

Stjepan Risović

Ovisnost kakvoće piljenja drva o naprezanjima u listu kružne pile, I.

Analiza utjecajnih čimbenika na kakvoću piljenja drva

The tensions in the circular saw blade affecting the wood sawing quality, I The analysis of the factors affecting the wood sawing quality

Pregledni rad - Review paper

Prispjelo - received: 10. 04. 1999. • Prihvaćeno - accepted: 12. 04. 1999.

*UDK 630*832.181; 630*822.33; 621*933.222; 630*829*

SAŽETAK • *Drveno inženjersvo, za razliku od mnogih drugih struka, znatnije se razvija tek poslije Drugoga svjetskog rata. Tada je počelo i proučavanje obradbenih postupaka drva. Zadovoljavaju se mnogi zahtjevi kao što su estetičnost, sociologičnost, izvedbenost, ergonomičnost, ekologičnost, gospodarstvenost, tehničnost, tehnologičnost i dr. Da bi se te sastavnice unapređivale, ili barem održavale, mnogostrano se istražuje drvo, postupci njegove obradbe, posljedci obradbe – sve s navedenih stajališta.*

S obzirom na to da je spomenuti broj karakterističnih čimbenika koji utječu na proizvodni proces prilično velik, teško ih je pri jednom ograničenom proučavanju istodobno sve promatrati i utvrditi međusobne ovisnosti. Zbog toga se pri istraživanju najbolje kakvoće na strojevima za obradbu drva promatraju najutjecajni činitelji, dok se ostali, manje utjecajni, ili izostavljaju ili promatraju zajednički (skupno). Usavršavanje obradbe drva temelji se i na odgovarajućoj primjeni rezultata znanstvenih istraživanja, inženjersko-tehničkim proračunima, eksperimentalnim istraživanjima te primjeni tih spoznaja pri rješavanju stvarnih problema.

U radu se raspravlja o nekim čimbenicima koji utječu na kakvoću piljenja drva. Kružna se pila najčešće rabi za piljenje. Osim stabilnosti lista pile tijekom obradbe odvajanjem čestica,

Autor je docent na Šumarskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Author is an assistant professor at the Faculty of Forestry of the Zagreb University.

naglašene su teškoće s povećanjem brzine rezanja, posmične brzine i promjera lista, uz smanjenje njegove debljine. Cjelokupni utjecaj navedenih teškoća pri rezanju mogu pridonijeti većoj hrapavosti bočnih obradbenih ploha, većoj širini propiljka, većem utrošku energije i dr.

U radu se zbog svega toga analizira utjecaj konstrukcijskih, energetskih i informacijskih čimbenika na kakvoću piljenja, raščlanjuje i ocjenjuje režim obradbe na kakvoću piljenja, analizira utjecaj lista kružne pile, trošenje oštrice, materijal izratka, i to sve obzirom na kakvoću bočnih ploha rezanja. Također su sveobuhvatno analizirana naprezanja zbog djelovanja centrifugalne sile, utjecaja promjene temperature i napinjanja lista pile.

Gljučne riječi: kružna pila, piljenje drva, kakvoća obradbe, naprezanje lista pile

SUMMARY • Unlike many other, wood engineering did not develop intensely until the end of the Second World War, when it was accompanied by the research of wood processing. Many requirements were fulfilled in terms of aesthetics, sociology, production, ergonomics, ecology, economics, technic, technology, and others. In order to improve these requirements, or at least maintain them, wood started to be researched together with the methods and results of its processing - from all the mentioned aspects.

Since the particular factors influencing the production process are so numerous, it would be an intricate job to monitor them all in a single limited research in order to establish their interactions. Accordingly, the research of the best quality of wood processing machines involves the observation of the most effective factors, others, less powerful, being either omitted, or observed as a group. The improvement of wood processing is also based on the adequate application of the research results, engineering/technical calculations, testing, and application of all these achievements to real issues.

Due to the simple transfer of force and movement, from the drive motor to the cutting blade, the circular saw is the most frequently used sawing machine. Besides the stability of the blade during the process of particle separation, there are also the difficulties with the acceleration of the cutting speed, sliding speed and the blade diameter when its thickness is reduced. The overall impact of these cutting obstacles may result in higher roughness of the cant surface, wider kerf, increased use of energy, etc.

Bearing all this in mind, I have analyzed the impact of design, energy and information upon the sawing quality. This paper presents the evaluation of the processing regime as related to the sawing quality; it analyzes the effect of the circular saw blade, the blade wear, material, all in terms of the quality of cutting the cant surfaces. The analysis also encompasses the tensions caused by the centrifugal force, the impacts of temperature changes and saw blade strain. All radial and circular tensions caused by the centrifugal force are positive.

Key words: circular saw, wood sawing, processing quality, saw blade tensions.

1. UVOD 1. Introduction

Od svih materijala koji se prerađuju za čovjekove potrebe drvo je jedan od najstarijih i najvažnijih. Danas se drvo rabi za izradbu više tisuća različitih predmeta, za čije je dobivanje potreban manji ili veći udio mehaničke obradbe.

Povijest mehaničke obradbe drva vrlo je duga. Prve alate za mehaničku obradbu drva čovjek je uporabljavao još u starome kamenom dobu. Usporedno s razvojem alata razvijali su se i postupci mehaničke obradbe, kao i mehanizirana sredstva rada. Tako je 1560. godine napravljen drveni tokarski stroj na ručni pogon, a godine 1800. proizvedena

je prva tokarilica kovinske konstrukcije za obradbu drva (Goglia, 1994). Već je 1776. godine prema patentu napravljena prva kružna pila, a 1777. godine proizvedena je blanjatica. H. Tresca je 1873. godine ispiti-
vao deformaciju pri blanjanju olova, te opisao pojavu sabijanja odvojene čestice, što je ujedno jedan od prvih radova u teoriji plastičnosti i proučavanju stvaranja odvo-
jene čestice (Šavar, 1990).

Važna istraživanja obradbe drva provedena su tek posljednjih šezdesetih godina u Srednjoj Europi (Njemačkoj) i Sjevernoj Americi (SAD-u).

Piljenja kružnim pilama proučavaju Pahlitzsch (1967) te Mote i Holryen (1973. i 1973A). Mote i Szymani (1977) analiziraju vibracije kružnih pila, njihovu stabilnost i naprezanja, kritičnu frekvenciju vrtnje i dr., a Szymani i Mote (1977) promatraju pilu sa stajališta što učinkovitije kontrole i smanjenja vibracija kružne pile tijekom piljenja. Činitelje učinka pri piljenju detaljno istražuje Reineke (1964), a Dietz (1977) proučava tehnike piljenja u sklopu povećanja učina i poboljšanja radnih uvjeta.

Poznati su i radovi zagrebačke pilarske škole; Brežnjak i Moen (1969) otkrili su ovisnost hrapavosti površine obrađene kružnom pilom s velikim pomakom po reznoj oštrici, Brežnjak i Moen (1970) proučavaju vibracije kružnih pila i bočnu stabilnost tračnih pila (Brežnjak i Moen 1972), a Brežnjak (1973) uporabne parametre piljenja. Isti je autor zbirno prikazao pokazatelje djelotvornosti pilarske tehnologije (Brežnjak, 1991).

Pahlitzsch i Friebe (1974) opisuju utjecaj prednapinjanja na krutost i ponašanje lista pile prilikom vrtnje. Autori, koristeći se Kirchhoffovom teorijom o kružnim pločama, dovede u svezu krutost i vlastitu frekvenciju, te pokazuju da je najbolji (optimalan) odnos promjera valjanja i promjera kružnice korijena zubi lista pile od 0,72 do 0,75.

Münz (1978) istražuje ovisnost kakvoće piljene plohe o sili i promjeru valjanja. Na povećanje vlastite frekvencije toplinski napetoga lista pile u odnosu prema mehaničkom napinjanju lista upozorava Münz (1980). Ploha obrađena toplinski napetim listom pile ima manju hrapavost nego pri obradbi kružnom pilom na kojoj je provedeno dovoljno mehaničko napinjanje.

Noguchi i Umetsu (1988) također su proučavali postupke toplinske obradbe na listovima kružnih pila.

Bučar i Kopač (1996) postavljaju dinamički model za povremeno nestabilno piljenje drva kružnom pilom, a Nicoletti i dr.

(1996) metodom konačnih elemenata analiziraju zaostala i stvarna naprezanja u listu kružne pile, njezinu vlastitu frekvenciju i ponašanje pri kritičnoj frekvenciji vrtnje.

Salje i Bartsch (1977) mjerili su razinu zvučnoga tlaka što ga stvaraju razne kružne pile pri piljenju izradaka od punoga drva i drvnih ploča. Mote i Zhu (1984) istražuju razinu zvučnoga tlaka uzrokovanoga rotacijom lista pile, pri čemu utvrđuju velik utjecaj radialne u usporedbi s okomitom sastavnicom zvučnoga tlaka.

Cheng i dr. (1995) utvrdili su smanjenje vibracije i buke u praznome hod, povećanje kritične brzine i krutosti uporabom kružnih pila promjenljive debljine, a Goglia i Beljo-Lučić (1996) ispitali su utjecaj odnosa vlastite frekvencije pile i frekvencije pobude na buku kružnih pila.

2. SVRHA I CILJ ISTRAŽIVANJA 2. Purpose and objectives of the research

Rad kružnom pilom redovito je praćen pojavama koje mogu utjecati na kakvoću piljenja. Cjelokupni utjecaj raznih čimbenika pri rezanju mogu pridonijeti većoj hrapavosti bočnih obradbenih ploha, većoj širini propiljka, većem utrošku energije i dr.

Zbog navedenoga za obradbu drva kružnom pilom u ciljeve istraživanja je uvršteno:

- raščlanjivanje utjecaja obratka na kakvoću piljenja
- raščlamba utjecaja lista kružne pile na kakvoću bočnih ploha rezanja
- analiza kinematičkih odnosa kružne pile
- analiza naprezanja zbog centrifugalne sile, zagrijavanja rubova ploče, napinjanja lista.

3. UTJECAJ KARAKTERISTIČNIH ČIMBENIKA NA PROCES OBRADBE DRVA ODVAJANJEM ČESTICA 3. The impacts of the characteristic factors upon the wood processing by particle separation

Opće je nastojanje svih proizvodnih procesa povećanje mogućnosti obradbe, brzine, točnosti i kakvoće, ujedinjavanje mjerne opreme i sofisticirani nadzor procesa i stroja.

Tako Schulz (1997) proučava današnje stanje i daljnji razvoj obradbe visokim brzinama rezanja (HSC - High Speed Cutting), Cebalo i dr. (1997) analiziraju utjecajne čimbenike pri obradbama visokim brzinama rezanja i njihovu spregu s povećanjem dobiti, dok Schmitt (1997) analizira glo-

dalice velikih frekvencija vrtnje rezne oštrice s visoko postavljenim zahtjevima glede kinematike i dinamike gibanja te ostalih posebnosti koje iz njih proizlaze.

Strojevi za piljenje s kružnim gibanjem alata, poznatiji pod nazivom kružne pile, najčešće su upotrebljavani strojevi u mehaničkoj preradbi drva.

I površan pogled na povijest razvoja alatnih strojeva pokazuje da su tehničke sposobnosti alatnoga stroja u uskoj svezi s usavršavanjem pogonskih sustava.

Postupak obradbe odvajanjem čestica ostvaruje se određenim režimom rada. Za obradbu odvajanjem čestica izbor režima rada ovisi o mogućnosti primijenjene tehnologije. Parametri obradbe su pod neposrednim utjecajem tehnologa obradbenoga procesa, ali su uvjetovani i drugim ulaznim veličinama, kao i zahtjevima na izlazu. Za svako pojedino piljenje moraju se što točnije odrediti vrijednosti elemenata obradbe, jer neposredno utječu na kakvoću obrađene površine odnosno na naprezanja u listu kružne pile. Međutim, kakvoća piljenja ne može se povećati jednostranim mijenjanjem tih vrijednosti, jer između pojedinih veličina režima obradbe postoji izravna zavisnost. Osnovne karakteristične veličine koje određuju režim piljenja kružnom pilom jesu *brzina rezanja, posmična brzina, korak ozubljenja i geometrija zubi*.

3. 1. Utjecaj obratka na kakvoću piljenja 3. 1. The impact of a stock upon sawing quality

Drvo je tvar organskoga podrijetla, proizvod šume koja uvijek "radi" u drukčijim uvjetima; mijenjaju se klima, stanište, vrsta, starost, genetska svojstva drva i dr. Zbog navedenoga svojstva drva kreću se u širokim rasponima. Ne razlikuju se samo od vrste do vrste drva, nego i unutar iste vrste, od područja do područja, od sastojine do sastojine. Svojstva se također razlikuju i od jednoga do drugoga stabla unutar iste sastojine. Svojstva jednoga stabla mijenjaju se u poprečnome, uzdužnome i tangentnom smjeru. Pojedina se svojstva čak međusobno razlikuju i unutar istoga goda, drvene tvari prirasle u jednoj godini.

Osnovne značajke drva kao prirodnoga materijala jesu nehomogenost, anizotropnost i nepostojanost.

Nijedan proces obradbe odvajanjem čestica ne ostavlja idealno glatku površinu. Njezina se kakvoća određuje hrapavošću odnosno valovitošću i fizikalno-mehaničkim svojstvima. Postupak obradbe odvajanjem

čestica često se ocjenjuje po tome koja se kakvoća površine njime može dobiti. Kakvoća obrađene površine prilično je važan kriterij za ocjenu obradivosti mekoga materijala.

Nove metode proizvodnje, sustavna kontrola kakvoće te prije svega želja za održanjem niskih proizvodnih cijena uvjetovali su, osim dimenzijskih, i druga ograničenja. Ta se ograničenja ponajprije odnose na određivanje najvećih dopuštenih odstupanja geometrijskog oblika i na hrapavost površine.

3. 2. Utjecaj alata na kakvoću piljenja 3. 2. The impact of tools upon sawing quality

Alat je u užem smislu sredstvo koje je u procesu obradbe odvajanja čestica upravljani alatnim strojem (Šavar, 1990). Njegova je uloga s prelaskom od ručnoga rada na strojni, mehanizirani način obradbe sve više rasla, sve do automatizirane proizvodnje. Razvoj tehnike omogućio je povećanje brzine odvajanja čestica, što je zahtijevalo nove materijale za alate boljih mehaničkih svojstava u novostvorenim uvjetima uporabe. Tehnika obradbe odvajanja čestica razvijat će se uspješno samo onda ako pronalazak novih materijala za alate i izradbu alata bude išla ispred razvoja konstrukcijskih materijala.

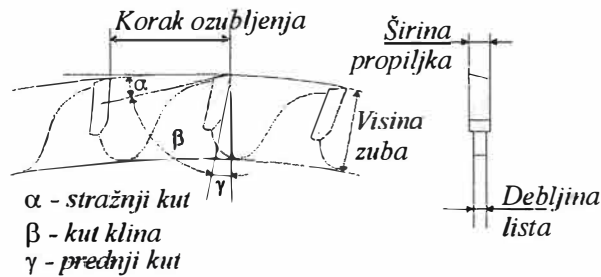
Glede alata za obradbu odvajanjem čestica postavljaju se ovi zahtjevi:

- u jedinici vremena odvojiti što veću količinu čestica
- osigurati zahtijevane dimenzije i geometriju obratka, uz traženu kakvoću obrađene površine
- postići postojanost tvrdoće oštrice pri povišenoj temperaturi
- osigurati dovoljnu čvrstoću i žilavost oštrice alata da bi izdržala statička i dinamička mehanička naprezanja pri obradbi odvajanjem čestica
- postići prihvatljive cijene nabave.

3.2.1. Alat kružne pile 3.2.1. Circular saw tools

Kao alat na kružnim pilama najčešće služi kružna ploča nazubljena po obodu. Vrlo se rijetko susreće alat u obliku nazubljene kalote ili nazubljenoga cilindra.

Na obodu lista nalazi se ozubljenje različitog profila. Budući da je brzina rezanja po smjeru i veličini približno jednaka obodnoj brzini, geometrijski elementi oštrice različitih vrsta ozubljenja mogu se definirati prema slici 1.



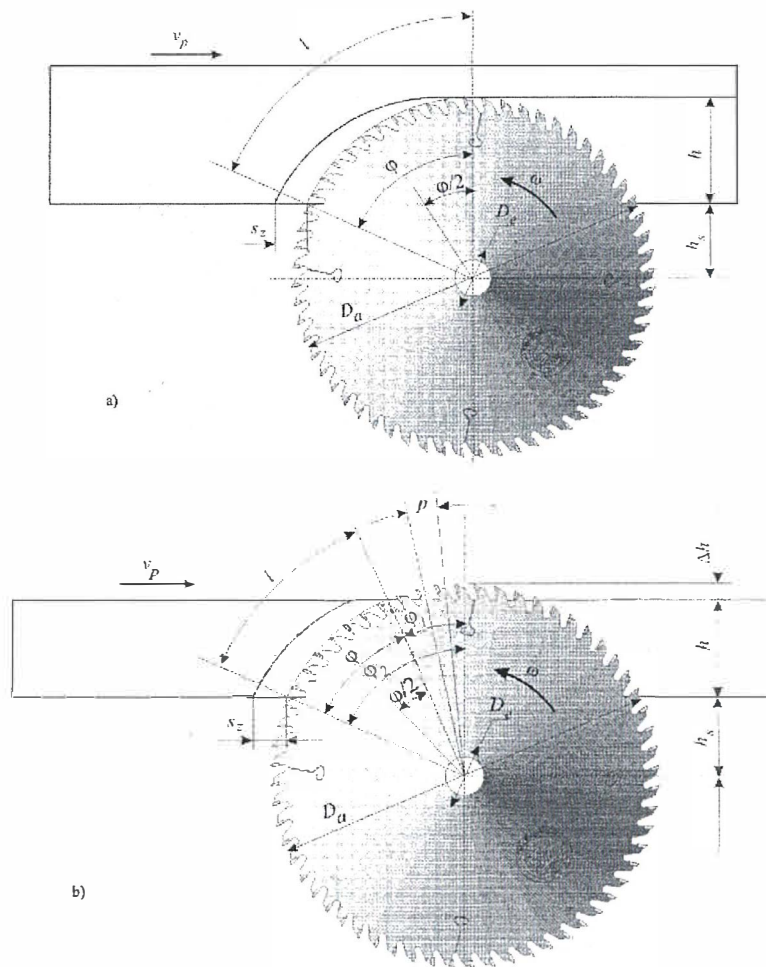
Slika 1.
Osnovne geometrijske značajke ozubljenja •
Characteristics of saw tooth geometry

Geometrija oštrice ovisi o više čimbenika, npr. o obliku ozubljenja, mokrini drva, vrsti drva i dr. Većina se autora slaže da je najbolja vrijednost stražnjeg kuta 10 do 15° , prednjega kuta pri rezanju tvrdoga drva oko 30° , dok se pri rezanju mekoga drva ona kreće u rasponu od 35 do 40° . Iz navedenoga proizlazi da će kut oštrenja za meko drvo imati vrijednost 40 do 45° , a pri rezanju tvrdoga drva 50 do 55° .

Većina proizvođača kružnih pila preporučuje da pri uporabi sinteriranih pločica za geometriju oštrice vrijednost prednjeg kuta bude oko 30° , kuta oštrenja oko 44° , a stražnjeg kuta oko 16° , iako se neće opaziti neke osobite negativne posljedice ako se kut oštrenja poveća i do 60° , a stražnji kut smanji na samo 5° .

3.2.2. Kinematički odnosi kružne pile 3.2.2. The kinematic relations of the circular saw

Da bi se kao i pri ostalim obradbama odvajanjem čestica, ostvarilo rezanje, potrebno je osigurati dva gibanja: glavno, koje isključivo izvodi alat jednolikom kutnom brzinom, i pomoćno. Glavna je brzina smjerom i veličinom jednaka obodnoj brzini točke na reznom bridu. Pomoćno odnosno posmično gibanje uglavnom izvodi obradak, a kod klatnih i poteznih kružnih pila izvodi ga alat. Posmična je brzina pri mehaniziranom pomaku obratka uvijek jednoliko pravocrtna. S obzirom na odnos smjerova glavne i posmične brzine, razlikuje se istosmjerno i protusmjerno rezanje. Na slici 2. prikazano je protusmjerno rezanje kružnom



Slika 2.
Shematski prikaz kružne pile u zahvatu pri protusmjernom rezanju •
A schematic illustration of circular saw at retraction cutting

pilom s osi alata ispod razine stola, kada je:
a) vrh rezne oštrice alata u obratku i b) izvan obratka.

Na slici 2. upotrijebljene oznake imaju ova značenja:
 D_a - promjer alata
 h_s - visina stola
 Δh - najmanja visina alata izvan obratka
 h - visina rezanja
 D_e - promjer priрубnice.

Zahvat rezne oštrice ostvaruje se na luku l , pri čemu je trenutačna brzina oštrice jednaka vektorskom zbroju glavne i posmične brzine. Glavna brzina na reznom luku promjenjivog je smjera i veličine. Promotrimo li bilo koju točku reznog brida, opazit ćemo da ona opisuje cikloidu jednako koraka, pri čemu je i luk l dio te cikloide. Međutim, zbog velikog odnosa glavne i posmične brzine (≥ 60 m/min) luk cikloide može se poistovjetiti s lukom kružnice pri rotaciji promatrane točke na reznom bridu. Uvođenjem toga pojednostavnjenja duljinu luka zahvata moguće je odrediti iz izraza:

$$l = \frac{O}{360} \cdot \varphi = \frac{D_s \cdot \pi \cdot \varphi}{360} = \frac{D_s}{2} \cdot \text{arc}\varphi \quad (1)$$

Kut zahvata φ može se odrediti iz relacije

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \quad (2)$$

Kutovi φ_1 i φ_2 ovise o promjeru lista pile D_a , visini rezanja h i visini alata izvan obratka Δh .

Debljina odvojene čestice po duljini luka zahvata mijenja se postupno od najmanje vrijednost δ_{\min} do najveće vrijednosti δ_{\max} .

Srednji kut zahvata može se odrediti iz relacije:

$$\varphi_{sr} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2} \quad (3)$$

Geometrija oštrice u interakciji s kinematičkim odnosima ima presudno značenje na kakvoću bočnih piljenih ploha. Na samom obratku mora se razlikovati hrapavost u smjeru glavnoga gibanja (mjeri se u smjeru obradbe – uzdužna hrapavost) i hrapavost u smjeru posmičnoga gibanja (mjeri se okomito na tragove obradbe - poprečna hrapavost).

Hrapavost u smjeru glavnoga gibanja može se odrediti na osnovi čimbenika o kojima i ovisi to su:

- brzina rezanja
- naljepci na prednjoj površini alata
- vrsta drva
- geometrija reznog dijela alata
- veličina elastične deformacije sustava stroj - alat - obradak.

Hrapavost u smjeru pomoćnoga gibanja može se približno odrediti na osnovi:

- geometrije reznog dijela alata
- kinematike rezanja.

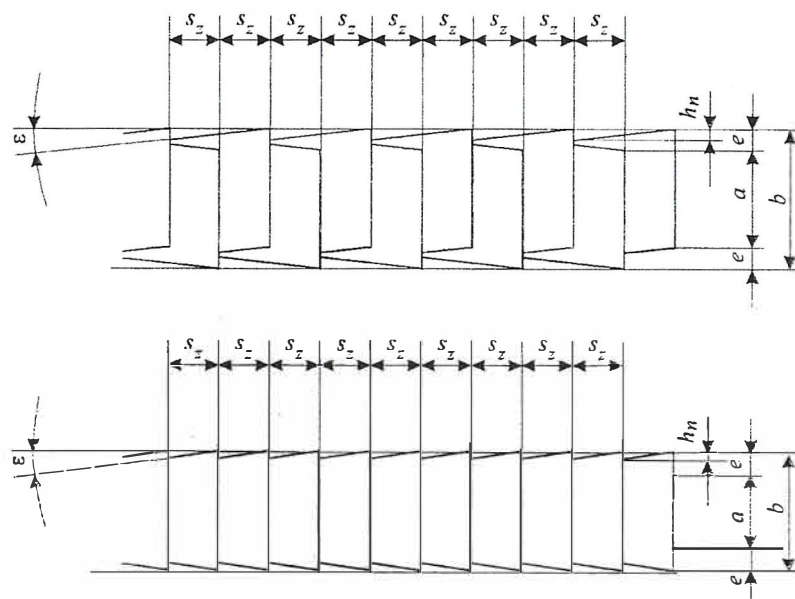
Teorijska hrapavost pri rezanju kružnom pilom uvjetovana je veličinom posmaka po zubu. Ako pogledamo sliku nastajanja propiljka kod listova kružnih pila u kojih je rezni dio izrađen od sinteriranih karbida (sl. 3.a), onda se visina teorijskih neravnina može iskazati relacijom:

$$h_n = s_z \cdot \tan \varepsilon \quad (4)$$

gdje je ε kut nagiba bočne oštrice.

Za rezanje s razvrćenim zubima (sl. 3.b) teorijska visina neravnina može se odrediti pomoću izraza:

Slika 3.
Shema nastajanja propiljka • A diagram of kerf making



$$h_n = 2s_z \cdot \tan \varepsilon \quad (5)$$

Ako neki zub više strši, on zbog svog nadvišenja ostavlja dodatnu hrapavost. Neravnine na bočnim obrađenim ploham mnogo su veće od teorijskih neravnina.

3.2.3. Utjecaj lista pile na kakvoću bočnih ploha rezanja

3.2.3. The impact of the saw blade upon the quality of the cant cutting surfaces

Stvarna kakvoća bočnih ploha rezanja uglavnom ovisi o bočnoj stabilnosti lista pile. Pritom se nastoje pomiriti međusobno oprečni zahtjevi: povećanje bočne stabilnosti i smanjenje debljine lista. Napori usmjereni na povećanje bočne stabilnosti lista mogu se promatrati sa stajališta:

- smanjenja unutarnjih naprezanja
- analize i određivanja kritične frekvencije vrtnje lista pile
- vođenja lista pile.

3.2.3.1. Analiza naprezanja pri rotaciji ravne simetrične kružne ploče

3.2.3.1. The analysis of the strain during the rotation of the flat symmetric circular table

U listu kružne pile pri njegovoj se rotaciji tijekom rada pojavljuju *tangencijalna* ili *posmična* (σ_t) i *radijalna* (σ_r) naprezanja.

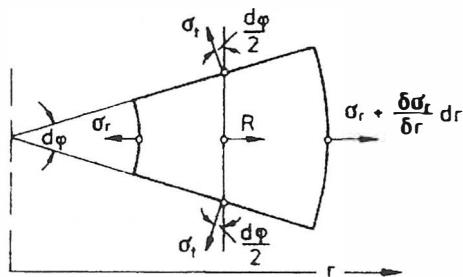
Izračun raspodjele naprezanja lista kružne pile oslanja se na proračun naprezanja homogene kružne ploče sa središnjim provrtom za prihvat. Kružna ploča je stalnoga i *Poissonova* koeficijenta. Kružna ploča vanjskoga promjera D_a i debljine H pričvršćena je s dvije prirubnice promjera D_e . Te se neelastične prirubnice u mehanici promatraju kao kruto tijelo. Za sva naprezanja vrijedi *Hookeov zakon*. Nadalje, za ravnu se kružnu ploču pretpostavlja da ima simetričan raspored naprezanja koji je po presjeku stalan. Na slici 4. dan je element kružne ploče s rasporedom naprezanja.

Pomoću uvjeta ravnoteže između radijalnih i tangencijalnih naprezanja, kako je predočeno na slici 4, može se napisati:

$$\left(\sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right) (r+dr) \cdot d\varphi - \sigma_r r d\varphi - 2\sigma_t \sin \frac{d\varphi}{2} dr + R \cdot r \cdot dr d\varphi = 0 \quad (6)$$

pri čemu je R obujamna radijalna sila.

Pojednostavnimo li prethodnu jednadžbu i diferencijalni član drugoga reda



Slika 4.

Element kružne ploče sa središnjim provrtom u kojem prevladava ravninsko naprezanje • The circular table unit with flat surface tension

izjednačimo s nulom, tada za male kutove proizlazi:

$$\frac{d(r \cdot \sigma_r)}{dr} - \sigma_t + R \cdot r = 0 \quad (7)$$

Ako s u_r označimo pomak u radijalnom smjeru kao funkciju polumjera, a s ε_r deformaciju u radijalnom smjeru, pomoću Hookeova zakona za ravninsko naprezanje može se napisati jednadžba:

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \cdot \sigma_t) \quad (8)$$

$$\varepsilon_t = \frac{u_r}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \cdot \sigma_r)$$

Uzmemo li u obzir da je vanjski dio ploče pod utjecajem povišene temperature, jednadžbi (8) mora se dodati član za temperaturnu deformaciju:

$$\varepsilon_r = \frac{du_r}{dr} = \frac{1}{E} (\sigma_r - \nu \cdot \sigma_t) + \alpha \cdot \vartheta \quad (9)$$

$$\varepsilon_t = \frac{u_r}{r} = \frac{1}{E} (\sigma_t - \nu \cdot \sigma_r) + \alpha \cdot \vartheta$$

Pomoću izraza (6) i (8) može se dobiti diferencijalna jednadžba koja nakon dvostrukoga integriranja daje izraz za funkciju pomaka u radijalnom smjeru $u_r(r)$:

$$u_r = (1 + \nu) \cdot \alpha \cdot \frac{1}{\alpha} \int \int g(r) r dr - \frac{1 - \nu^2}{E} \cdot \frac{1}{r} \int \left[r \int R(r) dr \right] dr + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (10)$$

Prvi dio te jednadžbe uzima u obzir temperaturnu razliku, a drugi dio pomak zbog centrifugalne sile. Integracijske stalnice C_1 i C_2 određuju se iz rubnih uvjeta.

a) Naprezanje zbog centrifugalne sile

Uz pretpostavku da kružna ploča ima stalnu temperaturu kao u jednadžbi (10), može se napisati:

$$u_r = -\frac{1-\nu^2}{E} \cdot \frac{1}{r} \int \left[r \int R(r) dr \right] \cdot dr + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (11)$$

U tome primjeru obujamna radijalna sila R ima značenje centrifugalne sile, stoga proizlazi:

$$R(r) = \omega^2 \cdot r \cdot \rho \quad (12)$$

U toj je jednadžbi ω kutna frekvencija rotirajućeg diska.

Ako se jednadžba (12) uvrsti u (11) i provede dvostruko integriranje, izraz za radijalni pomak glasi:

$$u_r = \frac{(1-\nu^2) \omega^2 \cdot \rho}{8E} \cdot r^3 + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (13)$$

Nakon određivanja stalnica C_1 i C_2 za radijalni pomak primjenom jednadžbe (8) mogu se postaviti izrazi za izračun radijalnih i posmičnih naprezanja lista kružne pile

$$\sigma_r = \frac{\rho \cdot \omega^2}{8} \left[K_2(1+\nu) - r^2(3+\nu) - \left(\frac{r_c}{r} \right)^2 (1-\nu)(r_c^2 - K_2) \right] \quad (14)$$

$$\sigma_t = \frac{\rho \cdot \omega^2}{8} \left[K_2(1+\nu) - r^2(1+3\nu) + \left(\frac{r_c}{r} \right)^2 (1-\nu)(r_c^2 - K_2) \right], \quad (15)$$

gdje je:

$$K_2 = \frac{r_a^4(3+\nu) + r_c^4(1-\nu)}{r_a^2(1+\nu) + r_c^2(1-\nu)}$$

b) Naprezanje pri zagrijavanju ploče

Kao i pri proračunu naprezanja zbog djelovanja centrifugalne sile, i pri izračunu radijalnoga pomaka zbog toplinskoga opterećenja ploče polazi se od jednadžbe (11), u kojoj je član za centrifugalnu silu izjednačen s nulom:

$$u_r = (1+\nu) \cdot \alpha \cdot \frac{1}{r} \int \vartheta(r) \cdot r dr + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (16)$$

Temperaturna raspodjela $\vartheta(r)$ pri rezanju drva kružnom pilom može se približno prikazati kubnom parabolom, čije je tjeme u središtu kružne pile, a najveća se vrijednost nalazi na rubu lista kružne pile.

Ako s $\Delta\vartheta_m$ označimo temperaturnu razliku između temperature na vrhu lista pile (temperatura u području rezanja) i temperaturu u blizini središnjeg provrta, raspodjela temperature može se opisati pomoću sljedećega izraza:

$$\vartheta(r) = \Delta\vartheta_m \cdot \left(\frac{r}{r_3} \right)^3 \quad (17)$$

Nakon uvrštavanja jednadžbe (17) u (16) dobije se izraz za radijalni pomak:

$$u_r = \frac{(1+\nu) \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta_m}{144} \cdot \frac{r^4}{4} + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r}, \quad (18)$$

odnosno:

$$u_r = K_3 \cdot r^4 + C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (19)$$

Uvrštenjem jednadžbe (19) u (9), dobije se izraz za radijalno i tangencijalno naprezanje u listu kružne pile pri povišenoj temperaturi:

$$\sigma_r = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta_m}{5} \quad (20)$$

$$\left[-\left(\frac{r}{r_a} \right)^3 - \left(\frac{r_a}{r} \right)^2 \cdot K_4 + K_5 \right]$$

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta\vartheta_m}{5} \quad (21)$$

$$\left[-4\left(\frac{r}{r_a} \right)^3 - \left(\frac{r_a}{r} \right)^2 \cdot K_4 + K_5 \right]$$

$$K_4 = \frac{\left(\frac{r_c}{r_a} \right)^5 (1+\nu) + \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 (1-\nu)}{(1+\nu) + \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 (1-\nu)}$$

$$K_5 = \frac{\left[1 - \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^5 \right] (1+\nu)}{(1+\nu) + \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^2 (1-\nu)}$$

Faktori K_4 i K_5 ovise samo o odnosu promjera D_e/D_a i o Poissonovom broju.

Na taj je način raspodjela naprezanja zbog zagrijavanja oboda lista kružne pile potpuno opisana.

c) Naprezanje zbog napinjanja lista kružne pile

Napinjanje je potrebno zbog toga što različiti faktori mogu utjecati na naprezanje i produljenje vanjske zone pile u odnosu prema unutarnjoj. Posljedica toga je činjenica da list pile tijekom rezanja gubi stabilnost u bočnom smjeru. Veličina sile kojom se napinje ovisi o više čimbenika:

- promjeru lista pile
- brzini rezanja
- broju zubi
- vrsti drva koje se reže
- raspoloživoj snazi.

Za kružne pile velikih promjera, veće debljine i one koje rade velikom frekvencijom vrtnje uvriježeno je pravilo da ih treba jače napinjati nego tanje pile, malih promjera, koje rade manjim frekvencijama vrtnje.

U praksi su poznata tri različita postupka napinjanja lista kružne pile: *napinjanje lista pile valjanjem, mehaničko napinjanje čekićima i toplinsko napinjanje.*

Na slici 5. prikazan je list kružne pile opterećen valjcima na promjeru D_w aksijalnom silom F_w pomoću dvaju valjaka.

List se pile propušta između dva tijela bačvasta oblika koji rotiraju oko nepomične osi. Preko bačvica na list pile djeluje se silom F_w koja uzrokuje plastičnu deformaciju. Tim je valjanjem kružna ploča podijeljena na dvije zone, unutarnju ($r_i \leq r \leq r_w$) i vanjsku ($r_w \leq r \leq r_a$). Zbog zanemarive širine valjanja može se smatrati da je tlak na mjestu valjanja p_w za vanjsku i unutarnju zonu jednak. Ta se raspodjela naprezanja može opisati i matematički.

Polazna jednadžba (10) za izračun naprezanja nerotirajuće kružne ploče jednolike temperature (bez temperaturnoga gradijenta) koje je posljedica napinjanja

valjanjem poprima oblik:

$$u_r(r) = C_1 \cdot r + \frac{C_2}{r} \quad (22)$$

Uvrštenjem izraza (21) u (22) dobivamo jednadžbu za radijalno naprezanje

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[C_1(1+\nu) - \frac{C_2}{r^2}(1-\nu) \right] \quad (23)$$

i za tangencijalno naprezanje:

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left[C_1(1+\nu) + \frac{C_2}{r^2}(1-\nu) \right] \quad (24)$$

Stalnice C_1 i C_2 za vanjsku i unutarnju zonu određuju se iz graničnih uvjeta.

Sa stalnicama C_1 i C_2 u unutarnjem dijelu može se opisati radijalno naprezanje:

$$\sigma_{ri} = -\frac{p_w \cdot r_w^2}{r_w^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (25)$$

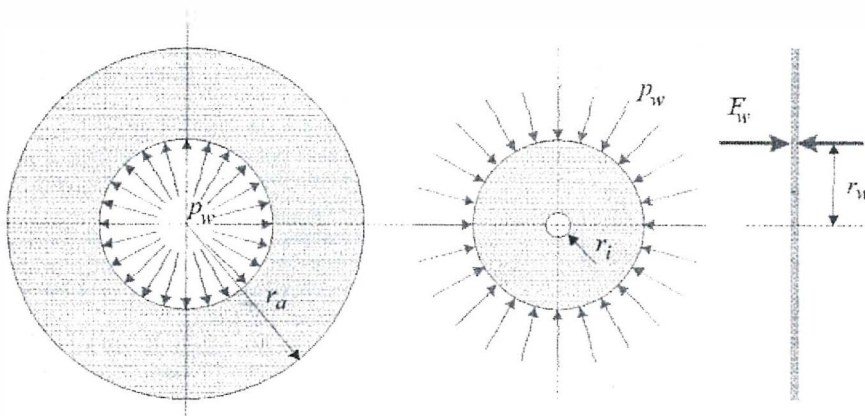
i tangencijalno naprezanje:

$$\sigma_{ti} = -\frac{p_w \cdot r_w^2}{r_w^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (26)$$

Kao u izrazu (25) i (26), radijalno naprezanje vanjskog dijela lista kružne pile računa se prema formuli:

$$\sigma_{ra} = \frac{p_w \cdot r_w^2}{r_a^2 - r_w^2} \left(1 - \frac{r_a^2}{r^2} \right) \quad (27)$$

dok se tangencijalno naprezanje računa prema sljedećoj jednadžbi:



Slika 5. Radijalni tlak p_w pri napinjanju lista kružne pile • Radial pressure occurring with the circular saw blade tension

$$\sigma_{ta} = \frac{p_w \cdot r_w^2}{r_a^2 - r_w^2} \left(1 + \frac{r_a^2}{r^2} \right) \quad (28)$$

Izrazi (25), (26), (27) i (28) u potpunosti opisuju stanje naprezanja valjanjem napetoga lista kružne pile bez temperaturnoga gradijenta. Jednadžbe pokazuju da naprezanje osim o dimenzijama kružne pile ovisi i o radijalnom tlaku p_w koji nije jednostavno opisati u ovisnosti o sili valjanja. Također je vrlo teško navesti kvantitativni utjecaj plastične deformacije valjka na zanemarivo maloj širini valjanja. Apsolutni iznos produljena unutarnje i vanjske zone kružne pile zbog djelovanja radijalnoga tlaka p_w na promjeru $r = r_w$ iznosi

$$\delta = |\delta_i| + |\delta_a|$$

Veličina naprezanja pokazuje ovisnost o širini valjanja. Općenita povezanost između radijalnoga pomaka u_r i radijalnoga i tangencijalnog naprezanja pokazana je u jednadžbi (8).

Uzimajući u obzir sve utjecajne veličine, može se napisati jednadžba za približan izračun srednjega radijalnog produljenja μm :

$$\bar{\delta} = 2,57 \cdot \frac{F_w^2}{H^2} \cdot \left(200 \cdot \frac{D_w}{D_{zg}} \cdot \frac{1}{D_{zg}} - 0,1 \right) \quad (29)$$

gdje je:

F_w - sila valjanja, kN

D_w - promjer valjanja, mm

D_{zg} - podnožni promjer, mm.

Pri tom je izračunu, kako navode Pahlitzsch i Friebe (1973A), moguće odstupanje manje od 10 % za sljedeće uvjete:

podnožni promjer $250 \leq D_{zg} \leq 550$

debljinu lista pile $1,5 \leq H \leq 2,5$

odnos promjera valjanja i podnožnog promjera $0,6 \leq D_w / D_{zg} \leq 0,92$

silu valjanja $5 \leq F_w \leq 12,5$.

Koristeći se izrazom (29), možemo odrediti radijalno i tangencijalno naprezanje u unutarnjem i vanjskom prstenu (segmentu):

$$\sigma_{ri} = \frac{\bar{\delta} \cdot E}{2r_w} \cdot \frac{r_a^2 - r_w^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2} \right) \quad (30)$$

$$\sigma_{ri} = \frac{\bar{\delta} \cdot E}{2r_w} \cdot \frac{r_a^2 - r_w^2}{r_a^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2} \right)$$

4. OSVRT NA POSTAVLJENE CILJEVE I ZAKLJUČCI

4. Comments on the objectives and conclusions

Suvremena proizvodnja sve više teži primjeni rezultata znanstvenih istraživanja u procesu rada te, u skladu s tim rezultatima i razvojnim dostignućima, usavršava organizaciju i načine sudobne obradbe drva. Raščlambe korisnosti novih tehnika, visokoučinskih strojeva i automatizacije proizvodnih procesa svjedoče o tome da proces sustavnoga usavršavanja obradbe nije jednostavan. Razvoj svih tehnologija, pa tako i tehnologije obradbe odvajanjem čestica, uvelike je prožet informatikom i fleksibilnom automatizacijom općenito. Zahtjevi za oblikovanjem procesa koji čine ili prate proizvodni tok vrlo su važni i velik su poticaj istraživačkim naporima. Stoga je i proizvodne procese i obradne strojeve potrebno promatrati u svezi s drugim postupcima i elementima koji pridonose postizanju postavljenih zadaća. Opće je nastojanje svih proizvodnih procesa povećanje mogućnosti obradbe, brzine, točnosti i kakvoće, ujedinjenje mjerne opreme i sofisticirani nadzor procesa i stroja. Prepoznatljivo obilježje suvremenih alatnih strojeva jest zbroj svih postupaka obradbe na jednom stroju, čemu se nerijetko pridružuju i postupci mjerenja, rukovanja alatom i obratkom, a u novije vrijeme i postupci laserom. Time se znatno skraćuju pripremno-završna vremena i povećava proizvodnost obradbe. Obradbe velikim brzinama (HSC) jedan su od odgovora na povećanje proizvodnosti obradnih strojeva. Samo najbolja sveza svih sastavnica koje sudjeluju u procesu - stroj, alat, materijal, izradak i tehnologija obradbe mogu dati najbolje rezultate. Posebnu važnost treba pridati povratnoj svezi između tehnologije obradbe, alatnoga stroja i razvoja odgovarajućega alata te odnosu kvalitete obrađene plohe, cijene izradbe i vremena izradbe.

5. LITERATURA

5. References

1. Brežnjak, M., 1973: Zur Forschung der Einschnittbreite. Holzindustrie, 26 (3), S. 76-78.
2. Brežnjak, M., 1991: Utjecaj uvjeta piljenja na neke pokazatelje djelotvornosti pilanske tehnologije, Sveučilište u Zagrebu, Šumarski fakultet, Zagreb, str. 1-2.
3. Brežnjak, M., Moen, K., 1969: Sawing with Swage set Circular Sawblades with High Betes per Tooth, Sértrykk av Norsk Skogindustri nr. 11: 1-8.
4. Brežnjak, M., Moen, K., 1970: On the Vibration of the Circular Saw Blade under

5. Brežnjak, M., Moen, K., 1972: On the lateral movement of the Bandsaw Blade under various Sawing Conditions, Norsk Treteknisk Institutt, Meddelelse nr. 46, Blindern, juli, pp. 1-91.
6. Bučar, B., Kopač, J., 1996: Dynamic model for the determination of instability of periodic circular cutting of wood tissue, Holz als Roh- und Werkstoff **54**: 19-25.
7. Cebalo, R., Schulz, H., Udiljak, T., 1997: With high speed machining towards 21st century, 4th International Conference on Production Engineering, Opatija, pp. 61-71.
8. Dietz, H., 1977: Sägewerkstechniken zur Verbesserung der Ausbeute und des Arbeitsplatzes, Holz als Roh- und Werkstoff **35**: 283-287.
9. Goglia, V., 1994: Strojevi i alati za obradu drva, Šumarski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, str. 1-236.
10. Goglia, V., Beljo-Lučić, R., 1996: Utjecaj odnosa vlastite frekvencije i frekvencije pobude na buku kružnih pila, Drvna industrija **47**(1): 11-17.
11. Münz, U. V., 1978: Vorspannungszustand und Arbeitsverhalten von Kreissägeblättern, Holz als Roh- und Werkstoff **36**: 345-352.
12. Münz, U. V., 1980: Mechanisch und thermisch erzeugte Spannungen in Kreissägeblättern, Holz als Roh- und Werkstoff **38**: 201-208.
13. Mote, C. D., Szymani, R., 1977: Principal Developments in Thin Circular Saw Vibration and Control Research, Part 1: Vibration of Circular Saws, Holz als Roh- und Werkstoff **35**: 189-196.
14. Mote, C. D., Zhu, W. H., 1984: Aerodynamic Far Field Noise in Idling Circular Sawblades, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, July, Vol.106: 441-446.
15. Mote, C.D., Holøyen, S., 1973: The temperature distribution in Circular Saws during cutting, Norsk Treteknisk Institutt, Meddelelse nr. 49, Blindern, november, pp. 1-30.
16. Mote, C.D., Holøyen, S.1973A: Theory and experiment on the optimal operation of circular saws, Norsk Treteknisk Institutt, Meddelelse nr. 48, Blindern, november, pp. 1-28.
17. Nikolić, G., 1987: Predavanja iz kolegija Automatizacija proizvodnje na III. stupnju, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
18. Noguchi, M., Umetsu, J., 1988: A new tensioning method of Circular Saws using heat treatment, IUFRO Working Party S5.04-08 Milling and Machining, Sao Paulo, Brazil, Wednesday, May 18, pp. 1-5.
19. Pahlitzsch, G., 1967: Aspects of Chain Saw cutting. Wood Machining Seminar, Forest Products Laboratory, Richmond, October, 10-11, pp. 38-56.
20. Pahlitzsch, G., Friebe, E., 1973A: Über das Vorspannen von Kreissägeblättern, Zweite Mitteilung, Holz als Roh- und Werkstoff **31**: 457-463.
21. Pahlitzsch, G., Friebe, E., 1974: Über das Vorspannen von Kreissägeblättern, Dritte Mitteilung, Holz als Roh- und Werkstoff **32**: 5-12.
22. Reineke, L.H., 1964: Factors Affecting Saw Capacity, Forest Products Journal Vol. **XIV**, June, pp. 235-238.
23. Salje, E., Bartsch, U., 1977: Geräuschuntersuchung an Kreissäge- und Vorritzsägeblättern für die Holzbearbeitung, Holz als Roh- und Werkstoff **35**: 179-181.
24. Schmitt, T., 1997: High speed millin machines, 4th International Conference on Production Engineering, Opatija, pp. 17-25.
25. Schulz, H., 1997: Gegenwärtiger Stand und weitere entwicklungen der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung, 4th International Conference on Production Engineering, Opatija, S. 1-8.
26. Šavar, Š., 1990: Obrada metala odvajanjem čestica, I. dio - teorijske osnove, Školska knjiga, Zagreb, str. 1-194.
27. Udiljak, T., 1996: Doprinos razvoju metoda za ispitivanje i praćenje stupnja istrošenosti oštrice reznog alata, Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje, disertacija, Zagreb, str. 1-123.

Osobna iskaznica "Hrvatskih šuma"

"Hrvatske šume" - javno poduzeće za gospodarenje šumama i šumskim zemljištima u Republici Hrvatskoj, p.o. Zagreb, djeluju od 1. siječnja 1991., a temeljna im je zadaća gospodariti državnim šumama i šumskim zemljištima.

"Hrvatske šume", p.o. Zagreb, gospodare s oko 80% svih šuma i šumskog zemljišta i zauzimaju 43% kopnene površine Republike Hrvatske.

Temeljno je načelo hrvatskog šumarstva potrajno gospodarenje. U skladu s tim, Zakon o šumama obavezuje na jednostavnu i proširenu biološku reprodukciju šuma. Jednostavna biološka reprodukcija obuhvaća pripremanje radova u obnovi sastojina, doznaku stabala i prosjecanje šuma. Ti se radovi obavljaju u skladu sa šumskogospodarskom osnovom koja vrijedi do 2005. godine na ploštini oko 328.000 ha. Proširena biološka reprodukcija obuhvaća plantažiranje i pošumljivanje neobraslih površina te konverziju i sanaciju sastojina na ploštini oko 97.918 ha. Sve su to šumskouzgojni radovi, koji s radovima na zaštiti šuma predstavljaju značajan dio šumske djelatnosti. Najveći dio ovih radova financira se prihodom od prodaje drva, budući da Zakon o šumama i načelo potrajnosti nalažu vraćanje stečenih prihoda u šumu.

Od ostalih gospodarskih djelatnosti šumarstvo se razlikuje:

- posebno dugom ophodnjom ili proizvodnim ciklusom; katkad prođe i 150 godina između početka i svršetka proizvodnog procesa, od ulaganja kapitala do ostvarenja prihoda;

- obavezom održavanja proizvodne osnove na nepromjenjenoj razini, odnosno održanja opstojnosti šume i potrebne biomase za kakvoćni prirast drveta;

- obavezom obnove šuma na krškom zemljištu mediteranskog i submediteranskog pojasa od Savudrije do Prevlake, posebno značajnog za turizam;

- obavezom održanja i poboljšanja opće korisnih i ekoloških funkcija šume.

Šuma veže znatnu količinu ugljičnog

dioksida, stvara kisik, sprječava eroziju tla, održava zalihu pitke vode te čuva postojeći, prirodni vodni režim; ona je mjesto za razonodu i odmor i, napokon, pridonosi stalnosti globalnog ekosustava. Zato su "Hrvatske šume" dužne gospodariti šumama višenamjenski;

- konačno, drvo kao tvorivo rijetka je obnovljiva tvar koja se može izravno tehnički rabiti.

Šumarstvo ima energetske pozitivnu bilancu te mali utrošak energije po jedinici proizvoda.

Ustroj je "Hrvatskih šuma" - javnog poduzeća za gospodarenje šumama i šumskim zemljištima u Republici Hrvatskoj, p.o. Zagreb, troštupanski - Direkcija u Zagrebu, 16 uprava šuma i 171 šumarija. "Hrvatske šume" imaju oko 10.000 zaposlenika, pri čemu oko 12000 s akademskom naobrazbom.

U 1996. godini "Hrvatske šume" su na gospodarenju šumama obavile oko 50% radova vlastitim zaposlenicima i sredstvima rada, a 50% radova putem usluga drugih. Poduzeće gospodari s 13.669 km tvrdih šumskih cesta, što je duljinski oko 50% svih javnih prometnica Hrvatske. Tijekom 1995. izgrađeno je vlastitim sredstvima 90,3 km donjega stroja i 86,2 km gornjega stroja šumskih cesta te 320 km protupožarnih prosjeka.

U 1996. godini sječni je etat "Hrvatskih šuma" iznosio 4.934.000 m³, a prirast drveta iznosio je 8.123.000 m³. "Hrvatske šume" financiraju znanstvenoistraživački rad Šumarskog fakulteta i Šumarskog instituta u godišnjem iznosu od 6.900.000 kn. One gospodare s dijelom, točnije 30 državnih lovišta, gdje se danas kao prvenstvena zadaća nameće obnova ratom uništenoga fonda divljači.

Višenamjenski potrajnim gospodarenjem šumama i šumskim zemljištem, kojim se podjednako osiguravaju ekološke, općekorisne i gospodarske funkcije šume, "Hrvatske šume", p.o. Zagreb, uvećavaju nacionalno bogatstvo i pridonose opstojnosti hrvatske države.