

# STROJNÍŠKI VESTNIK

LETNIK 21

LJUBLJANA, SEPTEMBER—OKTOBER 1975

ŠTEVILKA 9—10

UDK 621.9.01

## Tehnične površine in njihove značilnosti pri odrezovalnih procesih

POLDE LESKOVAR

### 1. UVOD

Stanje površine in sloja neposredno pod površino je pri obdelavi kovinskih materialov po postopkih z odvzemanjem, kakršni so npr. struženje, frezanje, brušenje, elektroerozivni postopek ipd., izrednega pomena. Vse bolj razširjena avtomatizacija delovnih procesov terja tudi vedno boljše površine, saj sta od njih odvisni v znatni meri funkcionalnost in doba trajanja določenega konstrukcijskega elementa.

Dejanska površina, ki jo ima določen izdelek po obdelavi, se lahko znatno razlikuje od predvidene idealne geometrične oblike. Poleg tega so lahko povzročene z različnimi postopki obdelave tudi spremembe v plasteh, ki so neposredno pod površino obdelovanca. Raziskave, ki zajemajo tako študij kvalitete površine kakor tudi spremembe v materialu neposredno pod površino v odvisnosti od postopkov obdelave, združujemo pod skupnim imenom *integrleta površine*.

Z raziskavami integrlete površine želimo dobiti odgovor na vprašanje, kaj se dogaja pri določenih obdelovalnih postopkih na površini in neposredno pod njo. Površina pomeni osnovo za dobo trajanja določenega konstrukcijskega elementa. Pri analizi porušitev je bilo ugotovljeno, da je najpogosteji vzrok zlomov utrujenost materiala, ki izhaja iz površine oziroma iz plasti neposredno pod njo. Torej je tudi večina trajnostnih zlomov posledica nepravilne obdelave, saj je iz vseh preiskav razvidno, da je trajnostno obnašanje določenega obremenjenega strojnega elementa odvisno predvsem od njegove površine.

### 2. INTEGRITETA POVRŠINE

Kadar govorimo o integrleti površine, razlikujemo v glavnem dvoje :

- kvaliteto površine oziroma njeni hrapavost in
- metalurgijo površine.

#### 2.1. Kvaliteta površine

Kvaliteta površine oziroma površinska topografija je področje, ki je danes že močno raziskano. S tega področja poznamo vrsto kvalitetnih del, ki so prispevala k enotnejšemu obravnavanju kvalitete površine [1, 2, 3]. Hrapavost merimo lahko na več načinov, vendar jo ocenjujemo dandanes po

kriterijih, ki so že standardizirani. V splošnem uporabljamo sedaj sistem srednje linije (*mean line system*) ali kratko M sistem, ki podaja hravost kot srednje odstopanje profila  $R_a$ , skrajšano srednjo višino neravnosti  $R_z$  in največjo višino neravnosti  $R_{max}$ .

Odstopanje dejanske površine od teoretične delimo v dve skupini:

— **hrapavost** pomeni čisto naključna odstopanja, ki so v prvi vrsti posledica neposrednega vpliva orodja na površino obdelovanca in njegovih fizikalno-kemičnih lastnosti,

— **valovitost** pa pomeni periodična odstopanja, ki so navadno odvisna od karakteristik odstopanj obdelovalnega stroja [4].

Obe skupini bi lahko imenovali kratko mikroskopska in makroskopska odstopanja.

#### 2.2 Metalurgija površine

V odvisnosti od obdelovalnih postopkov se različne spremembe ne pojavljajo samo na površini, temveč tudi pod njo. Raziskave so pokazale, da so nastale spremembe posledica različnih vplivov. V glavnem lahko nastanejo spremembe v površinskih plasteh zaradi naslednjih vplivov:

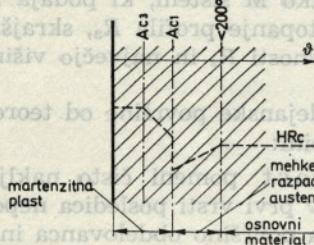
- vplivov temperature,
- vplivov plastične deformacije oziroma sil rezanja ter
- vplivov kemičnih reakcij in absorpcije njihovih produktov v površino.

##### 2.2.1. Vplivi temperature

Visoke temperature, ki se pojavljajo pri odrezovanju, povzročajo spremembe v strukturi površinskih plasti. Tako poznamo martenzitno plast, mehkejšo plast razpadlega austenita in austenitno plast.

Martenzitna plast nastane navadno pri obdelavi z odrezavanjem kaljivega jekla na njegovi površini. To trdo plast dobimo zaradi močnega pregretja in hitrega hlajenja površinskih plasti. Močno pregretje površinskih plasti povzročajo pretirani pogoji obdelave, hitro hlajenje pa hladilna sredstva pri odrezavanju in osnovni nesegreti material obdelovanca. Debelina martenzitne plasti je navadno zelo majhna in dosega le do 0,005 mm (v posebnih primerih tudi do 0,25 mm), njena trdota pa lahko doseže vrednosti tudi do 66 HRc. Ta plast je zaradi takoj velike trdote krhkna in rada poka [5].

Mehkejša plast razpadlega austenita se pojavlja navadno pod trdo martenitno plasti, prav tako pri kaljivih jeklih. Tam se manj segreje kakor pa vrhnja plast, ki je neposredno ob orodju (npr. brusilnem kolutu), in se tudi počasneje haldi. Zato ne pride do premene austenita v martenit, pač pa do njegovega razpada. Trdota take plasti je precej manjša od trdote martenitne plasti, znaša pa v odvisnosti od vrste jekla do približno 46 HRc. Slika 1 prikazuje posamezna temperaturna področja, ki so bila dosežena pri brušenju jekla, in trdoto teh plasti [5].



Sl. 1. Potev temperature v plasti pod površino pri brušenju jekla Č. 4340 s trdoto 50 HRc  
(po M. Fieldu, P. W. Kosterju in B. J. Kahlsu)

Kadar pri pretiranih pogojih obdelujemo jekla, ki so legirana z Ni, Ti in Al, se pojavlja austenitna plast. To je plast, ki ima majhno trdoto npr. 37 HRc, medtem ko ima osnovni material trdoto okrog 52 HRc. Tudi v tem primeru je vzrok za nastalo spremembo visoka temperatura, ki se pojavi v površinski plasti obdelovanca. Ta plast je prav tako nezaželena, saj je manj odporna proti obrabi in vpliva negativno na trajnostne lastnosti obdelovanca.

Torno navarjanje materiala orodja na površino obdelovanca se pojavlja pri orodjih iz hitroreznega jekla. Ta pojav je pogost v izvrtinah, ko se sveder med vrtanjem zažege. Trdota tako navarene plasti doseže tudi do 70 HRc. Tako nastale plasti lahko odpravimo s ponovnim vrtanjem s svedri iz karbidnih trdin. Pod torno navarjenimi plasti pa sta prav tako trda martenitna plast in pod njo mehkejša plast razpadlega austenita.

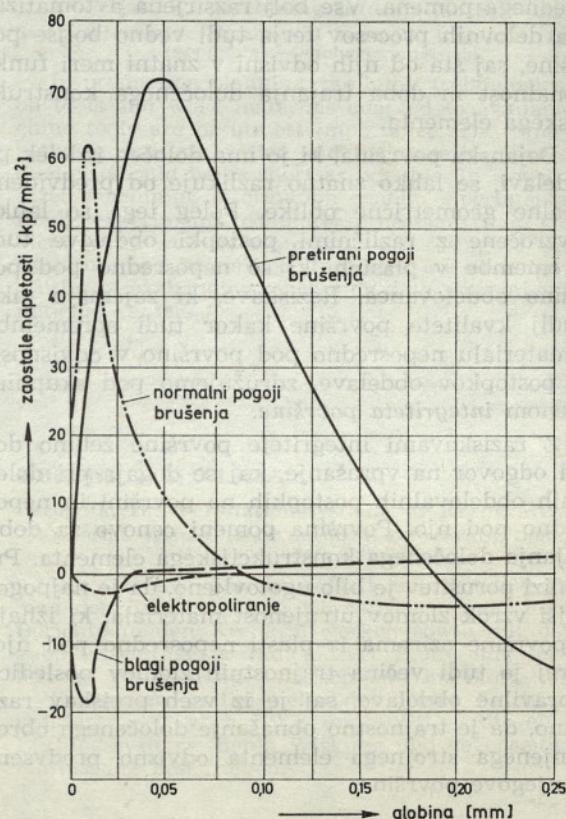
### 2.2.2. Vplivi plastične deformacije oziroma sil rezanja

Pri pretiranih pogojih obdelave se pojavljajo poleg visokih temperatur tudi velike rezalne sile, ki povzročajo plastične deformacije na površini obdelovanca in neposredno pod njo. Posledica plastičnih deformacij so lahko različne napake v površinskih plasti.

Razpoke zasledimo pri jeklih, ki so bili obdelani pri pretiranih pogojih obdelave. To so navadno zelo majhne razpoke (mikrorazpoke), ki jih tudi z makroskopskimi raziskavami in metalurškimi preizkusi le težko odkrijemo. Te razpoke so navadno v področju trde martenitne plasti. Mikro-

razpoke vplivajo izredno negativno na trajnostno trdrost materiala oziroma strojnega dela.

Zaostale napetosti (utrjenost) so posledica deformacije površine in plasti pod površino. Preizkusi so pokazali, da je površina pod krivuljo napetosti (sl. 2) proporcionalna deformaciji, ki nastane pri obdelavi. Zaradi tega je poznavanje krivulje, ki prikazuje porazdelitev zaostalih napetosti od površine v notranjost obdelovanca zelo pomembna. Dandanes posvečamo porazdelitvi zaostalih napetosti v odvisnosti od določenega obdelovalnega postopka izredno pozornost. Zaostale napetosti so lahko tlačne in natezne in so lahko posledica obdelovalnega postopka ali pa tudi obdelovalnih pogojev.



Sl. 2. Razporeditev zaostalih napetosti v plasti pod površino za jeklo Č. 4340 s trdoto 50 HRc  
(po M. Fieldu, P. W. Kosterju in B. J. Kahlsu)

Deformacije, ki nastanejo pri obdelavi so sorazmerne velikostim zaostalih napetosti. Raziskave kažejo, da so deformacije tem večje, čim večje so zaostale napetosti. Prav tako so raziskave pokazale, da se material z manjšim modulom elastičnosti bolj deformira kakor pa oni z večjim modulom elastičnosti. Uporaba pretiranih obdelovalnih pogojev povzroča vedno večje deformacije kakor pa obdelava pri normalnih, tj. milejših obdelovalnih pogojih.

Tudi jamicice, v dolbine in odtrganine so napake, ki se pojavljajo pri procesih obdelave z odrezavanjem. Pojavljajo se z nastavki na orodjih, ki pa nastajajo tudi zaradi obdelave v območjih, ki ne dajejo ugodnih rezultatov.

### 2.2.3. Kemične reakcije in absorpcija njihovih produktov v površino

Pri posebnih postopkih obdelave kovin, ki jih na današnji stopnji razvoja uporabljamo vse več, so poleg kvalitete površine zelo pomembne tudi kemične reakcije, ki na njih nastajajo. Kemične reakcije same kakor tudi njihovi produkti vplivajo na površino in plasti pod njo. K posebnim postopkom obdelave prištevamo elektroerozijske, elektrokemične, žarkovne in podobne postopke.

## 3. RAZISKAVE INTEGRITETE POVRŠINE

Z raziskavo integritete površine želimo dobiti vpogled, kako vplivajo na površino in sloj pod njo različni postopki obdelave, kateri obdelovalni pogoji so primerni za določene postopke in kakšne posledice lahko izhajajo iz njih. Dosedanje raziskave so pokazale, da je večina trajnostnih zlomov posledica napak na površini ali neposredno pod njo. Napake so pa posledica obdelovalnih postopkov in pogojev obdelave v proizvodnji. Zaradi tega so take raziskave pomembne, strošek zanje pa naj bi pokrivala proizvodnja. Raziskave integritete površine bi morale biti zajete pri vseh analizah obdelovalnosti materiala in biti sestavni del tehnološke banke podatkov. Zaradi tega jih je treba opravljati centralizirano za vse mogoče načine obdelave in najvažnejše konstrukcijske materiale.

V glavnem razlikujemo tri stopnje raziskav integritete površine, in sicer po tem, kako široko so zajete, oziroma kakšne podatke o površini nam dajejo. Tako poznamo:

- minimalne raziskave,
- standardne raziskave in
- razširjene raziskave integritete površine.

K minimalnim raziskavam integrите površine štejemo najcenejše raziskave, ki so namenjene navadno za uvodne raziskave in dajejo osnovni vpogled v površino in plasti pod njo. To so v glavnem osnovne metalografske informacije, ki jih dopoljuje še z raziskavami mikrotrdote in standardnimi podatki kvalitete površine. V osnovi delimo minimalne podatke v:

- analizo površine in njeni topografiji,
- makrostrukturo površine, ki daje vpogled v makrorazpoke in spremembe po makrojedkanju,
- mikrostrukturo površine, ki daje vpogled v mikrorazpoke, plastične deformacije na površini in neposredno pod njo, medkristalno korozijo, nastanek jamic, vdolbin, odtrganin, nastavke, staljene plasti in spremembe po mikrojedkanju in
- potek mikrotrdote.

Standardne raziskave integrite površine zajemajo razširjene raziskave minimalnih

raziskav. V to vrsto raziskav so zajete poglobljene raziskave površine in metalografske analize. Tako dobimo več podatkov o integriteti. V to skupino spadajo:

- raziskave, ki dajejo minimalne podatke,
- trajni dinamični preizkusi in vplivi na trajno dinamično trdnost,
- preizkusi napetostne korozije in
- opazovanje zaostalih napetosti.

Razširjene raziskave integrite površine dajejo najgloblji vpogled v njen integriteto. Te raziskave zajemajo poleg metalografskih, mehanskih in trdnostnih preizkusov še preizkušanje korozije. V to skupino prištevamo naslednje:

- standardne raziskave površine,
- razširjene trajne dinamične preizkuse,
- dodatne mehanske preizkuse, kakor so natezna trdnost, trajna statična trdnost, mikrotrdota, vrste zloma ipd.

Za vse našteto je treba docela poznavati geometrijo površine in njen topografijo, metalurgijo površine, osnovne značilnosti postopkov obdelave, mehanske lastnosti materiala, kemične lastnosti in vplive korozije, pa še vrsto drugih lastnosti, ki izvirajo iz tehnologije predelave oziroma obdelave, načinov obremenjevanja ter podobne, doslej še nezajete informacije, ki lahko izvirajo iz znanih ali še neznanih vplivov.

Od vseh omenjenih vplivov oziroma raziskav, je velikega pomena opazovanje zaostalih napetosti v obdelovancu. Pri tem ni pomembno samo, katere napetosti se pojavljajo v površinskem sloju, temveč predvsem kako so te napetosti porazdeljene glede na debelino sloja. Zaostale napetosti se pojavljajo med obdelavo in so posledica tako obdelovalnega postopka kakor tudi obdelovalnih pogojev. Slika 2 prikazuje potek zaostalih napetosti pri pretiranih, normalnih in blagih pogojih brušenja in pri postopku obdelave z elektro poliranjem [5]. Iz krivulje je lepo razvidno, kako potekajo zaostale napetosti od površine proti notranjosti obdelovanca. Pri pretiranih pogojih brušenja znašajo zaostale napetosti na površini nič, začnejo pa takoj pod njo močno naraščati in dosežejo pri globini okrog  $50 \mu\text{m}$  največjo vrednost, ki znaša prek  $70 \text{ kp/mm}^2$ . Če zasledujemo krivulje normalnih in blagih pogojev brušenja, opažamo, da je potek zaostalih napetosti precej drugačen. To velja še posebej za blage pogoje obdelave, kjer so zaostale napetosti minimalne ter tlačnega značaja, medtem ko ne povzroča postopek odvzemanja z elektropoliranjem — kot primerjava — skoraj nobenih zaostalih napetosti.

## 4. UVODNE RAZISKAVE INTEGRITETE POVRŠINE PRI STRUŽENJU

### 4.1. Pogoji obdelave

Pri odrezavanju s struženjem so za oblikovanje površine pomembni:

— material obdelovanca, kjer imajo največji vpliv sestava, mikrostruktura in mehanske lastnosti, zlasti natezna trdnost in trdota,

— geometrija orodja, predvsem cepilni in prosti kot ter kot nagiba,

— rezalni pogoji — globina rezanja, podajanje in hitrost rezanja —, ki so odločilni za poprečno temperaturo in rezalne sile,

— stanje na rezальнem robu in

— material orodja.

V našem primeru smo po večletnih raziskavah [6, 7] izbrali naslednje:

— material obdelovanca: aluminijeva zlitina D 50,

— geometrija orodja: 

$a$	$\gamma$	$\lambda$	$\kappa$	$\epsilon$	$r$
5°	6°	0°	75°	90°	0,4 mm

— rezalne pogoje:

hitrost rezanja:  $v_1 = 100 \text{ m/min}$ ,

$v_2 = 200 \text{ m/min}$ ,

$v_3 = 500 \text{ m/min}$ ,

podajanje:  $s_1 = 0,004 \text{ mm/vrt}$ ,

$s_2 = 0,222 \text{ mm/vrt}$ ,

$s_3 = 0,388 \text{ mm/vrt}$ ,

globino rezanja:  $a = 3 \text{ mm}$ ,

— stanje na rezальнem robu: uporabljali smo ostri neobrabljeni rezalni rob z zaokrožitvijo  $r = 0,4 \text{ mm}$ ,

— material orodja: karbidna trdina P 10 Sandvik-Coromand.

Tako smo dobili 9 kombinacij obdelave.

#### 4.2. Rezultati preiskav in analiza rezultatov

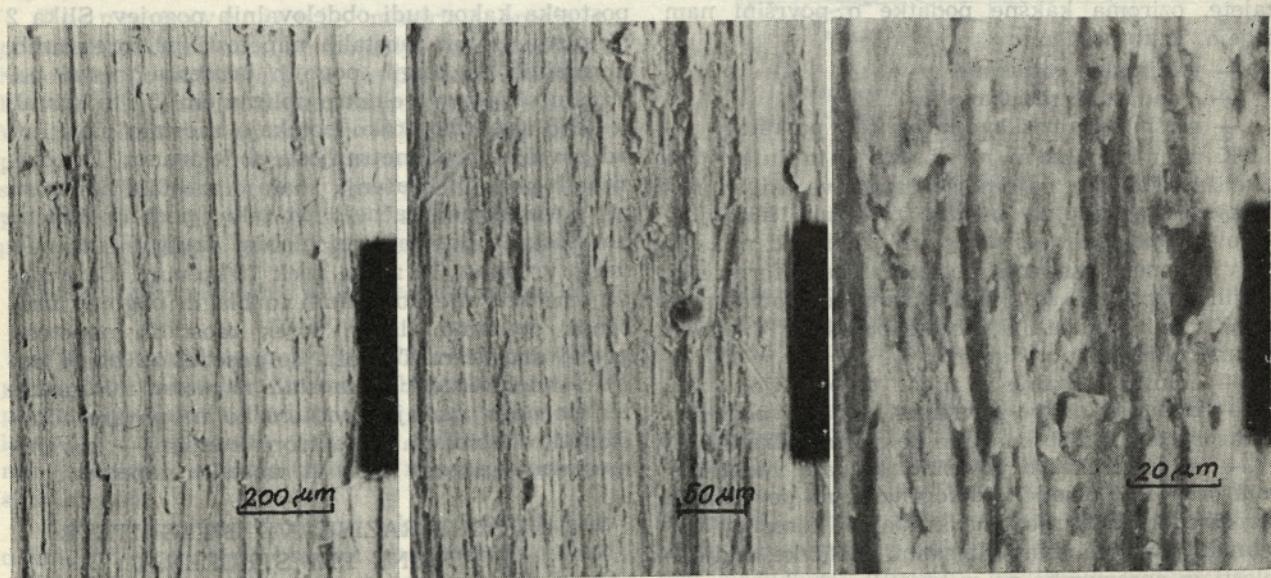
Glede na izbrane pogoje obdelave smo analizirali naslednje:

1. kvaliteto površine,
2. površinske efekte,
3. metalurgijo površine,
4. mikrotrdoto v vrhnjih plasteh.

Rezultati preiskav kvalitete površine se ne razlikujejo od rezultatov, ki smo jih dobili že pri prejšnjih raziskavah in so bili delno tudi že objavljeni [6]. V teh raziskavah smo opazovali vplive geometrije orodja, podajanja, globine rezanja in hitrosti rezanja na hrapavost pri aluminijevih zlitinah. Zaradi tega se bomo omejili v tem delu le na površinske učinke, metalografijo površine in mikrotrdoto.

Kadar opazujemo površinske učinke pri odrezavanju, so zelo pomembni posnetki površine pri različnih povečavah. Oglejmo si po tri posnetke površine pri različnih povečavah, ko spremojamo le podajanje.

Slike 3, 4 in 5 prikazujejo površino preizkušanca pri hitrosti rezanja  $v = 500 \text{ m/min}$  in podajanju  $s = 0,044 \text{ mm/vrt}$  pri povečavah 60 : 1, 180 : 1 in 600 : 1. Slike 6, 7 in 8 pa kažejo posnetke pri enaki hitrosti rezanja vendar pri podajanju  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$ . Iz posnetkov lahko zelo nazorno opazimo, kakšne spremembe nastanejo na površini, če podajanje močno spremenimo. Podobne razlike smo dobili tudi pri drugih hitrostih rezanja ( $v = 100$  in  $200 \text{ m/min}$ ). Pri podajanju  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$  (sl. 6, 7 in 8) opazimo pri majhnih povečavah izrazito le valovitost površine, ki je posledica po-

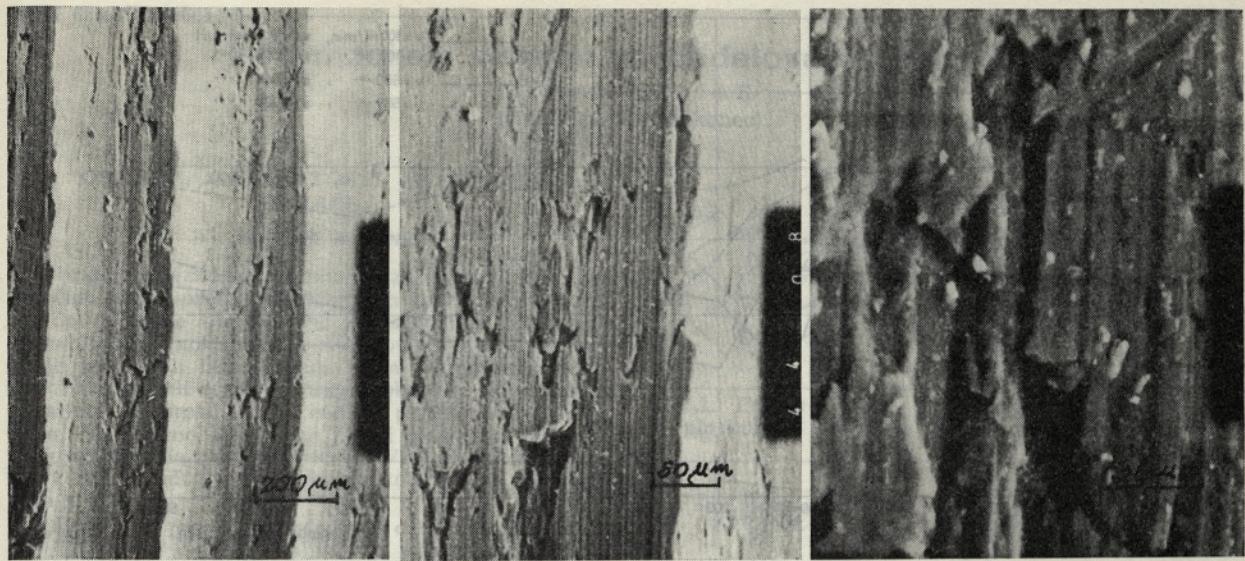


60 : 1

180 : 1

600 : 1

Sli. 3, 4 in 5. Posnetki površine pri različnih povečavah pri hitrosti rezanja  $v = 500 \text{ m/min}$  in podajanju  $s = 0,044 \text{ mm/vrt}$ ,  $R_a = 1,8 \mu\text{m}$



60 : 1

180 : 1

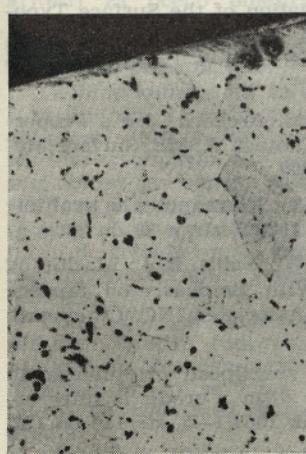
600 : 1

Sl. 6, 7 in 8. Posnetki površine pri različnih povečavah pri hitrosti rezanja  $v = 500 \text{ m/min}$  in podajanju  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$ ,  $R_a = 9,2 \mu\text{m}$

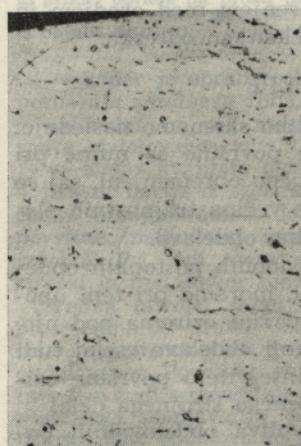
dajanja. Šele največje povečave pokažejo, kako globoko je pri takih pogojih obdelave lahko načeta tudi površina sama.

Še bolj očitne in zanimive rezultate dobimo, če pogledamo metalografske posnetke, ki prikazujejo plasti pod obdelano površino. Slike 9 in 10 prikazujeta obdelavo pri hitrosti rezanja  $v = 100 \text{ m/min}$  ter podajanjih  $s = 0,044 \text{ mm/vrt}$  in  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$ . Iz obeh posnetkov je moč razbrati, kako podajanje spreminja plasti pod površino obdelovanca. Iz posnetka, ki ga vidimo na sliki 9, je lepo raz

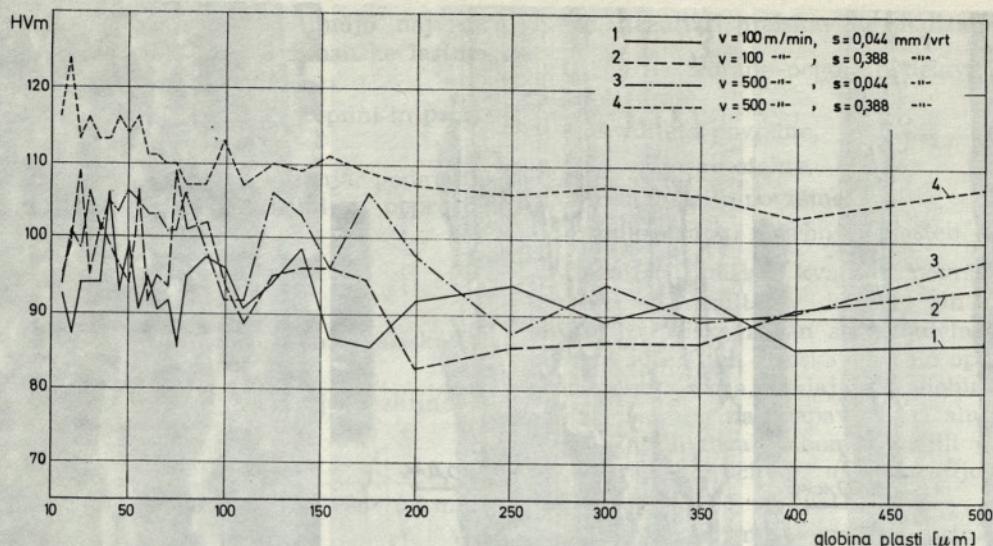
vidno, da pri takšnih pogojih obdelave neposredno pod površino plasti niso močno deformirane. Le izredno tanka plast tik pod površino kaže posledice plastične deformacije. Če pa pogledamo sliko 10, ki prikazuje rezanje pri sicer enaki hitrosti toda pri znatno večjem podajanju, postane deformirana plast pod površino znatno debelejša, deformacije izrazitejše, pojavlja se celo razpoke, ki segajo v notranjost obdelovanca. Podobne značilnosti opažamo tudi na slikah 11 in 12, ki prikazujeta metalografske posnetke pri hitrosti rezanja  $500 \text{ m/min}$  ter podajanju  $s = 0,044 \text{ mm/vrt}$  in  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$ .

 $s = 0,044 \text{ mm/vrt}$  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$ 

Sl. 9 in 10. Metalografski posnetek plasti pod površino pri hitrosti rezanja  $v = 100 \text{ m/min}$  in različnih podajanjih  $s$

 $s = 0,044 \text{ mm/vrt}$  $s = 0,388 \text{ mm/vrt}$ 

Sl. 11 in 12. Metalografski posnetek plasti pod površino pri hitrosti rezanja  $v = 500 \text{ m/min}$  in različnih podajanjih  $s$



Sl. 13. Potek mikrotrdote v plasteh pod površino v odvisnosti od pogojev obdelave pri struženju

Opravljene analize potrjujejo rezultate prejšnjih raziskav, s katerimi smo dokazali, da naraščajo sile rezanja največ v odvisnosti od globine rezanja in podajanja, znatno manj pa od hitrosti rezanja. S povečanjem sil rezanja se povečujejo tudi deformacije površine in slojev pod njo, kar ima lahko zelo neugodne posledice, posebno pri dinamično obremenjenih elementih. Do enakih, vendar še bolj nazornih rezultatov nas pripeljejo meritve mikrotrdote. Slika 13 prikazuje potek mikrotrdote v odvisnosti od hitrosti rezanja in podajanja. Iz posameznih krivulj je nazorno razvidno, da se poveča mikrotrdota zaradi povečanja podajanja (glej krivulji 2 in 4). Iz posameznih krivulj pa je prav tako razvidno, da ima na poteku mikrotrdote vpliv tudi hitrost rezanja (krivulje 1 in 3 ter 2 in 4), kar je v zvezi s trenjem med orodjem in obdelovancem oziroma odtekanjem odrezka.

## 5. SKLEPI

Iz vsega navedenega lahko sklenemo naslednje:

1. Raziskave integritete površine so nujne pri strojnih delih, ki so dinamično obremenjeni, saj so vse analize pokazale, da je večina trajnostnih zlomov povzročena z nepravilno obdelavo.

2. Kadar govorimo o sodobnih postopkih obdelave in njihovi optimizaciji, moramo pri tem upoštevati tudi razmere na površini oziroma pod njo. Niso namreč optimalni pogoji obdelave vselej tudi porok za najbolj ugodno integrirano površine oziroma uporabno dobo določenega strojnega dela.

3. Za globljo analizo vpliva obdelovalnih postopkov na integrirano površine je treba opraviti širše raziskave, ki morajo zajeti vplive temperature, deformacij in kemičnih reakcij. Pri tem pa je treba raziskati vsak vpliv posebej in upoštevati zaostale napetosti.

4. Uvodne raziskave, ki so bile namenjene za prve analize raziskave integritete površine pri nas, so jasno pokazale, da so take raziskave nujno potrebne, njihovi izsledki pa morajo biti sestavni del banke tehnoloških podatkov. Le tako je mogoče ugotavljati, ali so optimalni pogoji obdelave sprememljivi tudi glede na integrirato površine.

## LITERATURA

[1] Peklenik, J.: New Developments in Surface Characterisation and Measurements by Means of Random Process Analysis; Proc. on Conf. on Properties and Metrology of Surface, Oxford, April 1968, Institution of Mechanical Engineers.

[2] Peklenik, J.: Investigation of the Surface Topology, Presented at the 16th General Assembly CIRP, Paris, Sept. 1966, CIRP Annals Vol — 15 pp 381 — 385 (1967).

[3] Whitehouse, D. J. and Archard, J. F.: Properties of Random Surface in Contact, ASME, Surface Mechanics Symposium, Nov 1969.

[4] Leskovar, P.: Prispevek k vrednotenju kvalitete površine, Strojniški vestnik 1970/2, stran 33 do 39.

[5] Field, M., Koster, P. W., Kahls, B. J.: Machining of High Strength Steels With Emphasis on Surface Integrity, Metcut Research Associates INC. Cincinnati, OHIO — USA.

[6] Leskovar, P.: Nekaj značilnosti pri preiskavah odrezovalnosti aluminijevih zlitin z orodji iz hitroreznega jekla, Strojniški vestnik 1969/4—5, str. 116 do 122.

[7] Leskovar, P.: Analiza lastnosti materiala in njihovi vplivi na sile rezalnega procesa, Strojniški vestnik 1975/3—4, str. 49 do 54.

Avtorjev naslov:

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