UDK 62—408:621.785.5:621.91:669.715:539.37:531.43

Raziskave integritete površin materiala in orodja

POLDE LESKOVAR

Raziskovalna skupina, ki jo sestavljajo prof. dr. Polde Leskovar, dipl. inž.; izr. prof. dr. Janez Grum, dipl. inž.; asist. mag. Miran Kovač, dipl. inž.; asist. mag. Dimo Ferlan, dipl. inž.; asist. Pavel Žerovnik, dipl. inž. in asist. Marija Kisin, dipl. inž. ter tehnična sodelavca M. Ribič, dipl. teh. in Tatjana Jović, dipl. teh., vodi raziskovalno dejavnost s področja RAZISKOVALNE INTEGRITETE POVRŠIN MATERIALA IN ORODJA.

1. PODROČJA RAZISKAV

Skupina raziskuje naslednja področja:

a) Integriteto površine, ki zajema podatke o geometričnih, mehanskih in fizikalno-kemičnih lastnostih materiala obdelovanca na površini in v slojih pod njo. Pomen raziskav ni samo v njihovem opisovanju, temveč sega tudi zunaj strojništva na področja energetike, surovin, ekonomije ipd. Pri večini izdelkov, ki jih izdelujemo v strojništvu, je integriteta površine bistvenega pomena na njihovo uporabnost. Primer takih izdelkov so ležaji, gonila, tečaji, osi, gredi, elementi krmilne in regulacijske pnevmatike in hidravlike kakor tudi vsi dinamično močno obremenjeni strojni deli. Pri vseh omenjenih delih so zahteve, da je kakovost površine optimalna, in ne zgolj, da ima najmanjšo hrapavost ali idealno ravnost. To pomeni, da moramo pri predpisovanju kakovosti površine — poleg konstrukcijskih zahtev upoštevati še ekonomske, npr. zahtevo po čim daljši obratovalni dobi določenega ključnega strojnega elementa ali njegovi čim cenejši izdelavi ipd. V izdelovalni tehnologiji poznamo še druge zahteve, ki so si neredko celo nasprotujoče. Zaradi tega je zelo pomembno, da najdemo optimalno rešitev. To pa terja globlje poznavanje materialov kakor tudi strojev in postopkov izdelave.

Material, ki ga pripravimo za obdelavo, ima navadno grobo površino in zelo različno napetostno stanje, ki je v znatni meri odvisno od načina predelave do polizdelka. Z obdelavo hočemo nato doseči dokončno obliko in izboljšati pri tem tudi površino. Vsak postopek v izdelovalnem procesu pa pomeni zopet poseg v površino obdelovanca in sloje pod njo. Z generiranjem nove oblike in površine, vnašamo v material tudi različne napake in predvsem notranje napetosti, ki so posledica obdelovalnega postopka in režima obdelave. Povzročajo jih najrazličnejši vplivi, kakršni so: temperatura, plastična deformacija itd., ki so posledica rezalnih in preoblikovalnih sil, kemičnih reakcij na površini ipd. Poznavanje teh napetosti je izrednega pomena, saj so raziskave zadnjih nekaj let zelo zanesljivo pokazale, da je večina trajnostnih zlomov dinamično obremenjenih strojnih delov nastala zaradi prevelikih zaostalih napetosti, ki so bile posledica napačnih izdelovalnih procesov ali pa preostrih režimov obdelave.

b) Metalurški vplivi na obdelovalne in obrabne procese pri odrezovanju so drugo področje, ki ga intenzivno razvijamo v okviru navedene raziskovalne skupine. V prvi vrsti raziskujemo v zadnji dobi metalurške vplive na značilne obrabe na rezalnem robu orodja iz karbidnih trdin pri obdelavi (struženju) jekel za avtomate. Na obdelovalnost v veliki meri vplivajo; kemična sestava, vrsta, količina in porazdelitev vključkov v osnovnem materialu, toplotna obdelava ipd. Pri jeklih za avtomate porazdelimo vključke v štiri skupine:

— trdi abrazivni vključki, ki močno poslabšajo obdelovalnost (Al_2O_3, SiO_2, Cr_2O_3, TiN ipd.),

— nekovinski vključki, ki ugodno vplivajo na obdelovalnost (MnS, FeS, MnSe, MnTe, ipd.),

— čiste kovine, ki so netopljive, prav tako ugodno vplivajo na obdelovalnost (Pb, Bi ipd.) in

— vključki z neizrazitim vplivom na obdelovalnost (FeO, MnO ipd).

Velikost in porazdelitev najrazličnejših vključkov sta povezani s tehnologijo pridobivanja oziroma predelavo jekla. V jeklih za avtomate so zaželeni predvsem nekovinski vključki in vključki čistih kovin. V obdelovalnem procesu je najpomembnejši podatek velikost rezalnih sil, ki so posledica rezalnih razmer in kontaktnega trenja med orodjem in obdelovancem ter elastoplastičnih deformacij v strižni coni. Posledica tega je bolj ali manj močan razvoj toplote, ki je v največji meri odvedena v odrezek, manj v orodje, najmanj pa v obdelovanec. Iz objavljenih razprav o temperaturnih razmerah lahko ugotovimo, da je najvišja temperatura na orodju, in sicer nekoliko odmaknjeno od rezalnega roba vzdolž cepilne ploskve. Enako pomembni, a zelo zapleteni so fizikalno kemični procesi, ki potekajo praktično med popolnoma čistimi kontaktnimi površinami orodja in obdelovanca. Dosedanje raziskave, ki jih je opravila naša skupina, so zelo nazorno pokazale, da znano merilo za obrabo — obrabna širina na prosti ploskvi *VB* daje premalo informacij o obstojnem času orodja. Pri obdelavi različnih materialov se lahko značilne velikosti kotanje na cepilni ploskvi močno razlikujejo pri enakih obdelovalnih razmerah in enaki obrabi na prosti ploskvi.

Prav tako je bila opravljena vrsta raziskav na aluminijevih zlitinah. Tudi pri teh raziskavah smo opazovali predvsem metalurške vplive na mehanske in tehnološke lastnosti aluminijevih zlitin. Posebno

zlitine, ki jih obdelujemo na avtomatih, morajo imeti natančno določeno sestavo. Da lahko obdelujemo te vrste zlitin na avtomatih, jim dodajamo, podobno kakor jeklom, tudi dodatke: v tem primeru čiste kovine, ki sestavljajo v osnovni masi vključke, ki vplivajo na obliko odrezka. Iz objavljenih raziskav izhaja, da je razmerje Pb:Bi zelo pomembno. Tudi toplotna obdelava aluminijevih zlitin, posebno tistih, ki imajo glavni legirni element baker, lahko prevladujoče vpliva na mehanske in tehnološke lastnosti. Prav tako je zelo pomembno staranje; in pri tem ne samo temperatura staranja, temveč prav tako čas staranja. Le pravilno izbrana sestava in nadaljnja toplotna obdelava zagotavljata ugodne mehanske in tehnološke lastnosti zlitine.

c) Z identifikacijo obdelovalnega procesa prav tako skušamo dati svoj prispevek k nadaljnjim razjasnitvam, ki bi pripeljale k optimizaciji teh procesov.

Med najpogostejše postopke oblikovanja sodi prav gotovo odrezovanje. Najznačilnejši parameter, ki ga uporabljamo pri opisu rezalnega procesa, je hrapavost nastale površine. Ta pa je odvisna od geometrične oblike orodja, razmer pri rezanju, vrste materiala, orodja, odrezovalnega stroja ipd. Za opis optimalnega poteka rezalnega procesa bi morali znati izraziti povezanost naštetih parametrov.

Najneposrednejše lahko opišemo rezalni proces z rezalnimi silami. Nekateri raziskovalci so ga skušali opisati 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.

K napredku pri opisu rezalnega procesa so prispevali E. Bickel, J. Peklenik, T. Sato in T. Mosedale, ki so dokazali, da je rezalni proces po naravi naključen. J. Peklenik in T. Mosedale sta analizirala rezalni proces z metodami kibernetike. Odpovedala sta se opisu na podlagi mehanike kontinuumov in opisala rezalni proces kot kibernetični sistem s prenosnimi funkcijami. Takšen sistem tudi omogoča, da lahko poiščemo optimalno pot glede na uporabljeno energijo pri odrezovanju. Meritve prenosnih funkcij na različnih rezalnih procesih in materialih so pokazale, da so funkcije odvisne od razmer pri rezanju.

Doslej so bile merjene prenosne funkcije 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 vzbujajo mehanska valovanja vse do ultrazvočnih frekvenc, zato lahko pričakujemo zanimive rezultate tudi od raziskav analize akustične emisije v ultrazvočnem področju. Sklepamo, da bi bilo mogoče na ta način ugotoviti vplive nekaterih parametrov na rezalni proces, ki ga v nizkofrekvenčnem območju ni mogoče opaziti. S tega področja sta objavila I. Grabec in P. Leskovar prve rezultate raziskav, ki kažejo vzpodbujajoče izide.

K identifikacijskim raziskavam vključujemo tudi analizo kakovosti materialov in identifikacijo mikrorazpok kot posledico nepravilnih izdelovalnih procesov.

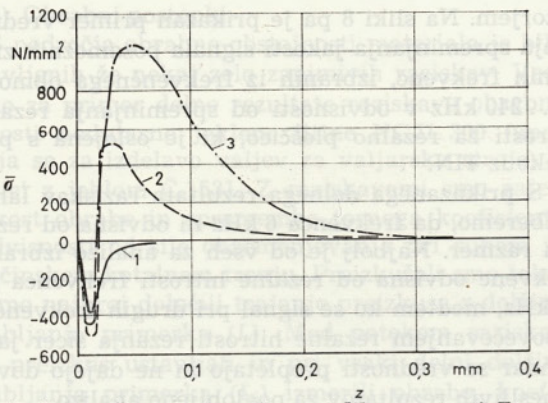
d) Tudi obraba spada v sklop raziskav, ki so posledica lastnosti različnih materialov. Najrazličnejši izdelovalni procesi terjajo namreč primerno orodje in druge pripomočke. Orodje je pri izdelavi izdelkov neposredno vključeno v proces obdelave in se pri tem obrablja. Obraba pomeni izgubo materiala s površine trdnega telesa in je posledica mehanskih vplivov, ki so sestavni del triboloških procesov. Obraba pa nastaja zaradi stika med orodjem in obdelovancem. Obrabni procesi se pojavljajo povsod, kjer se gibljeta dva dela, tako da se med seboj dotikata npr. ubirajoča se zobnika, bat — valj, lopatice turbine — voda ali para, valjanje ipd. Opazujemo jih kot odpadanje majhnih delcev ali tudi kot spremembe dotikajočih se materialov ali pa kot spremembe oblike vrhnjih plasti. Obrabo te vrste zasledujemo v izdelavi pri tistih elementih, katerih tehnične funkcije so povezane s triboloških obremenitvami. Osnovne značilne veličine so trdnostne lastnosti materialov. Pod tribološko obremenitvijo nastajajoča obraba pa je lahko opisana le z omenjenimi sistemskimi obrabnimi značilnimi veličinami. V sodelovanju z delovnimi organizacijami je bilo končanih že nekaj raziskovalnih nalog, ki pojasnjujejo probleme obrabe pri izdelovalnih procesih.

2. PRIMERI RAZISKAV IZ OPISANIH PODROČIJ

a) Integriteta površin

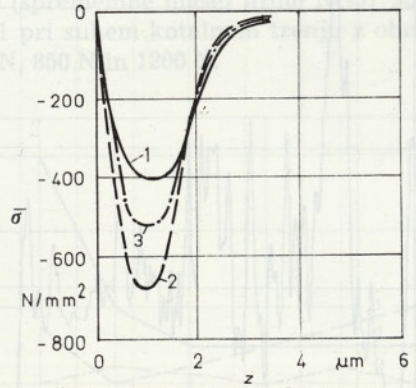
S področja integritete površin smo opravili, potem ko smo razvili dva sorodna postopka merjenja zaostalih napetosti v materialu, že vrsto raziskav poteka zaostalih napetosti v odvisnosti od različnih izdelovalnih procesov. Poudarjeno je bilo opazovanje parametrov integritete površin obdelovanca in orodja po posameznih vmesnih fazah izdelovalnega procesa oziroma končnega izdelka. Tako smo raziskovali napetostna stanja in druge parametre integritete v površinskih slojih oziroma površinah, ki so bile poprej različno toplotno ali mehansko obdelane (stružene, brušene, frezane ipd.). Za ponazoritev si poglejmo nekaj rezultatov iz raziskav o vplivu različnih vrst brusilnih snovi pri različnih pogojih brušenja na porazdelitev zaostalih napetosti in porazdelitev trdote v slojih na obdelani površini določenega materiala in v slojih pod njo.

S slik 1 in 2 lahko razberemo, da so napetostne razmere v slojih tik pod obdelano površino preizkusnih obdelovancev kot posledica grobih razmer pri brušenju precej bolj neugodne, kakor pa zaostale napetosti po obdelavi v blagih razmerah bru-



Sl. 1. *Povprečne vrednosti zaostalih napetosti* $\bar{\sigma}$ *v odvisnosti od globine sloja z po grobem brušenju jekla Č.4850*

Krivulje: 1 — brus: 2 B 46/IH8/6 V 40 (aluminijev oksid), v_s = = 22,1 m/s, v_w = 0,36 m/s, a = 0,1 mm, f = 0,3 mm/gib; 2 — brus: C 54/IJ6 V 60 (silicijev karbid), v_s =22,3 m/s v_w = 0,36 m/s, a = = 0,1 mm, f = 0,3 mm/gib; 3 — brus: 1 Al-250-15-2 (borov nitrid), v_s = 18,8 m/s, v_w = 0,36 m/s, a = 0,1 mm, f = 0,3 mm/gib



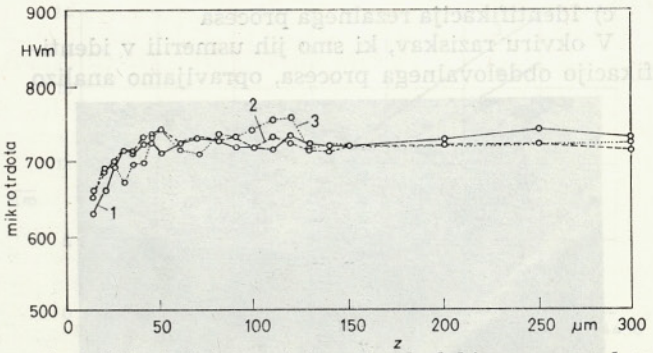
Sl. 2. *Povprečne vrednosti zaostalih napetosti* $\bar{\sigma}$ *v odvisnosti od globine sloja z po finem planem brušenju jekla Č.4850*

Krivulje: 1 — brus: 2 B 46/IH8/6 V 40 (aluminijev oksid), v_s = = 22,1 m/s, v_w = 0,25 m/s, a = 0,25 mm, f = 0,3 mm/gib; 2 — brus: C 54/IJ6 V 60 (silicijev karbid), v_s =22,3 m/s, v_w = 0,25 m/s, a = 0,02 mm, f = 0,3 mm/gib; 3 — brus: 1 Al-250-15-2 (borov nitrid), v_s = 18,8 m/s, v_w = 0,25 m/s, a = 0,02 mm, f = 0,3 mm/gib;

šenja. V prvem primeru dobimo tik pod površino sicer tlačne napetosti, ki pa kmalu preidejo v izredno velike natezne. V drugem primeru pa dobimo samo tlačne napetosti, ki so znatno ugodnejše. Obenem so tudi po absolutni vrednosti znatno manjše. S slike 3 lahko razberemo, da vrsta brusilne snovi ne vpliva na potek trdote. Iz navedenega izhaja, naj brušenju v grobih razmerah sledi še brušenje v blagih. Na ta način se je mogoče izogniti prevelikim zaostalim napetostim oziroma lahko vplivamo, da dobimo po značaju in po porazdelitvi takšne, ki bodo podaljšale obratovalno dobo določenega močno dinamično obremenjenega strojnega dela.

b) Metalurški vplivi na obdelovalnost domačih materialov

Že v uvodu smo zapisali, da je to izredno pomembno in precej zapleteno področje in vseh vplivov ni mogoče pojasniti po kratkih postopkih raziskav. Vplivov na obdelovalnost določenega materiala je zelo veliko. Poglejmo primer rezultatov raziskave odvisnosti obrabe na rezalnem robu orodja,



Sl. 3 *Mikrotrdota v odvisnosti od globine z po grobem planem brušenju jekla Č.4850*
(Podatki o obdelavi na sliki 1)

in to tako na prosti kakor tudi na cepilni ploskvi v odvisnosti od strukture materiala in razmer pri rezanju.

Za obdelavo smo izbrali jeklo Č.4320 in ga pripravili v treh strukturnih stanjih:

— grobozrnata struktura s približno enakim deležem perlita in ferita (žarjenje na temp. 1250 °C 2 uri; izotermno držanje na temp. 670 °C 1,5 ure in počasno hlajenje v peči);

— trakasta feritno-perlitna mikrostruktura (žarjenje na temp. 920 °C 2 uri, izotermno držanje pri temp. 600 °C 1,5 ure in počasno hlajenje v peči);

— finozrnata feritno-perlitna mikrostruktura (žarjenje na temp. 920 °C 2 uri, izotermno držanje na temp. 450 °C 0,5 ure in počasno hlajenje v peči).

Podatki pri obdelavi:

rezalne hitrosti:	podajanje:	globina rezanja:
v_{c1} = 500 m/min	f_1 = 0,132 mm/vrt.	a_p = 1 mm
v_{c2} = 200 m/min	f_2 = 0,222 mm/vrt.	
v_{c3} = 150 m/min		

Rezalna ploščica je bila tipa SPUN D 12, vrste P 10, izdelek tovarne 1. Partizan.

Po opravljenih preizkusih smo izmerili obrabo na prosti ploskvi (*VB*) z optičnim mikroskopom in kotanjasto obrabo cepilne ploskve (*KT*) z merilnikom hrapavosti. Na sliki je prikazana obrabljena cepilna ploskev, slikana na elektronskem mikroskopu, na sliki 5 pa topografija cepilne ploskve s slike 4.

Rezultati časovnega poteka obrabe na prosti ploskvi so razvidni s slike 6.

Na podlagi rezultatov raziskav obrabe smo prišli do naslednjih sklepov, da:

— pri vseh strukturah vpliva na obrabo proste ploskve poglavitno rezalna hitrost,

— je razmerje med obrabama na prosti in cepilni ploskvi pri različnih strukturah materiala različno,

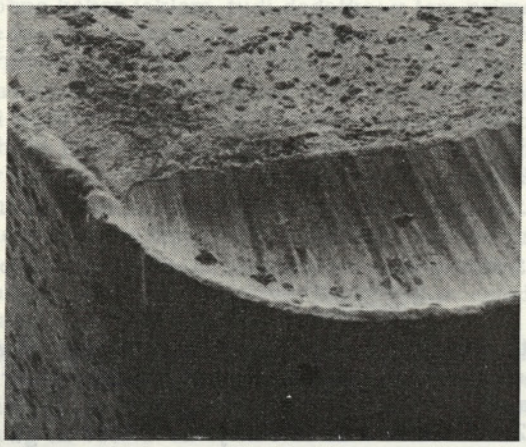
— je obstojni čas orodja pri obdelavi grobozrnate strukture bistveno večji,

— odrezki postajajo z rastočo obrabo bolj primerni,

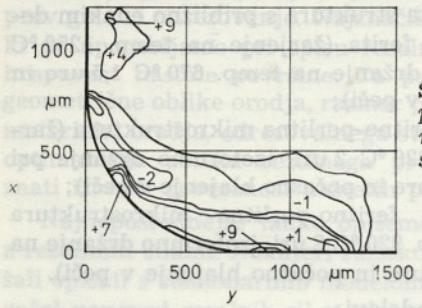
— je do največjih poškodb rezalnega roba prihajalo pri trakasti strukturi.

c) Identifikacija rezalnega procesa

V okviru raziskav, ki smo jih usmerili v identifikacijo obdelovalnega procesa, opravljamo analizo

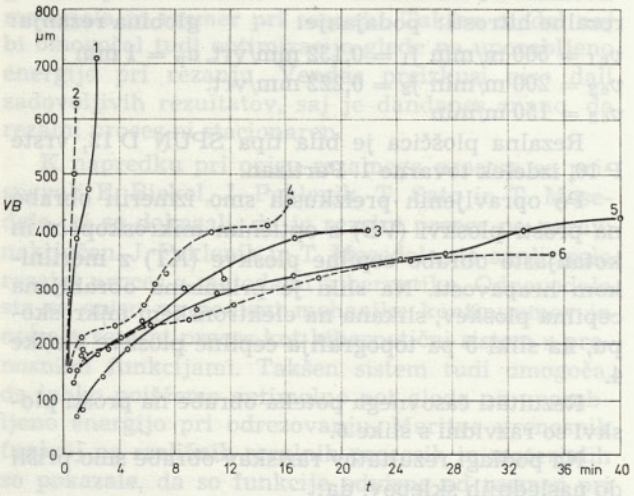


Sl. 4 *Fotografski posnetek obrabljene cepilne ploskve*



Sl. 5. *Topografski posnetek obrabljene cepilne ploskve s slike 4*

t = 2,75 min,
VB = 0,14 mm,
KM = 0,200 mm,
KT = 0,002 mm

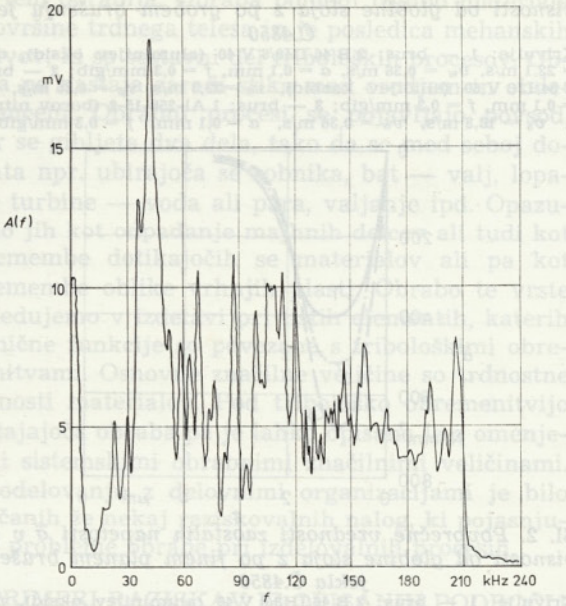


Sl. 6 *Večanje obrabe na prosti ploskvi VB v odvisnosti od časa t pri struženju jekla Č.4320 (grobozrnata struktura)*

Koti na orodju: $\alpha = 5°$, $\gamma = 6°$, $\lambda = 0°$, $\kappa = 75°$, $\varepsilon \equiv 90°$ in R = 0,8 mm. Krivulje: 1 — v_c = 500 m/min, f = 0,132 mm/vrt., a_p = 1 mm, 2 — v_c = 500 m/min, f = 0,222 mm/vrt., a_p = 1 mm, 3 — v_c = 250 m/min, f = 0,132 mm/vrt., a_p = 1 mm, 4 — v_c = 250 m/min, f = 0,222 mm/vrt., a_p = 1 mm, 5 — v_c = 150 m/min, f = 0,132 mm na vrt., a_p = 1 mm, 6 — v_c = 150 m/min, f = 0,222 mm/vrt., a_p = = 1 mm

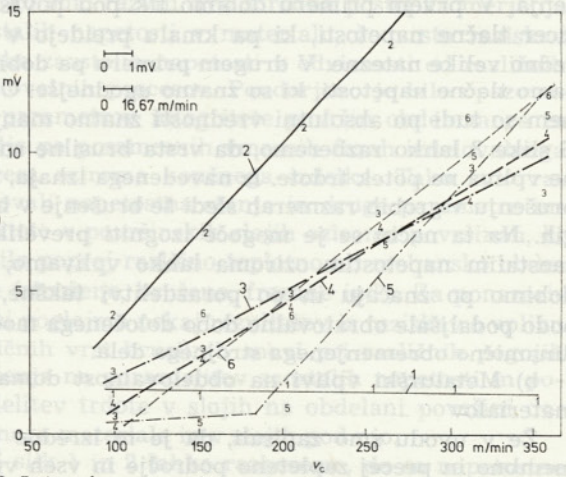
frekvenc, ki so posledica akustične emisije kot odziv na spremembo rezalnih parametrov in kakovost rezalne ploščice. Na sliki 7 je prikazan primer frekvenčnega spektra, posnetega s frekvenčnim analizatorjem. Na sliki 8 pa je prikazan primer vrednotenja spreminjanja jakosti signala posameznih značilnih frekvenc, izbranih iz frekvenčnega območja 0 . . . 240 kHz v odvisnosti od spreminjanja rezalne hitrosti za rezalno ploščico, ki je oslojena s prevleko iz TIN.

S prikazanega delnega rezultata raziskav lahko razberemo, da frekvenca 6 kHz ni odvisna od rezalnih razmer. Najbolj je od vseh za analizo izbranih frekvenc odvisna od rezalne hitrosti frekvenca pri 42 kHz, medtem ko se signal pri drugih frekvencah s povečevanjem rezalne hitrosti rezanja sicer jača, vendar se vrednosti prepletajo in ne dajejo dovolj zanesljivih rezultatov za poglobljeno analizo.



Sl. 7 *Intenzivnost spektra akustične emisije A (f) v odvisnosti od frekvence f*

Obdelovani material: ATJ 100 Pb, rezalni material: rezalna ploščica z označbo A, VB = 0,0 mm, v_c = 350 m/min



Sl. 8. *Intenzivnost spektra akustične emisije A (f) pri posameznih frekvencah v odvisnosti od rezalne hitrosti v_c*

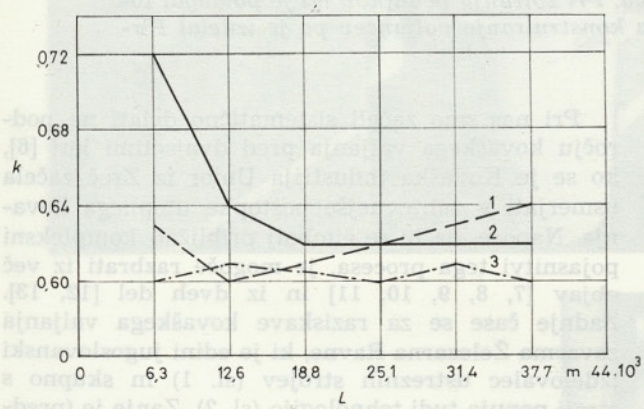
Obdelovani material: ATJ 100 Pb, rezalni material: rezalna ploščica z označbo A, VB = 0,0 mm

Krivulje: 1 — f = 6 kHz, 2 — f = 42 kHz, 3 — f = 5a kHz, 4 — f = 68 kHz, 5 — f = 88 kHz, 6 — f = 108 kHz

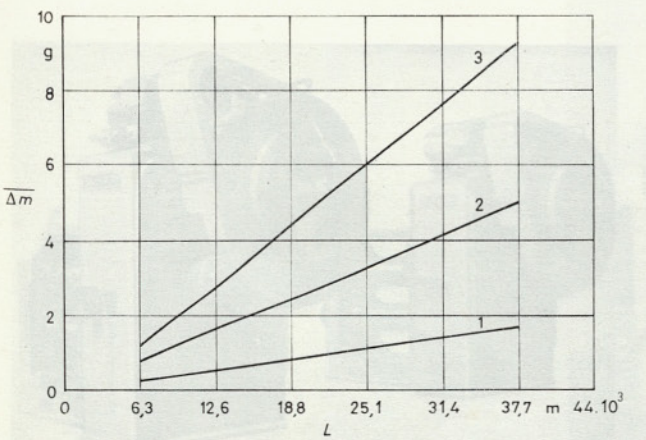
d) Obrabni postopki

S področja obrabne obstojnosti materiala je bilo opravljenih že nekaj zelo zanimivih raziskav. Vzemimo za primer delne rezultate raziskave obrabne trdnosti nodularne jeklene litine NGJL 300 (uporablja se za izdelavo valjev za valjarske stroje) v dvojici z jeklom Č.1531. Z raziskavami smo zajeli velikost obrabe in spremembe tornega koeficienta v odvisnosti od sile obremenjevanja pri suhem in tekočinskem kotalnem trenju. Preizkušali smo tako, da smo najprej določili trajanje preizkusa z dolžino obrabljanja primerka (L). Med potekom raziskav smo preizkus ustavljali in pri vsaki delni dolžini obrabljanja primerka (L_i) izmerili obrabo, koeficient trenja na podlagi momenta trenja ter parametra, ki podajata najhitreje sliko stanja površine preizkušanca, to sta hrapavost (R_a) in trdota (HV).

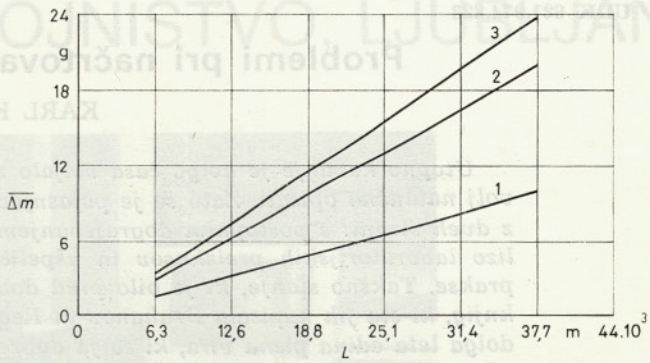
Na slikah 9, 10 in 11 so prikazani rezultati raziskav, dobljeni z ugotavljanjem tornega koeficienta in obrabe (spremembe mase) litine NGJL 300 in jekla Č.1531 pri suhem kotalnem trenju z obremenitvami 500 N, 850 N in 1200 N.



Sl. 9 *Koeficient trenja k za različne normalne sile F_N v odvisnosti od dolžine obrabljenega primerka L pri suhem kotalnem trenju*
Krivulje: 1 — F_N = 550 N, 2 — F_N = 850 N, 3 — F_N = 1200 N



Sl. 10 *Obraba Δm litine NGJL 300 za različne normalne sile F_N v odvisnosti od dolžine obrabljenega primerka L pri suhem kotalnem trenju*
Krivulje: 1 — F_N =500 N, 2 — F_N = 850 N, 3 — F_N = 1200 N



Sl. 11 *Obraba Δm jekla Č.1531 za različne normalne sile F_N v odvisnosti od dolžine obrabljenega primerka pri suhem kotalnem trenju*
Krivulje: 1 — F_N = 500 N, 2 — F_N = 850 N, 3 — F_N = 1200 N

3. SKLEPNA BESEDA

Predstavljena raziskovalna skupina se ukvarja z raziskavami, ki so temeljnega kakor tudi uporabnega pomena. Izraziti pomen osnovnih raziskav imajo raziskave v zvezi z identifikacijo rezalnega procesa, medtem ko imajo druge oba pomena hkrati, saj jih opravljamo tudi v mešanih raziskovalnih skupinah, v katerih so tudi zastopniki delovnih organizacij, s katerimi sodelujemo. Takšne mešane skupine smo oblikovali skupaj z Železarno Ravne, Železarno Štore, Železarno Jesenice, s tovarno ETA — Cerkno, TAM Maribor, IMPOL Slovenska Bistrica in drugimi. To vsekakor dokazuje, da so se rezultati naših raziskav in naše eksperimentalne metode dobro uveljavili tudi v praksi. Prav tako smo opravili kooperacijske raziskave v okviru mednarodne organizacije za proizvodno tehnologijo — CIRP s področja mikrotrdote in ugotavljanja zaostalih napetosti. Pri teh raziskavah so poleg naše skupine sodelovali še raziskovalci z univerz v Hannovru (ZR Nemčija), Aachenu (ZR Nemčija), Leuvenu (Belgija), Cincinnati (ZD Amerike), in Melbournu (Avstralija). V okviru raziskovalne skupine s tematiko bolj ali manj povezano z opisanimi raziskovalnimi področji so bili opravljeni v zadnjih desetih letih: 1 doktorat, 6 magisterijev, 97 diplomskih nalog na visokošolski stopnji in 31 diplomskih nalog višješolskega študija strojništva na naši fakulteti. Rezultate raziskav smo predstavili v domači in tuji literaturi kakor tudi na posvetovanjih doma in v tujini. V zadnjih desetih letih je bilo objavljenih 11 člankov v domačih strokovnih revijah, 8 v tujih in predstavljenih 20 referatov v domovini in 9 v tujini. Obenem je bilo za domačo industrijo opravljenih 43 raziskovalnih nalog.

Na podlagi zelo ugodnih dosedanjih rezultatov in aktualnosti ter pomembnosti področja raziskav, ki jih opravljamo, lahko prav gotovo pričakujemo v prihodnje še boljše rezultate, saj nam je uspelo v zadnjem obdobju izpopolniti postopke raziskav in dopolniti eksperimentalno opremo.

Avtorjev naslov: prof. dr. Polde Leskovar, dipl. inž.
Fakulteta za strojništvo, Ljubljana