

# VLOGA CEPILNE FRAKTURE V PROCESU FORMIRANJA ODREZKA PRI ORTOGONALNEM ODREZAVANJU

The role of cleavage type fracture in the process of chip formation during orthogonal cutting

*Izvleček: Prikazani so pogoji napredovanja oz. loma odrezka tipa I pri ortogonalnem premočrtnem odrezavanju bukovine (Fagus sylvatica) v smeri 90°-0°. Orientirane vzorce lesnega tkiva smo odrezovali z rezilom s prsnim kotom 31° in 42°. Debelina odrezka se je gibala med 0,1 mm in 0,3 mm. Med odrezavanjem so se tvorili segmentirani odrezki, pri čemer je dolžina segmenta naraščala z debelino odrezka. Z metodo končnih elementov smo modelirali odrezek različne dolžine in debeline. Na osnovi izmerjenih mehanskih lastnosti obdelovanega materiala smo izračunali upogibno oz. tlačno trdnost odrezka in faktor koncentracije napetosti na konici razpoke. Napetosti, ki so posledica upogiba odrezka, se pri konstantnem faktorju koncentracije napetosti z naraščanjem razpoke povečujejo. Z upoštevanjem pogoja, da razpoka lahko napreduje zgolj tedaj, ko je faktor koncentracije napetosti  $K$  na konici razpoke enak kritičnemu faktorju koncentracije napetosti  $K_C$ , in ko je upogibna oz. tlačna napetost  $\sigma_x$  v odrezku manjša od trdnosti  $\sigma_u$ , lahko izračunamo dolžino segmenta odrezka. Odrezek oz. razpoka napreduje vse dokler tlačna napetost ne doseže trdnosti ( $\sigma_x = \sigma_u$ ). Izračunane vrednosti se zelo dobro ujemajo z izmerjenimi. Spremembe dolžin segmentov odrezka so občutne že pri relativno majhnih spremembah upogibne trdnosti in kritičnega faktorja koncentracije napetosti.*

*Ključne besede: fraktura, odrezek, ortogonalno odrezavanje, razplastitev lesnega tkiva*

*Abstract: The conditions of chip propagation or chip break in orthogonal oblique cutting of beech wood (Fagus sylvatica) in the 90°-0° direction for a type-I chip are shown. Oriented wood samples were cut at a rake angle of 31° and 42°. The chip thicknesses varied from 0.1 mm to 0.3 mm. During the cutting segmented chip was formed. The segment length increased with the chip thickness. For the modelling of chips of varying length and thickness, the finite element method was used. Using the data obtained from the measured specimen properties, we calculated the compressive stress in the chip and the stress intensity factor at the crack tip. The stresses increase with the crack length at the constant stress intensity factor. Considering the necessary conditions for the crack propagation i.e. the stress intensity factor  $K_I$  at the crack tip equals the critical stress intensity factor  $K_{IC}$ , and the compressive stress  $\sigma_x$  in the chip is smaller than the strength  $\sigma_u$ , the segment length of the chip can be calculated. The crack propagates until the compressive stress reaches the ultimate value. Comparing the calculated and the measured values a good agreement between them was obtained. The results showed a large sensitivity of the chip segment length. It is significantly changed even at the slightest changes of compressive strength and critical stress intensity factor.*

*Keywords: fracture, chip, orthogonal cutting, wood tissue delamination*

## UVOD

Odrezovanje je proces obdelave lesa, kjer s specifično oblikovanim rezilom nadzorovano odstranjujemo del materiala. Pri tem želimo, da je kvaliteta obdelane površine čim boljša, poraba energije pa čim manjša. Za doseganje omenjenih pogojev je potrebno poznati, kaj se dogaja z

\* asist. dr., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, e-pošta: miran.merhar@bf.uni-lj.si

\*\* prof. dr., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za lesarstvo, Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, e-pošta: bojan.buca.r@bf.uni-lj.si

materialom, ki ga odstranjujemo in z materialom, ki ostane po odrezovanju. Da bi čim bolj spoznali omenjeno dogajanje, so bile v preteklosti opravljene številne raziskave. Eno prvih raziskav je opravil Franz (cit. po Koch, 1985), ki je odrezke, nastale pri različnih pogojih odrezavanja, označil kot tip I, II in III. Omenjeni način označevanja se uporablja še danes. Dobro znano je tudi delo McKenzieja (1960, 1962), ki se je ukvarjal z odrezavanjem v smeri  $90^{\circ}$ - $90^{\circ}$

Z odrezavanjem v smeri  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$  se je ukvarjal tudi Sitkei (1983), ki je odrezek modeliral kot konzolni nosilec na elastični podlagi. Predpostavil je, da pred konico rezila nastane razpoka. Pogoj za napredovanje le-te pa je, da so vzdolžne tlačne napetosti v odrezku manjše od porušnih, in da so prečne natezne na konici razpoke enake porušnim.

Eden prvih, ki je pri modeliranju odrezka uporabil zakonitosti lomne mehanike, je bil Triboulot (1983). Za različne prsne kote odrezavanja je izračunal faktor koncentracije napetosti  $K$  za razcepni (I) in strižni (II) fraktorni način. Predpostavil je, da nastaneta prevladujoča tipa odrezkov I in II zgolj kot posledica lomnega načina. Odrezek tipa I nastane s cepitvijo materiala pred samo konico rezila, odrezek tipa II pa naj bi nastal kot posledica nastanka strižnega loma. V obeh primerih se fraktura razširi, ko je koeficient koncentracije napetosti enak kritičnemu.

Williams (1998) je uporabil energijski princip, pri katerem je upošteval disipacijsko energijo zaradi trenja med obdelovancem in rezilom, energijo zaradi upogibnih plastičnih deformacij odrezka pred konico rezila in energijo za nastanek novih površin. Pri dovedeni energiji je upošteval zgolj vzporedno komponento rezalne sile.

Atkins (2003) je za analizo procesa odrezavanja lesa uporabil kar svoj model, ki je bil v osnovi razvit za analizo nastanka odrezka pri odrezavanju kovine. Poleg strižnih napetosti v strižni ravnini in posledično plastične deformacije upošteva tudi delo za nastanek novih površin ter koeficient trenja med odrezkom in rezilom. Model obravnava izključno kontinuiran nastanek odrezka.

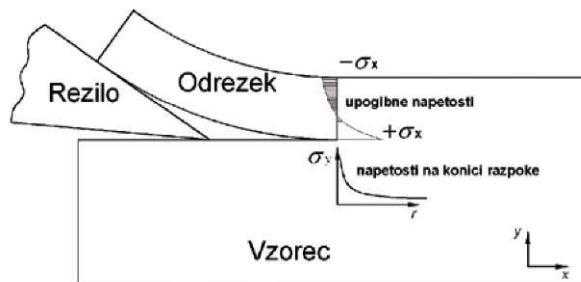
Opisana dela navajajo različne načine modeliranja odrezovanja lesa. Skupno vsem je, da opisujejo pogoje za napredovanje odrezka. McKenzie in Sitkei sta postavila pogoj za napredovanje, pri katerem je napetost pravokotno na smer odrezovanja pred konico rezila enaka porušitveni. Triboulot je za pogoj napredovanja odrezka postavil kar vrednost kritičnega faktorja koncentracije napetosti. Williams in Atkins pa sta z uporabo fraktorne mehanike modelirala nastanek kontinuiranega odrezka. Nihče od omenjenih raziskovalcev pa ni modeliral oz. prikazal prehoda med napredovanjem odrezka in lomom le-tega. McKenzie in Sitkei sta sicer nakazala pogoj, pri katerem se odrezek zlomi, njegovo napredovanje pa se ustavi, ven-

dar samega pogoja loma nista modelirala. Podobno je postopal tudi Triboulot, Atkins in Williams pa sta, kot smo že omenili, obravnavala izključno kontinuiran odrezek.

Ker gre pri nastanku odrezka nedvomno za pojav frakture, je potrebno pri nastajanju odrezka upoštevati tudi fraktorne lastnosti lesa. Širjenje fraktur v orientiranih vzorcih lesa je bil v preteklosti predmet številnih raziskav. V številnih publikacijah avtorji navajajo metode za izračun koeficienta koncentracije napetosti, ki veljajo zgolj za simetrično obremenjene vzorce (Sih, 1965; Saouma, 1986; Stanzl-Tschegg, 1995; Schachner, 2000; Banks-Sills, 2005). Poleg tega gre v vseh omenjenih publikacijah za kontinuirano širjenje razpoke oziroma cepljenje materiala z ume-tno povzročeno iniciacijo frakture. V primeru odrezavanja gre za izrazito nesimetrične vzorce in posledično tudi za nesimetrične obremenitve, kar pa vpliva tudi na vrednosti koeficienta koncentracije napetosti.

Sila, potrebna za ortogonalno odrezavanje lesa, je izrazito variabilna, kar je izključno posledica izmenjajočih se načinov porušitve materiala. Predpostavljena kronologija nastajanja odrezka je naslednja. Tvorba odrezka se prične s hipno frakturo, ki povzroči izrazito zmanjšanje rezalne sile, hitrost širjenja loma pa bistveno presega hitrost rezila. Iniciacijo omenjene razpoke lahko povzročijo številne diskontinuitete v materialu, ki so najpogosteje posledica zgodovine obremenjevanja materiala. Sledi cepljenje tkiva, ki fenomenološko sovpada z razmerami pri klasičnih frakturnih testih, vse dokler je faktor intenzivnosti napetosti na konici razpoke enak kritičnemu faktorju koncentracije napetosti  $K_I = K_{CC}$ , ter dokler so tlačne napetosti zaradi upogiba v odrezku manjše od porušnih vrednosti. Z večanjem razpoke oz. dolžine segmenta odrezka se tlačne napetosti v odrezku povečujejo. Ko pri določeni dolžini odrezka dosežejo porušno vrednost, nastopi lom upogibno obremenjenega odrezka. Prikaz upogibnih napetosti v odrezku in napetosti na konici razpoke je na sliki 1.

Namen našega dela je analizirati diskontinuirano oziroma intermitenčno nastajanje odrezka tipa I, kot ga navaja



**Slika 1. Upogibne napetosti v odrezku in napetosti na konici razpoke**

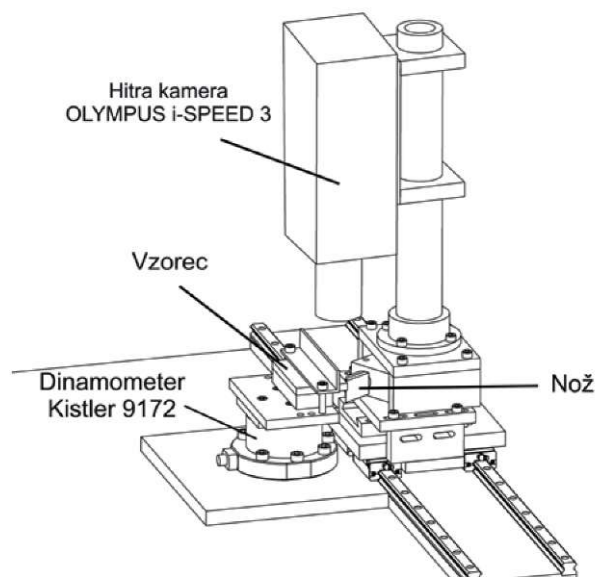
Franz (cit. po Koch, 1985). Z uporabo frakturne mehanike bomo izračunali faktorje koncentracije napetosti in jih primerjali s kritičnimi faktorji koncentracije napetosti. Izračunali bomo tudi napetosti v odrezku zaradi upogiba. Z upoštevanjem obeh izračunov bomo modelirali pogoje za napredovanje oz. lom odrezka.

## MATERIALI IN METODE

### ODREZAVANJE

Odrezavali smo bukove vzorce (*Fagus sylvatica*) dolžine 130 mm in debeline 10 mm. Vzorci so bili brez vizualnih napak, vzdolžno orientirani s tangencialno teksturo, povprečni ravnovesna vlažnost in gostota pa sta znašali 9,5 % oziroma  $678 \text{ kg/m}^3$ .

Vzorec smo pritrdili na 4-komponentni dinamometer Kistler tip 9272, s katerim smo merili sile v smeri in prečno na smer podajanja. Podatke smo zajemali z merilno kartico AT-Mio-16E1 in programsko opremo LabWiev proizvajalca National Instrument. Frekvenca vzorčenja je bila 10 kHz. Proizvajalec dinamometra navaja lastno frekvenco samega dinamometra v smeri in pravokotno na smer podajanja okoli 4 kHz. Za pritrditev vzorca smo na dinamometer namestili še jekleno ploščo mase 1,8 kg, kar je spremenilo njegovo lastno frekvenco. Da bi ugotovili njegovo dejansko lastno frekvenco, smo ga vzbudili v lastno nihanje in izmerili frekvenco lastnih nihanj v obeh smereh. V smeri podajanja smo izmerili okrog 650 Hz, pravokotno na smer podajanja pa 620 Hz. Rezalno hitrost oz. hitrost rezila, ki je znašala 30 mm/s, smo določili tako, da je bila hipotetična frekvenca loma odrezkov bistveno



Slika 2. Eksperimentalni sistem

nižja od lastne frekvence dinamometra. Odrezovanje je potekalo v smeri  $90^\circ-0^\circ$ , preizkušane pa je bil tangencialno orientiran. Odrezovali smo s HSS rezilom z ostrinskim kotom  $30^\circ$ . Rezilo je bilo nameščeno na voziček z vodili, samo podajanje vozička pa je bilo izvedeno s hidravličnim cilindrom. Hitrost podajanja smo spreminjali zvezno z nastavljivim ventilom pretoka. Eksperimentalni sistem prikazuje slika 2.

Debeline odrezkov smo spreminjali korakom v območju od 0,1 mm pa do 0,3 mm. Spremembe so znašale 0,05 mm. Prsni koti rezila so bili  $16^\circ$ ,  $22^\circ$ ,  $31^\circ$ ,  $42^\circ$  in  $54^\circ$ . Pri prsni kotih  $16^\circ$  in  $22^\circ$  so nastajali kontinuirani odrezki tipa II, pri prsni kotih  $31^\circ$ ,  $42^\circ$  in  $54^\circ$  pa so nastajali zgolj diskontinuirani odrezki tipa I. Dolžine segmentov nastalih odrezkov smo izmerili z merilnim mikroskopom.

### LASTNOSTI MATERIALA

Vzorcem smo določili tudi upogibno trdnost  $a_u$ , modul elastičnosti  $E$  in faktor koncentracije napetosti  $K_C$ . Upogibno trdnost in modul elastičnosti smo določili s štiritočkovnim upogibom. Dimenzije vzorcev so znašale 105 mm x 10 mm x 5 mm. Za izračun modula elastičnosti smo uporabili relevantne izmerjene vrednosti pri 40 % obremenitvi materiala. Porušno trdnost smo izmerili tudi s konzolnim vzorcem, kjer je bila konzola debela 0,5 mm, dolga pa 16 mm.

Faktor koncentracije napetosti  $K_C$  smo določili s CT vzorci na trgalnem stroju. Dolžina vzorcev je bila 120 mm, višina 100 mm in debelina 10 mm. Dolžina razpoke je bila 55 mm. Silo smo merili z dinamometrom, pomik v smeri obremenjevanja pa z namensko izdelanim merilnikom pomika. Vzorci so bili tangencialno longitudinalni, kar pomeni, da smo jih obremenjevali v tangencialni smeri, razpoka pa je napredovala v vzdolžni smeri.

Odzivnost materiala smo modelirali tudi s programom Ansys, pri čemer smo za obremenitev predpostavili največjo izmerjeno silo. Preizkušance smo modelirali kot ortotropen material, analizirali pa smo zgolj ravninsko deformacijsko napetostno stanje. Za modul elastičnosti v vzdolžni smeri smo vzeli izmerjenega, ki je znašal 14500 MPa. Preostale manjkajoče podatke, manjkajoča modula elastičnosti, strižne module in Poissonova razmerja pa smo povzeli po Kollmannu (Kollmann, 1984).

Tako so  $E_l = 14500 \text{ MPa}$ ,  $E_r = 1140 \text{ MPa}$ ,  $E_t = 2240 \text{ MPa}$ ,  $\nu_l = 0,518$ ,  $\nu_r = 0,36$ ,  $\nu_t = 0,45$ ,  $G_{lr} = 1055 \text{ MPa}$ ,  $G_{rt} = 460 \text{ MPa}$  in  $G_{lt} = 1600 \text{ MPa}$ .

Faktor koncentracije napetosti  $K$  smo izračunali z uporabo Rice-ovega J integrala (Banks-Sills in sod., 2005)

(1)

kjer je  $r$  pot integracije,  $W$  gostota deformacijske energije

(2)

$n$  normala na pot integracije, vektor poti  $T = \langle \delta n, u_i \rangle$  vektor deformacij in  $d_s$  diferencial poti  $r$ .

Če upoštevamo, da je  $J = G$ , kjer je  $G$  hitrost sproščanja deformacijske energije, ter da je površina razpoke vzporedna z glavno osjo materiala, lahko uporabimo zvezo med  $G$ , ter  $K$  (Sih, 1965)

(3)

kjer je  $F$  ekvivalentni modul elastičnosti

$$E' = \left[ \frac{b_{11}b_{22}}{2} \left( \sqrt{\frac{b_{22}}{b_{11}}} + \frac{2b_{12} + b_{66}}{2b_{11}} \right) \right]^{-1/2} \quad (4)$$

V primeru ravninskega deformacijskega stanja moramo upoštevati

$$b_{ij} = a_{33}^{-1} \quad i, j = 1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

kjer so konstante  $a_{ij}$  podajnostni koeficienti materiala

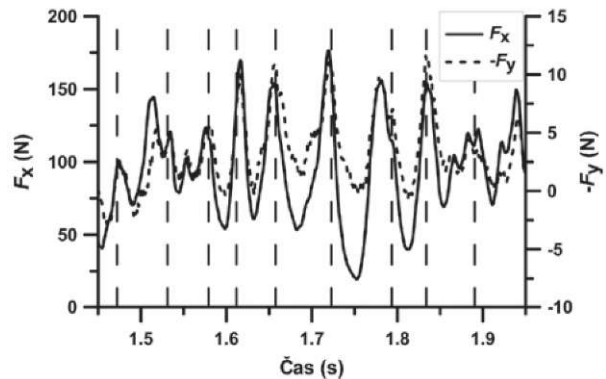
$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E'} \quad \frac{1}{F} = \frac{1}{F'} \quad \frac{1}{C} = \frac{1}{C'}$$

### MODELIRANJE ODREZKA

Debeline modeliranega odrezka  $h$  so bile od 0,15 mm do 0,3 mm z dolžinami  $L$  od 0,5 mm do 2 mm. Pri posamezni debelini in dolžini odrezka smo silo  $F$  obremenjevanja postopno povečevali in vsakič izračunali tlačno napetost v odrezku ter faktor koncentracije napetosti  $K$  na konici razpoke. Iz dobljene odvisnosti lahko izračunamo silo, potrebno za napredovanje razpoke, to je, kadar je faktor koncentracije napetosti enak kritičnemu faktorju koncentracije napetosti  $K_{lc}$ . Iz dobljene sile pa lahko izračunamo napetosti v odrezku. V primeru, da so izračunane napetosti manjše od porušnih, bo razpoka napredovala. V nasprotnem primeru, ko so napetosti enake porušnim, pa se bo odrezek zlomil in razpoka ne bo napredovala.

### REZULTATI IN DISKUSIJA

Slika 3 prikazuje časovni posnetek sile v smeri ( $F_x$ ) in pravokotno ( $F_y$ ) na smer podajanja oz. odrezavanja, za odrezek



Slika 3. Komponente rezalne sile  $F_x$  in negativne  $F_y$  skupaj z dolžinami segmentov odrezka (navpična črtkana črta); debelina odrezka 0,3 mm, prsni kot  $31^\circ$

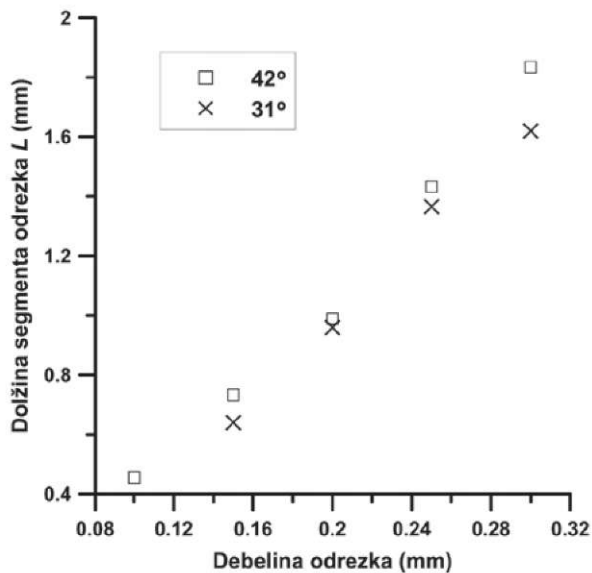
debeline 0,3 mm, nastal pri prsnem kotu rezila  $31^\circ$ . Izrazito nihanje sil je posledica izmenjujočega se delovanja frakture in loma odrezka zaradi upogiba. Ko rezilo pride v stik z lesom, se začne v materialu pred konico kopičiti elastična energija. Ko je nakopičena energija dovolj velika, se ob prisotnosti diskontinuitete v materialu, to je kakršna koli razpoka, nakopičena elastična energija nenadoma sprosti in razpoka hitro napreduje do neke ravnovesne dolžine. Le-ta je odvisna zgolj od količine nakopičene elastične energije. Tik preden se pojavi razpoka, sta komponenti rezalne sile  $F_x$  in  $F_y$  največji. V nadaljevanju rezilo dviguje odrezek, razpoka pa napreduje do trenutka, ko tlačna napetost v odrezku ne doseže porušne vrednosti. Ko se to zgodi, nastopi lom odrezka. Rezalna sila ne pade na vrednost nič oz. na vrednost odzivne sile, ki je posledica pluznega efekta, saj ima odrezek še vedno določeno togost. Ko rezilo ponovno doseže področja loma odrezka, se celotna zgodba ponovi.

Na sliki 4 je prikazan segmentiran odrezek, ki je nastal v procesu nekontinuiranega odrezavanja. Gre za odrezek tipa I, nekontinuiranost procesa pa je posledica spremeljivega snovnega toka materiala v odrezek. Ob 10x povečavi so lepo vidni segmenti odrezka. Povprečne dolžine segmentov odrezka za različne debeline odrezka nastalih pri prsnih kotih  $31^\circ$  in  $42^\circ$  prikazuje slika 5. Iz prikaza je lepo razvidna odvisnost med dolžino segmentov odrezka in njegovo debelino, pri čemer prsni kot na omenjeno odvisnost ne vpliva.

Porazdelitev dolžin segmentov odrezka debeline 0,3 mm, nastalega pri odrezavanju s prsnim kotom  $31^\circ$ , prikazuje slika 6. Razvidna je variabilnost dolžin segmentov vse od 0,7 mm pa do 3 mm. Vzrok za veliko variabilnost dolžine segmentov lahko iščemo v mikro variabilnosti kritičnega faktorja koncentracije napetosti in porušne trdnosti. Variabilnost omenjenih parametrov nedvomno vpliva tudi na velikost rezalne sile, kar je razvidno iz sl. 3.

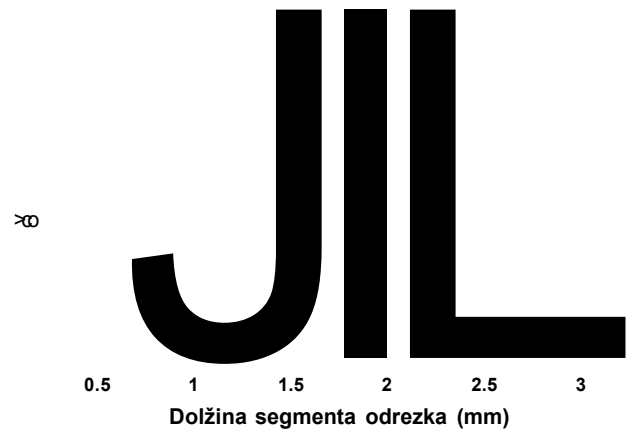
1 mm

Slika 4. Odrezek debeline 0,3 mm s segmenti L, nastal pri prsnem kotu rezila 31°



Slika 5. povprečne dolžine segmentov odrezka v odvisnosti od debeline odrezka in prsnega kota

Povprečna vrednost izmerjenega kritičnega faktorja koncentracije napetosti  $K_{IC}$  znaša 0,63 MPaVm. Trdnost, določena s štiri-točkovnim upogibnim testom, znaša v povprečju 151 MPa, trdnost, določena na konzolno vpetem preizkušancu, pa 185 MPa. Razliko pripisujemo dimenzijam preizkušancev. V primeru štiri-točkovnega testa je bila zaradi večje presečne površine zajeta tudi večja varia-



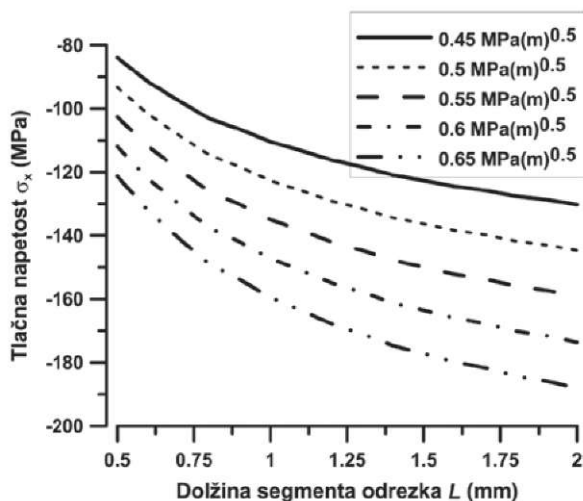
slika 6. porazdelitev dolžin segmentov odrezka debeline 0,3 mm, nastalega pri prsnem kotu 31°

preglednica 1. Izmerjene vrednosti vzorca

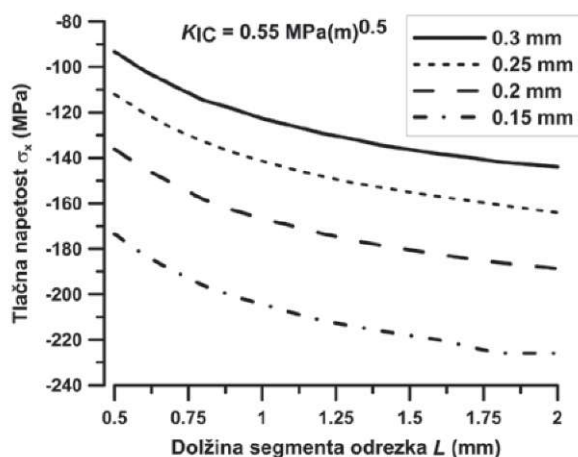
	$K_{IC}$ (MPaVm)	$E$ (MPa)	$\sigma_u$ 4 točk (MPa)	$\sigma_u$ konz. (MPa)
	0,52	13300	145	183
	0,73	13270	150,5	198
	0,68	15700	168,8	190
	0,56	16640	156,4	170
	0,66	13540	136	
		14874	149	
Povp.	0,63	14554	151,07	185,25
Std. odkl.	0,09	1415,38	11,04	11,87

bilnost materiala, posledično pa je povprečna vrednost nižja. V primeru konzolno vpetega preizkušanca pa je bila presečna površina bistveno manjša, kar pomeni bistveno manjši obseg variabilnosti znotraj vzorca, in pa veliko variabilnost med vzorci. V našem primeru smo naleteli na material z bistveno višjo trdnostjo. Izmerjene lastnosti prikazuje preglednica 1.

Na sliki 7 so prikazane izračunane tlačne napetosti v odrezku debeline 0,3 mm v odvisnosti od dolžine segmenta odrezka in faktorja koncentracije napetosti. Evidentno je, da je tlačna napetost v odrezku pri določeni dolžini segmenta v celoti odvisna od vrednosti faktorja koncentracije napetosti, le-ta pa je odvisen od geometrijskih značilnosti korena iniciacijske razpoke. Ker je velika variabilnost



Slika 7. Tlačne napetosti v odrezku debeline 0,3 mm v odvisnosti od dolžine segmenta odrezka  $L$  in faktorja koncentracije napetosti



slika 8. tlačne napetosti v odrezku odrezka pri faktorju koncentracije napetosti  $K_t = 0,55 \text{ MPaVm}$  v odvisnosti od debeline odrezka in dolžine segmenta  $L$

morfologije korena iniciacijske razpoke v lesnem tkivu bolj pravilo, kot izjema, je dokaj samoumevna tudi posledično velika variabilnost faktorja koncentracije napetosti.

Na sliki 8 je prikazan potek tlačnih napetosti v odrezku v odvisnosti od dolžine segmenta odrezka in njegove debeline pri predpostavljeni vrednosti faktorja koncentracije napetosti  $0,55 \text{ MPaVm}$ . Pri tanjših odrezkih je tlačna trdnost dosežena pri bistveno krajših segmentih odrezka, kar pomeni, da je manjši tudi krivinski radij zvitega odrezka. Segmentacija odrezka je v veliki meri povezana s

samo nadzorljivostjo procesa odrezavanja. V primeru, ko je dolžina segmenta odrezka velika, je velika tudi dolžina razpoke, ki nastane kot posledica hipne sprostitve napetosti. Ker se razpoka širi v ravnini, kjer je razplastitev tkiva najverjetnejša, se lahko v primerih, ko smer odrezavanja ne sovпада z ravnino razplastitve, pojavijo določene težave, ki so povezane predvsem z morfologijo površin.

Iz slik 7 in 8 lahko razberemo veliko variabilnost dolžine segmenta odrezka ob dokaj majhnih spremembah kritičnega faktorja koncentracije napetosti in tlačne trdnosti. Glede na variabilnost materiala in različne izmerjene vrednosti, ki jih prikazuje preglednica 1, tako lahko za modul elastičnosti  $E$ , kritični faktor koncentracije napetosti  $K_{Ic}$  kakor tudi upogibne trdnosti  $a_u$ , zaključimo, da je občutna spremenljivost dolžine segmenta odrezka pričakovana. To nedvomno potrjujejo tudi meritve dolžine segmenta odrezka (slika 6), iz katerih je razvidna tudi do 400 % variabilnost dolžine segmenta odrezka.

## ZAKLJUČEK

Prikazana je vloga frakturne mehanike v procesu nastajanja odrezka tipa I. Časovni potek merjenih komponent rezalne sile kaže na to, da v procesu formiranja odrezka tipa I nedvomno prihaja do frakturiranja materiala, ki pa nikakor ni kontinuirano. Ker hitrost gibanja rezila ni enaka hitrosti širjenja frakture oziroma razpoke, je proces odrezavanja diskontinuiran. Morfologija odrezkov potrjuje predpostavljeno kronologijo formiranja odrezka, ki je posledica izmenjujočih se načinov porušitve materiala. Dokazano je bilo, da je dolžina segmenta v odrezku nedvomno zelo občutljiv parameter. Vzrok za veliko variabilnost dolžine segmentov lahko iščemo v mikro variabilnosti kritičnega faktorja koncentracije napetosti in porušne trdnosti.

V izračunih so bile uporabljene metode za linearno stabilno frakturo. Vprašanje je, ali je ta pristop povsem verodostojen. Ugotovili smo, da se les rad nestabilno cepi navkljub enakomernemu prodiranju klina oz. v našem primeru rezila, poleg tega pa se pojavlja tudi »bridging« efekt, kar povzroča nelinearnost. V teku je raziskava stabilnosti cepitve lesa oz. prodiranje razpoke, kjer smo s hitro kamero posneli silo in potek napredovanja razpoke. Navkljub stabilnemu prodiranju rezila v les je razpoka napredovala deloma nestabilno, kar pomeni, da model vtiskanja klina, ki ga je v svojem delu predstavila Stanzl-Tschegg (1995) kot stabilnega, v primeru odrezovanja bukovine ne drži povsem. Problem je nastanek razpoke v še nerazslojenem delu vzorca po lomu odrezka. V tem primeru se rezilo vtiska v les, kjer se kopiči elastična energija. Ob prisotnosti mikro diskontinuitete v materialu se nakopičena energija sprosti in nastala razpoka napreduje do ravnovesne dolžine z zelo veliko hitrostjo. Ko je dose-

žena ravnovesna dolžina razpoke, kjer se porabi nakopičena elastična energija, se razpoka širi skladno s pomikom rezila. Iz časovnega posnetka sil padec hitrosti napredovanja razpoke ni razviden. Sprememba hitrosti postane opazna, če potek sile diferenciramo. Hitrost spremembe sile sovpada s padcem hitrosti napredovanja razpoke, kar smo ugotovili s snemanjem s hitro kamero.

V raziskavi ni upoštevan radij zaokroženosti rezila, ki s svojo geometrijo povzroča plužni efekt. Glede na to, da konic rezila ni absolutno ostra, le-ta prav gotovo vpliva na iniciacijo in napredovanje razpoke.

## ZAHVALA

Ministrstvu za visoko šolstvo znanost in tehnologijo se zahvalujemo za finančno podporo, ki je omogočila nastanek prispevka. Raziskava je bila opravljena v Laboratoriju za mehanske obdelovalne tehnologije v sklopu raziskovalnega programa Razvojna vrednotenja (P2-0182-0481).

## REFERENCE

1. **Atkins A.G. (2003)** Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some long-standing problems. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45:373-396
2. **Banks-sills L., Hershkovitz I., Wawrzynek p.A., Eliasi R., Ingraffea A.R. (2005)** Methods for calculating stress intensity factors in anisotropic material: Part I-z = 0 is a symmetric plane. *Engineering Fracture Mechanics*, 72:2328-2358
3. **Hertzberg R. (1996)** *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering materials*. Wiley, New York
4. **Koch p. (1985)** Utilization of hardwoods growing on southern pine sites. Agriculture handbook no. 605. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Washington
5. **Kollmann F.F.P., Cote W.A. (1984)** *Principles of Wood Science and Technology, Volume I: Solid Wood*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
6. **Le-Ngoc L., McCallion H. (1997)** On the fracture toughness of orthotropic materials. *Engineering Fracture Mechanics*, 58(4):355-362
7. **McKenzie W.M. (1960)** Wood cutting process. *Forest Products Journal*, 10 (9):447-456
8. **McKenzie W.M. (1962)** The relationship between the cutting properties of wood and its physical and mechanical properties. *Forest Products Journal*, 12(6):287-294
9. **Saouma v.E., Sikiotis E.s. (1986)** Stress intensity factors in anisotropic bodies using singular isoparametric elements. *Engineering Fracture Mechanics*, 25(1):115-121
10. **Schachner H., Reiterer A., Stanzl-tschegg s.E. (2000)** Orthotropic fracture toughness of wood. *Journal of Material Science Letters*, 19:1783-1785
11. **Sih G.C., Paris p.c., Irwin G.R. (1965)** On cracks in rectilinearly anisotropic bodies. *International Journal of Fracture Mechanics*, 1(3):189-203
12. **Sitkei G. (1983)** Fortschritte in der Theorie des Spanens von Holz. *Holztechnologie*, 24:67-70
13. **Stanzl-tschegg s.E., Tan D.M., Tschegg E.K. (1995)** New splitting method for wood fracture characterization. *Wood Science and Technology*, 29:31-50

14. **Triboulot P., Asano I., Ohta M. (1983)** An application of fracture mechanics to the wood-cutting process. *Mokuzai Gakkaishi*, 29(2):111-117
15. **Williams J.G. (1998)** Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests. *Journal of Material Science* 33:5351 - 5357