

UDK 534.2:621.91.01

Akustična emisija pri analizi rezalnega procesa

POLDE LESKOVAR, IGOR GRABEC, PETER VEBER

1. UVOD

Vsak proizvodni proces pomeni zaporedje operacij, ki jih moramo opraviti pri izdelavi določenega izdelka. Z obdelovalnim procesom damo bodocu izdelku obliko z določeno natančnostjo dimenzij. Določeno kakovost lahko dosežemo z različnimi postopki izdelave in organizacijskimi prijemmi po različnih poteh. Navadno iščemo pri tem optimalno pot glede na stroške izdelave. Če pa hočemo določiti optimalno pot, moramo znati opisati vplive spremenljivih parametrov.

Med najpogostejše postopke oblikovanja sodi odrezavanje. Najbolj značilen parameter, ki ga uporabljamo pri opisu rezalnega procesa, je hrupavost nastale površine. Ta pa je odvisna od geometrije orodja, razmer pri rezanju, vrste materiala, orodja, obdelovanca in obdelovalnega stroja. Za opis optimalne poti rezalnega procesa bi morali znati izraziti povezanost naštetih parametrov. Pri tem pa naletimo na eksperimentalne in teoretične težave.

Najbolj neposredno lahko opišemo rezalni proces z rezalnimi silami. Nekateri raziskovalci so poskušali opisati rezalni proces s stacionarnim modelom, ki naj bi omogočal napoved rezalnih sil v odvisnosti od lastnosti materiala in razmer pri rezanju. Takšen model naj bi omogočal tudi optimizacijo glede na uporabljeno energijo pri rezanju. Vendar preizkusi niso dali zadovoljivih rezultatov, saj je dandanes znano, da rezalni proces ni stacionaren. Ta prizadevanja so pokazala tudi, da opis plastičnega toka na osnovi mehanike kontinuuma zaradi naključne lastnosti snovi in izredno zapletenih geometrijskih razmer ne pripelje do uporabnih rezultatov.

K napredku pri opisu rezalnega procesa so prispevali E. Bickel, J. Peklenik, T. Sato in T. Mosedale [1, 2, 3, 4, 5], ki so dokazali, da je rezalni proces po naravi naključen. J. Peklenik in T. Mosedale sta analizirala rezalni proces z metodami kiberneteike. Odpovedala sta se opisu na osnovi mehanike kontinuuma in opisala rezalni proces kot kibernetični sistem, ki ga je mogoče okarakterizirati s prenosnimi funkcijami [6, 7]. Te pa lahko določimo eksperimentalno. Takšen sistem tudi omogoča, da lahko poiščemo optimalno pot glede na uporabljeno energijo pri odrezavanju. Meritve prenosnih funkcij na različnih rezalnih procesih in materialih so pokazale, da so funkcije odvisne od raz-

mer pri rezanju. Merjenje ustreznih odvisnosti lahko zato rabi za identifikacijo rezalnega procesa [8, 9].

Doslej so bile opravljene meritve prenosnih funkcij v nizkem frekvenčnem območju, ki ustreza področju pričakovanih mehanskih nihanj orodja in obdelovanca, tj. do približno 10 kHz. Pri rezalnem procesu pa prihaja poleg trenja na površinah še do mikrodinamičnih pojavov v preoblikovalni coni, ki lahko vzbude mehanska valovanja vse do ultrazvočnih frekvenc. Zato lahko pričakujemo zanimive rezultate tudi od raziskav analize akustične emisije v ultrazvočnem področju. Sklepamo, da bi bilo na ta način mogoče ugotoviti vplive nekaterih parametrov na rezalni proces, ki ga v nizkofrekvenčnem področju ni mogoče opaziti (kako je npr. ostrina noža).

2. AKUSTIČNA EMISIJA IN NJENA DETEKCIJA

V naravi nastaja zvok zaradi makroskopskih in mikroskopskih dinamičnih pojavov. Področje mikroskopskih pojavov označujemo navadno kot akustično emisijo. To je še danes manj raziskana skupina zvočnih pojavov. Kot značilen primer te skupine pojavov lahko omenimo šumenje kosa trde snovi med lomljenjem ali upogibanjem in oddajanje ultrazvočnih valov pri raznih faznih premenah. V obeh primerih se spreminjajo lastnosti snovi. Porajajo se lokalne nestabilnosti, pri katerih se del nakopičene energije pretvarja v zvočno. Tako nastali zvok oznanja notranje spremembe snovi. Zaradi tega obstaja tudi možnost, da z detekcijo in analizo tega zvoka dobimo podatke o spremembi lastnosti snovi [10]. Vsi naštetji pojavi spremljajo tudi rezalni proces.

V glavnem poznamo dve značilni obliki akustične emisije, tj. nezvezno akustično emisijo v obliki močnih ultrazvočnih izbruhov in zvezno akustično emisijo. Nezvezna akustična emisija, ki se pojavlja sunkovito v obliki izbruhov, je značilna za nehomogene, anizotropne snovi z veliko trdnostjo. Pojavlja se pri deformaciji razpokanih vzorcev, širjenju loma in mikrorazpok ter deformacijah pri nizkih temperaturah. Zvezna akustična emisija je navadno v poprečju šibkejša vendar s tako pogostimi izbruhi, da jih ne ločimo med seboj. Ta vrsta emisije se pojavlja pri deformaciji homogenih duktilnih snovi.

Iz povedanega sklepamo, da lahko uporabljamo emisijo ultra zvoka pri študiju lastnosti materialov in pri analizi določenih postopkov preoblikovanja oziroma obdelave.

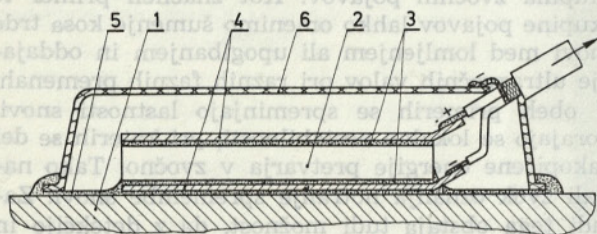
Akustična emisija, ki se pojavlja pri procesu rezanja, ima značaj zvezne akustične emisije. Proces rezanja je namreč zvezen. Taka zvezna akustična emisija terja tudi posebne postopke analize.

Za detekcijo akustične emisije uporabljamo piezokeramične senzorje. Pri zvezni akustični emisiji uporabljamo senzorje z enakomerno občutljivostjo po vsem frekvenčnem območju, ki nas zanima. Spektralno neodvisno detekcijo lahko dobimo v podresonančnem frekvenčnem območju senzorja. Na tem delu je njegova občutljivost precej enakomerna. Dobra stran detekcije v podresonančnem območju je tudi v tem, da senzor sledi amplitudi signala z majhno zakasnitvijo.

Senzorji, ki jih uporabljamo kot pretvornike mehanske oziroma akustične energije v električno, so izdelani tako, da so vloženi v posebne okrove, ki jih ščitijo pred mehanskimi poškodbami in elektromagnetnimi motnjami iz okolja. Z različno obliko senzorjev lahko dosežemo določene lastnosti piezokeramike v smeri, ki jo poudarimo. V osnovi pa so lastnosti v določenih smereh določene z velikostjo posameznih piezoelektričnih konstant, le-te pa od snovi in stopnje polarizacije.

V našem primeru smo izdelali poseben širokopasovni senzor z enakomernim odzivom v območju od 50 do 300 kHz iz PSN keramike diskaste oblike. Diskasti piezoelektrični senzorji imajo možnosti [12] nihanja v prečni in radialni smeri.

Slika 1 prikazuje pritrditve in zaščito senzorja proti elektromagnetnim vplivom.



Sl. 1. Pritrditev senzorja na stružni nož

1 — držalo noža, 2 — PSN keramika, 3 — AG lepilo, 4 — Cu folija, 5 — dvokomponentno lepilo, 6 — mrežica

3. ZASNOVA PREISKAV

3.1. Material za obdelavo

Za preizkuse smo izbrali tri aluminijeve zlitine z interno označbo Industrije metalnih polizdelkov IMPOL iz Slov. Bistrice D₅₀, D₄₀ in D₃₀. Mehanski parametri posameznih zlitin so zbrani v tabeli 1.

3.2. Obdelovalni stroj in orodje

Vse preizkuse smo opravili na posebni eksperimentalni stružnici ES II. Stružnica je posebej prirejena za preizkuse in primerno toga. Opremljena

Tabela 1

Označba zlitine	Nat. trdnost σ_M [N/mm ²]	Meja plast. $\sigma_{0,2}$ [N/mm ²]	Raztezek δ_{10} [%]	Trdota HB
D ₅₀	450	295	20	110
D ₄₀	450	300	18	110
D ₃₀	400	260	16	100

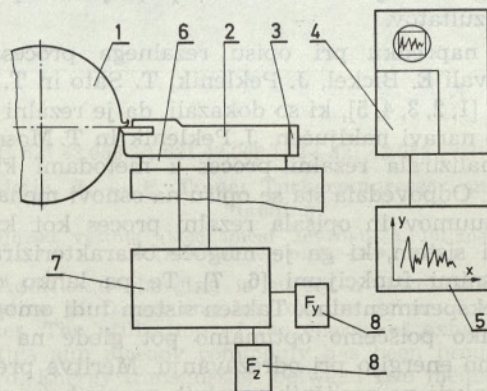
je z Ward-Leonardovim agregatom za brezstopenjsko spreminjanje vrtilne hitrosti, ki omogoča konstantno hitrost rezanja. Področje vrtilnih hitrosti, ki jih lahko dosegamo na stružnici ES II, znaša od 700 do 8500 vrt/min.

Pri rezanju smo uporabljali rezalne ploščice iz karbidne trdine z označbo P 20, ki so bile mehanično vpete na držalo SANDVIK — Coromant. Pri preizkusih smo uporabljali konstantno geometrijo orodja. Druge pogoje rezanja smo spreminjali v naslednjih področjih:

- globina rezanja $a = 0,5, 2$ in 3 mm
- podajanje $s = 0,027, 0,044$ in $0,132$ mm/vrt
- hitrost rezanja $v = 100, 200, 400, 600, 800$ in 1000 m/min
- obraba noža $VB = 0,00, 0,15, 0,35$ in $0,55$ mm

3.3. Ureditev eksperimentalnega merilnega sistema

Eksperimentalni merilni sistem prikazuje slika 2. Na orodju — stružnem nožu 2 — je pritrjen po posebnem postopku (glej sl. 1) senzor 3, ki zaznamuje akustično emisijo. Od senzorja vodimo električne signale v spektralni analizator 4 za merjenje spektrov emisije, ki ga izriše risalnik $x-y$ 5. Poleg akustične emisije smo opazovali tudi rezalni sili F_z in F_y . To sta glavna sila rezanja F_z in podajalna sila F_y . Obe sili smo merili s posebnim trokomponentnim merilnikom sil 6 in številčne vrednosti odčitali prek ojačevalnika naboja sil 7 na digitalnih voltmetrih 8. Na ta način smo dobili poprečno vrednost sil.



Sl. 2. Eksperimentalni merilni sistem

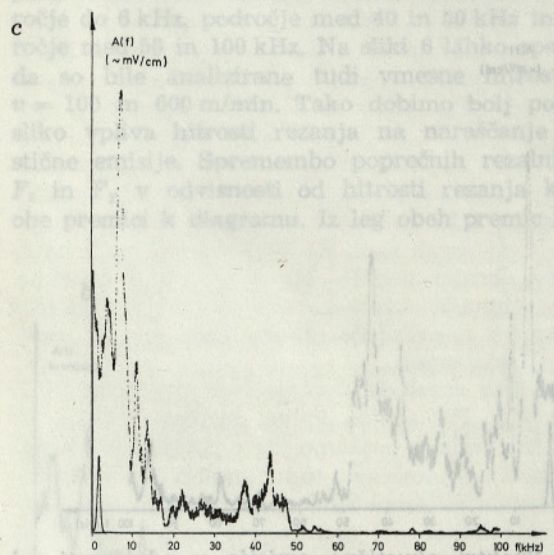
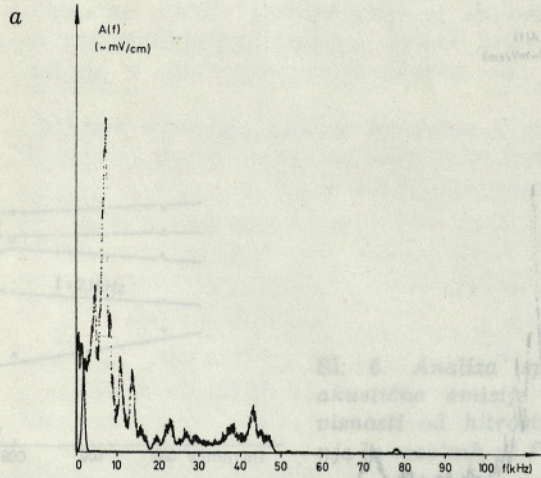
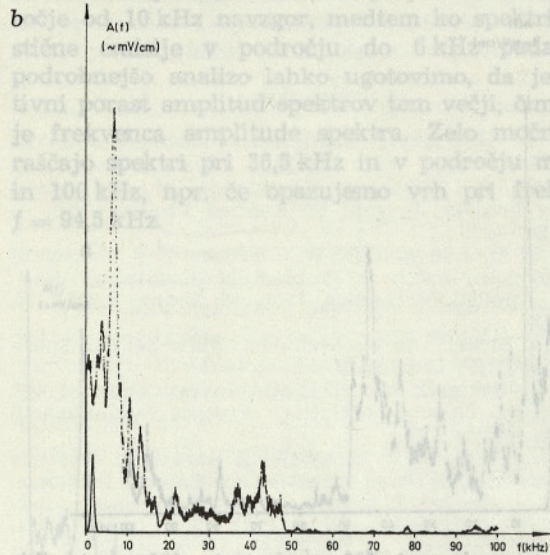
Spektralno analizo akustične emisije smo zasledovali na dveh merilnih območjih, in sicer v področju od 50 Hz do 100 kHz in med 50 Hz in 1 MHz. Vsaki meritvi smo prilagodili primerno ojačanje in dolžino trajanja analize.

4. EKSPERIMENTI IN ANALIZA REZULTATOV

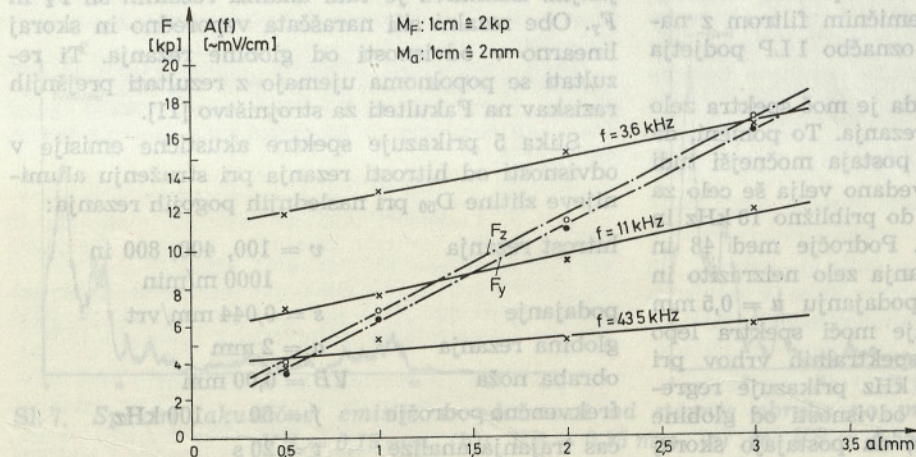
Slika 3 prikazuje spektre akustične emisije v odvisnosti od globine rezanja.

Spektri akustične emisije se nanašajo na naslednje pogoje rezanja:

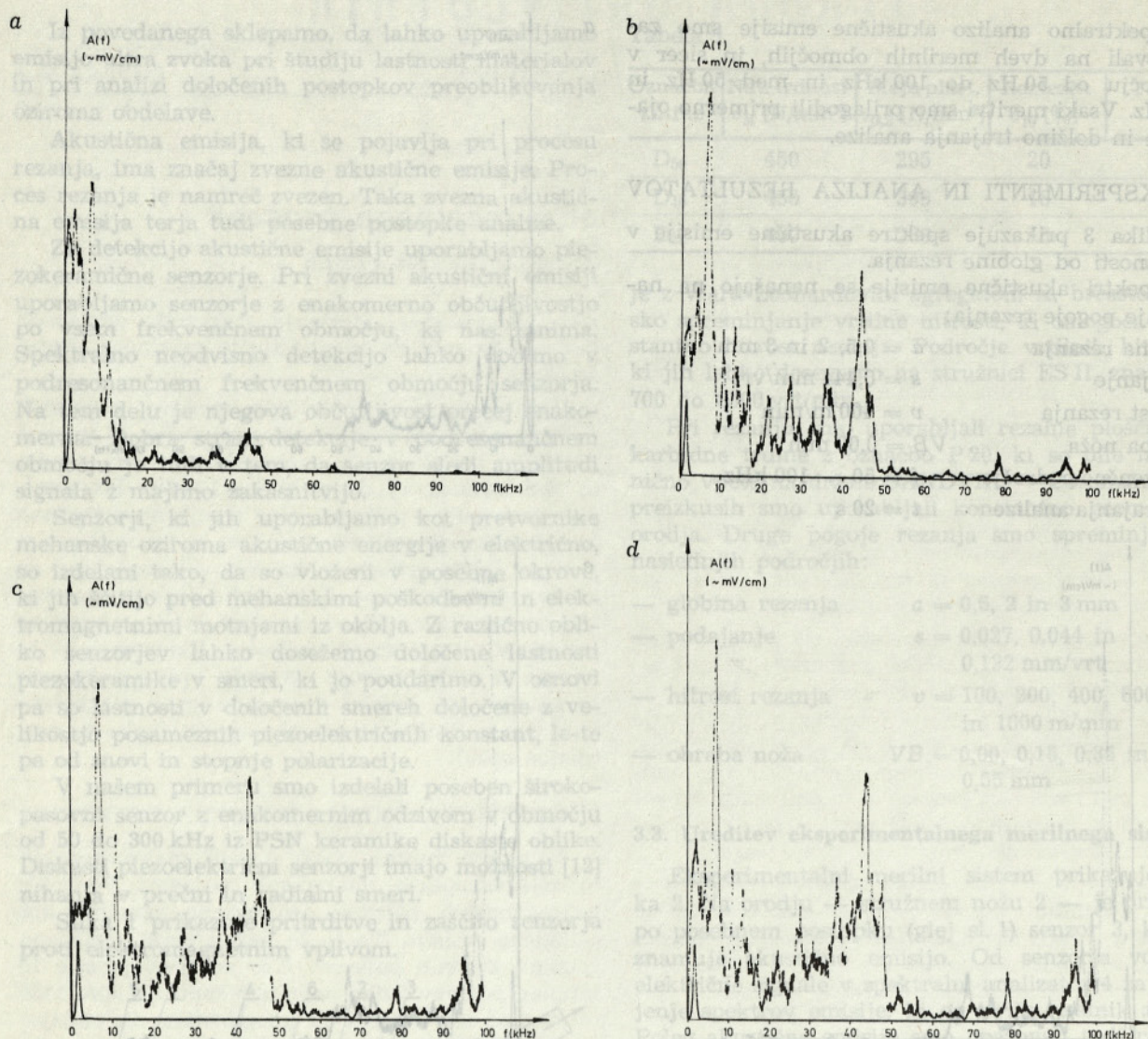
globina rezanja	$a = 0,5, 2$ in 3 mm
podajanje	$s = 0,444$ mm/vrt
hitrost rezanja	$v = 400$ m/min
obrabna noža	$VB = 0,00$ mm
frekvenčno področje	$f = 50 \dots 100$ kHz
čas trajanja analize	$t = 20$ s



Sl. 3. Spektri akustične emisije v odvisnosti od globine rezanja pri 0,5 mm (a), 2 mm (b) in 3 mm (c)



Sl. 4. Analiza spektrov akustične emisije v odvisnosti od podajanja in rezalnih sil F_z in F_y



Sl. 5. Spektri akustične emisije v odvisnosti od hitrosti rezanja pri 100 m/min (a), 400 m/min (b), 800 m/min (c) in 1000 m/min (d)

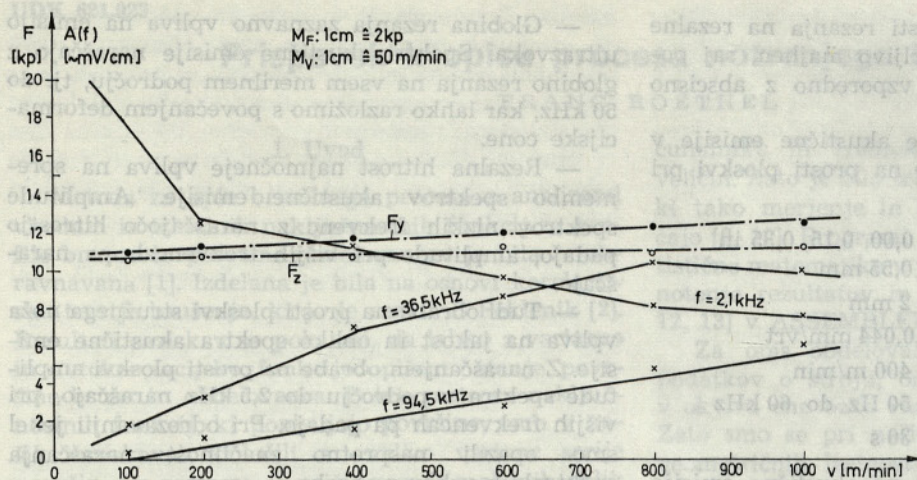
Spekter akustične emisije kaže odvisnost efektivne amplitude harmoničnih komponent od frekvence. Izmerjen je bil s premičnim filtrom z nastavlljivo širino pasu $\Delta\omega$ z označbo 1 LP podjetja Tektronix.

S slike lahko razberemo, da je moč spektra zelo opazno odvisna od globine rezanja. To pomeni, da z večanjem globine rezanja postaja močnejši tudi signal akustične emisije. Povedano velja še celo za področje nižjih frekvenc, tj. do približno 18 kHz in med približno 37 in 48 kHz. Področje med 48 in 100 kHz je pri vplivu podajanja zelo neizrazito in praktično pri najmanjšem podajanju $a = 0,5$ mm popolnoma izgine. Naraščanje moči spektra lepo prikazuje slika 4. Analizo spektralnih vrhov pri frekvencah 3, 6, 11 in 43,5 kHz prikazuje regresijska premica naraščanja v odvisnosti od globine rezanja. S slike je razvidno, da postajajo skoraj

vsi trije vrhovi enako močnejši pri različnih podajanjih. Zanimiva je tudi analiza rezalnih sil F_z in F_y . Obe rezalni sili naraščata vzporedno in skoraj linearno v odvisnosti od globine rezanja. Ti rezultati se popolnoma ujemajo z rezultati prejšnjih raziskav na Fakulteti za strojništvo [11].

Slika 5 prikazuje spektre akustične emisije v odvisnosti od hitrosti rezanja pri struženju aluminijeve zlitine D₅₀ pri naslednjih pogojih rezanja:

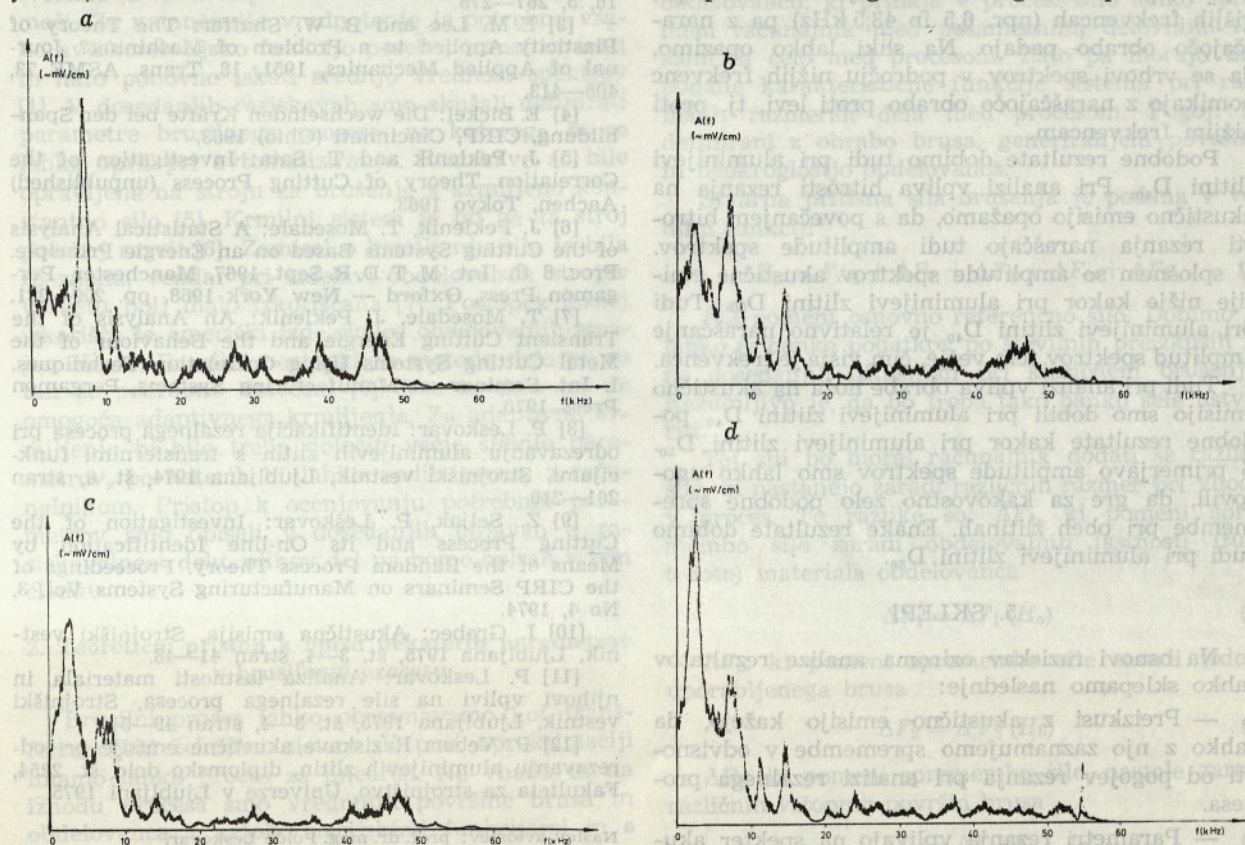
hitrost rezanja	$v = 100, 400, 800$ in 1000 m/min
podajanje	$s = 0,044$ mm/vrt
globina rezanja	$a = 2$ mm
obrada noža	VB = 0,00 mm
frekvenčno področje	$f = 50 \dots 100$ kHz
čas trajanja analize	$t = 20$ s



Sl. 6. Analiza spektrov akustične emisije v odvisnosti od hitrosti rezanja in rezalnih sil F_z in F_y

S slike 5 lahko razberemo, da z naraščanjem hitrosti rezanja pride do znatnega povečanja akustične emisije. Ta trditev velja predvsem za področje od 10 kHz navzgor, medtem ko spektri akustične emisije v področju do 6 kHz padajo. S podrobnejšo analizo lahko ugotovimo, da je relativni porast amplitud spektrov tem večji, čim višja je frekvenca amplitude spektra. Zelo močno naraščajo spektri pri 36,5 kHz in v področju med 50 in 100 kHz, npr. če opazujemo vrh pri frekvenci $f = 94,5$ kHz.

Povedano potrjuje slika 6, kjer so vneseni podatki naraščanja oziroma padanja moči spektrov pri posameznih frekvencah. Pri tem smo analizirali področje do 6 kHz, področje med 40 in 50 kHz in področje med 50 in 100 kHz. Na sliki 6 lahko opazimo, da so bile analizirane tudi vmesne hitrosti, tj. $v = 100$ in 600 m/min. Tako dobimo bolj popolno sliko vpliva hitrosti rezanja na naraščanje akustične emisije. Spremembo poprečnih rezalnih sil F_z in F_y v odvisnosti od hitrosti rezanja kažeta obe premici k diagramu. Iz leg obeh premic lahko



Sl. 7. Spektri akustične emisije v odvisnosti od stopnje obrabe na prosti ploskvi $VB = 0,00$ (a); $VB = 0,15$ mm (b); $VB = 0,35$ mm (c) in $VB = 0,55$ mm (d)

sklepamo, da je vpliv hitrosti rezanja na rezalne sile izredno, skoraj zanemarljivo majhen, saj potekata obe premici skoraj vzporedno z abscisno osjo.

Slika 7 prikazuje spektre akustične emisije v odvisnosti od stopnje obrabe na prosti ploskvi pri naslednjih pogojih rezanja:

obrada noža	$VB = 0,00, 0,15, 0,35$ in $0,55$ mm
globina rezanja	$a = 2$ mm
podajanje	$s = 0,044$ mm/vrt
hitrost rezanja	$v = 400$ m/min
frekvenčno področje	$f = 50$ Hz do 60 kHz
čas trajanja analize	$t = 30$ s

Pri analizi vpliva obrabe na akustično emisijo smo opravili dve skupini preizkusov. V prvi skupini smo analizirali frekvenčno področje do 1 MHz. Iz diagramov smo lahko razbrali, da v obliki spektrov ni posebnih razlik, pada pa emisija na vsem spektralnem področju s povečanjem obrabe. Da bi dobili bolj podroben vpogled v oblike spektrov, smo analizirali posamezna spektralna področja. V področju od 50 Hz do 60 kHz smo zasledili največje spremembe v obliki in moči spektrov. Z naraščanjem obrabe na prosti ploskvi amplitude spektra v področju $2,1$ kHz močno narastejo. Amplitude pri višjih frekvencah (npr. $6,5$ in $43,5$ kHz) pa z naraščajočo obrabo padajo. Na sliki lahko opazimo, da se vrhovi spektrov v področju nižjih frekvenc pomikajo z naraščajočo obrabo proti levi, tj. proti nižjim frekvencam.

Podobne rezultate dobimo tudi pri aluminijevi zlitini D_{40} . Pri analizi vpliva hitrosti rezanja na akustično emisijo opazimo, da s povečanjem hitrosti rezanja naraščajo tudi amplitude spektrov. V splošnem so amplitude spektrov akustične emisije nižje kakor pri aluminijevi zlitini D_{50} . Tudi pri aluminijevi zlitini D_{40} je relativno naraščanje amplitud spektrov tem večje, čim višja je frekvenca.

Tudi pri analizi vpliva obrabe noža na akustično emisijo smo dobili pri aluminijevi zlitini D_{40} podobne rezultate kakor pri aluminijevi zlitini D_{50} . S primerjavo amplitude spektrov smo lahko ugotovili, da gre za kakovostno zelo podobne spremembe pri obeh zlitinah. Enake rezultate dobimo tudi pri aluminijevi zlitini D_{30} .

5. SKLEPI

Na osnovi raziskav oziroma analize rezultatov lahko sklepamo naslednje:

— Preizkusi z akustično emisijo kažejo, da lahko z njo zaznamujemo spremembe v odvisnosti od pogojev rezanja pri analizi rezalnega procesa.

— Parametri rezanja vplivajo na spekter akustične emisije najmočneje v področju do 50 kHz, kar velja še posebej za področje do 10 kHz.

— Globina rezanja zaznavno vpliva na emisijo ultrazvoka. Spektri akustične emisije naraščajo z globino rezanja na vsem merilnem področju, tj. do 50 kHz, kar lahko razložimo s povečanjem deformacijske cone.

— Rezalna hitrost najmočneje vpliva na spremembo spektrov akustične emisije. Amplitude spektrov nizkih frekvenc z naraščajočo hitrostjo padajo, amplitude pri višjih frekvencah pa naraščajo.

— Tudi obraba na prosti ploskvi stružnega noža vpliva na jakost in obliko spektra akustične emisije. Z naraščanjem obrabe na prosti ploskvi amplitude spektra v področju do $2,5$ kHz naraščajo, pri višjih frekvencah pa padajo. Pri odrezavanju jekel smo opazili nasprotno značilnost naraščanja spektralnih vrhov z obrabo.

Narejeni preizkus je uvodnega značaja. Dobljene odvisnosti imamo namen raziskati še izčrpnije, jih potrditi tudi na drugih materialih in raziskati možnosti za optimizacijo rezalnega procesa na osnovi analize akustične emisije.

LITERATURA

- [1] V. Piispanen: Teknillinen Aikakanslehti 27, 315—322 (1937).
- [2] M. E. Merchant: Mechanics of the Metal Cutting Process, Journal of Applied Physics, 1945 — 16, 5, 267—275.
- [3] E. M. Lee and B. W. Shaffer: The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining? Journal of Applied Mechanics, 1951, 18, Trans. ASME 73, 405—413.
- [4] E. Bickel: Die wechselnden Kräfte bei der Spanbildung, CIRP, Cincinnati (Ohio) 1963.
- [5] J. Peklenik and T. Sata: Investigation of the Correlation Theory of Cutting Process (unpublished) Aachen, Tokyo 1963.
- [6] J. Peklenik, T. Mosedale: A Statistical Analysis of the Cutting Systems Based on an Energie Principle. Proc. 8 th. Int. M. T. D. R. Sept. 1967, Manchester, Pergamon Press, Oxford — New York 1968, pp. 209—231.
- [7] T. Mosedale, J. Peklenik: An Analysis of the Transient Cutting Energie and the Behaviour of the Metal Cutting Systems Using Correlation Techniques. I. Int. Seminar on Manufacturing Systems, Pergamon Press 1970.
- [8] P. Leskovicar: Identifikacija rezalnega procesa pri odrezavanju aluminijevih zlitin s transfernimi funkcijami, Strojniški vestnik, Ljubljana 1974, št. 6, stran 201—210.
- [9] Z. Seljak, P. Leskovicar: Investigation of the Cutting Process and its On-line Identification by Means of the Random Process Theory. Proceedings of the CIRP Seminars on Manufacturing Systems Vol. 3, No 4, 1974.
- [10] I. Grabec: Akustična emisija, Strojniški vestnik, Ljubljana 1975, št. 3—4, stran 41—48.
- [11] P. Leskovicar: Analiza lastnosti materiala in njihovi vplivi na sile rezalnega procesa, Strojniški vestnik, Ljubljana 1975, št. 3—4, stran 49—54.
- [12] P. Veber: Raziskave akustične emisije pri odrezavanju aluminijevih zlitin, diplomsko delo, št. 2254, Fakulteta za strojništvo, Univerze v Ljubljani 1975.

Naslov avtorjev: prof. dr. mag. Polde Leskovicar,
doc. dr. Igor Grabec,
asistent Peter Veber, dipl. ing.,
vsi: Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani