UDK 621.9.011

Analiza lastnosti materiala in njihovi vplivi na sile rezalnega procesa

POLDE LESKOVAR

1. Uvod

Vloga lastnosti materiala postaja v moderni tehnologiji vse pomembnejša. Medsebojne odvisnosti v procesu, kakor tudi nenehna navzočnost materiala ter vrsta njegovih lastnosti, ki niso vedno mehansko določene in so pogosto v zvezi z mnogimi tehnološkimi procesi, lahko razdelimo v več razredov.

V prvem razredu so »natančno določene lastnosti« materiala. To so lastnosti, ki jih lahko določamo z izrazi atomistike ter z molekularnimi in kristalografskimi parametri kemičnih elementov. Sem spadajo tudi elastična konstanta materiala, električne in magnetne lastnosti ipd.

V drugi razred sodijo »za proces specifične lastnosti«. To so v glavnem mehanske lastnosti materiala, kakršne so: trdota, trdnost, sposobnost plastičnega preoblikovanja, lastnosti utrjanja ipd.

Tretji razred pa sestavljajo lastnosti, ki pomenijo zelo kompleksne fizikalne procese in zavzemajo svoja mesta v karakterističnih oblikah. Lastnosti te skupine so npr.: obstojna doba orodja, kvaliteta površine obdelovanca, koeficient trenja, specifične rezalne sile, specifična energija, deformacije ipd. [1]

Vse te različne lastnosti materiala so vidne pod zapletenimi sestavami v predpisanih definicijah modelov določenih tehnoloških procesov. Sestava takih modelov terja, da so izražene z njimi tudi lastnosti materiala kot funkcije spremenljivk za ločene poljubne tehnološke postopke.

Material, naj bo to jeklo ali druge zlitine npr. na osnovi aluminija, bakra, ipd., imamo lahko za mikroskopske nehomogenosti. V sestavu kristalnih zrn in njihovih meja so velikosti zrn in druge nepopolnosti porazdeljene po naključju. Vse to povzroča, da se tudi mehanske lastnosti materiala spreminjajo naključno in jih zaradi tega ni mogoče predvidevati. V stohastično nehomogenih snoveh, kakršni so kovinski materiali, so mehanske lastnosti zato naključnostne funkcije.

Iz statistične napetostne teorije je znano, da so napetosti v materialu porazdeljene normalno. Tudi dopustna natezna trdnost je stacionarna naključnostna funkcija s konstantno srednjo vrednostjo in varianco [2]. Tako predlaga J. Murzewski [3] že korelacijsko funkcijo za dopustno trdnost

$$r_{xx} = \exp\left(-x^2/a^2\right)$$

ki pa je osnovana bolj na domnevah brez potrebnega eksperimentalnega potrdila.

Dandanes je znano, da so mehanske lastnosti materiala — predvsem trdnost in trdota — pomemben vstopni podatek, ki ga bomo v nadaljevanju raziskali podrobneje.

2. Mikrotrdota kot osnova za korelacijsko analizo materiala

V našem primeru smo obravnavali trdoto, ki je izredno pomembna in značilna lastnost vsakega materiala, še posebno, če ga obdelujemo z odrezavanjem. Podobno, kakor smo zapisali za razdelitev dopustne trdnosti, ki so jo omenjali razni avtorji [2, 3], lahko trdimo tudi za trdoto, da je namreč njena porazdelitev po materialu le naključna. Od tod tudi lahko predpostavljamo, da je porazdelitev trdote normalna glede na strukturo materiala. Normalna porazdelitev ima v matematični statistiki izredno pomembno vlogo, saj lahko trdimo, da je večina statističnih porazdelitev, ki se pojavljajo v praksi, normalna. Če pa že nimajo čisto normalne porazdelitve, se ji prav gotovo močno približujejo [4].

Tako lahko priredimo avtokorelacijsko funkcijo za mikrotrdoto

$$R_{HV}(\tau) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_0^T HV(t)\, HV(t+\tau)\, \mathrm{d}t$$

in funkcijo spektralne gostote

$$S_{HV}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{HV}(\tau) \exp\left(-j\, 2\pi f \tau\right) \mathrm{d}\tau$$

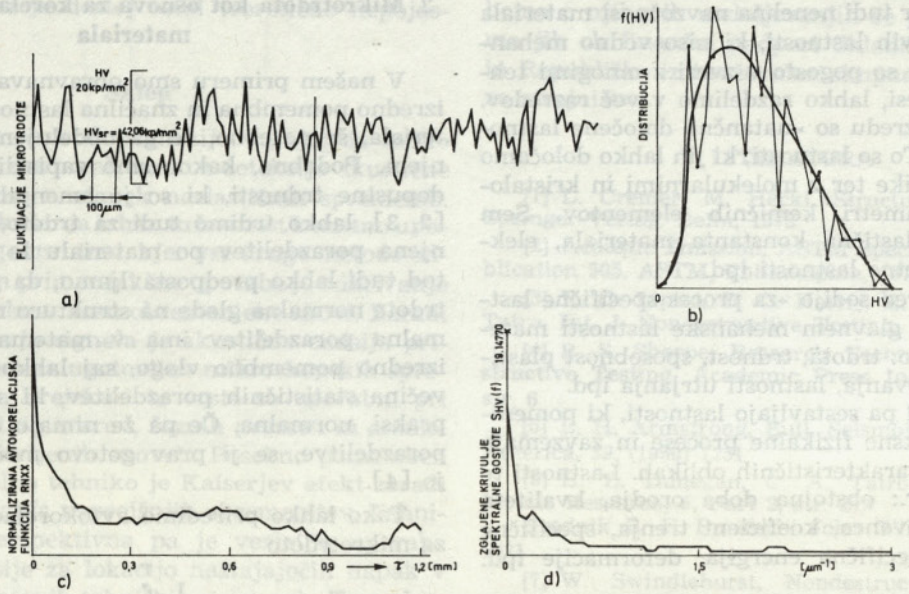
Naključnostno nehomogeni material povzroča tudi naključnostni značaj rezalnih sil. To je bil tudi glavni razlog naših raziskav. Vpliv trdote na obrabo je vsakomur znan. Z našimi poskusi pa smo dokazali, da lahko s trdoto opišemo posamezne kovinske materiale s korelacijskimi funkcijami in spektralnimi gostotami. Poleg tega so raziskave pokazale tudi odvisnot rezalnih sil od mehanskih lastnosti materiala.

Predmet naših raziskav so nekateri materiali s področja aluminija in njegovih zlitin. V ta namen smo izbrali poleg čistega aluminija z označbo A_3 še tri najbolj značilne zlitine aluminija. To so zlitine D_3, D_4 in D_{58}, ki se danes uporabljajo največ za razne obremenjene strojne elemente in konstrukcije in se zaradi tega tudi največ obdelujejo z odrezavanjem.

Kakor pove že sam naslov, smo obravnavali kot značilno lastnost materiala v nadaljevanju le nje-

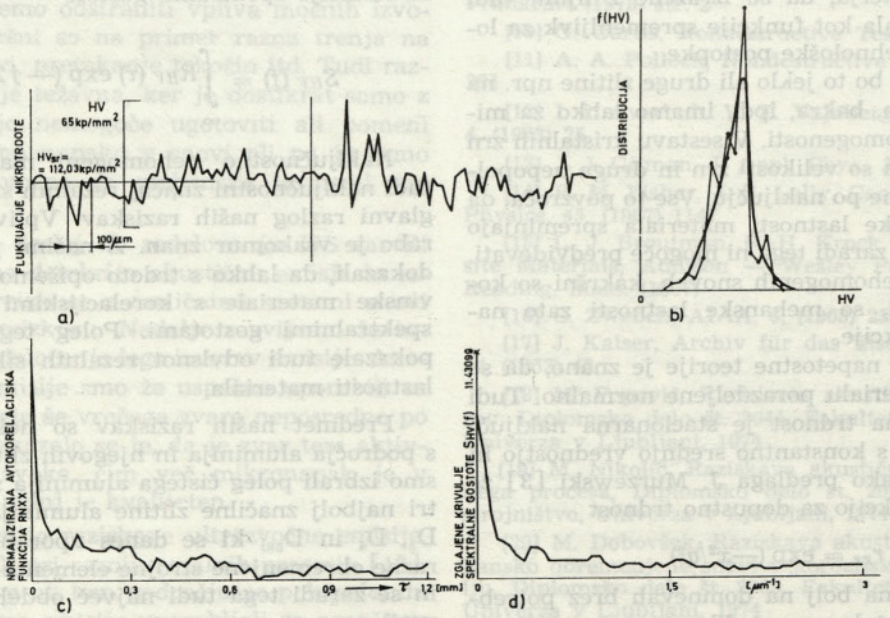
TABELA 1. *Statistični parametri meritev mikrotrdote*

Označba materiala	Število odčitkov N	Aritmetična sredina kp/mm² XSR	Standardna deviacija SIX	Varianca SIX²	Tretji moment SMX³	Četrti moment SMX⁴	Koeficient asimilacije ALFX³	Koeficient sploščitve ALFX⁴
A_3	1500	42,06	9,53	90,90	435	$2,2 \cdot 10^4$	0,502	2,69
D_3	1500	112,03	15,50	241,00	1240	$3,5 \cdot 10^5$	0,331	6,01
D_4	1493	117,58	28,60	822,00	62200	$1,8 \cdot 10^7$	2,650	27,50
D_{58}	1450	106,85	23,40	547,00	14400	$2,3 \cdot 10^6$	—1,12	7,72



Sl. 1. *Analiza mikrotrdote HV za čisti aluminij* A_3

a — fluktuacije mikrotrdote
b — distribucija
c — normalizirana korelacijska funkcija
d — zglajena krivulja spektralne gostote



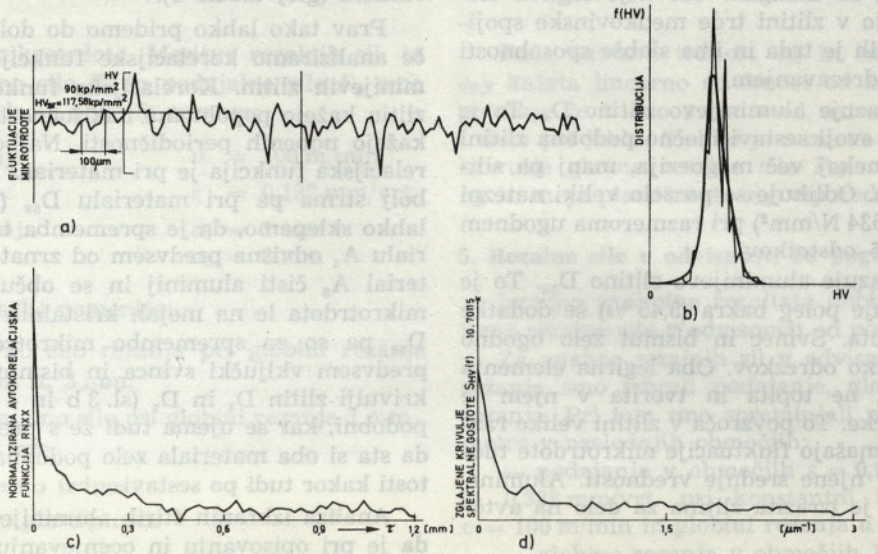
Sl. 2. *Analiza mikrotrdote HV za aluminijevo zlitino* D_3

a — fluktuacije mikrotrdote
b — distribucija
c — normalizirana korelacijska funkcija
d — zglajena krivulja spektralne gostote

govo trdoto. Pri tem smo merili mikrotrdoto s posebnim merilnikom mikrotrdote Durimet podjetja Leitz. Na posebej obdelanem preskušancu z določeno kvaliteto površine smo ugotavljali trdoto v razmiku po 20 μm. Na vsakem preskušancu smo določili po približno 1500 odčitkov. Tabela 1 prikazuje nekaj značilnih parametrov meritev mikrotrdote.

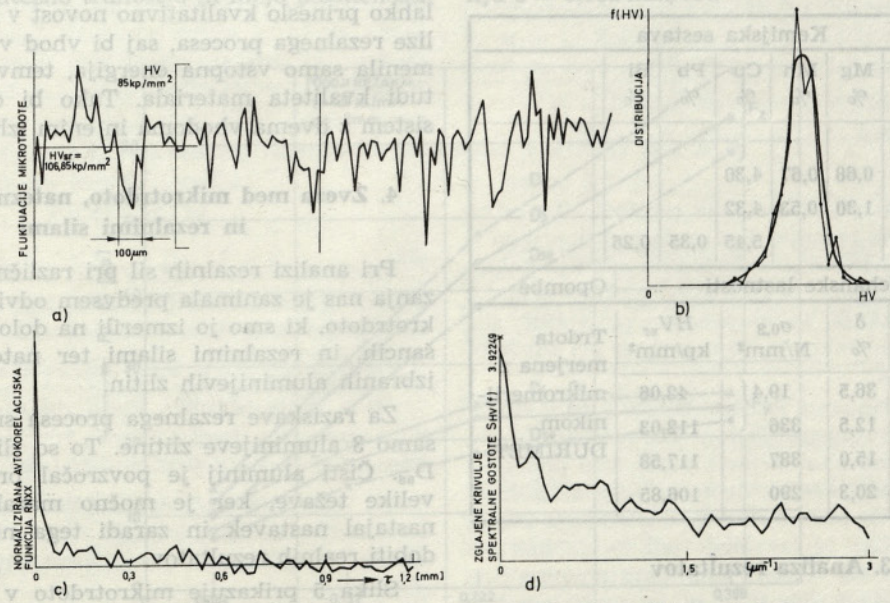
Izmerjene vrednosti mikrotrdote smo vrednotili nato na elektronskem računalniku IBM 1130, ki je po določenih programih narisal posamezne karakteristične funkcije.

Slika 1 prikazuje fluktuacije mikrotrdote (a), distribucijo mikrotrdote (b), normalizirano avtokorelacijsko funkcijo (c) in spektralno gostoto (d) mikrotrdote *HV* za material A_3. Material A_3 je čisti



Sl. 3. *Analiza mikrotrdote HV za aluminijevo zlitino* D_4

a — fluktuacije mikrotrdote
b — distribucija
c — normalizirana korelacijska funkcija
d — zglajena krivulja spektralne gostote



Sl. 4. *Analiza mikrotrdote HV za aluminijevo zlitino* D_{58}

a — fluktuacije mikrotrdote
b — distribucija
c — normalizirana korelacijska funkcija
d — zglajena krivulja spektralne gostote

aluminij z 99,5-odstotno čistočo in ima zelo majhno natezno trdnost ($\sigma_M = 70$ N/mm²) in raztezek ($\delta = 36{,}5$ odstotka). Fluktacije mikrotrdote 1 a znašajo skoraj 50 odstokov od njene srednje vrednosti.

Slika 2 prikazuje enake pokazatelje tj. krivulje spremembe vrednosti mikrotrdote (a), krivuljo porazdelitve (b), krivuljo normalizirane korelacijske funkcije (c) in krivuljo spektralne gostote (d) za aluminijevo zlitino D_3. Poleg bakra kot glavne legirne komponente vsebuje aluminijeva zlitina D_3 še magnezij, silicij in mangan. Vsi trije legirni elementi sestavljajo v zlitini trde medkovinske spojine, zaradi katerih je trda in ima slabše sposobnosti za obdelavo z odrezavanjem.

Slika 3 prikazuje aluminijevo zlitino D_4. To je zlitina, ki je po svoji sestavi močno podobna zlitini D_3, vsebuje le nekaj več magnezija, manj pa silicija in mangana. Odlikuje se po zelo veliki natezni trdnosti (($\sigma_M = 534$ N/mm²) pri razmeroma ugodnem raztezku ($\delta = 15$ odstotkov).

Slika 4 prikazuje aluminijevo zlitino D_{58}. To je zlitina, ki vsebuje poleg bakra (5,45 %) še dodatke svinca in bismuta. Svinec in bismut zelo ugodno vplivata na obliko odrezkov. Oba legirna elementa se v aluminiju ne topita in tvorita v njem le mehkejše vključke. To povzroča v zlitini velike razlike trdote, saj znašajo fluktuacije mikrotrdote tudi do 80 odstotkov njene srednje vrednosti. Aluminijeva zlitina D_{58} je izrazita zlitina za delo na avtomatih.

V tabeli 2 so zbrani osnovni podatki o kemični sestavi naštetih zlitin in njihove mehanske lastnosti.

TABELA 2. *Sestava in mehanske lastnosti Al-zlitin*

Ozn. mat.	Kemijska sestava							
	Fe %	Si %	Mg %	Mn %	Cu %	Pb %	Bi %	
A_3	0,22	0,09						
D_3	0,28	0,57	0,68	0,67	4,30			
D_4	0,25	0,43	1,30	0,53	4,32			
D_{58}	0,23	0,11			5,45	0,35	0,26	

Ozn. mat.	Mehanske lastnosti				Opombe
	σ_M N/mm²	δ %	$\sigma_{0,2}$ N/mm²	HV_{sr} kp/mm²	
A_3	77	36,5	19,4	42,06	Trdota merjena z mikromerilnikom DURIMET
D_3	481	12,5	336	112,03	
D_4	534	15,0	387	117,58	
D_{58}	408	20,3	290	106,85	

3. Analiza rezultatov

Pri analizi posameznih krivulj vhodnih podatkov ali fluktuacij mikrotrdote (sl. 1 a, 2 a, 3 a in 4 a) vidimo, da so precejšnje razlike, pa naj bo to v smeri abscisne osi ali v smeri ordinat. Najbolj sta si podobni krivulji zlitin D_3 in D_4, kar je razumljivo, saj sta si ti dve zlitini tudi najbolj podobni po svoji sestavi in mehanskih lastnostih. Če primerjamo krivulje porazdelitev oziroma distribucij, vidimo, da so med seboj zelo različne. Najmanjše koeficiente nesimetričnosti najdemo pri krivuljah zlitin A_3 in D_3 (sl. 1 b in 2 b) znatno večja pa postaneta pri materialih D_4 in D_{58} (sl. 3 b in 4 b). Tudi koeficienti sploščenosti so pri vseh materialih zelo različni (glej tabelo 1).

Prav tako lahko pridemo do določenih sklepov, če analiziramo korelacijske funkcije izbranih aluminijevih zlitin. Korelacijske funkcije vseh štirih zlitin kažejo popolnoma naključnostni značaj in ne kažejo nobenih periodičnosti. Najbolj položna korelacijska funkcija je pri materialu A_3 (sl. 1 c), najbolj strma pa pri materialu D_{58} (sl. 4 c). Iz tega lahko sklepamo, da je sprememba trdote pri materialu A_3 odvisna predvsem od zrnatosti, saj je material A_3 čisti aluminij in se občutneje spremeni mikrotrdota le na mejah kristalnih zrn. Pri zlitini D_{58} pa so za spremembo mikrotrdote odločujoči predvsem vključki svinca in bismuta. Korelacijski krivulji zlitin D_3 in D_4 (sl. 3 b in 4 c) sta si precej podobni, kar se ujema tudi že s prej zapisanim, tj. da sta si oba materiala zelo podobna tako po zrnatosti kakor tudi po sestavi.

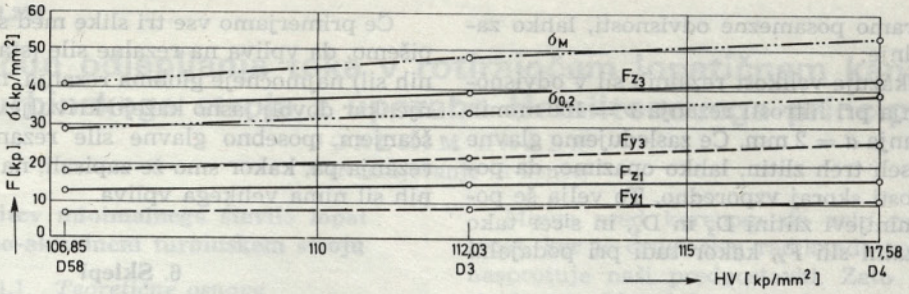
Analiza izbranih štirih aluminijevih zlitin kaže, da je pri opisovanju in ocenjevanju določenih kovinskih materialov mogoče uspešno uporabljati korelacijsko analizo. Menim, da bi lahko bili rezultati take analize znatno bolj jasni in odločujoči, če bi za ugotavljanje trdote uporabljali napravo, ki bi ugotavljala kontinuirno spremembo trdote. To bi lahko prineslo kvalitativno novost v raziskave analize rezalnega procesa, saj bi vhod v sistem ne pomenila samo vstopna energija, temveč neposredno tudi kvaliteta materiala. Tako bi dobili tehnični sistem z dvema vhodoma in enim izhodom.

4. Zveza med mikrotrdoto, natezno trdnostjo in rezalnimi silami

Pri analizi rezalnih sil pri različnih pogojih rezanja nas je zanimala predvsem odvisnost med mikrotrdoto, ki smo jo izmerili na določenih preizkušancih, in rezalnimi silami ter natezno trdnostjo izbranih aluminijevih zlitin.

Za raziskave rezalnega procesa smo uporabljali samo 3 aluminijeve zlitine. To so zlitine D_3, D_4 in D_{58}. Čisti aluminij je povzročal pri odrezavanju velike težave, ker je močno mazal, na nožu je nastajal nastavek in zaradi tega ni bilo mogoče dobiti realnih rezultatov.

Slika 5 prikazuje mikrotrdoto v odvisnosti od rezalnih sil in natezne trdnosti ter meje plastičnosti za aluminijeve zlitine D_3, D_4 in D_{58}. Iz danih krivulj je razvidno, da se rezalne sile večajo linearno v



Sl. 5. *Sile pri rezanju v odvisnosti od mikrotrdote in natezne trdnosti*

odvisnosti od mikrotrdote. Meritve rezalnih sil, to je glavne rezalne sile F_z in podajalne sile F_y smo merili pri naslednjih pogojih rezanja:

— hitrost rezanja $v = 100$ m/min
— podajanje $s = 0{,}132$ mm/vrt.
— globina rezanja $a_1 = 1$ mm
$a_3 = 3$ mm

Posamezne označbe pomenijo:

F_{z1}, F_{z3} — glavno silo rezanja pri globini rezanja 1 mm in 3 mm,
F_{y1}, F_{y3} — podajalno silo pri globini rezanja 1 mm in 3 mm,
σ_M — natezno trdnost,
$\sigma_{0,2}$ — mejo plastičnosti.

Kakor je razvidno s slike, je glavna sila rezanja F_z linearno odvisna od mikrotrdote materiala, kar pa velja tudi za podajalne sile F_y. Prav tako je zanimiva povezava med srednjo vrednostjo meritev mikrotrdote, natezno trdnostjo in mejo plastičnosti.

Tudi natezna trdnost σ_M in meja plastičnosti $\sigma_{0,2}$ kažeta linearno odvisnost od mikrotrdote, kar potrjuje že znano zvezo med natezno trdnostjo in trdoto pri jeklu. S slike je nazorno razvidno, da so krivulje glavne rezalne sile F_{z3}, natezne trdnosti σ_M in meje plastičnosti $\sigma_{0,2}$ vzporedne.

5. Rezalne sile v odvisnosti od pogojev pri rezanju

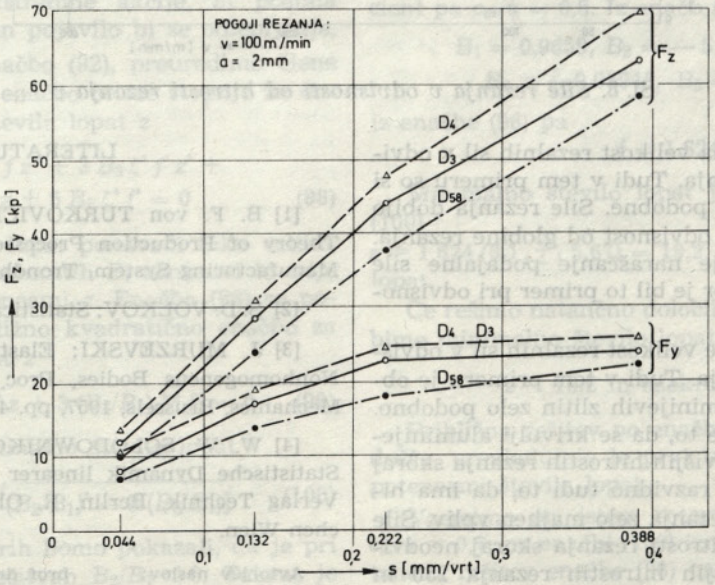
Izredno zanimive rezultate dobimo, če zasledujemo rezalne sile v odvisnosti od pogojev rezanja.

Za analizo rezalnih sil v odvisnosti od pogojev rezanja smo izbrali podajanje, globino in hitrost rezanja. Pri tem smo spreminjali posamezne parametre v naslednjih območjih:

— podajanje v območjih $s = 0{,}044$; 0,132; 0,222 in 0,388 mm/vrt. pri konstantni hitrosti rezanja $v = 100$ m/min in globini rezanja $a = 2$ mm;

— globino rezanja v območjih 1, 2 in 3 mm pri hitrosti rezanja $v = 100$ m/min in podajanju $s = 0{,}132$ mm/vrt.;

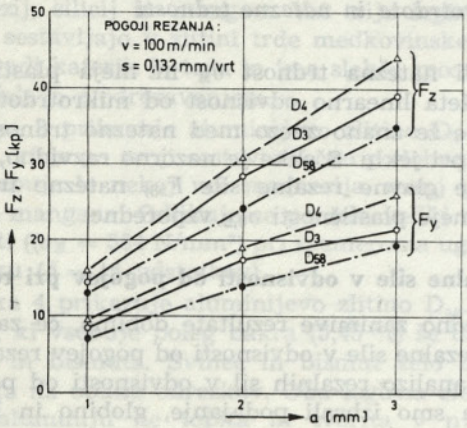
— hitrost rezanja v območjih $v = 50$, 100, 250 in 400 m/min pri globini rezanja 2 mm in podajanju $s = 0{,}132$ mm/vrt.



Sl. 6. *Sile rezanja v odvisnosti od podajanja s*

Če analiziramo posamezne odvisnosti, lahko zapišemo naslednje:

Slika 6 prikazuje velikost rezalnih sil v odvisnosti od podajanja pri hitrosti rezanja $v = 100$ m/min in globini rezanja $a = 2$ mm. Če zasledujemo glavne sile rezanja vseh treh zlitin, lahko opazimo, da potekajo odvisnosti skoraj vzporedno. To velja še posebej pri aluminijevi zlitini D_3 in D_4, in sicer tako pri glavni rezalni sili F_z, kakor tudi pri podajalni sili F_y.



Sl. 7. *Sile rezanja v odvisnosti od globine rezanja a*

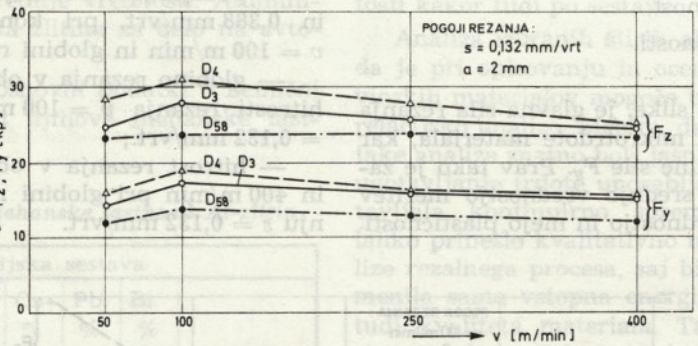
S slike 7 je razvidna velikost rezalnih sil v odvisnosti od globine rezanja. Tudi v tem primeru so si vse tri odvisnosti zelo podobne. Sile rezanja dobijo skoraj proporcionalno odvisnost od globine rezanja. Pri globini rezanja je naraščanje podajalne sile znatno močnejše, kakor je bil to primer pri odvisnosti od podajanja.

Slika 8 pa prikazuje velikost rezalnih sil v odvisnosti od hitrosti rezanja. Tudi v tem primeru je obnašanje vseh treh aluminijevih zlitin zelo podobno. Pri tem je zanimivo še to, da se krivulji aluminijevih zlitin D_3 in D_4 pri višjih hitrostih rezanja skoraj prekrivata. S slike je razvidno tudi to, da ima hitrost rezanja na sile rezanja zelo majhen vpliv. Sile rezanja ostanejo od hitrosti rezanja skoraj neodvisne ali pa le pri višjih hitrostih rezanja 250 in 400 m/min celo manjšajo.

Če primerjamo vse tri slike med seboj, lahko zapišemo, da vpliva na rezalne sile (statični del rezalnih sil) najmočneje globina rezanja, nato pa podajanje, kar dovolj jasno kažejo krivulje s strmim naraščanjem, posebno glavne sile rezanja F_z. Hitrost rezanja pa, kakor smo že zapisali, na velikost rezalnih sil nima velikega vpliva.

6. Sklepi

Raziskave kvalitete materiala in vplivi njihovih lastnosti na sile v rezalnem procesu so dale pozitivne rezultate. Iz vsega povedanega lahko sklepamo, da je izbira mikrotrdote pokazala pot, kako dobiti značilni podatek, s katerim bomo lahko zanesljivo ocenili kvaliteto določenega kovinskega materiala. S korelacijsko in spektralno analizo je mogoče zaznati spremembe v materialu. Mehanske lastnosti materiala (natezna trdnost in trdota) vplivajo sorazmerno na rezalne sile. Tudi pogoji rezanja vplivajo na rezalne sile. Največji vpliv ima globina rezanja, nato pa podajanje. Le hitrost rezanja na rezalne sile nima večjega vpliva. Pri manjših hitrostih rezanja se le rahlo nagiba k naraščanju, pri večjih hitrostih pa se tako glavna rezalna sila kakor tudi podajalna sila manjšata.



Sl. 8. *Sile rezanja v odvisnosti od hitrosti rezanja v*

LITERATURA

[1] B. F. von TURKOVICH: Prolegomena to the Theory of Production Processes, 2nd Int. Seminar on Manufacturing System, Trondheim-Norway, 1970.

[2] S. D. VOLKOV: Statistical Proc. Strenght Theory.

[3] J. MURZEVSKI: Elastic-Plastic Stochastically Nonhomogeneus Bodies, Proc. 9th Int. Congr. Appl. Mechanics, Brussels, 1957, pp. 479—489.

[4] W. W. SOLODOWNIKOW: Einführung in die Statistische Dynamik linearer Regelungssysteme, VEB Verlag Technik, Berlin, R. Oldenbourg Verlag, München-Wien.

Avtorjev naslov: prof. dr. mag. ing. Polde Leskovar
Fakulteta za strojništvo
univerze v Ljubljani