jako teško sve vrhove noževa postaviti na istu kružnicu. Iako su ta odstupanja mala, mogu biti i reda stotinke milimetra, dovoljno su velika da nam kvalitetu obrađene plohe u takvom slučaju diktira jedan najistureniji nož. Zbog toga, obično jedan nož definira visinu neravnine na obrađenoj plohi i tu se javlja novi pojam - s_{zeff} , odnosno efektivni posmak po zubu (slika 21). On predstavlja posmak najisturenijeg noža na alatu, te na taj način definira visinu neravnine. Na slici 21 prikazan je utjecaj efektivnog posmaka po zubu.



Slika 21 - Utjecaj odstupanja putanje oštrice noža na konačni oblik obrađene plohe (Lisičan, 1996.)

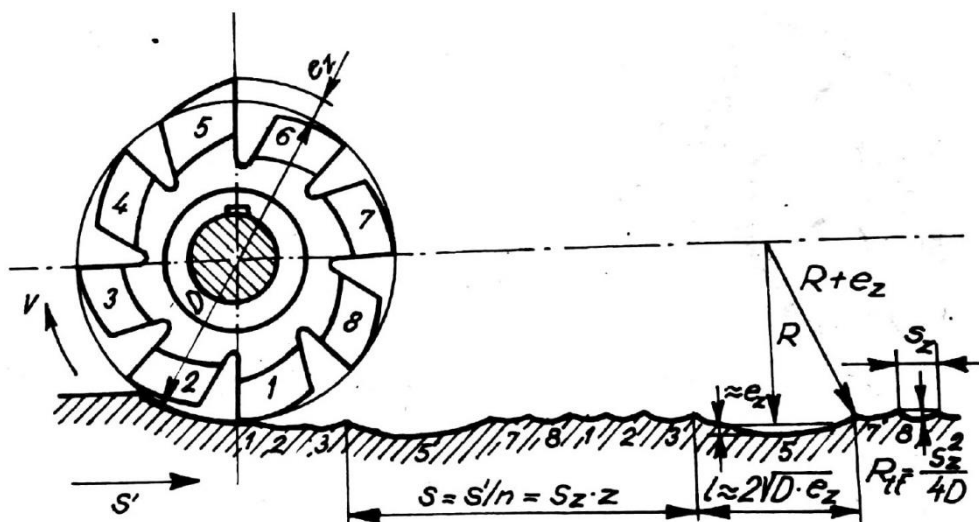
Na slici 21 vidljivo je da svi noževi nisu na istoj putanji. Lijevo je prikazana visina neravnine kada je više noževa u zahvatu, dok je desno vidljiv profil površine kada je samo jedan nož u zahvatu. U toj situaciji efektivni posmak po zubu je jednak posmaku po okretaju i onda isključivo on definira visinu neravnine na površini.

Ovakvi nedostaci se mogu javiti iz dva razloga; neadekvatno pričvršćivanje radne glave na vratilo, te nemogućnost smještanja svih vrhova noževa na istu kružnicu.



Slika 22 - Prikaz krajnje površine pri neadekvatnom pričvršćivanju radne glave na vreteno (Šavar Š, 1977.)

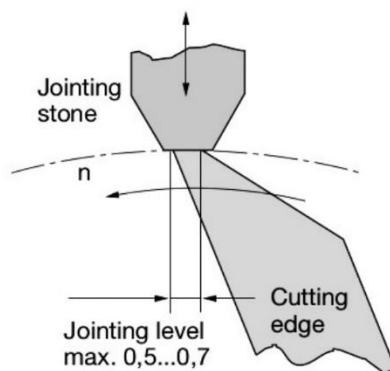
Na slici 22 je prikazan alat s osam noževa upravo kako bi se naglasio nedostatak ekscentričnog pričvršćivanja. Može se vidjeti da takva anomalija uzrokuje neravnine s nešto većim valnim duljinama.



Slika 23 - Prikaz površine pri "ekscentričnosti zuba" (Šavar Š, 1977.)

Na slici 23 se može vidjeti da pojava ovakvog nedostatka uzrokuje dublje neravnine, kao i veće valne duljine pri prolazu ekscentričnog zuba.

Ponekad se oštrice izjednačavaju na način da se namjerno zatupe kako bi se izjednačila njihova duljina (slika 24). Ovo se također radi kod piljenja razvraćenim zubima, kako bi razvraka s obe strane lista bila jednaka.



Slika 24 - Shematski prikaz postupka dodatnog skošavanja oštrice (engl. jointing) (Leitz Lexicon)

Jako je bitan i način pričvršćivanja radne glave na vreteno, odnosno način upinjanja. Najbolje se pokazalo hidrauličko upinjanje.

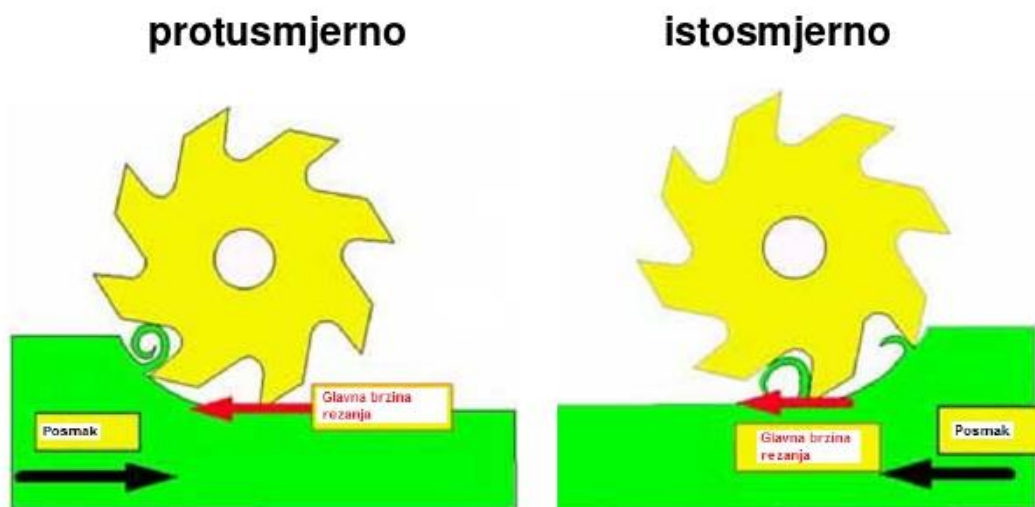
Princip hidrauličkog (hydro) upinjanja čine određeni kanali koji su napunjeni mašću. Pomoću visokotlačne mazalice tlak u kanalima se povećava na 300 bara čime se rastežu stjenke komora u kojima je mast i potpuno centrira hidro glava.

Kombinacijom jointinga i hidro upinjanjem može se postići da uglavnom svi noževi budu na istoj putanji.

Znamo da je pri obodnom glodanju moguće istosmjerno i protusmjerno rezanje (slika 25). Cevdet Sogutlu (2010) u svom radu piše da parametri hrapavosti R_a , R_z i R_t jako ovise o načinu rezanja. On svojim istraživanjem na dvije različite vrste drva zaključuje da su navedeni parametri niži ukoliko se obradak kreće u smjeru vrtnje alata (istosmjerno rezanje). Pretpostavka je da ova situacija proizlazi iz razloga što oštrice pri izlasku iz zahvata ne trgaju vlakanca s površine na drvu tijekom otklanjanja strugotine.

Iako istosmjerno rezanje daje niže rezultate visine neravnine, puno češće se pri obodnom glodanju koristi protusmjerno rezanje. Pri ručnom blanjanju, nipošto se ne preporuča istosmjerni način reza zbog sigurnosnih razloga. Naime, može se dogoditi da alat naglo povuče obradak, a s njim i radnika, pa je stoga puno sigurnije protusmjerno blanjanje pri takvom načinu rada. Još jedan razlog zbog kojeg se preferira protusmjerno blanjanje ispred istosmjernog je trošenje oštrica.

Oštrice se puno brže troše pri istosmjernom rezanju, nego što je to slučaj kod protusmjernog.



Slika 25 - Smjerovi rezanja (Ivo Slade, 2020.)

Osim smjera rezanja, bitan je i materijal od kojeg se izrađuju oštrice pa su tako Dobrzynski M. et al., 2017. utvrdili da oštrice od tvrdog karbida mogu obraditi gotovo četiri puta više materijala prije zatupljenja i naglog povećanja parametara hrapavosti nego oštrice od kromiranog čelika (13%). Zatupljenje oštrice automatski utječe na silu po nožu, te na taj način definira debljinu odvajane strugotine. Iako je debljina odvajane strugotine pri procesu blanjanja promijenjiva tijekom zahvata (Slika 25), za proračun se obično uzima srednja debljina odvajane strugotine (δ_{sr}) pa je tako ona jednaka

$$\delta_{sr} = s_z * \frac{\Delta h}{l} \quad (19)$$

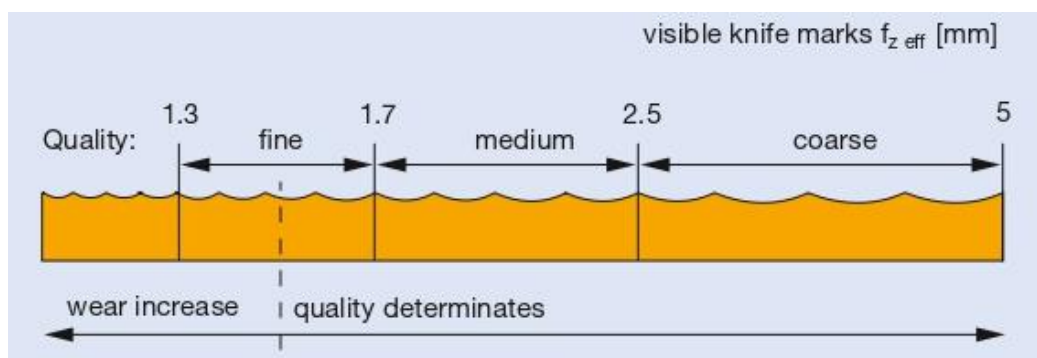
gdje je Δh visina obrade, a l duljina luka zahvata, odnosno l iznosi

$$l = \frac{D}{2} * \frac{\phi * \pi}{180} \quad (20)$$

Na kraju se da zaključiti da zatupljenje oštrice itekako utječe na visinu neravnine tijekom bilo kojeg procesa obrade odvajanjem čestica.

Iz slike 25 se također može uočiti zašto istosmjerno rezanje daje bolje rezultate u smislu visine neravnina na obrađenoj površini tijekom procesa obodnog glodanja. Vidljivo je da se debljina odvajane strugotine smanjuje pri izlasku oštrice iz zahvata, pa to izravno utječe na parametre hrapavosti i valovitosti na obrađenoj plohi.

Na slici 26 prikazane su preporuke efektivnog posmaka po zubu s obzirom na „kvalitetu“ obrađene površine.



Slika 26 - Prikaz preporuka efektivnog posmaka po zubu kod procesa blanjanja (Leitz lexicon)

Obično se ne ide ispod 1,5 mm vrijednosti efektivnog posmaka po nožu jer se ne dobiju nikakva bitna poboljšanja u „kvaliteti“, a oštrice se ubrzano troše.

Treba pripaziti da se ovo odnosi na s_{zeff} , što znači da će on kod većine klasičnih blanjalica zbog grešaka upinjanja alata i postavljanja noževa u glavu biti jednak proračunatom posmaku po okretaju - s_o , a tek se kod hidro glava može za s_{zeff} uzimati proračunati s_z .

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu, sažeto su prikazani načini dobivanja teorijske visine neravnine kod tri različita postupka mehaničke obrade drva odvajanjem čestica. Također su ukratko objašnjeni neki parametri kojima se definira hrapavost (valovitost) određene površine. Usporedbom parametara hrapavosti i valovitosti s teorijskom visinom neravnina, može se doći do zaključka da h_n predstavlja samo jedan od parametara hrapavosti – R_{max} (W_{max}). U stvarnosti se za ocjenjivanje određene površine pretežito koriste neki drugi parametri kao što su R_a , R_z , R_q (W_a , W_z , W_q)... To su parametri koji daju nešto jasniju sliku površine jer uzimaju puno više točaka u obzir od R_{max} (W_{max}), no ukoliko želimo što jasnije prikazati profil određene površine, potrebno je uzeti što veći broj parametara u obzir.

Posmak po zubu (ili po okretaju kod tokarenja), može se povezati s uzdužnim parametrom S_m . Znamo da se porastom posmaka po zubu dobiva lošija kvaliteta krajnje površine, ukoliko se kvalitetna površina definira kao ravna i glatka.

Ako se pogleda raspon posmaka po zubu kod piljenja i tokarenja i stavi u omjer s teorijskom visinom neravnine, vidjet će se da taj omjer ne prelazi onaj „granični“ omjer između hrapavosti i valovitosti odnosno 1:50. Iz navedenog se može zaključiti da parametre valovitosti kod površina obrađenim piljenjem ili tokarenjem nije potrebno uključiti pri ocjenjivanju površine kao takve, te da su nam za računanje visine neravnine kinematskih tragova obrade dovoljni parametri hrapavosti.

No, iako su parametri hrapavosti dovoljni za procjenjivanje površine ako se uzmu u obzir kinematski tragovi obrade, ne treba olako odbaciti parametre valovitosti. Ako se želi dobiti potpuno jasna slika površine, potrebno je uključiti i parametre valovitosti. Razlog tomu su prije svega određene bočne sile, vibracije i slične neželjene pojave koje uzrokuju visine neravnina s većim valnim duljinama.

Ako se pogleda površina nakon procesa obodnog glodanja, tu je omjer između teorijske visine neravnine i posmaka po nožu obično veći od 1:50 i pri ocjenjivanju obrađene plohe nakon blanjanja, neophodno je uključiti parametre valovitosti.

Što se tiče teorijske visine neravnine, posmična i glavna brzina (brzina rezanja), te geometrije oštrice, imaju najveću ulogu pri definiranju krajnje kvalitete površine. Teoretski, velikom brzinom rezanja, malom posmičnom brzinom i adekvatnom geometrijom noža (zuba), dobijemo glatku površinu, no nažalost, u stvarnosti smo ograničeni mogućnostima stroja, alata, te raznim drugim utjecajima. Osim ograničenja, postoji mnoštvo drugih faktora koji ne mogu u potpunosti biti kontrolirani, a koji utječu na stvarnu plohu nakon obrade. Bilo da se radi o piljenju, tokarenju ili obodnom glodanju, uvijek će postojati određeni faktori koje neće biti moguće u potpunosti kontrolirati.

Iako se u ovom radu pisalo isključivo o mehaničkim utjecajima na obrađenu površinu, ne smije se zaboraviti da je drvo izuzetno kompleksan materijal koji je moguće predvidjeti samo do određenih granica. U ovom radu, vrsta materijala koji se obrađuje uopće nije bila uzeta u obzir. Bez utjecaja tehnoloških i fizikalnih svojstava drva koje utječu na krajnju površinu, postoji mnoštvo ograničenja koje sprječavaju dobivanje željene površine. Ako se u obzir uzme i sva heterogenost jednog materijala kao što je drvo, onda se da zaključiti da je definiranje krajnje plohe nakon bilo kojeg procesa obrade izuzetno zahtjevan posao.

6. LITERATURA

1. Aslan S., Coskun H., Kilic M., 2008: The effect of the cutting direction, number of blades and grain size of the abrasives on the surface roughness of Taurus cedar (*Cedrus Libani* A. Rich.) woods. *Building and Environment* 43: 696-701.
2. Cevdet Sogutlu, 2010: The effect of the feeding direction and feeding speed of planing on the surface roughness of Oriental Beech and Scotch Pine woods. *Wood Research* 55(4): 67-78.
3. Dobrzynski M., Orlowski K. A., Biskup M., 2017: Selected aspects of the surface quality of the wooden elements after planing. 23rd International wood machining seminar, poster presentations: 372-380.
4. Goglia V., 1994: STROJEVI I ALATI ZA OBRADU DRVA I – dio. Šumarski fakultet, Zagreb.
5. Hendarto B., Shayan E., Ozarska B., Carr R., 2004: Analysis of roughness of a sanded wood surface. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 28: 775-780.
6. Hrapavost tehničkih površina (https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf), 2020.
7. Jirouš-Rajković, V. Režimi brušenja ravnih furniranih ploha i njihov utjecaj na površinsku obradu. Magistarski rad. Zagreb: Šumarski fakultet, 1991.
8. Kršljak B., 2000: Mašine i alati za obradu drveta I, Šumarski fakultet, Beograd.
9. Mitutoyo America Corporation, Quick guide to surface roughness (https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf), 2020.
10. Ors Y., Baykan I., 1999: The effect of planing and sanding on the surface roughness. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry* 23 (3): 577-582.
11. Procesi obrade odvajanjem čestica (www.fsb.hr/kas/).

12. Runje, B., 2014: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje.
13. Šavar Š, 1977.,: Obrada odvajanjem čestica I. dio. Fakulter strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
14. Taylor Hobson Limited, 2003: Exploring Surface Texture.

SLIKE:

1. Tipovi površine - Taylor Hobson Limited, 2003: Exploring Surface Texture
2. Hrapavo-valovita površina - Taylor Hobson Limited, 2003: Exploring Surface Texture
3. Princip kontaktnog načina mjerenja visine neravnine - Taylor Hobson Limited, 2003: Exploring Surface
4. Valne duljine - Hrapavost tehničkih površina (https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/design/2007/hrapavost_tehnickih_povrsina.pdf), 2020.
5. Primarni profil - Mitutoyo America Corporation, QUICK GUIDE TO SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT (https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf), 2020.
6. Profil hrapavosti - Mitutoyo America Corporation, QUICK GUIDE TO SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT (https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf), 2020.
7. Profil valovitosti - Mitutoyo America Corporation, QUICK GUIDE TO SURFACE ROUGHNESS MEASUREMENT (https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2012/11/1984_Surf_Roughness_PG.pdf), 2020.
8. Karakteristične duljine profila - Runje, B.: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
9. Prikaz parametra Ra na određenom profilu i formula za njegovo izračunavanje prema ISO 1302-2002
10. Prikaz parametra Rq na određenom profilu i formula za njegovo izračunavanje prema ISO 1302-2002
11. Grafički prikaz značenja izračunatih vrijednosti parametara hrapavosti Rp i Rv s obzirom na izmjereni profil hrapavosti prema ISO 1302-2002

12. Grafički prikaz parametara R_{max} , R_t , i R_z na izmjerenom profilu prema ISO 1302-2002
13. Grafički prikaz nekih hibridnih parametara na izmjerenom profilu prema ISO 1302-2002
14. Slika 14 – Grafički prikaz S_m parametra na određenom profilu površine prema ISO 1302-2002
15. Teoretska visina neravnine (h_n) kod raznih tehnika obrade
16. Visina neravnine kod zubi sa stlačenjem
17. Visina neravnina kod zubi s razvrakom
18. Oblik strugotine kod razvraćenih zubi - Goglia V., 1994: STROJEVI I ALATI ZA OBRADU DRVA I – dio. Šumarski fakultet, Zagreb
19. Teorijska visine neravnine kod tokarenja
20. Teorijska visina neravnine kod procesa obodnog glodanja
21. Utjecaj odstupanja putanje oštrice noža na konačni oblik obrađene plohe - Lisičan, J. 1996: Teória a technika spracovania dreva (Theory and technology of wood processing) Zvolen, Matcentrum
22. Prikaz krajnje površine pri neadekvatnom pričvršćivanju radne glave na vreteno - Šavar Š, 1977.,: Obrada odvajanjem čestica I. dio. Fakulter strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
23. Prikaz površine pri "ekscentričnosti zuba" - Šavar Š, 1977.,: Obrada odvajanjem čestica I. dio. Fakulter strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
24. Shematski prikaz postupka dodatnog skošavanja oštrice (engl. jointing) - Leitz Lexicon edition 4 (http://www.kord.ee/download/Lexikon_E_06.pdf), 2020.
25. Smjerovi rezanja - Ivo Slade, OBRADA MATERIJALA II, (https://loomen.carnet.hr/pluginfile.php/382715/mod_resource/content/1/Obrada%20materijala%20II%20-%20I%20dio.pdf) 2020.
26. Prikaz preporuka efektivnog posmaka po zubu kod blanjanja - Leitz Lexicon edition 4 (http://www.kord.ee/download/Lexikon_E_06.pdf), 2020.

TABLICE:

1. Preporučene granične vrijednosti filtra - Runje, B.: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.