YU — ISSN 0039—2480

STROJNIŠKI VESTNIK

LETNIK 20 LJUBLJANA, V NOVEMBRU 1974 ŠTEVILKA 6

UDK 669.715:621.91.01

Identifikacija rezalnega procesa pri odrezavanju aluminijevih zlitin s transfernimi karakteristikami

POLDE LESKOVAR

1. UVOD

Industrijski razvoj zadnjih desetletij kaže na vedno hitrejšo avtomatizacijo posameznih proizvodnih postopkov. To pa narekuje vse globlje poznavanje tehnologije obdelave in materialov. S povečano uporabo numerično krmiljenih (NC) obdelovalnih strojev in z uvedbo elektronskih računalnikov v proizvodne procese je postal še bolj pereč že stari problem, kako določiti najugodnejše obdelovalne pogoje. Potreba je pa pripeljala do še intenzivnejših raziskav.

Zaradi tega je bilo v zadnjem obdobju vloženega mnogo truda v raziskave, kako najti odgovor na vprašanje, kaj se pri rezanju kovin resnično dogaja v kontaktni coni obdelovanec—orodje. Že od W. F. Taylorja [1] naprej je cilj vseh teh raziskav dajati priporočila za obdelavo kovin, ki bi bila ekonomična, oziroma razviti metode in postopke, ki bi bili cenejši, hitrejši in dovolj zanesljivi pri določanju glavnih značilnosti za obdelavo določenega kovinskega materiala. Ta problem še do danes ni zadovoljivo rešen. Če analiziramo različne že znane postopke, s katerimi določamo obdelovalne pogoje pri odrezavanju kovin, opažamo, da veljata pri analizi procesa odrezavanja v glavnem dve osnovni teoriji rezanja:

1. hipoteza minimalne energije, ki sta jo razvila Piispanen in Merchant [2, 3] in

2. hipoteza drsne smeri, ki sta jo uporabljala Lee in Shaffer [4].

Obe hipotezi izhajata z enakega stališča, namreč, da je rezalni proces statični proces. Torej predpostavljata, da so sile, ki delujejo na orodje, konstantne. S preskusi je bilo dokazano, da je to mogoče le pri izjemnih pogojih, drugače pa se rezalne sile spreminjajo [5]. Tudi debelina odrezka ima naključnosten karakter, ki ga lahko opažamo na primer na struženi površini. Številni preskusi pri določanju prereza odrezka so pokazali, da se le-ta spreminja [6]. Glede na povedano je jasno, da imamo opravka z določenimi naključnostnimi spremembami, torej naključnostnimi funkcijami oziroma procesi.

V letu 1963 so poročali Bickel [5] ter Peklenik in Sata [7] o spreminjanju rezalnih sil F_Z in F_Y pri pogojih, ki karakterizirajo stacionarno stanje rezalnega procesa. Pri tem se je spreminjala sila po velikosti tudi do 40 % njene srednje vrednosti. Nadalje je bilo tudi odkrito, da je sprememba rezalnih sil funkcija časa. Iz rezultatov lahko povzamemo, da imajo merjene sile naključnostni značaj, ki izhaja iz različnih vplivnih dejavnikov. Nepreoblikovan material na vhodu procesa imamo lahko za elastoplastično naključnostno nehomogeno telo. Mehanske lastnosti materiala, kakršni sta npr. natezna trdnost in trdota, se namreč, ko teče le-ta v transformacijski coni, spreminjajo zgolj naključnostno. Na drugi strani pa vidimo, da daje sam tok materiala v transformacijski coni vrsto informacij kakor npr. mehanično utrjanje, tvorjenje nastavka na rezalnem robu orodja, pogoje trenja in podobne karakteristike, ki so za analizo procesa le malo uporabne.

V literaturi najdemo vrsto člankov in razprav, ki obravnavajo na takšen ali drugačen način fizikalni proces v transformacijski in strižni coni. Nobeden od njih pa do sedaj še ni razložil, kaj se resnično dogaja med procesom rezanja. Prav tako je bilo izdelanih mnogo modelov, s katerimi naj bi razložili fizikalni proces rezanja. Tudi vsi ti modeli niso prinesli zadovoljive razlage.

Tako prihajamo do sklepa, da je nemogoča razlaga rezalnega procesa na osnovi klasične teorije rezanja. Novi način, kako opisati rezalni proces, je postavljen z modernejšo in razvito eksperimentalno tehniko na modernejše osnove — na osnove statistike.

Že v prejšnjih raziskavah Peklenika in Mosedala je bilo predlagano [8, 9], naj upoštevamo za razlago rezalnega procesa tako imenovano »črno skrinjo« (*black box*) s spremenljivimi vhodi in izhodi. Razlog za tak način raziskav je v tem, da je rezalni proces ekstremno kompleksen in obširen in ne dobimo na vseh stopnjah meritev ali opažanj dovolj informacij o transformaciji materiala.

2. STATISTIČNI MODEL REZALNEGA PROCESA

Povedali smo že, da so osnovane prejšnje teorije rezanja na domnevah in predpostavkah, ki so jih novejše raziskave ovrgle. Kljub vsem raziskovalnim naporom ni dala uporaba klasičnih mehanizmov za analizo rezalnega procesa zadovoljivega odgovora. Klasična teorija ne upošteva naključnostnega značaja določenih fizikalnih veličin. To so predvsem sile, deformacije, temperatura ipd.

Peklenik in Mosedal [9, 10] sta razvila energijski model rezalnega procesa na osnovi stohastične analize. Pri njem izražamo energijska razmerja, kakor izhaja:

$$U_i(t) = U_s(t) + U_o(t) \tag{1}$$

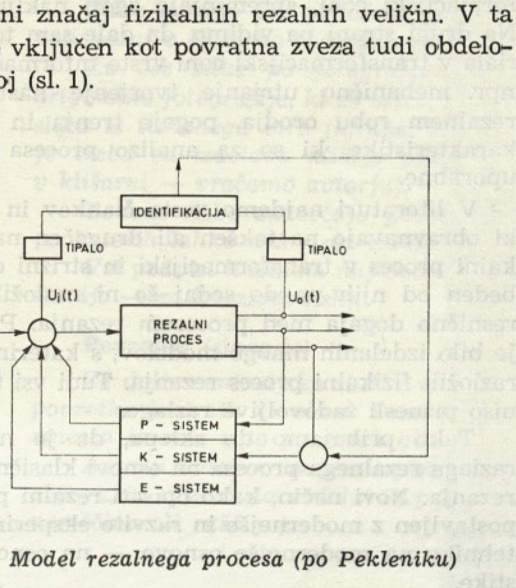
kjer pomenijo:

$U_i(t)$ — vstopno energijo, ki je potrebna za odvzem materiala,

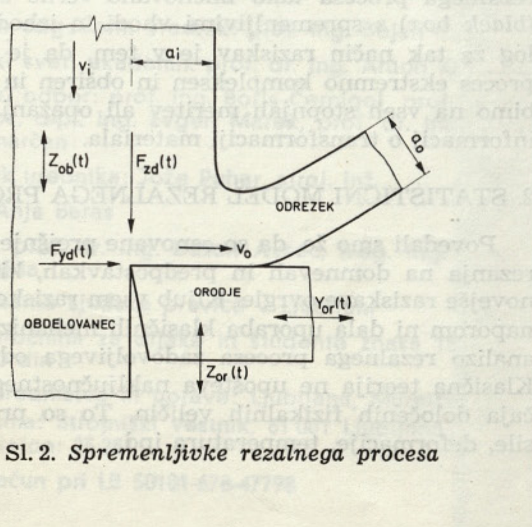
$U_s(t)$ — transformacijsko energijo, ki je potrebna za plastično deformacijo materiala vzdolž strižne ploskve in

$U_o(t)$ — izstopno energijo, ki je potrebna za nastanek odrezka. Ta del energije se nanaša na trenje med cepilno ploskvijo stružnega noža in spodnjo ploskvijo odrezka.

Moderni statistični model rezalnega procesa je osnovan kot večvhodni sistem, ki pa upošteva naključnostni značaj fizikalnih rezalnih veličin. V ta proces je vključen kot povratna zveza tudi obdelovalni stroj (sl. 1).



Sl. 1. *Model rezalnega procesa (po Pekleniku)*



Sl. 2. *Spremenljivke rezalnega procesa*

Za izračunavanje vstopne $U_i(t)$ in izstopne energije $U_o(t)$ imamo v osnovi na voljo dve vrsti sil in hitrosti. To so sile in hitrosti, ki delujejo v smeri pretoka materiala obdelovanca, to je v smeri rezanja, ki jo označujemo s smerjo Z in v smeri odtoka odrezka, to je v smeri podajanja, ki jo označujemo s smerjo Y (sl. 2).

Rezalno orodje, v našem primeru stružni nož, vibrira v dveh smereh: v smeri osi Z in v smeri osi Y (glej sliko 2). Tudi obdelovanec niha, vendar samo v smeri osi Z. Rezalna hitrost v_i in hitrost odrezka v_o prav tako nista konstantni, temveč se spreminjata po času (t). Če računamo varianci obeh, sta le-ti zelo majhni v primerjavi z njihovima srednjima vrednostma. Zaradi tega lahko menimo, da sta konstantni in enaki srednjima vrednostma. Zaradi tega upoštevamo poleg sil in hitrosti v smeri osi Y in Z tudi premike orodja v smeri Y in Z. Tako dobimo premike $Z_{or}(t)$, $Y_{or}(t)$ in $Z_{ob}(t)$, iz katerih lahko izračunamo hitrosti $\dot{Z}_{or}(t)$ oziroma $\dot{Z}_{ob}(t)$.

$$U_s(t) = F_Z(t)\,[v_i + \dot{Z}_{ob}(t) - \dot{Z}_{or}(t)] - F_Y(t)\,[v_o - \dot{Y}_{or}(t)] \tag{2}$$

Iz tega izhaja, da lahko pišemo za vhodno energijo

$$U_i(t) = F_Z(t)\,[v_i + \dot{Z}_{ob}(t) - \dot{Z}_{or}(t)] \tag{3}$$

in izhodno energijo

$$U_o(t) = F_Y(t)\,[v_o - Y_{or}(t)] \tag{4}$$

Kadar imamo dovolj tog sistem, so premiki oziroma njihovi odvodi, to je vrednosti hitrosti zaradi nihanja obdelovanca in orodja, zelo majhni. V našem primeru sta znašala povesa Z_{ob} in Z_{or} 5 do 6 oziroma 1 do 2 μm pri rezalni sili $F_Z = 20$ kp. Če preračunamo te vrednosti v hitrosti, znašajo te od 1 do 2 % od hitrosti, pri kateri smo opravljali preskuse. Zaradi tega imamo lahko naš sistem za poseben primer togega sistema. To pa v znatni meri poenostavi osnovne enačbe. Tako lahko pišemo

$$\begin{aligned} U_i(t) &= F_Z(t)\,.\,v_i \\ U_o(t) &= F_Y(t)\,.\,v_o \end{aligned} \tag{5}$$

Sili $F_Z(t)$ in $F_Y(t)$ sestojita iz dveh komponent. To sta srednji vrednosti sile F_m, ki jo imamo lahko za konstantno vrednost, in dinamični vrednosti $F_d(t)$, ki je naključnostne narave. Zaradi tega ju pišemo v obliki

$$\begin{aligned} F_Z(t) &= F_{m_Z} + F_{d_Z}(t) \\ F_Y(t) &= F_{m_Y} + F_{d_Y}(t) \end{aligned} \tag{6}$$

Če zamenjamo silo $F_Z(t)$ iz enačbe (6) in jo vstavimo v obrazec (5), dobimo

$$U_i(t) = F_{m_Z} v_i + F_{d_Z}(t) \,.\, v_i$$
$$U_o(t) = F_{m_Y} v_o + F_{d_Y}(t) \,.\, v_o \qquad (7)$$

To pa pomeni, da sta tudi energiji sestavljeni iz dveh delov; dela s konstantno vrednostjo U_{m_i} in U_{m_o}

$$Um_i = F_{m_Z} v_i$$
$$Um_o = F_{n_Z} v_o \qquad (8)$$

in delom, ki se spreminja s časom t in je stacionarna naključnostna funkcija:

$$u_i(t) = U_{d_i}(t) = F_{d_Z}(t)\, v_i$$
$$u_o(t) = U_{d_o}(t) = F_{d_Y}(t)\, v_o \qquad (9)$$

kjer pomenita v_i konstantno rezalno hitrost in v_o konstantno hitrost odrezka.

V rezalnem procesu predpostavljamo, da je prostornina odrezanega materiala konstantna. Vstopno-izstopna zveza za idealne geometrične pogoje znaša

$$a_i\, s_i\, v_i = a_o\, s_o\, v_o \qquad (10)$$

Debelina in širina se spremenita, ko pride odrezek skozi transformacijsko cono. Zaradi tega pišemo enačbo kar glede na prerez A. Tako dobimo obrazec (10) v obliki

$$A_i\, v_i = A_o\, v_o \qquad (11)$$

Če upoštevamo definicijo Merchanta [3], dobimo razmerje prečnih prostornin oziroma prečnih prerezov, kakor ga prikazuje enačba

$$p = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_i}{A_o} \qquad (12)$$

3. IDENTIFIKACIJA REZALNEGA PROCESA

Za identifikacijo rezalnega procesa moramo poznati njegove dinamične karakteristike. Za to uporabljamo matematični model oziroma odzivne funkcije, ki prikazujejo zvezo med spremenljivkami sistema.

Odgovor sistema s konstantnim parametrom je določen z vhodom in težnostno funkcijo $h(\tau)$, ki ji pravimo tudi impulzno odzivna funkcija. Za linearni sistem s konstantnim parametrom je poleg impulzne odzivne funkcije, ki je v časovni domeni, pomembna tudi frekvenčna odzivna funkcija, ki jo dobimo v frekvenčni domeni.

Glede na rezalni proces, ki ima vhod $u_i(t)$ in izhod $u_o(t)$, in s predpostavko, da je proces stacionaren in ergodičen, dobimo impulzno odzivno funkcijo iz obrazca

$$u_i(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)\, u_i(t - \tau)\, d\tau \qquad (13)$$

Frekvenčno odzivno funkcijo $I(f)$ rezalnega procesa pa dobimo s korelacijskimi funkcijami in funkcijami spektralnih gostot.

Avtokorelacijska funkcija vstopne energije $R_{u_i}(\tau)$ znaša

$$R_{u_i}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t)\, u_i(t + \tau)\, dt \qquad (14)$$

in križno korelacijska funkcija vstopno-izstopne energije $R_{u\, u_o}(\tau)$

$$R_{u_i u_o}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t)\, u_o(t + \tau)\, dt \qquad (15)$$

Funkcijo spektralne gostote energij ali kratko energijski spekter vhodne energije $S_{u_i}(f)$ dobimo s Fouriejevo analizo avtokorelacijske funkcije energije vhoda

$$S_{u_i}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{u_i}(\tau)\, e^{-j2\pi f\tau} d\tau \qquad (16)$$

in križno energijski spekter vhodno-izhodne energije $S_{u_i u_o}(f)$

$$S_{u_i u_o}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{u_i u_o}(\tau)\, e^{-j2\pi f\tau} d\tau \qquad (17)$$

Težnostna funkcija $h(\tau)$ pomeni dinamično karakteristiko rezalnega procesa v časovni domeni. Dinamično karakteristiko v frekvenčni domeni $I(f)$ pa dobimo s Fouriejevo transformacijo težnostne funkcije $h(\tau)$.

$$I(f) = \int_0^{\infty} h(\tau)\, e^{-j2\pi f\tau} d\tau \qquad (18)$$

Funkcijo $I(f)$ lahko izračunamo tudi s križnim energijskim spektrom vhoda in izhoda in energijskim spektrom vhoda

$$I(f) = \frac{S_{u_i u_o}(f)}{S_{u_i}(f)} \qquad (19)$$

Frekvenčno odzivno funkcijo pa lahko dobimo tudi v obliki absolutne vrednosti $I(f)$, ki jo izračunamo iz razmerij energijskih spektrov izhoda in vhoda.

$$|I(f)|^2 = \frac{S_{u_o}(f)}{S_{u_i}(f)} \qquad (20)$$

Absolutno vrednost frekvenčne odzivne funkcije imenujemo tudi »faktor povečanja sistema« (*system gain factor*) oziroma »kvadrat modula frekvence energije« (*square modulus of the energy frequency*), ki daje prehodne karakteristike izhodnega procesa. Zaradi tega lahko pričakujemo, da bo dal faktor okrepitve sistema dovolj informacij o rezalnem procesu. To je pravzaprav tudi namen tega dela.

Dinamično transferno karakteristiko rezalnega procesa pa lahko dobimo, če uporabljamo frekvenčno odzivno funkcijo v obliki kvadrata modula frekvence rezalnih sil. Tako dobimo enačbo

$$| I (f) |^2 = \frac{S_{F_Y}(f)}{S_{F_Z}(f)} \tag{21}$$

ki je rabila v našem primeru za analizo rezalnega procesa. Že tu lahko povemo, da je dal izbran kriterij dovolj informacij, s katerimi je bilo mogoče ugotavljati posamezne vplive na rezalni proces.

Namen identifikacije je določiti najugodnejše rezalne pogoje rezanja za določene materiale. Najugodnejši pogoji pa so odvisni od materiala obdelovanca, kakor tudi od materiala orodja in vrste drugih dejavnikov kakor npr. geometrije orodja, dinamičnih lastnosti sistema, globine rezanja, podajanja ipd.

Kakor smo videli, je energija sestavljena iz dveh delov: statičnega U_m in dinamičnega dela $u\,(t)$. Statični del energije je odvisen od materiala obdelovanca, geometrije orodja in rezalnih pogojev in ne od vrste stroja. Tako pridemo do ravnotežja energijske enačbe

$$U_{m_i} = U_{m_t} + U_{m_o} \tag{22}$$

s katero lahko izračunamo razmerje med izstopno in vstopno energijo $\varphi\,(o)$. Če hočemo dobiti najboljše pogoje za rezalni proces, mora biti izpolnjen naslednji pogoj

$$\frac{U_{m_o}}{U_{m_i}} = \varphi\,(O) = \min \tag{23}$$

Pri tem pa moramo razlikovati rezalne pogoje z maksimalno dobo trajanja orodja od onih, ki so v soglasju z optimalno ceno odrezanega materiala oziroma optimalno dobo trajanja orodja.

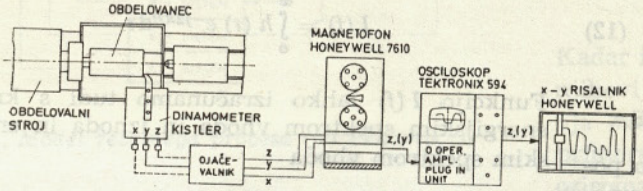
Za maksimalno dobo trajanja orodja mora biti temperatura na kontaktni površini minimalna. Zaradi tega je tudi U_{m_o} minimalna, saj je ta del energije uporabljen za premagovanje trenja med odrezkom in cepilno ploskvijo orodja in trenja med ustvarjeno površino obdelovanca in prosto ploskvijo orodja. Vendar določanje same U_{m_o} za identifikacijo rezalnega procesa ne zadostuje. To dosežemo v zadostni meri le, če zadostimo pogoju, ki ga prikazuje enačba (23) oziroma če velja končni pokazatelj specifična transformacijska energija, ki se nanaša na prostornino odrezanega materiala

$$\frac{\varphi\,(o)}{V_i} = \min \tag{24}$$

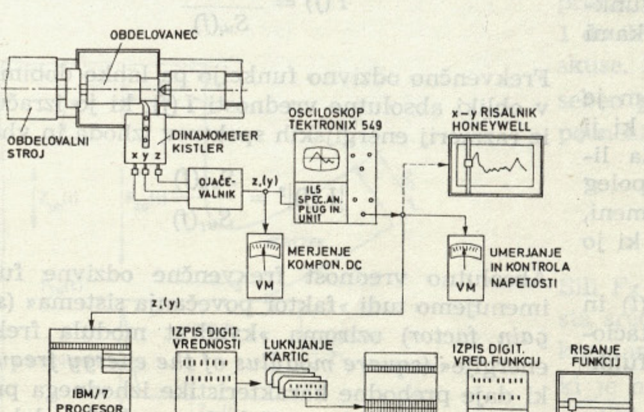
Šele, ko sta izpolnjena oba pogoja iz enačb (21) in (24), lahko določimo najboljše pogoje rezanja za posamezni material obdelovanca, material orodja, geometrijo orodja in vseh drugih dejavnikov, ki vplivajo na sam odrezovalni proces oziroma dinamični sistem.

4. UREDITEV EKSPERIMENTALNEGA MERILNEGA SISTEMA

V prejšnjem poglavju smo postavili statistični model rezalnega procesa na osnovi energij. Za praktično izvedbo vsega povedanega je treba opraviti vrsto meritev vstopnih in izstopnih veličin. Za to je treba spremeniti fizikalne signale v analogne elek-



Sl. 3. *Shema merjenja srednje vrednosti statične komponente rezalnih sil*



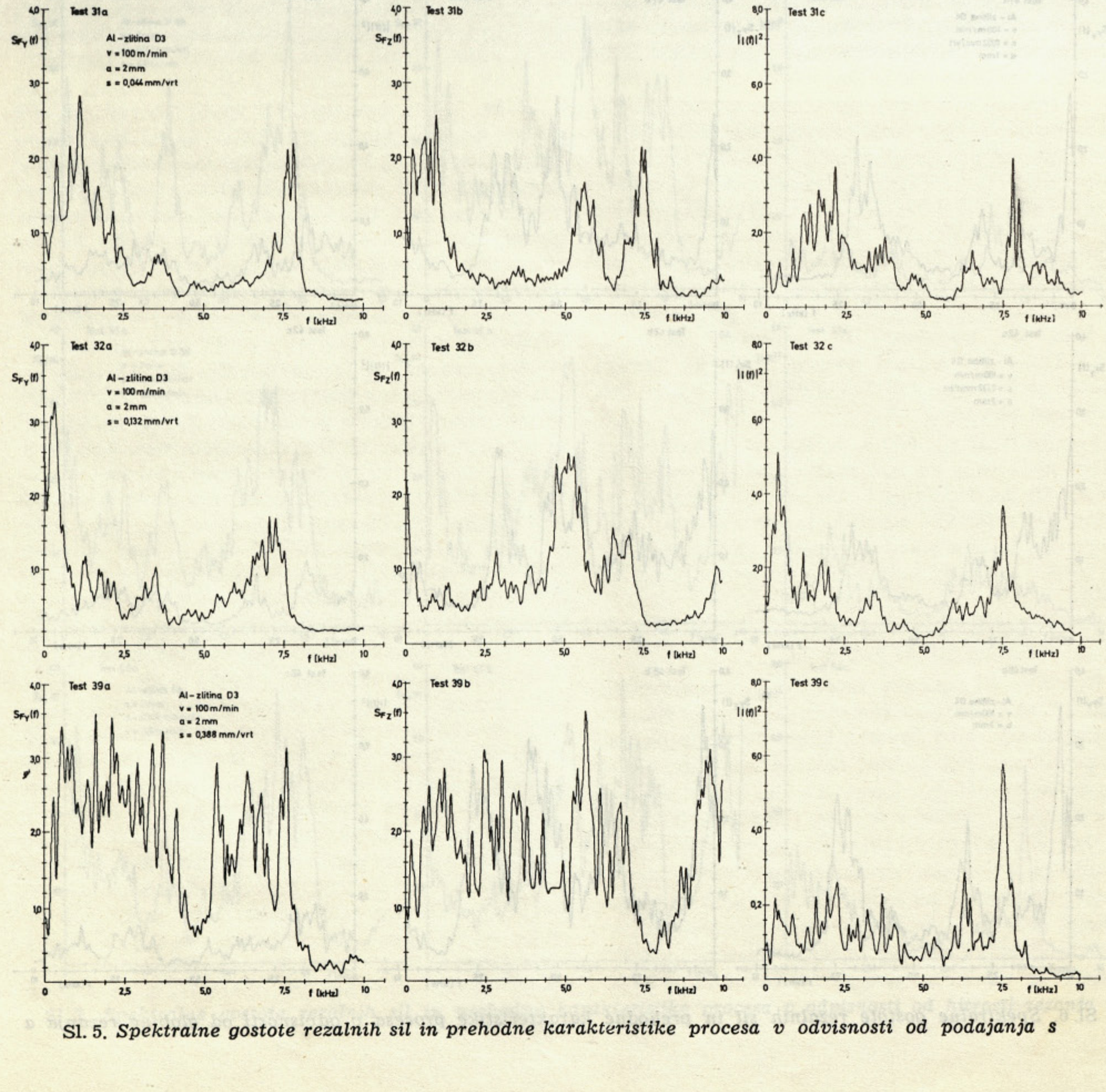
Sl. 4. *Shema ugotavljanja prehodne karakteristike rezalnega procesa $|I\,(f)|^2$ in merjenja statične komponente rezalnih sil*

trične signale, le-te pa naprej v digitalne vrednosti, ki jih preračunamo pozneje v elektronskem računalniku.

Rezalne sile F_Z in podajalne sile F_Y, ki jih merimo v odvisnosti od časa (t), so fizikalne veličine, ki smo jih merili s posebnim dinamometrom. Obe veličini pa imata, kakor je znano, statično ($D.C$) in dinamično ($A.C$) komponento. Statična ali enosmerna komponenta je znatno večja od dinamične. Zaradi tega smo morali meriti vsako posebej. Za to pa je bilo treba izbrati dve različni poti.

Enosmerno komponento sil smo ugotavljali prek magnetofona in osciloskopa na risalnik $x - y$, kakor prikazuje slika 3. V drugi seriji poskusov pa smo ugotavljali velikost statične komponente neposredno iz rezalnega procesa na multivoltmetru v voltih. Ker pa smo celotni merilni stavek merili prek ojačevalnika natančno na 1 V $\triangleq$ 10 kp, je bilo mogoče odbrati statično komponento že kar na voltmetru. Opisani merilni stavek je bil vključen v merilni stavek za ugotavljanje dinamične komponente.

Merilni stavek za ugotavljanje dinamične komponente je bil po dolgem preskušanju in umerjanju sestavljen tako, da smo rezalni proces vodili prek dinamometra in ojačevalnika neposredno v spektralni analizator. Od tod pa na risalnik $x - y$ ali pa na računalnik IBM-S/7, kjer smo analogne



Sl. 5. *Spektralne gostote rezalnih sil in prehodne karakteristike procesa v odvisnosti od podajanja s*

signale preračunali v digitalne vrednosti in dobili z računalnikom IBM 1130 izpis oziroma luknjaste kartice. Po posebnem programu pa smo nadalje računali in risali najprej energijske spektre sile S_{F_Y} in S_{F_Z}, nato pa kvadratni modul frekvence obeh rezalnih sil $|I(f)|^2$.

5. EKSPERIMENTALNI REZULTATI IN ANALIZA

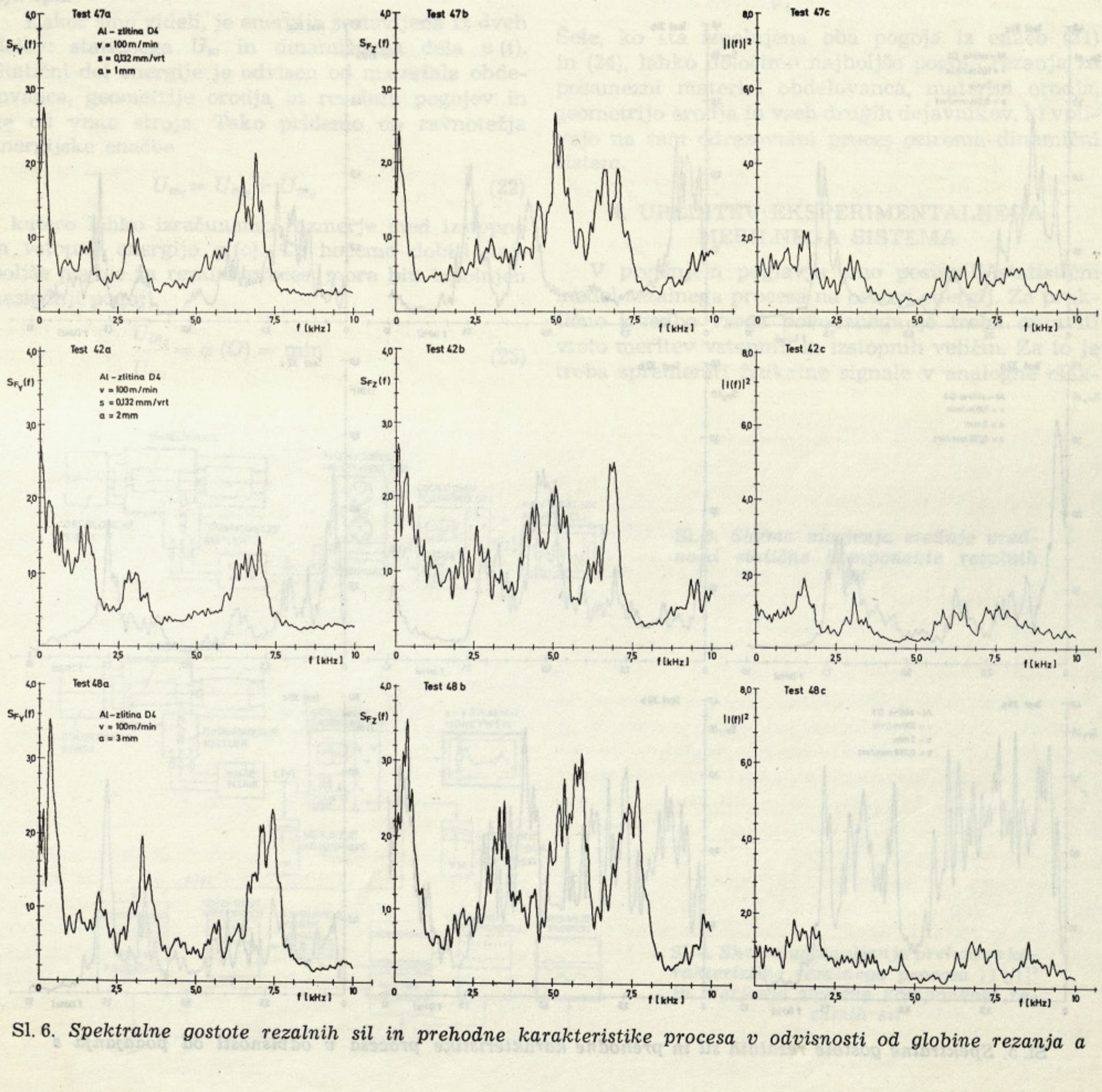
5.1. Eksperimentalni rezultati

Pri obravnavani nalogi »Analiza transformacijskega procesa pri odrezavanju aluminija in njegovih zlitin s transfernimi karakteristikami« je bilo treba opraviti vrsto različnih preskusov. Eksperimentalni rezultati le-teh so osnova za ugotavljanje naslednjih dejavnikov:

1. Ugotavljanje obdelovalnosti z odrezavanjem treh aluminijevih zlitin z uporabo elektronskega računalnika-procesorja po postopku *on-line*, pri različnih pogojih rezanja in po sistemu »črne skrinje« (*black box*).

2. Vpliv rezalnih pogojev, kakor so hitrost in globina rezanja ter podajanje na obliko in velikost dinamične transferne karakteristike kot kvadratnega modula frekvence vhodnih in izhodnih rezalnih sil.

3. Iskanje najugodnejših obdelovalnih pogojev pri upoštevanju najmanjše energije.



Sl. 6. *Spektralne gostote rezalnih sil in prehodne karakteristike procesa v odvisnosti od globine rezanja a*

Kakor smo že povedali, smo za eksperimentalni del izbrali tri aluminijeve zlitine z označbami D_3, D_4 in D_{58} domače izdelave. Pri vseh teh aluminijevih zlitinah smo spreminjali rezalne pogoje v naslednjem območju:

— hitrost rezanja $v = 50, 100, 250, 400$ m/min
— podajanje $s = 0{,}044, 0{,}132, 0{,}222, 0{,}386$ mm/vrt
— globino rezanja $a = 1, 2, 3$ mm

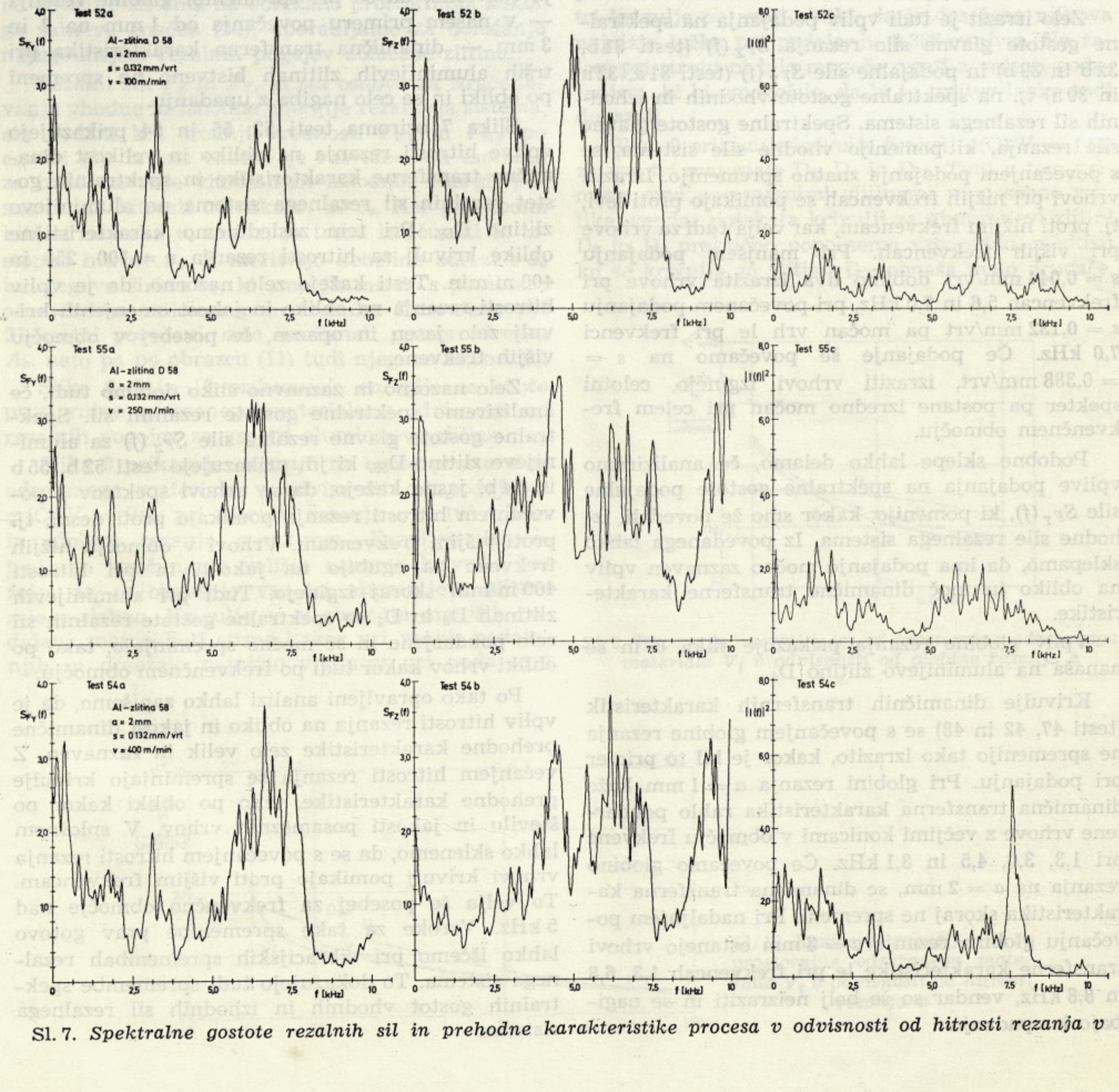
Vpliv rezalnih pogojev na obliko in velikost dinamične transferne karakteristike prikazujejo slike 5, 6 in 7.

5.2. Analiza rezultatov

5.2.1. Dinamična transferna karakteristika

Slike 5, 6 in 7 so sestavljene vsakič iz treh delov a, b in c. Slike z označbo »a« kažejo vedno krivulje spektralnih gostot podajalne sile S_{F_Y} slike z označbo »b« krivulje spektralnih gostot glavne rezalne sile S_{F_Z} in slike z označbo »c« krivulje dinamične transferne karakteristike rezalnih sil $|I(f)|^2$.

Slika 5 prinaša teste 31, 32 in 39, ki kažejo vplive podajanja pri struženju aluminijeve zlitine D_3. Že relativno površen pogled na obliko dinamične transferne karakteristike (testi 31c, 32c in 39c) pove, da je vpliv podajanja razločno viden. Pri podrob-



Sl. 7. *Spektralne gostote rezalnih sil in prehodne karakteristike procesa v odvisnosti od hitrosti rezanja v*

nejši analizi opazimo, da ima dinamična transferna karakteristika pri podajanju 0,044 mm/vrt dva izrazita vrhova tj. vrh pri frekvenci približno 2 kHz in še izrazitejši vrh pri frekvenci 7,8 kHz. Če povečamo podajanje s na 0,132 mm/vrt, se pomakne vrh dinamične prehodne karakteristike v območju nižjih frekvenc proti levi — proti nižjim frekvencam in dobimo izrazitejši vrh pri 0,65 kHz. Tudi vrh pri 7,8 kHz se je pomaknil proti levi — proti nižjim frekvencam in dobimo nov vrh, ki je enotnejši pri frekvenci 7,5 kHz. Če podajanje še povečamo na $s = 0{,}388$ mm/vrt, vrh pri nižjih frekvencah izgine, celotna krivulja transferne karakteristike postane enakomernejša — brez izrazitega vrha v območju nižjih frekvenc. Vrh pri frekvenci 7,5 kHz pa ostane v istem frekvenčnem območju, vendar postane izrazitejši — močnejši.

Zelo izrazit je tudi vpliv podajanja na spektralne gostote glavne sile rezanja $S_{F_Z}(f)$ (testi 31 b, 32 b in 39 b) in podajalne sile $S_{F_Y}(f)$ (testi 31 a, 32 a in 39 a) tj. na spektralne gostote vhodnih in izhodnih sil rezalnega sistema. Spektralne gostote glavne sile rezanja, ki pomenijo vhodne sile sistema, se s povečanjem podajanja znatno spremenijo. Izraziti vrhovi pri nižjih frekvencah se pomikajo proti levi, tj. proti nižjim frekvencam, kar velja tudi za vrhove pri višjih frekvencah. Pri manjšem podajanju $s = 0{,}044$ mm/vrt dobimo dva izrazita vrhova pri frekvencah 5,6 in 7,0 kHz, pri povečanem podajanju $s = 0{,}132$ mm/vrt pa močan vrh le pri frekvenci 7,0 kHz. Če podajanje še povečamo na $s = 0{,}388$ mm/vrt, izraziti vrhovi izginejo, celotni spekter pa postane izredno močan pri celem frekvenčnem območju.

Podobne sklepe lahko delamo, če analiziramo vplive podajanja na spektralne gostote podajalne sile $S_{F_Y}(f)$, ki pomenijo, kakor smo že povedali, izhodne sile rezalnega sistema. Iz povedanega lahko sklepamo, da ima podajanje močno zaznaven vpliv na obliko in moč dinamične transferne karakteristike.

Vpliv globine rezanja prikazuje slika 6 in se nanaša na aluminijevo zlitino D_4.

Krivulje dinamičnih transfernih karakteristik (testi 47, 42 in 48) se s povečanjem globine rezanja ne spremenijo tako izrazito, kakor je bil to primer pri podajanju. Pri globini rezanja $a = 1$ mm kaže dinamična transferna karakteristika rahlo poudarjene vrhove z večjimi konicami v območju frekvenc pri 1,3, 3,0, 4,5 in 8,1 kHz. Če povečamo globino rezanja na $a = 2$ mm, se dinamična transferna karakteristika skoraj ne spremeni. Pri nadaljnjem povečanju globine rezanja $a = 3$ mm ostanejo vrhovi transferne karakteristike le pri frekvencah 1,3, 6,8 in 8,8 kHz, vendar so še bolj neizraziti in se nagibajo k upadanju.

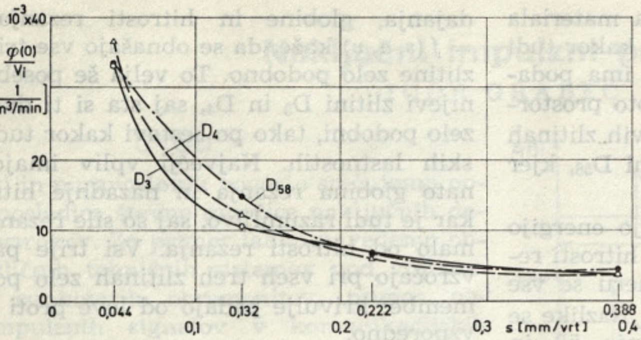
Če analiziramo spektralne gostote rezalnih sil S_{F_Z} in S_{F_Y}, opazimo, da se krivulje v odvisnosti od globine rezanja spreminjajo občutneje, kakor je bilo to pri krivuljah dinamične transferne karakteristike. Krivulje spektralnih gostot naraščajo po jakosti, vrhovi postajajo izrazitejši, vendar je to naraščanje tako enakomerno pri obeh spektrih, da pri računanju dinamične transferne funkcije kot kvocienta spektralne gostote izhoda S_{F_Y} s sprektralno gostoto vhoda S_{F_Z} ne pride do veljave.

Iz opravljene analize lahko posnamemo, da globina rezanja ne vpliva na obliko dinamične transferne karakteristike pri aluminijevi zlitini D_4. Zelo podobne rezultate dobimo tudi pri aluminijevi zlitini D_3. To je v bistvu tudi razumljivo, saj sta obe zlitini (D_3 in D_4) tako po sestavi kakor tudi po mehanskih lastnostih zelo podobni. Iz povedanega je razvidno, da se pri spremembi globine rezanja — v našem primeru povečanja od 1 mm na 2 in 3 mm — dinamična transferna karakteristika pri trših aluminijevih zlitinah bistveno ne spremeni po obliki in se celo nagiba z upadanju.

Slika 7 oziroma testi 52, 55 in 54 prikazujejo vplive hitrosti rezanja na obliko in velikost dinamične transferne karakteristike in spektralnih gostot rezalnih sil rezalnega sistema na aluminijevo zlitino D_{58}. Pri tem zasledujemo karakteristične oblike krivulj za hitrosti rezanja $v = 100$, 250 in 400 m/min. Testi kažejo zelo nazorno, da je vpliv hitrosti rezanja na obliko in jakost omenjenih krivulj zelo jasen in opazen, še posebej v območju višjih frekvenc.

Zelo nazorno in zaznavno sliko dobimo tudi, če analiziramo spektralne gostote rezalnih sil. Spektralne gostote glavne rezalne sile $S_{F_Z}(f)$ za aluminijevo zlitino D_{58}, ki jih prikazujejo testi 52 b, 55 b in 54 b, jasno kažejo, da se vrhovi spektrov s povečanjem hitrosti rezanja pomikajo proti desni, tj. proti višjim frekvencam. Vrhovi v območju nižjih frekvenc pa zgubijo na jakosti in pri hitrosti 400 m/min skoraj izginejo. Tudi pri aluminijevih zlitinah D_3 in D_4 so spektralne gostote rezalnih sil zelo poudarjene in se močno spreminjajo, tako po obliki vrhov kakor tudi po frekvenčnem območju.

Po tako opravljeni analizi lahko zapišemo, da je vpliv hitrosti rezanja na obliko in jakost dinamične prehodne karakteristike zelo velik in zaznaven. Z večanjem hitrosti rezanja se spreminjajo krivulje prehodne karakteristike, tako po obliki kakor po številu in jakosti posameznih vrhov. V splošnem lahko sklenemo, da se s povečanjem hitrosti rezanja vrhovi krivulj pomikajo proti višjim frekvencam. To velja še posebej za frekvenčno območje nad 5 kHz. Vzroke za take spremembe prav gotovo lahko iščemo pri vibracijskih spremembah rezalnega sistema. To dokazujejo tudi spremembe spektralnih gostot vhodnih in izhodnih sil rezalnega sistema.



Sl. 8. *Razmerje energij φ (o) in prostornine odrezanega materiala V_i v odvisnosti od podajanja s*

5.2.2. Razmerje srednjih vrednosti energij

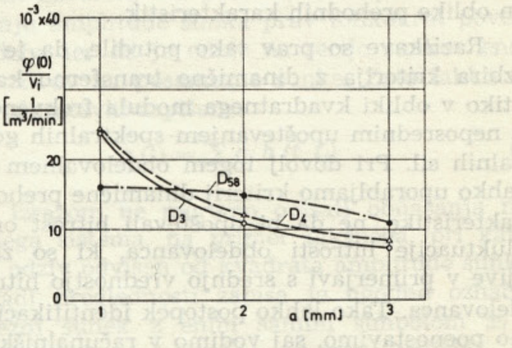
Kriterij prehodne karakteristike, ki ga da razmerje med srednjima vrednostma izhodne in vhodne energije sistema na odrezano prostornino, kakor ga zahteva enačba (24), uporabljamo za določanje najugodnejših rezalnih pogojev določene zlitine.

Rezalni sili F_Z in F_Y, ki sta osnova za izračunavanje vhodne in izhodne energije rezalnega sistema, sta podani kot srednji vrednosti F_{mZ} in F_{mY} po enačbi (8). Iz iste enačbe je razvidno, da moramo za izračunavanje vhodnih in izhodnih energij poznati tudi hitrosti odrezka v_i in v_o. Ker je vhodna hitrost odrezka v_i znana, je treba izračunati le izstopno hitrost v_o. Z meritvijo debeline odrezka a_o in njegove širine b_o, ki smo ju merili s posebnim orodjarskim mikroskopom znamke Zeiss-Jena pri 21-kratni povečavi, smo izračunali prerez odrezka A_o, nato pa po obrazcu (11) tudi njegovo hitrost v_o.

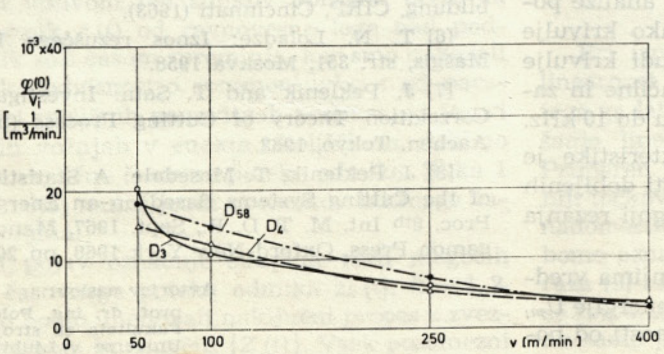
Slike 8, 9 in 10 prikazujejo energije na enoto prostornine odrezanega materiala v odvisnosti od rezalnih pogojev za vse tri aluminijeve zlitine.

Slika 8 prikazuje energijo na enoto prostornine odrezanega materiala v odvisnosti od podajanja $\varphi(O)/V_i = f(s)$, pri hitrosti rezanja $v = 100$ m/min in globini rezanja $a = 2$ mm. Rezultati izmerjenih in izračunanih veličin oziroma krivulje kažejo, da se obnašajo vse tri aluminijeve zlitine zelo podobno. Krivulje so v območju manjših podajanj znatno bolj strme kakor pri večjih podajanjih in dosežejo najnižjo vrednost pri podajanju 0,388 mm/vrt. V območju večjih podajanj 0,222 in 0,388 mm/vrt se celo popolnoma prekrivajo. To prav gotovo kaže na podoben vpliv, ki ga ima podajanje pri vseh treh zlitinah. Razen tega pa kažejo vse tri krivulje po svoji obliki, da je dosežena njihova najnižja točka pri podajanju 0,388 mm/vrt. Na žalost pri stroju ni bilo mogoče rezati z večjim podajanjem, ki bi omogočilo, da bi to trditev lahko tudi dokazali.

Slika 9 prikazuje krivulje funkcij $\varphi(O)/V_i = f(a)$ za vse tri materiale D_3, D_4 in D_{58}. Tudi v tem primeru med posameznimi zlitinami ni posebne razlike, vendar potekata krivulji za aluminijevi zlitini D_3 in D_4 praktično popolnoma vzporedno, medtem ko se krivulja za zlitino D_{58} obnaša malo drugače.



Sl. 9. *Razmerje energij φ (o) in prostornine odrezanega materiala V_i v odvisnosti od globine rezanja a*



Sl. 10. *Razmerje energij φ (o) in prostornine odrezanega materiala V_i v odvisnosti od hitrosti rezanja v*

To je v bistvu tudi razumljivo, saj sta materiala D_3 in D_4 zelo podobna tako po sestavah kakor tudi po lastnostih. Iz povedanega izhaja, da ima podajanje močnejši vpliv na energijo na enoto prostornine odrezanega materiala pri aluminijevih zlitinah D_3 in D_4 kakor pa pri aluminijevi zlitini D_{58}, kjer pada krivulja le zelo počasi.

Slika 10 posreduje krivulje, ki kažejo energijo na odrezano prostornino v odvisnosti od hitrosti rezanja $\varphi(O)/V_i = f(v)$. Tudi v tem primeru se vse tri zlitine med seboj le malo razlikujejo. Razlike se kažejo le pri manjših hitrostih rezanja 50 in 100 m/min. Pri hitrostih rezanja 250 in 400 m/min pa se rezultati vseh treh zlitin močno izenačijo. Vse tri krivulje pri manjših hitrostih rezanja padajo hitreje in postanejo pri najmanjši hitrosti rezanja, tj. 400 m/min že skoraj vzporedne z abscisno osjo, kar tudi pomeni, da se je krivulja približala svoji najnižji točki. Iz povedanega lahko sklepamo, da se najnižja točka ne pojavi pri hitrosti rezanja, ki bi bila manjša od 400 m/min.

6. SKLEP

Raziskave transformacijskega procesa pri odrezavanju aluminijevih zlitin s transfernimi funkcijami so pokazale, da je s predlaganim postopkom identifikacije *on-line,* ki smo ga uporabili pri opisanih raziskavah, mogoče ugotavljati vplive rezalnih pogojev. Rezalni pogoji vplivajo opazno na velikost in oblike prehodnih karakteristik.

Raziskave so prav tako potrdile, da je mogoča izbira kriterija z dinamično transferno karakteristiko v obliki kvadratnega modula frekvenc $|I(f)|^2$ z neposrednim upoštevanjem spektralnih gostot rezalnih sil. Pri dovolj togem obdelovalnem sistemu lahko uporabljamo kriterij dinamične prehodne karakteristike, ne da bi upoštevali hitrost orodja in fluktuacije hitrosti obdelovanca, ki so zanemarljive v primerjavi s srednjo vrednostjo hitrosti obdelovanca. Tako lahko postopek identifikacije znatno poenostavimo, saj vodimo v računalniški sistem neposredno spektralni gostoti vhodne rezalne sile S_{F_Z} in izhodne sile S_{F_Y}.

Rezultati raziskav so potrdili tudi, da je bila izbira frekvenčnega območja pravilna. Iz analize posameznih testov jasno izhaja, da so tako krivulje spektralnih gostot rezalnih sil kakor tudi krivulje dinamičnih prehodnih karakteristik značilne in zanimive v celotnem frekvenčnem območju do 10 kHz.

Kriterij dinamične prehodne karakteristike je nazorno pokazal, da se oblike in velikosti dobljenih krivulj spreminjajo s spremenjenimi pogoji rezanja glede frekvence in amplitude.

Kriterij, ki ga da razmerje med srednjima vrednostma izhodne energije U_{m_o} in vhodne energije U_{m_i} sistema in odrezane prostornine v odvisnosti od podajanja, globine in hitrosti rezanja $\varphi(O)/V_i = f(s, a, v)$ kaže, da se obnašajo vse tri aluminijeve zlitine zelo podobno. To velja še posebej za aluminijevi zlitini D_3 in D_4, saj sta si ti dve zlitini tudi zelo podobni, tako po sestavi kakor tudi po mehanskih lastnostih. Največji vpliv imajo podajanje, nato globina rezanja in nazadnje hitrost rezanja, kar je tudi razumljivo, saj so sile rezanja odvisne le malo od hitrosti rezanja. Vsi trije parametri povzročajo pri vseh treh zlitinah zelo podobne spremembe: krivulje padajo od leve proti desni skoraj vzporedno.

Tudi spektralne gostote rezalnih sil S_{F_Y} in S_{F_Z} kažejo znatne spremembe v odvisnosti od rezalnih pogojev. Moč spektrov obeh rezalnih sil s povečanjem prereza odrezka raste, vendar je naraščanje spektralnih gostot izhodne sile S_{F_Y} pri podajanju sorazmerno večje, kakor pa je to primer pri globini rezanja. To je prav gotovo posledica naraščanja rezalnih sil v odvisnosti od podajanja oziroma globine rezanja.

S podrobno analizo eksperimentalnih rezultatov lahko opazimo pri spektralnih gostotah tudi določeno medsebojno povezanost. To nas pripelje, kakor smo zapisali že pri analizi rezultatov, do sklepa, da obstaja med obema spektroma določena povezanost. Fizikalni model, ki bi opisal to povezanost v odvisnosti od fizikalnih lastnosti materiala in pogojev rezanja, bi lahko napovedal značilnosti, ki smo jih ugotovili pri naših raziskavah. Značilna je tudi ugotovitev, da smo dobili dinamične karakteristike z več vrhovi, kar kaže, da se pojavljajo v določenih frekvenčnih območjih ugodnejše razmere pri prenosih iz ene prostostne stopnje v drugo.

LITERATURA

[1] W. F. Taylor: On the Art of Metal Cutting, Trans. ASME 28 (1901).

[2] V. Piispanen: Teknillinen Aikakauslehti 27, 315—322 (1937).

[3] M. E. Merchant: Mechanics of the Metal Cutting Process; Journal of Applied Physics, 16, 267—275 (1945).

[4] E. M. Lee and B. W. Shaffer: The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining; Journal of Applied Physics, 18, Trans. ASME 73, 405—413 (1951).

[5] E. Bickel: Die wechselnde Kräfte bei der Spanbildung, CIRP, Cincinnati (1963).

[6] T. N. Loladze: Iznos rezuščego instrumenta; Mašgis, str. 351, Moskva 1958.

[7] J. Peklenik and T. Sata: Investigation of the Correlation Theory of Cutting Process (unpublished), Aachen, Tokyo, 1963.

[8] J. Peklenik, T. Mosedale: A Statistical Analysis of the Cutting Systems Based on an Energy Principle, Proc. 8th Int. M. T. D. R., Sept. 1967, Manchester, Pergamon Press, Oxford-New York 1968, pp. 209—231.

Avtorjev naslov:
prof. dr. ing. Polde Leskovar,
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani