

1. UVOD

Površine mašinskih elemenata, tj. površine projektovane i izrađene inženjerskim znanjem i metodama, predstavljaju površine čije stanje, ma s kojeg aspekta se ono posmatralo, značajano utiče na funkcionalnost proizvoda, njegov radni vijek i pouzdanost u radu. Različita odstupanja na površini od želenog ili projektovanog oblika ili stanja obuhvataju mehaničke, metalurške, hemijske i druge promjene. Ove promjene, iako ograničene na mali površinski sloj, mogu ozbiljno ugroziti ili ograničiti kvalitet proizvoda, ili mogu, u nekim slučajevima, učiniti površinu neprihvativom. Za ostvarivanje konačnog cilja, a to je kvalitet proizvoda, neophodno je razumijevanje promjena na površini u toku i nakon postupka generisanja te površine tj. postupka obrade. Integritet površine (Surface Integrity) definiše uticaj osobina površine i uslova pri kojima će materijal površine obavljati neku funkciju. Odavno je poznato da postupak završne obrade, zatim kombinacija hrapavosti površine, zaostalih napona, hladnog deformisanja, pa čak i fazne transformacije, snažno utiču na funkcionalnost proizvedenih dijelova.

Sve moderne proizvodne tehnologije imaju za cilj izradu dijelova sa karakteristikama materijala koje zadovoljavaju uslove eksploatacije. Ovo se posebno odnosi na proizvode koji moraju biti otporni na trošenje pri čemu njihove površine moraju da izdrže veoma teške uslove rada. Prema tome, ponašanje konstrukcionih materijala uglavnom zavisi od stanja površine materijala, uslova kontakta, kao i sredine u kojoj taj materijal obavlja funkciju. Da bi se potpuno razumjele karakteristike površine i njihov uticaj na rad različitih proizvoda, elemenata mašina i sl., razvijena je posebna naučna grana: nauka o površini (Surface Science).

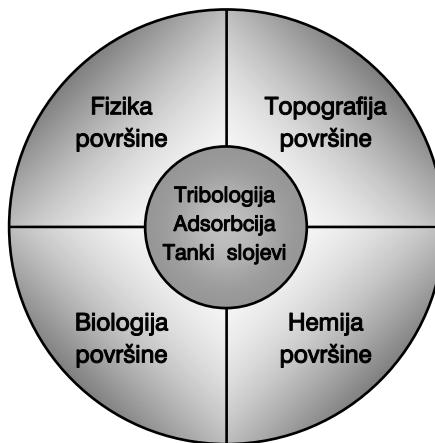
Površina se može jednostavno opisati kao krajnji sloj entiteta, dok se interfejs definije kao prijelazni sloj između dva ili više entiteta koji se razlikuju u hemijskom ili fizičkom, ili u oba aspekta. Površina ili interfejs postoje u bilo kojem sistemu čije su karakteristike pretrpjele iznenadne promjene (naprimjer, gustoća, kristalna struktura i orientacija strukture, hemijski sastav i sl.). Površine i interfejsi se mogu ispitivati (istraživati) korištenjem mikroskopskih metoda, kao i fizičkim i hemijskim metodama. Za primjenu ovih metoda razvijen je veliki broj jednostavnih i visoko sofisticiranih mašina i uređaja. Korištenjem navedenih mašina i uređaja može se doći do informacija vezanih za fenomene interakcija površine i interfejsa. Prema tome, nauka o površini se može definisati kao grana nauke koja se bavi bilo kojim tipom interakcije površine i interfejsa između dva ili više entiteta. Ove interakcije mogu biti fizičke, hemijske, električne, mehaničke, toplotne, biološke, geološke, astronomske, pa čak i emocionalne.

1.1. KRATKI HISTORIJAT

U najopštijem pristupu, "rođenje" nauke o površini se može povezati sa prvim trenucima materijalnog svijeta kojeg današnji čovjek poznaje i kojeg pokušava razumjeti. Uprkos najstarijem poznatom zapisu o fenomenu površine koji datira još od vremena Hammurabi-ja (1758 p.n.e.) koji govori o vještini zvanoj Babylonian Lecanomancy, površine su dugo vremena imale "lošu" reputaciju: "one su – urođene – svojstvene same sebi – površinske, čak "neljudske", smatrane su varljivim i, stoga, moralno sumnjivim". Grčki filozof Democritus Abdera je vjerovao da je suština stvari sakrivena u njenoj unutrašnjosti, dok su (varljive) vidljive karakteristike iskazane površinom. Drugačiji, više naučno zasnovan pristup površinama, počinje tek oko polovine 19. vijeka, i to, u umjetnosti, literaturi i nauci. Intelektualni preduslov za ovo je bio da se površini kao fenomenu pripisu i pozitivne karakteristike, i to u najširem smislu. Nakon što je ideja bila uspostavljena, započeo je brz napredak nauke o površini, najviše zahvaljujući pionirima kao što su J. W. Gibbs (termodinamika površine) i I. Langmuir (adsorpcija i tanki slojevi).

J. William Gibbs je 1877. godine uspostavio matematičke osnove za statističku mehaniku i termodinamiku. Pokušao je dati potpuni termodinamički opis različitih faza na površini. Nakon toga, Irving Langmuir (nobelovac u području hemije, 1932. godine) dao je ogroman doprinos shvataju fenomena površine i njegova istraživanja su doprinjela da se nauka o površini prepozna kao značajna istraživačka oblast. Razvio je prvu kvantitativnu teoriju o adsorpciji 1915. godine, a također je radio istraživanja na uljanim filmovima, lipidima, biofilmovima i molekularnim monoslojevima. Također, radio je na istraživanju radnih funkcija metala i došao je do opšte prihvatljivog modela termionske emisije.

Nakon otkrića elektrona i atoma, fizika površine postaje nezavisna naučna oblast. Ovo je ostvareno upotrebom tehnologije visokog vakuma. Direktni uticaj na razvoj nauke o površini dali su Irving Langmuir (termionska emisija), zatim Albert Einstein (objašnjenje fotoelektričnog efekta) i Clinton Davisson i Lester Germer (potvrda De Broigles-ove tvrdnje o talasnoj prirodi kvantno-mehaničkih čestica kroz elektronsku difrakciju). Izum tranzistora 1947. označio je prekretnicu u fizici površine. Termin "nauka o površini" se počinje upotrebljavati u ranim 1960-tim godinama. Ekspanzija nauke o površini bila je omogućena sljedećim događajima: mogućnost provođenja istraživanja u sredinama visokog vakuma, razvoj tehnika za pripremu mikroskopskih jednokristalnih površina, te razvoj različitih metoda površinske analize, koje su omogućile karakterizaciju strukture i reaktivnost širokog spektra površina. Na slici 1.1 prikazana su najvažnija područja nauke o površini.



Slika 1.1. Najvažnija područja nauke o površini

Primijenjena nauka o površini, tj. inženjerstvo površine je staro gotovo kao i upotreba konstrukcionih materijala u različitim inženjerskim granama. Od početka, bez obzira na uspostavljanje, ili ne ove discipline, zapravo se radi o razvoju upravo u oblasti inženjerstva površine, i to s različitih aspekata i zahtjeva primjene inženjerskih površina. Inženjerstvo površine, kao tehnička grana, daje kriterije za definisanje razlika u kvalitetu proizvoda, funkcionisanju u toku radnog vijeka, te cijenu radnog vijeka proizvoda. Termin inženjerstvo površine se koristi skoro trideset godina i može se definisati kao oblast u kojoj se izučavaju postupci zajedničkog dizajna površine i substrata s ciljem funkcionisanja površine sa različitih aspekata. Ova oblast se smatra visoko interdisciplinarnom aktivnošću, slika 1.2. Ovdje se radi o spektru pitanja vezanih za nastanak i mehanizme formiranja površinskih slojeva, njihov sastav, upotrebu i ispitivanje. Uspješna implementacija inženjerstva površine zahtijeva integriran pristup u fazi dizajna, koji obavezno uključuje saradnju između projektanta (konstruktera) i inženjera površine. Stalni zadatak inženjerstva površine je istraživanje različitih tehnologija obrade i dorade površina s ciljem dostizanja optimalnih karakteristika površine projektovane za konkretnu primjenu i eksploatacione uslove. U ASM priručniku, inženjerstvo površine se definiše kao "tretman površinskog i subpovršinskog sloja materijala s ciljem ostvarenja zahtijevane funkcije tog materijala". Dakle, ovdje se žele postići tražene karakteristike površine projektovanog mašinskog elementa, uključujući:

- poboljšanje otpornosti na koroziju,
- poboljšanje otpornosti na oksidaciju,
- poboljšanje otpornosti na trošenje,
- smanjenje gubitka energije uslijed trenja,
- poboljšanje mehaničkih karakteristika, naprimjer, čvrtoća, žilavost, tvrdoća i sl.,
- poboljšanje električnih karakteristika,

- poboljšanje izolaciono termičkih karakteristika,
- poboljšanje bioloških karakteristika,
- poboljšanje vizuelnog (estetskog) izgleda i dr.



Slika 1.2. Najvažnija područja inženjerstva površine

1.2. OPŠTA RAZMATRANJA O POVRŠINI

Tačan opis strukture površine, a naročito sastava površine više komponentnih sistema, ključan je za razumijevanje različitih fenomena površine, kao što su heterogena kataliza, korozija, adhezija i podmazivanje. Također, na električne karakteristike interfejsa može se uticati pomoću hemijskog sastava u području površinskog sloja.

Veoma koristan konceptualni pristup u inženjerstvu površine u segmentu opisa mješavine površina jeste modeliranje energije sistema (naprimjer, legura metalnih materijala), ako su komponente sistema (naprimjer, atomi) povezani hemijskim vezama. Ovaj pristup je bio veoma uspješan u razvoju termodinamike tečnih i čvrstih rastvora i nazvan je kvazihemijski tretman. Izraz „kvazihemijski“ može proizvesti nerazumijevanje, jer se također koristi i kod nekih drugih, naprimjer, determinističkih modela. Da bi se izbjegla dvosmislenost, pojam „udvojena veza“ se koristi za pojednostavljeni hemijski opis interakcija. Na osnovu ovog hemijskog opisa može se vidjeti zašto se mješavina može obogatiti sa bar jednom komponentom, i to u području površine, a ne samo na nivou substrata (osnovnog materijala). Različite sklonosti ka povezivanju između sličnih i različitih komponenti u mješavini, i odsustvo nekih veza u površini, rezultira različitim sastavom u području površine i ukupnog sastava (substrata).

Mnoga istraživanja u široj naučnoj oblasti nauke o površini, fokusirana su uglavnom na osnovne karakteristike površina koje su čiste (glatke) i u termodinamičkoj ravnoteži, ili približno u tom stanju. Mnoge stvarne inženjerske površine koje su dobivene mašinskom obradom nisu idealno glatke, i podložne su oksidaciji. Svi metali (osim zlata i platine) imaju stabilne okside pri sobnoj temperaturi. Površine metala izložene okolnom zraku oksidiraju, pri čemu oksidni sloj raste brzinom koji zavisi od brzine difuzije atoma metala i kiseonika kroz površinski sloj. Kada se površina oblikuje mašinskom obradom, pojavljuju se zone plastične deformacije na površinskom sloju. Tokom ove deformacije, čestice oksida se potiskuju ispod površine, dakle oksidirani dijelovi površine bivaju prekriveni plastično deformisanim dijelovima materijala i na svojevrstan način bivaju zarođeni u površini. Prema tome, površine proizvedene mašinskom obradom imaju površinski sloj koji je mješavine metala i oksida, sa prijelaznom zonom do osnovne kristalne strukture metala.

Čiste (glatke) površine pri visokim temperaturama su ili blizu, ili u ravnotežnom stanju. Površina koja je glatka u tehničkom smislu riječi može biti veoma gruba u razmjeru veličina atoma. U ovom slučaju, površinska hrapavost je prvenstveno određena proizvodnom operacijom, oblikom alata i kinematikom relativnog kretanja alata i obratka.

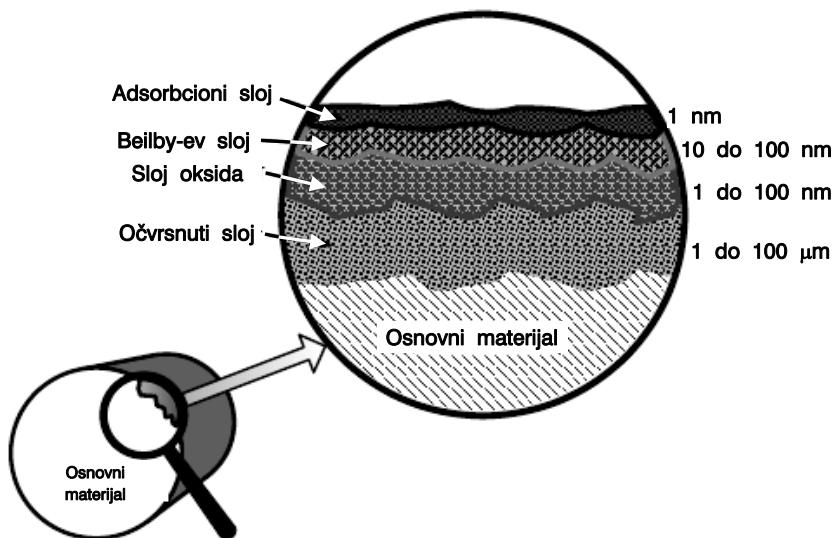
Kada su dvije iste i glatke metalne površine u kontaktu na nivou atoma, tada međatomske sile u oblasti kontakta proizvode veoma jaku adheziju uzrokujući formiranje metalnih spojeva. U slučaju djelovanja tangencijalnih sila na ovaj kontakt, tj. ako dođe do kliznog tribološkog kontakta, tada se navedeni metalni spojevi ili lome, ili se metal smiče na mjestima koja se nalaze u blizini metalnog spoja (slučaj kada je čvrstoća metalnog spoja veća od čvrstoće izvornog metalnog materijala).

Površine koje se generišu različitim postupcima obrade nisu savršeno (idealno) ravne. Dakle, kontakt dvije površine se ne ostvaruje preko tzv. nominalne površine, nego po mnogo manjoj površini koja se naziva stvarna površina kontakta. Stvarna površina kontakta predstavlja zbir svih pojedinačnih kontakta dvije površine, a koji se ostvaruje putem kontakta neravnina površina. To znači i da specifični pritisak kontakta nije dobiten na osnovu nominalne površine kontakta, nego mnogo manje, stvarne površine kontakta, dakle specifični pritisak je mnogo veći. To, s druge strane znači, da je koeficijent trenja u funkciji ovoga, mnogo većeg specifičnog pritiska. Usljed elastičnih deformacija vrhova neravnina metalnih površina u kontaktu, stvarna kontaktна površina (a prema tome i sila trenja) se povećava sa povećanjem normalnog opterećenja kontaktne (normalna sila). Pri tome se održava i konstantan koeficijent trenja kao odnos sile trenja i normalne sile. Hemijski adsorbovani slojevi na metalnoj, mašinski obrađenoj površini nazivaju se granični slojevi. Ovi slojevi imaju karakteristike mazivog sredstva i značajno smanjuju kontaktну silu trenja.

1.3. STVARNE POVRŠINE ČVRSTIH TIJELA

Fizika i hemija čvrstih tijela se bavi sa idealnom površinom, dakle zanemarujući veličinu stvarnog kontakta, kao i nesavršenost površine. Stvarna površina se čini čista, bez ikakvih dodataka ili slojeva, međutim, kao što to slika 1.3 pokazuje, na površini se nalazi nekoliko mikro slojeva. Ovi slojevi su formirani uslijed djelovanja vanjskih faktora, kao što su postupak mašinske obrade, uslovi pod kojim je provedena mašinska obrada, radna temperatura, pojava oksida i sl. U zavisnosti od korištenog proizvodnog procesa, zona deformaciono otvrdnutog materijala predstavlja osnovni sloj. Iznad ovog sloja formira se sloj oksida kao posljedica oksidacije metala sa kiseonikom iz okolnog vazduha i djelovanja mehanizama tzv. površinske oksidacije. Iznad oksidnog sloja, ili izmiješano s njim stvara se tzv. Beilby-ev koji predstavlja amorfnu ili mikrokristalnu strukturu, a koji je rezultat topljenja i frikcionih mehanizama tokom mašinske obrade. Adsorpcioni sloj predstavlja vanjski sloj i sastavljen je od vode ili vodonikovih ugljika iz vanjske sredine koji se mogu kondenzovati i fizički ili hemijski adsorbovati na površinu.

U toku rada struktura površine se može promijeniti. Naprimjer, mikroskopska istraživanja slojeva površine na željezničkim šinama su pokazala veoma visoke plastične deformacije uslijed enormno velikog normalnog pritiska, kao i smicanje, a sve u uslovima brze



Slika 1.3. Šematski prikaz metalne površine

promjene temperature. U ovakvim uslovima dolazi do dekompozicije početne perlitne strukture čelika koja je praćena sa površinskom oksidacijom, pojavom defekata, površinskim izlučivanjem karbida i austenitizacijom materijala. Drugi primjer može biti pojava napuklina uslijed zamora materijala pri niskotemperaturnom zračenju. Ispitivanja bazirana na elektronskoj mikroskopiji su pokazala da u ovim uslovima nastaje zamor materijala uzrokovani povećanjem amplitude naprezanja (povećanje nivoa otvrdnjavanja, na račun smanjenja duktelnosti). Ostali primjeri mogu biti: pucanje plastike uslijed napona iz vanjske sredine, erozivno odnošenje materijala lopatice turbine, površinska korozija, i t.d.

1.4. INTEGRITET POVRŠINE – POZNATI POJMOVI

Historijski razvoj integriteta površine kao discipline, podrazumijeva razvoj i praktičnu primjenu rezultata istraživanja u proizvodnji. Od pionirskih radova treba izdvojiti istraživanja provedena u Metcut institutu (SAD) gdje se prvi puta uspostavio koncept po kojem se integritet površine definije kao izvorno ili poboljšano stanje površine koja je proizvedena mašinskom obradom ili nekom drugom proizvodnom operacijom. Također je naglašen sveobuhvatni prikaz stanja integriteta površine, što inače predstavlja originalni pristup gdje se akcenat stavlja na prirodu metalurških promjena koje se dešavaju u površinskim i podpovršinskim slojevima različitih legura. Ova prva istraživanja se odnose kako za konvencionalne, tako i za nekonvencionalne postupke obrade. Pri tome, jasno uočljive promjene na površini su okarakterisane kao plastična deformacija, mikropukotine, fazne transformacije, promjena mikrotvrdoće, pukotine i uglačana ispuštenja (naslage, koje su vezane za pojavu naljepka pri obradi rezanjem), raspored zaostalih napona, i t.d. Kasnije je ponuđen način detaljnog opisa metoda mjerjenja i ocjene integriteta površine i predložena eksperimentalna procedura za procjenu parametara integriteta površine. Ova metodologija podrazumijeva upotrebu tri različita nivoa podataka na osnovu kojih se procijenjuju karakteristike integriteta obrađenih površina, tabela 1.1. Na kraju, prva istraživanja provedena u Metcut institutu, dovela su do uspostave američkog nacionalnog standarda o integritetu površine (ANSI B211.1, 1986. godine).

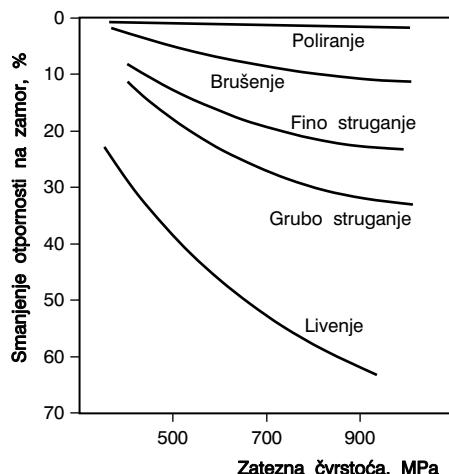
Integritet površine se ne bavi samo topološkim (geometrijskim) aspektima površina, nego njenim sveobuhvatnim fizičkim, mehaničkim, metalurškim, hemijskim i biološkim osobinama i karakteristikama. Dakle, ovdje je zadatak da se osiguraju tražene eksploracijske i radne karakteristike obrađene površine koja je proizvedena korištenjem različitih proizvodnih operacija. Proizvodne operacije direktno utiču na ove karakteristike, dakle direktno utiču na integritet površine. Naprimjer, na slici 1.4 prikazan je uticaj postupka obrade na zamor materijala u slučaju obrade jedne vrste čeličnog liva. Kao što se vidi, zamor materijala zavisi od postupka mašinske obrade, kao i karaktera obrade (gruba ili završna obrada). Što je površina hrapavija, razlika u relativnoj promjeni zamora je veća. Razmatranje u izvjesnom smislu postaje komplikovanije kada se zaključi da

1. UVOD

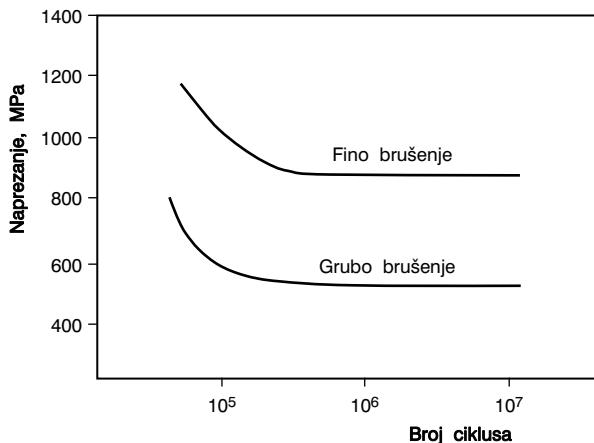
integritet površine ne zavisi samo od odabranog postupka obrade, nego i od režima obrade. Kao dokaz ovome, na slici 1.5 prikazane su promjene naprezanja (otpornost na zamor materijala) u zavisnosti od broja ciklusa pri različitim režimima brušenja: grubo i fino. Jasno se vidi mnogo veća čvrstoća istog materijala i njegova otpornost na zamor u slučaju fine obrade brušenjem. Na kraju, treba reći da integritet površine zavi-si i od mnogih drugih parametara i karakteristika proizvodne opercije, nprimjer, vrsta i karakteristike materijala alata, geometrija alata, karakteristike držača alata, karakteristike glavnog vretena alatne mašine, vrsta pogona, pomoćni pribor, vrsta i način dovođenja sredstva za hlađenje i podmazivanje, kao i mnogi drugi.

Tabela 1.1. Različiti nivoi podataka o integritetu površine

| MINIMALNI SKUP PODATAKA O INTEGRITETU POVRŠINE | STANDARDNI SKUP PODATAKA O INTEGRITETU POVRŠINE | PROŠIRENI SKUP PODATAKA O INTEGRITETU POVRŠINE |
|--|--|---|
| Kvalitet obrade, Mikrostruktura (10x ili manje) Mikropukotine, Pokazatelji mikropukotina, Mikrostruktura, Mikropukotine, Plastična deformacija, Fazne transformacije, Promjene na granici zrna, Pukotine, uglačanja, Naljepak na reznom alatu, Rastapanja, Selektivno nagrizanje, Mikrotvrdotoča. | Minimalni skup podataka o integritetu površine i dodatak: Test zamora materijala, Test naprezanja od korizije, Zaostali naponi i iskrivljenoš-dijelova. | Standardni skup podataka o integritetu površine i dodatak: Dadatna mehanička ispitiva-nja: Zatezanje, Puzanje, Napon loma, Uvijanje, Ostali testovi (procenat noše-nja profila, trenje klizanja, osobine zaptivanja). |



Slika 1.4. Smanjenje otpornosti na zamor čeličnog liva u zavisnosti od postupka naknadne mašinske obrade

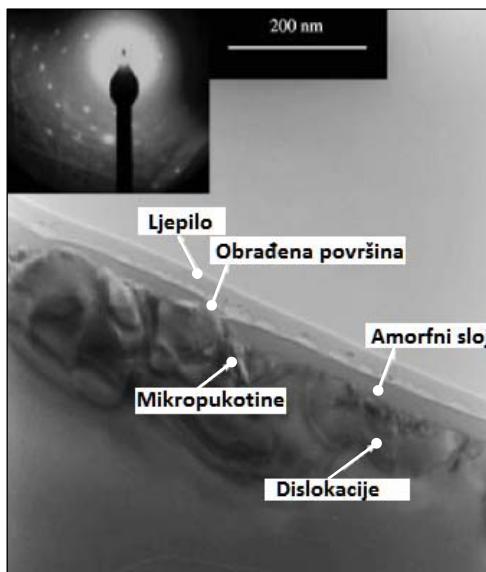


Slika 1.5. Položaj krivih naprezanja – broj ciklusa promjena za ANSI 4340 čelik (kaljen i poboljšan na 51 HRc) u zavisnosti od režima brušenja

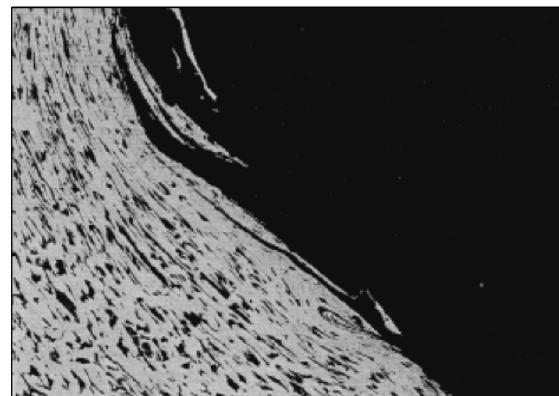
Primjenjeni postupak obrade mašinskih dijelova uzrokuje razne defekti koji negativno utiču na integritet obrađene površine. Ovi defekti se mogu klasifikovati na one koji su nastali u osnovnom materijalu (substratu) i na one koji su nastali u toku proizvodnje. Među mnogim defektima, identificiranim u praksi, najčešći su sljedeći:

- Pukotine, koje predstavljaju prekid kontinuiteta materijala, uske su i oštре sa naglim promjenama orijentacije (smjera). To su dakle, vanjski ili unutrašnji diskontinuiteti sa oštrim vanjskim rubovima. Pukotine se mogu primjetiti golim okom ili uvećanjem do 10x, a mikropukotine, uvećanjem većim od 10x.
- Metalurške transformacije uključuju mikrostrukturalne promjene uzrokovane izvana, najčešće temperaturom ili visokim kontaktnim pritiscima. Tu spadaju fazne transformacije, rekristalizacija, razgradnja legure, razugličenje, naknadno očvršćavanje uz rastapanje materijala, hemijske reakcije i sl.
- Zaostala naprezanja nastala uslijed djelovanja mehaničkih sila, deformacija i temperatura. Najčešći mehanizmi nastanka zaostalih naprezanja su neravnomjerne deformacije, neravnomjerno zagrijavanje i hlađenje i strukturne promjene.
- Krateri, koji predstavljaju plitka udubljenja i ulegnuća približno okruglog ili ovalnog oblika sa odnosom dubine prema širini obično manjem od 4:1.
- Uključci predstavljaju male, nemetalne elemente ili mješavine u metalnom materijalu.
- Promjene na granici zrna predstavljaju različite defekte i oslabljena mesta na granici koja se javljaju uslijed agresivnog djelovanja tečnog metala ili korozije. U slučaju djelovanja korozije ovaj defekt se naziva korozija po granici zrna.
- Jamice su plitka površinska udubljenja, sa odnosom dubine prema širini manjim od 4:1, i koje obično nastaju uslijed hemijskog ili fizičkog djelovanja.
- Plastična deformacija je široka, očigledna površinska deformacija uzrokovanata visokim naprezanjima uslijed trenja ili mehaničkog djelovanja alata prilikom proizvodnje.

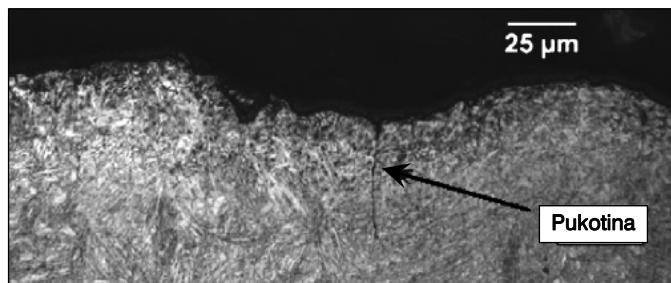
Jasno vidljive mikropukotine se obično javljaju pri mašinskoj obradi krtih materijala (slika 1.6, struganje monokristalnog silikona) ili operacijama mašinske obrade pri malim brzinama rezanja (slika 1.7, izrada navoja). Pri obradi rezanjem veoma duktilnih materijala, i u uslovima visokih temperatura i pritisaka, može doći do sabijanja materijala i svojevrsnog "zatvaranja" pukotina. Međutim, u toku rada, takve pukotine se mogu ponovo pojaviti jer je čvrstoća materijala tako zatvorene pukotine manja od čvrstoće osnovnog materijala. Na slici 1.8 prikazan je snimak pukotine nastale uslijed zamora materijala nastale u mehaničkom klinu. Pukotina je nastala u dnu neravnine profila površine kao posljedica obrade, odnosno preslikanog oblika vrha alata pri obradi. Slika 1.9 prikazuje pukotinu nastalu uslijed greške pri brušenju koljenaste osovine.



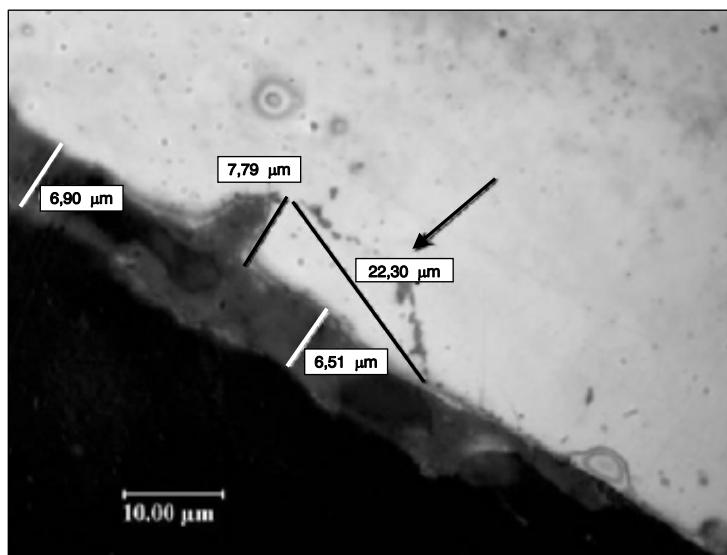
Slika 1.6. Presjek i struktura difrakcije monokristalnog silikona pri struganju dijamantskim alatom



Slika 1.7. Mikrografski snimak korijena navoja vijka

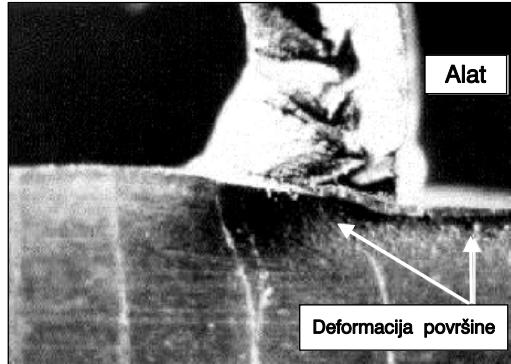


Slika 1.8. Pukotina nastala uslijed zamora materijala

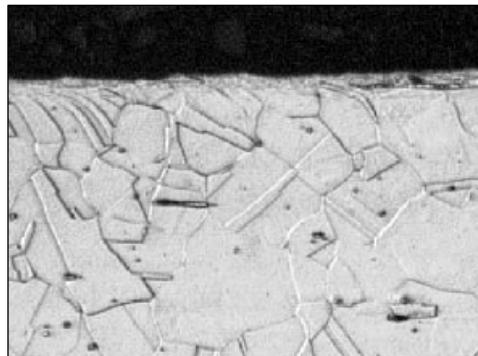


Slika 1.9. Pukotina nastala uslijed brušenja (koljenasta osovina)

Procese obrade odnošenjem materijala u obliku strugotine karakterišu strukturalne promjene površine obratka. Usljeđ djejovanja sile rezanja i sile trenja u tzv. zonama deformacije i zonama trenja, ovdje se dešava veoma značajna plastična deformacija materijala obratka, slika 1.10. Ova deformacija rezultira deformacionim očvršćavanjem površinskog sloja obrađene površine. Tvrdoća i zatezna čvrstoća se proporcionalno povećavaju sa stepenom plastične deformacije, dok se duktilnost smanjene. Veza duktilnosti i debljine sloja deformacionog očvršćavanja je direktno proporcionalna; veća duktilnost – deblji sloj očvršćavanja. Na slici 1.11 prikazan je ovaj sloj formiran pri struganju jedne vrste nehrđajućeg čelika (304/304L).



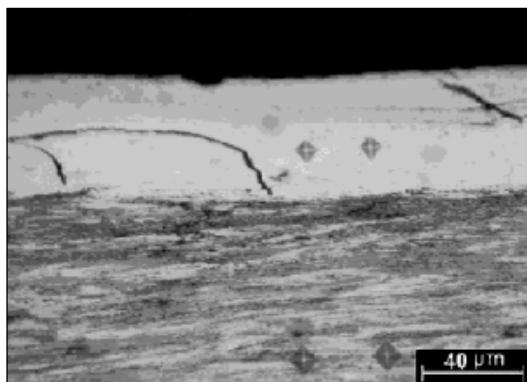
Slika 1.10. *Plastična deformacija površine pri obradi metala rezanjem*



Slika 1.11. *Mikrostruktura površine nehrđajućeg čelika nakon obrade struganjem sa jasno vidljivom deformacijom strukture*

Pri obradi otvrdnutih materijala, dešavaju se različite površinske promjene. Ovo je vezano za složene uslove koji vladaju pri takvim obradama, a to je prije svega, veliko mehaničko opterećenje, termički uslovi, hemijske reakcije i sl. Obradena površina u ovom slučaju ima veoma vidljive i po karakteristikama značajne promjene. Struktura i mehaničke karakteristike ovih površinskih slojeva su značajno različite od osnovnog materijala. Ovdje se formira tzv. "bijeli sloj", dešavaju se različite metalurške promjene i javljaju se zaostala naprezanja. Izraz „bijeli sloj“ je uveden radi činjenice da se ovi slojevi na metalografskim snimcima optičke mikroskopije vide kao svjetla faza, ili su bez naročitog jasnog izgleda na snimcima elektronske mikroskopije. Osim toga, u literaturi se izraz "bijeli sloj" odnosi na sloj velike tvrdoće nastao pri obradi željeznih materijala pod određenim uslovima. Ovaj izraz je postao i uobičajeni način povezivanja sa promjenama u površinskim slojevima. Također, koriste se i drugi izrazi kao što je "bijeli nagriženi sloj", "nenagriženi sloj", "bijela faza" i "fazno transformisani materijal".

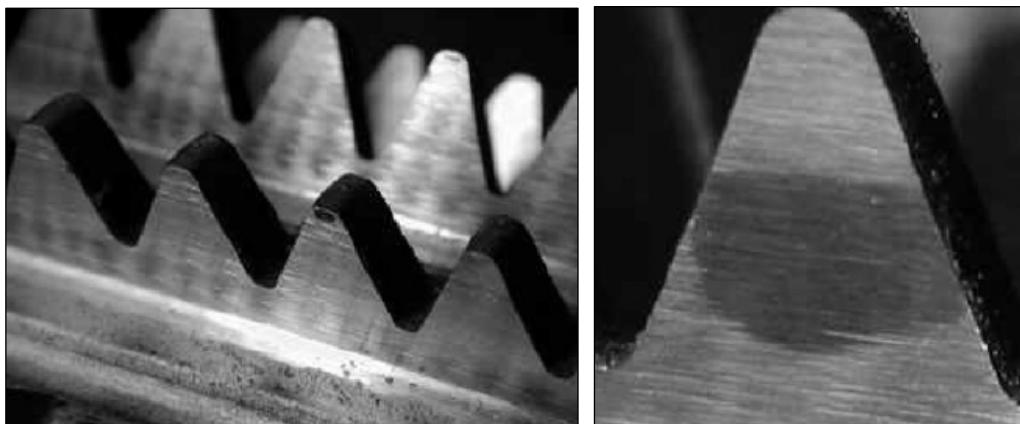
Najranije spominjanje površinskih tvrdih bijelih slojeva se veže za 1912. godinu kada je J.W. Stead na optičkom mikroskopu na nagrijenoj površini žice čeličnog užeta primjedio ovaj sloj. Pojavu ovog sloja je objasnio nastajanjem martenzita zbog zagrijavanja uslijed trenja u toku rada užeta, nakon čega je uslijedilo brzo hlađenje, a uslijed hladnjih podslojeva. Bijeli slojevi u svojim različitim formama su rezultat uticaja različitih faktora povezanih sa procesom obrade. Ovi faktori su vezani za topotne, mehaničke i hemijske uslove, a direktno su vezani za naprezanja, brzine deformacije, brzine zagrijavanja, brzine hlađenja i uslove radne sredine. Slika 1.12 prikazuje primjer bijelog sloja koji je nastao pri tvrdom struganju čelika AISI 1065.



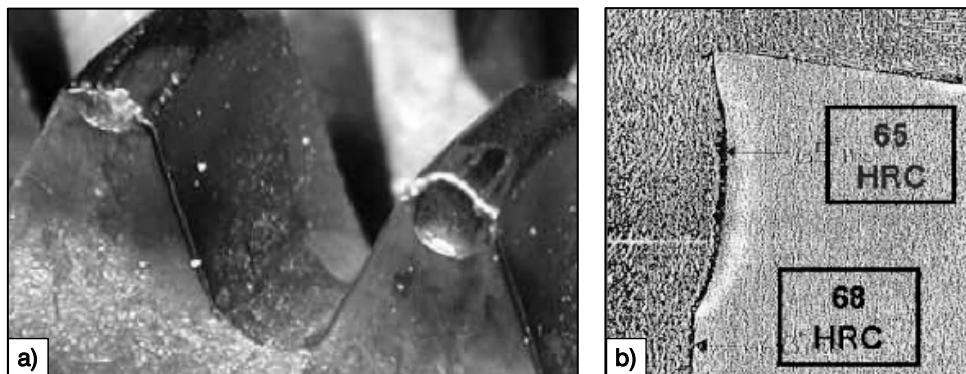
Slika 1.12. *Bijeli sloj nastao tvrdim struganjem čelika ANSI 1065*

Brušenje je postupak obrade kojeg karakterizira velike količina uložene energije po jedinični zapremine odnešenog materijala. Većina ove energije se pretvara u toplotu, koja je skoncentrisana u malom površinskom sloju materijala obratka. Kao rezultat toga, često dolazi do naglog porasta lokalne temperature. Ovaj porast temperature zavisi od niza faktora, naprimjer, karakteristike i način dovođenja sredstva za hlađenje, tip i karakteristike brusnog tocila, te brzina i dubina brušenja. Pri brušenju otvrdnutih i kaljenih čelika, produktivnost brušenja, tj. količina skinutog materijala obratka u jednom prolazu je limitirana količinom generisane topotne energije. Velika količina ove topote može izazvati termička oštećenja obrađene površine, koja se nazivaju termičke opeklone i koje isključivo zavise od temeptature zagrijavanja obrađivane površine.

Na slici 1.13 prikazan je primjer termičke opeklone pri brušenju grudne površine zupčastog noža za izradu zupčanika od brzoreznog čelika. Fotografija na desnoj strani navedene slike pokazuje široko područje opeklone izazvane djelovanjem toplote. Na slici 1.14.a prikazani su istrošeni zubi ovog zupčastog noža, a uslijed nedostatka odgovarajućeg nivoa tvrdoće, a što opet je uzrokovano termičkom opeklonom, slika 1.14.b.



Slika 1.13. Termičke opeklne pri brušenju zupčastog noža od brzoreznog čelika



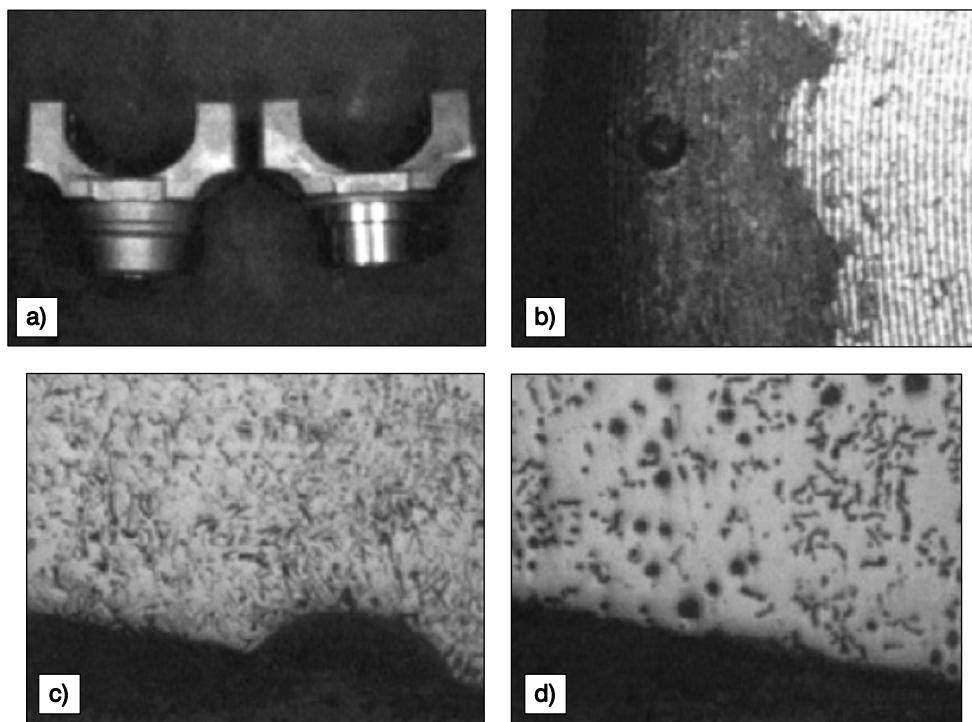
Slika 1.14. Trošenje grudne površine zupčastog noža (a) uslijed gubitka tvrdoće (b)

Problemi izazvani nemetalnim uključcima i poroznošću su najviše izraženi u fazama ljevanja čelika, sivog liva i aluminijumskih legura. Ovo je noročito izraženo u proizvodnji odlivaka za automobilsku industriju. Zato, zahtjevi za ekonomičnom proizvodnjom ovih odlivaka sa smanjenim uključcima, stalno rastu. Mikrouključci mogu imati značajan negativan efekat na mehaničke karakteristike proizvoda, kao i negativan uticaj na obradljivost.

Na slici 1.15 prikazan je karakterističan primjer proizvoda za automobilsku industriju. U pitanju je proizvod viličastog oblika (jaram) koji se prethodno dobije livenjem, liveno gvožđe: slika 1.15.a – mašinski neobrađeni i obrađeni odlivak, slika 1.15.b – tamna i svijetla faza na obrađenoj površini odlivka, slika 1.15.c – mikrostruktura tamne faze sa uvećanjem 100x i slika 1.15.d – mikrostruktura svijetle faze sa uvećanjem 100x. Analizom

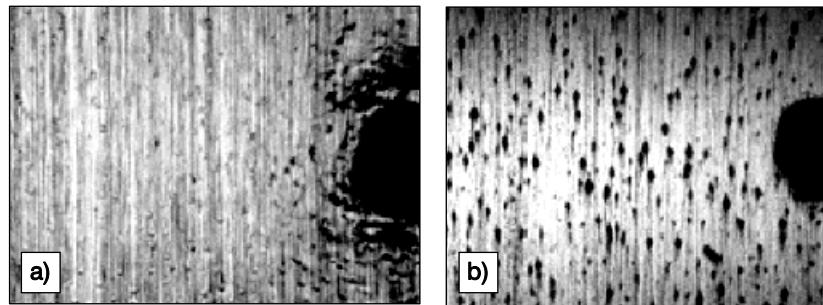
postupka livenja i dobivenim snimcima prikazanih na navedenoj slici, može se zaključiti sljedeće. Prvobitna pretpostavka za pojavu tamnijeg i svjetlijeg sloja je zaostajanje oksida metala. Međutim, dalje ispitivanje mikrostruktura svijetlih i tamnih područja (slika 1.15.c i d.) pokazalo je da se grafit formira pretežno u izduženom obliku, a ne obliku globula i to u tamnom području. Očito se radilo o pograšno postavljenom hranitelju prilikom livenja, tako da je rezultat tzv. degradirana struktura. Daljom analizom procesa izvršena je rekonstrukcija procesa livenja, tj. postavljen je još jedan lokani hranitelj. Umjesto jednog hranitelja na vrhu svakog odlivka, postavljen je još jedan između otvora za istopljeni metal za dva odvojena dijela odlivka. Dakle, promjenom lokacije hranitelja odlivka problem je riješen na način da se u ovom slučaju obezbjeđuje kontinuirano livenje, bez kontaminacije metalom. Konačno, promjenjena tehnologija livenja je rezultirala poboljšanjem integriteta obrađene površine.

Brušenjem livenog gvožđa poboljšava hrapavost obrađene površine, smanjuju se parametri hrapavosti, naprimjer, srednje aritmetičko odstupanje R_a . Međutim, prilikom brušenja se grafitne granule iščupavaju ostavljajući male kratere na obrađivanoj površini. Time se procenat nošenja profila površine značajno mijenja. Ove granule mogu biti

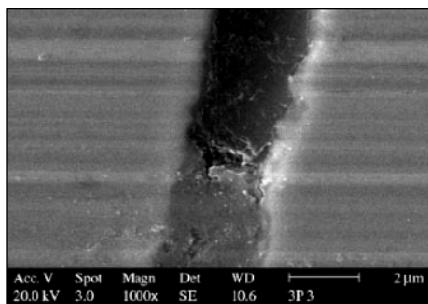


Slika 1.15. *Degradiacija grafita kod sivog liva: a) mašinski neobrađeni i obrađeni odlivak, b) tamna i svijetla faza na obrađenoj površini, c) mikrostruktura tamne faze, uvećanje 100x i d) mikrostruktura svijetle faze, uvećanje 100x*

raznešene (razmazane) ili utisnute po površini tokom brušenja, slika 1.16.a. Nakon brušenja, operacijama vrlo fine završne obrade (mikro obrada) ovi dijelovi se jasno uočavaju na površini, slika 1.16.b. Na prvi pogled, ovakva površina izgleda lošija, ako se posmatra parametar R_a . Međutim, kako to pokazuje slika 1.17, ovdje se radi o pojavi kratera iz kojih su iščupane granule grafita prilikom završne obrade.



Slika 1.16. *Mikrografski snimci obradene površine livenog gvožda: a) prije vrlo fine obrade, uvećanje 50x, b) poslije vrlo fine obrade, uvećanje 100x*



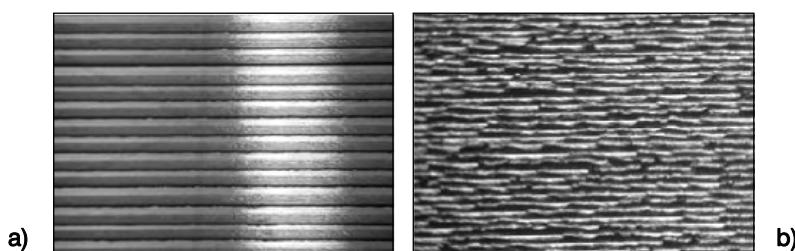
Slika 1.17. *Krater nastao iščupavanjem grafita na površini livenog gvožda, SEM uvećanje 1000x*

U ranije datoј tabeli 1.1, od strane utemjitelja koncepta integriteta površine, prikazani su skupovi podataka o integritetu površine a koji su vezani samo za proizvodnju, odnosno izradu dijelova. Kao rezultat, minimalni, standardni i prošireni skupovi podataka o integritetu površine uključuju samo karakteristike za određeni slučaj. Štaviše, ovi skupovi podataka obuhvataju i neke zastarjele podatke, naprimjer, posmatranje naljepka na reznom alatu kao dijela minimalnog skupa podataka. Prvo, ovaj parametar nije mjerljiv pa se kao takav ne može uzeti kao zahtjev u bilo kakvoj tehničkoj dokumentaciji (konstrukcionom crtežu, tehnološkoj dokumentaciji i t.d.). A s druge strane, naljepak kao pojava u toku procesa obrade u današnje vrijeme i korištenjem današnjih tehnologija obrade, obično se uopšte ne pojavljuje. Uticaj naljepka na integritet površine je čak i pogrešno ocijenjen. Naprimjer, u tehničkoj literaturi se veoma često spominje činjenica da pojava naljepka negativno utiče na kvalitet obrađene površine. Ovdje se čini pot-

rebnim dodatno objašnjenje za ovaj fenomen. Da bi razumio fenomen nastanka naljepka iz ugla fizičke metalurgije, potrebno je poći od definicije procesa rezanja metala kao procesa gdje se s ciljem odvajanja strugotine, u zoni rezanja, namjerno stvaraju uslovi za nastanak pukotine (generisanje novih površina – površinska energija). Rad utrošen na stvaranje ove pukotine smatra se primarnim parametrom za određivanje sile rezanja i energije utrošene pri rezanju. Stoga, za objašnjenje ovog procesa mora se, prije svega, uzeti u obzir mehanika loma, ali u uslovima visokih temperatura koje vladaju pri rezanju metala.

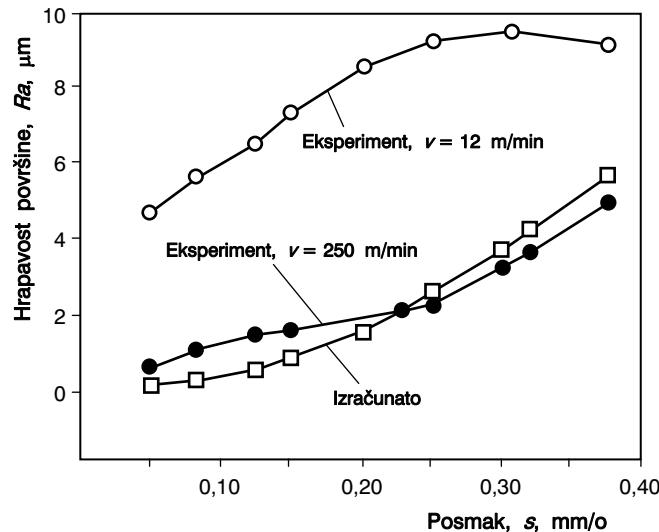
Prema mnogim istraživačima, postoji primjetan porast naprezanja na lom, a također i rada potrebnog za formiranje pukotine negdje približno od 0,18 do 0,25 od tačke topljenja materijala obratka. Ovim se mogu objasniti "čudni" eksperimentalni rezultati do kojih su došli neki autori još na polovini dvadesetog vijeka. Ovdje se misli na eksperimentalna istraživanja procesa rezanja pri veoma niskim brzinama rezanja kada se dešavaju izuzetno visoke plastične deformacije i pri kojima se stvara naljepak na reznom klinu alata po čitavoj aktivnoj dužini rezne ivice. Ako se proces rezanja odvija pri optimalnoj temperaturi rezanja, naljepak se uopšte ne formira, pa tako uopšte ne utiče na kvalitet obrađene površine. Snimci obrađene površine prikazani na slici 1.18 mogu poslužiti kao dokaz za ovu tvrdnju. Kao što se vidi, naljepak ima uticaj na obrađenu površinu samo u slučaju obrade sa malim brzinama rezanja, tj. kada je temperatura rezanja ispod optimalne temperature, slika 1.18.a. Kada je temperatura rezanja blizu ili jednaka optimalnoj temperaturi, naljepak se uopšte ne formira, tako da teoretska hrapavost obrađene površine (profil obrađene površine) potpuno i islučivo zavisi samo do geometrije alata (radijus zaobljenja vrha alata) i posmaka, slika 1.18.b.

Na slici 1.19 prikazani su rezultati mjerjenja parametra hrapavosti R_a , kao i vrijednosti ovog parametra proračunati na osnovu radijusa zaobljenja vrha alata i korištenog posmaka (od 0,05 mm/o do 0,38 mm/o), a sve za dvije različite brzine rezanja; 12 m/min i 250 m/min. Sa navedene slike je vidljivo da u slučaju kada je brzina rezanja odabранa tako da je temperatura rezanja blizu optimalne (brzina rezanja od 250 m/min),



Slika 1.18. Površina čelika ANSI 1045 obrađena uzdužnim struganjem, materijal alata tvrdi metal P10, grudni ugao $\gamma = 7^\circ$, ledni ugao $\alpha = 9^\circ$, napadni ugao $\kappa = 93^\circ$, pomoćni napadni ugao $\kappa_l = 27^\circ$, radijus zaobljenja alata $r = 1 \text{ mm}$, dubina rezanja $d = 0,3 \text{ mm}$: a) brzina rezanja $v = 12 \text{ m/min}$, posmak $s = 0,38 \text{ mm/o}$, b) brzina rezanja $v = 250 \text{ m/min}$, posmak $s = 0,45 \text{ mm/o}$

stvarna (ekperimentalno izmjerena) i teoretska (izračunata prema geometrijskom modelu) hrapavost su približno iste. Snimak ove površine prikazan je na slici 1.18.b, gdje je za brzinu razanja od 250 m/min, korišten optimalan posmak od 0,24 mm/o.



Slika 1.19. Izračunate i eksperimentalno izmjerene vrijednosti parametra hrapavosti R_a za dvije različite brzine rezanja, podaci kao na slici 1.18

1.5. INTEGRITET POVRŠINE – NOVA VIZIJA

U nekim industrijskim granama, kao što su svemirska, automobilska i biomedicinska, postoje izraziti zahtjevi za apsolutnom pouzdanšću i maksimalnom sigurnošću rada elemenata. Međutim, prema nekim autorima, ne postoji čak ni odgovarajuća definicija integriteta površine. Integritet površine obuhvata samo elemente vezane za proizvodnju, jer se primjenjenim postupcima izrade dijelova direktno utiče na karakteristike proizvoda, kao što su čvrstoća na zamor, otpornost protiv korozije, radni vijek i sl.

Osnovni uzrok ovog problema leži u nedovoljnim i nesistematskim informacijama o integritetu površine, i to s obzirom na dva ubičajena stajališta: uloga integriteta površine u dizajnu proizvoda i formiranje specifičnog skupa zahtjeva integriteta površine za različite proizvodne procese. Bez sumnje, postoji nedostatak sistematskog prikaza podataka o integritetu površine u obliku, naprimjer, priručnika ili standarda, gdje bi se podaci sistematizirali na način korelacijske veze između integriteta površine i uslova eksploatacije proizvoda, iako je objavljen veliki broj istraživačkih radova u kojima se

nastoje uspostaviti takve korelacije. Jedan takav primjer može biti korelacija između završne obrade površine i broja ciklusa do zamora materijala, ili korelacija između integriteta površine i ponašanja materijala pri djelovanju korozije.

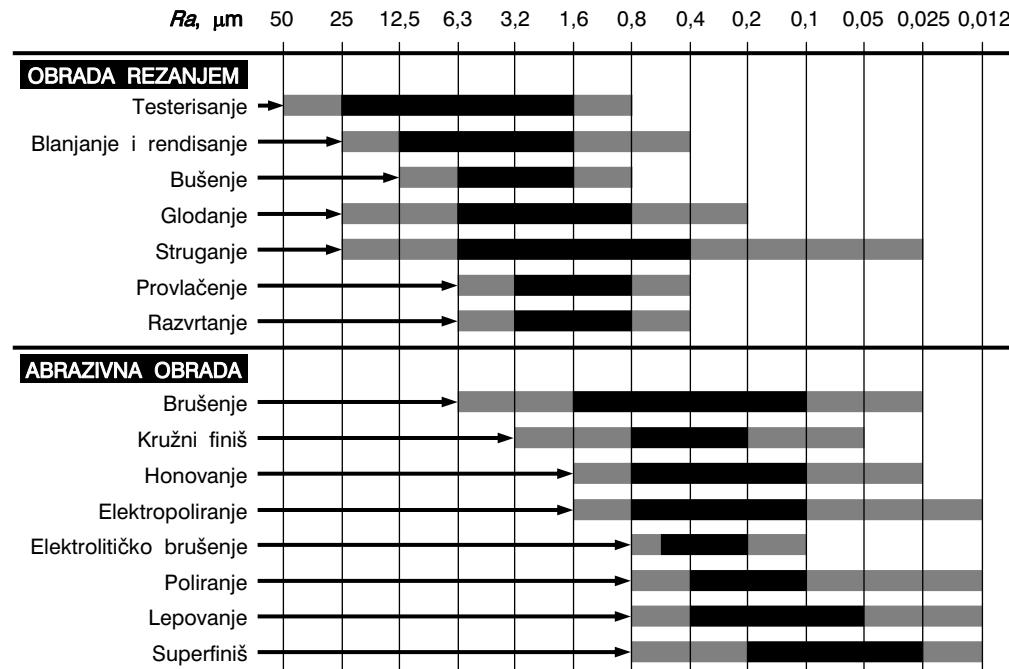
Većina radioničkih crteža sadrže samo informacije o zahtjevima vezanim za kvalitet obrađene površine, a rijetko i informacije vezane za teksturu površine, te osobine materijala. Osim za veoma malo specifičnih slučajeva, konstrukcionalna i proizvodna dokumentacija ne sadrži informacije vezane za fizičke, mehaničke, metalurške i hemijske karakteristike površinskog sloja. Od ovih karakteristika mogu se izdvojiti: nivo i dubina deformacionog očvršćavanja, karakter, dubina i raspored površinskih zaostalih napona i sl. Pri projektovanju tehnologije izrade dijelova, isključivo se vodi računa samo o određivanju režima obrade s obzirom na zadovoljavanje propisane tačnosti dimenzija, oblika, tolerancija, te hrapavosti obrađene površine, ali optimirano s obzirom na minimalne troškove proizvodnje. Niti jedan literaturni izvor, katalog alata, priručnik tehničara obrade i sl., ne uzima u obzir selekciju elemenata i parametara proizvodne operacije koji se odnose na zahtjeve integriteta obrađene površine. Kao ilustracija, razmotrit će se sljedeći primjer. Prvi problem koji inženjer – tehničar mora da riješi u kontekstu zahtjeva završne obrade jeste vrsta površine koja će najbolje ispuniti traženu funkciju proizvoda. Mnogi faktori mogu uticati na ovu odluku, naprimjer, željeni sjaj površine, adhezija, trenje, i t.d. Dalje, potpuno razumijevanje zahtjeva u smislu funkcionalnosti dijela će uticati na izbor tehničkog postupka obrade, kao i mjerljivih parametara, na osnovu kojih se, u konačnici, mogu izračunati troškovi proizvodnje. Kada se doneše odluka o traženom kvalitetu obrađene površine, naredni zadatak je izbor odgovarajuće proizvodne operacije kako bi se postigao traženi kvalitet obrade. Tehničaru je na raspolaganju ogroman broj raznovrsnih reznih alata, materijala alata, rezne geometrije, sistema za obradu različitih karakteristika, sredstava za hlađenje, pomoćnog pribora i t.d. To znači da izbor optimalne kombinacije gore navedenih faktora, čak i u slučaju veoma jednostavnih proizvodnih operacija, kao što su struganje, glodanje i bušenje, čine ovaj zadatak zapravo teškim, jer se optimalan izbor treba vezati i za integritet površine. Ako se uzme u obzir samo jedan od najjednostavnijih parametara integriteta površine – srednje aritmetičko odstupanje profila R_a , slika 1.20, tada je na raspolaganju zaista širok spektar proizvodnih operacija, s jedne strane, a istovremeno se može vidjeti da vrijednost posmatranog parametra R_a varira i mnogostruko puta od operacije do operacije.

Kao što je poznato, integritet površine opisuje ne samo topološke (geometrijske) aspekte površine i njene fizičke i hemijske karakteristike, nego i mehaničke i metalurške karakteristike, što se jasno vidi iz podataka datih u tabeli 1.1. Međutim, kada se navedeni podaci, naizgled veoma korisni, trebaju praktično implementirati, tada se vidi da praktično ne postoji mogućnost da se preporuke i zahtjevi integriteta površine ugrade u tehničku dokumentaciju. Čak i u slučaju dijelova sa prevlakama, osim hemijskog sastava i debljine prevlake, nikakav drugi pokazatelj se ne specificira. U ovom slučaju, s aspekta integriteta površine, veoma su značajni podaci o adhezivnoj vezi prevlake sa substratom, zatim stvarna površina kontakta, gustoća i sl. Drugi primjer mogu biti dijelovi sa otvrdnutim površinskim slojevima, naprimjer dijelovi sa površinskim slojevima obogaćenih ugljikom ili karbonitridom i termički tretiranih, osim tvrdoće, hemijskog sastava i debljine prevlake, nikakav drugi pokazatelj se ne specificira.

1. UVOD

tava i debljine slojeva, ništa drugo nije specificirano. Prema nekim autorima, za ovo postoje dva glavna razloga:

- dostupni rezultati istraživanja o integritetu površine, kao i istraživačke studije baziraju se na uslovima u kojima su testovi provedeni. Niti jedna takva studija ne daje sistematizirane i na kvantitativan način dostupne informacije o uticaju integriteta površine na funkcionisanje dijela. Sa takvim informacijama, konstruktor bi mogao jasno i precizno odrediti parametre integriteta površine i iste definisati u konstrukcionej i tehnološkoj dokumentaciji, i
- “projektovanje za proizvodnju” ili “tehnologičnost konstrukcija”, kao stručna oblast koja se izučava na univerzitetima ima za cilj osposobljavanje budućih inženjera da posjeduju znanja i vještine za konstruisanje i projektovanje proizvoda na način da imaju oblik koji je tehnologičan, odnosno da su projektovani dijelovi jednostavniji za izradu (proizvodnju). Osim toga, vodi se računa da je i kontrola dimenzija, oblika i tolerancija lako izvodljiva. Dakle, u konačnici radi se o projektovanju s aspekta najjeftinije konstrukcije. Nažalost, praktični aspekti integriteta površine se ne uzimaju u obzir u ovim univerzitskim kursevima.



Slika 1.20. Kvalitet (hrapavost) obradene površine u zavisnosti od postupka obrade

U proteklih petnaestak godina, globalna konkurenčija prislila je proizvodne kompanije da preispitaju svoju poslovnu praksu i da nađu način kako udovoljiti izazovima ekonomske globalizacije. Smanjenje mase elemenata i mašina, a istovremeno povećanje njihove izdržljivosti i pouzdanosti, zatim povećanje vijeka trajanja i udovoljavanje uslovi ma sigurnosnih standarda (npr. automobilska industrija) prisile su mnoge proizvođače da koriste bolje i kvalitetnije materijale za dijelove i da nametnu viši nivo zahtjeva kvaliteta u proizvodnji. Upravo u takvima uslovima, integritet površine, i generalno, inženjerstvo površine dolaze u prvi plan ovih aktivnosti, jer se na ovaj način bolje pristupa projektovanju i izradi dijelova i mašina. Dakle, sve više se posvećuje pažnja različitim podacima i parametrima integriteta površine mašinskih dijelova. U prilog ovim aktivnostima ide i činjenica da su povećani zahtjevi za integritetom površine usko vezani sa sljedećim tehnološkim i proizvodnim unapređenjima:

- primjena novih alatnih mašina i različitih ugradbenih uređaja pomoću kojih se izrađuju dijelovi čije su površine visokog kvaliteta, s jedne strane, i pomoću kojih se mogu proizvoditi dijelove sa ponovljivim visokim kvalitetom, s druge strane, i
- široka dostupnost jeftine opreme za mjerjenje i procjenu integriteta površine (danas je uobičajeno da je proizvodna kompanija u autoindustriji opremljena sa naprednom laboratorijom za ispitivanje materijala sa sofisticiranom opremom za kontrolu metalurgije površine, te fizičkih i hemijskih karakteristika površine).

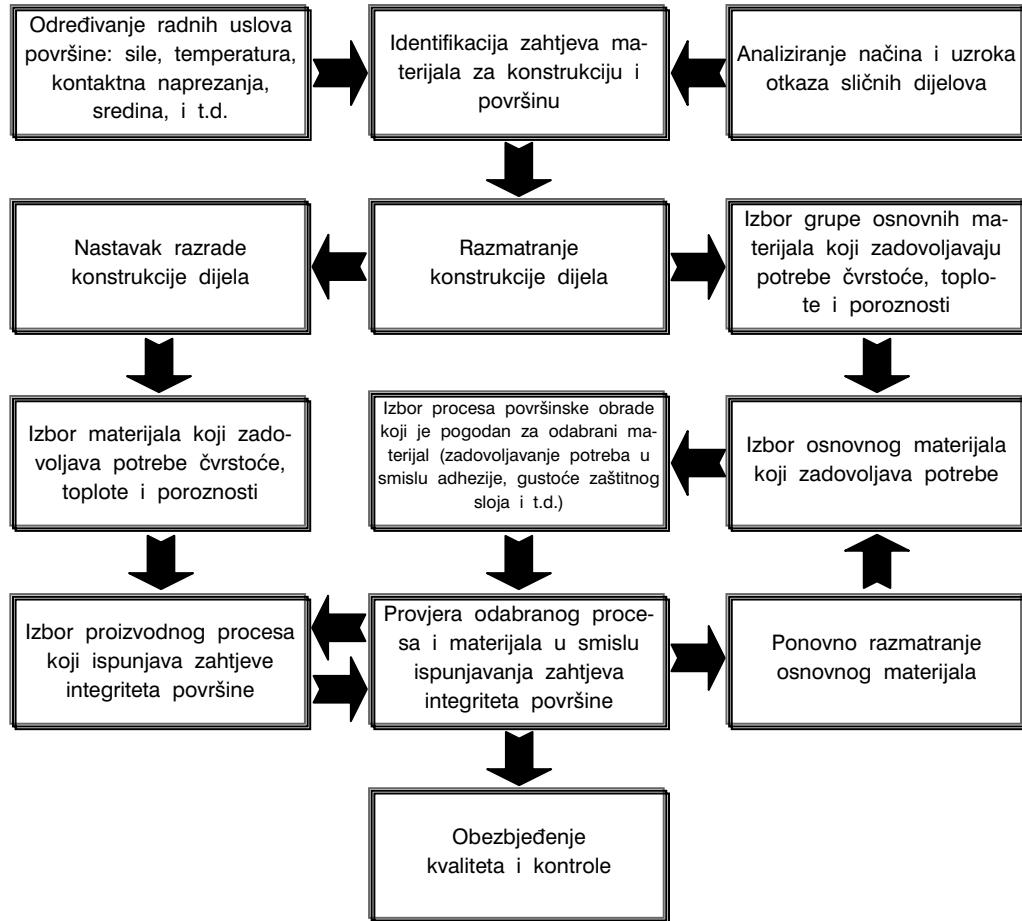
Kao što je ranije rečeno, integritet površine u inženjerskom smislu se može definisati kao skup različitih karakteristika površine koje utiču na performanse i funkcionalisanje te površine (ovdje se misli i na površinske i dubinske karakteristike). Ove karakteristike uključuju: završnu obradu, teksturu i profil površine, zamor materijala, koroziju i otpornost na trošenje, adheziju i difuziju.

Definisani parametri integriteta površine se klasificiraju kao:

- Geometrijski parametri (npr. završna obrada, parametri krive nošenja profila),
- Fizički parametri (npr. mikrotvrdoća, **zaostala naprezanja**, mikrostruktura),
- Hemijski parametri (npr. sklonost ka oksidaciji, adsorpcija, hemisorpcija, površinska električna polarizacija, hemijske reakcije površine) i
- Biološki parametri (npr. vezanost i proliferacija ćelija).

Na slici 1.21 prikazana je pojednostavljena lista za provjeru integriteta površine. Za svaki pojedinačni dio definisan je set jedinstvenih zahtjeva integriteta površine, a koji zavise od radnih uslova (sila, temperatura, kontaktna naprezanja, uticaj okolne sredine, i t.d.) i analize mehanizama i vrsta otkaza pojedinih dijelova.

Degradacija materijala može biti izazvana bilo kakvim radnim uslovima, npr. mehaničko naprezanje i mehanički udar, toplost, vibracija male talasne dužine, elektromagnetna radijacija, radioaktivna emisija, interakcija sa bakterijama, gljivice i druge slične životne forme i dr. Klasifikacija degradacije površine prema uzroku nastanka predstavlja prvi korak u definisanju zahtjeva integriteta površine, i to za svaki konkretni slučaj.



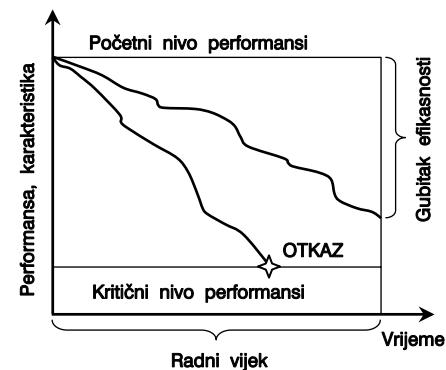
Slika 1.21. Pojednostavljena lista za provjeru integriteta površine

Najzad, u inženjerskoj praksi se ne posvećuje puna pažnja zahtjevima integriteta površine. Tačnije, ponuđen je samo fiksirani skup podataka i zahtjeva već prikazan u tabeli 1.1. Štaviše, ranije objašnjene karakteristike površine i njeni nedostaci (defekti, oštećenja), vezani su uglavnom za metalne materijale. Za druge materijale, naprimjer, plastike i kompozitne materijale, postoji čitav niz različitih defekata površina koji se moraju uzeti u obzir. To su naprimjer, varijacija gustoće, pukotine, ljuštenje smole, odsječena i polomljena vlakna, trošenje, nabori, vlažnost, i t.d. Nivo, ili veličina defekta u smislu njegove kritične vrijednosti za dijelove izrađene od kompozitnih materijala zavisi, prije svega, od konstrukcionih i eksploracionih zahtjeva i varira od dijela do dijela. U zavisnosti od zahtjeva konstrukcije, prisustvo nekih defekata ispod određene vrijednosti ne mora uticati na eksploracione karakteristike dijela. Degradacija karakteristika zavisi od

tipa, broja, lokacije, i veličine defekata. Nivo kritičnosti svakog defekta se mora odrediti za svaki dio pojedinačno.

Da bi se razumjela važnost integriteta površine u ukupnom kvalitetu bilo kojeg proizvoda, mora se razumjeti koncept degradacije materijala. Od momenta kada neki mašinski dio, odnosno proizvod napusti posljednju proizvodnu operaciju, taj dio je podvrgnut nekom obliku degradacije, iako se takva degradacija ne mora uvijek primjetiti ili izmjeriti. Brzo oksidiranje (hrđanje) tek izrađene čelične površine je tipičan primjer neposredne degradacije materijala, koja se može smatrati akumuliranim oštećenjem. Takvo oštećenje se nastavlja kroz radni ciklus dijela, odnosno, komponente. Radna opterećenja, udari i naprezanja, temperature i tok energije, prisustvo agresivnih medija i polja (elektromagnetna radijacija i sl.), utiču na smanjenje performansi materijala uzrokujući na kraju otkaz. Najjednostavnija definicija degradacije materijala bi bila ona po kojoj je degradacija posljedica djelovanja čitavog niza fizičkih procesa. Degradacija materijala je gotovo uobičajena pojava i predstavlja jedan od velikih inženjerskih problema. Naprimjer, djelovanje korozije na strukture izrađene od čelika podrazumijeva da se pri projektovanju tih struktura mora uzeti u obzir količina osnovnog materijala koja će se vremenom pretvoriti u oksid, i ne samo to, nego treba uzeti u obzir i smanjenje nekih karakteristika, kao što je otpornost na zamor i čvrstoća. Pravilan pristup bi se ogledao u odgovarajućem izboru parametara integriteta površine, čime se dodatni (površinski) materijal može podijeliti po strukturi, koja bi u tom slučaju bila superiornija u pogledu otpornosti na različite uticaje, slika 1.22. Progresivno trošenje koje se javlja u tribološkom kontaktu klipa i cilindra motora sa unutrašnjim sagorijevanjem uzrokuje prolazak izduvnih gasova iz cilindara, čime motor postepeno postaje manje efikasan. Trošenjem navedenih dijelova smanjuje se snaga motora, povećava potrošnja goriva i značajno smanjuje radni vijek motora.

Degradacija materijala je definisana u smislu gubitka performansi inženjerskog sistema. Gubitak performansi se može povezati sa mnogim radnim parametrima, naprimjer, povećane vibracije motora uslijed trošenja koljenastog vratila. Za bilo koju komponentu postoji kritični minimalni nivo performansi, nakon čijeg gubitka nastupa otkaz, odnosno stanje kada sistem ne može više da vrši funkciju. Za primjer motora sa unutrašnjim sagorijevanjem, trošenje cilindra može proizvesti zazor između klipa i cilindra do takvih razmjera da se potpuno izgubi kompresija gasova. Od toga trenutka motor više ne može vršiti svoju funkciju, dakle nastupio je otkaz. Mehanička degradacija se razvija brzinom koja je u zavisnosti od lokalnih uslova, a otkaz se pojavljuje ako se performanse smanje do kritičnog nivoa, a prije isteka radnog vijeka sistema, slika 1.22.

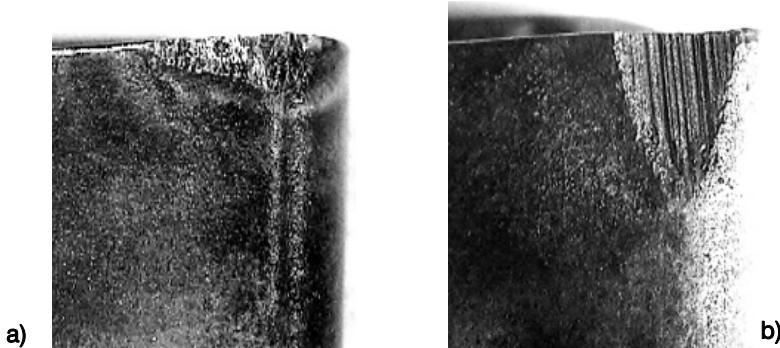


Slika 1.22. Grafička interpretacija degradacije materijala i gubitaka performansi i karakteristika inženjerskog sistema

Očito je da izučavanje integriteta površine treba biti usmjereni ka pronalaženju načina da se parametrima integriteta površine kontroliše stepen degradacije materijala pri radu i osiguranje ovih zahtjeva tokom operacije mašinske obrade. U tom slučaju bi stvarni trošak uslijed degradacije materijala trebao biti procijenjen i izbalansiran prema cijeni koštanja obezbjeđenja parametara integriteta površine. Štaviše, operacije obrade, naročito završne obrade, bi se trebale uporediti u smislu brzine degradacije površine uslijed oštećenja površine tokom obrade. U tom kontekstu, potrebno je uraditi i sistematizaciju postupaka i operacija obrade, s ciljem upravljanja procesom degradacije površine. Ovakva sistematizacija bi bila od velike koristi, kako projektantima i konstrukterima, tako i tehnologima i procesnim inženjerima. Kao primjer, razmotrit će se slučaj karakterističnih operacija obrade rezanjem: obrada struganjem pomoću rezne pločice od tvrdog metala i obrada brušenjem.

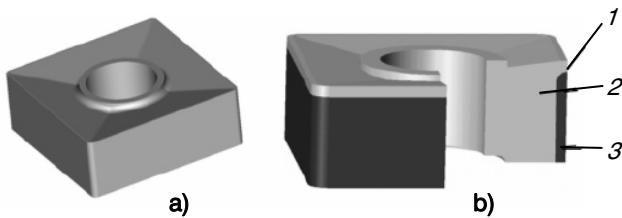
Kao što je poznato, postoje dvije osnovne zone trošenja kod alata definisane rezne geometrije: trošenje u obliku pojasa trošenja na leđnoj površini alata i trošenje u obliku kratera na grudnoj površini alata, koji su inače najčešći kriteriji istrošenosti reznog alata. Na slici 1.23.a prikazan je pojас trošenja na leđnoj površini, i to nizak stepen istrošenosti karakterističan za zahvate završne obrade, a na slici 1.23.b viši stepen istrošenosti karakterističan za zahvate grube obrade. Očito je da se s povećanjem pojasa trošenja na leđnoj površini alata, parametri integriteta površine proporcionalno pogoršavaju. Stoga je širina pojasa trošenja na leđnoj površini alata definisana kao kriterij radnog vijeka alata (postojanost alata). Tako je, za zahvate završne obrade ova veličina manja, nego za zahvate grube obrade. Jasno je da se na ovaj način povećava cijena alata za zahvate završne obrade.

Kako bi se smanjio štetan uticaj trošenja alata na integritet površine, može se koristiti rezna pločica kod koje je leđna površina smanjena. Naime, na slici 1.24.a prikazana je standardna rezna kvadratna pločica, a na slici 1.24.b rezna pločica sa smanjenom leđnom površinom. Ovdje je zapravo leđna površina 7 smanjena nanošenjem sloja bakra 3 kao dijela tijela pločice 2. Sloj bakra je smješten ispod radnog dijela leđne površine i služi kao provodnik toplosti nastale prilikom rezanja. Cilj je da se bakarnim slojem

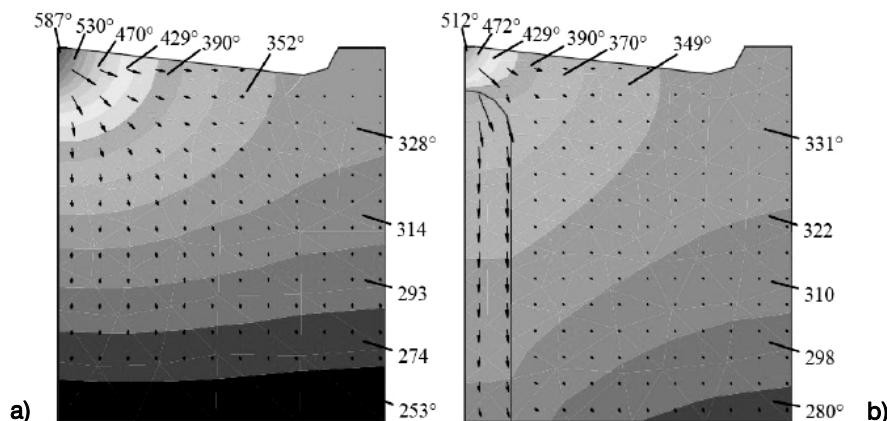


Slika 1.23. *Trošenje ledne površine alata: a) završna obrada, b) gruba obrada*

odvede dio topline i na taj način produži postojanost alata, odnosno da se uspori proces trošenja alata koji se, kako je to poznato, snažno intenzivira sa povećanjem temperature alata. Slika 1.25. prikazuje rezultat numeričke simulacije temperaturnog polja alata pomoću metode konačnih elemenata. Jasno je vidljivo, a i eksperimentima potvrđeno, da se na ovaj način temperatura vrha alata može smanjiti i do 100 °C.



Slika 1.24. Standardna kvadratna rezna pločica (a) i modificirana rezna pločica sa ugradenim bakarnim slojem za odvodenje topline (b)



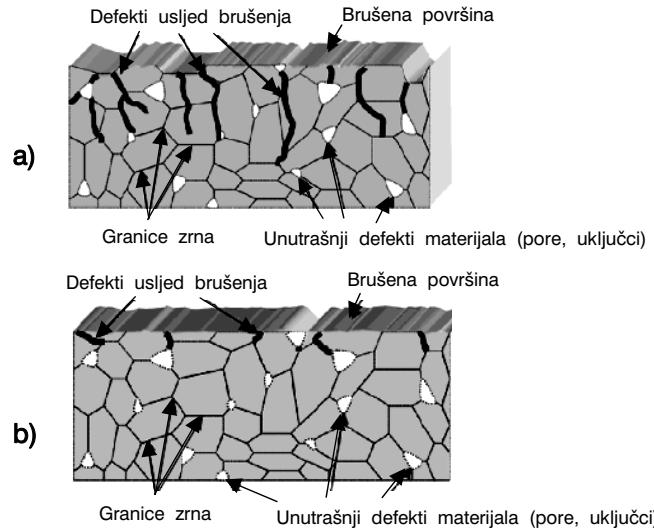
Slika 1.25. Temperaturno polje reznog klina alata od tvrdog metalra P20 pri obradi čeličika 1045 (ANSI), brzina rezanja $v = 150 \text{ m/min}$, posmak $s = 0,1 \text{ mm/o}$, dužina rezanja $d = 0,5 \text{ mm}$: a) standardna rezna pločica (slika 1.24.a), b) modifikovana rezna pločica (slika 1.24.b)

Rezna keramika na bazi Al_2O_3 je veoma dobar rezni materijal koji se naročito koristi pri obradi gdje se javlaju visoke temperature rezanja. Rezna keramika ima jedinstvene karakteristike, kao što su visoka čvrstoća, otpornost na oksidaciju, otpornost na termički šok i otpornost na trošenje. Međutim, upravo zbog ovakvih karakteristika, keramiku je veoma teško obrađivati, tj. keramika ima nisku obradljivost. Kao ilustracija ovoga može poslužiti podatak da cijena obrade keramika može biti i za 80% viša od ukupne cijene dijela izrađenog od keramike. Za završnu obradu ovih materijala najčešće se koristi

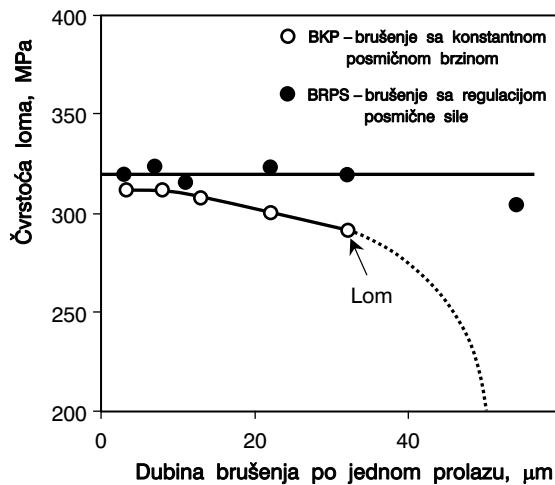
dijamantsko brusno tocilo. Ova operacija obrade, međutim, neizbjegno generiše krte i duktilne pukotine u osnovi površinskog sloja keramičkih materijala. Sile u toku brušenja proizvode defekte kao što su vrlo sitne strugotine, pukotine i/ili raspukline. Defekti nastali uslijed brušenja neizostavno smanjuju čvrstoću keramike. Veličina ovih defekata se kreće od nekoliko desetina do nekoliko stotina mikrona. U proizvodnoj praksi se s ciljem odnošenja površinskih slojeva sa navedenim defektima koriste dodatne operacije završne obrade.

Dubina brušenja i posmična brzina su jedini faktori kojima se može upravljati procesom konvencionalnog brušenja. Ako se brušenje vrši konstantnom posmičnom brzinom, onda se takav postupak naziva brušenje sa konstantnim posmakiom (BKP – Constant Feeding Speed). Sile koje se javljaju pri brušenju mogu izazvati pojavu površinskih naprezanja, kao i defekte u osnovnim površinskim slojevima. Na slisi 1.26.a šematski je prikazan defekt (oštećenje) površine izazvan prekomjernim povećanjem sila pri konvencionalnom brušenju sa konstantnom posmičnom brzinom.

S ciljem smanjenja površinskih oštećenja, može se koristiti metoda obrade brušenjem sa regulacijom posmične sile brušenja (BRPS – Regulated Force Feeding). U ovom slučaju posmična brzina se mijenja u zavisnosti od promjene posmične sile koja se kontinuirano mjeri. Na taj način se zapravo održava konstantna energija brušenja. Pokazalo se da je dubina prostiranja površinskih oštećenja pri ovakvom brušenju mnogo manja, što se može vidjeti i na slici 1.26.b. Na slici 1.27 prikazani su rezultati mjerena čvrstoće loma za navedena dva metoda brušenja u zavisnosti od dubine brušenja po jednom prolazu. Jasno se vidi negativniji uticaj metode brušenja sa konstantnom posmičnom brzinom.



Slika 1.26. Šematski prikaz oštećenja površine pri: a) brušenju sa konstantnom posmičnom brzinom i b) brušenju sa regulacijom posmične sile

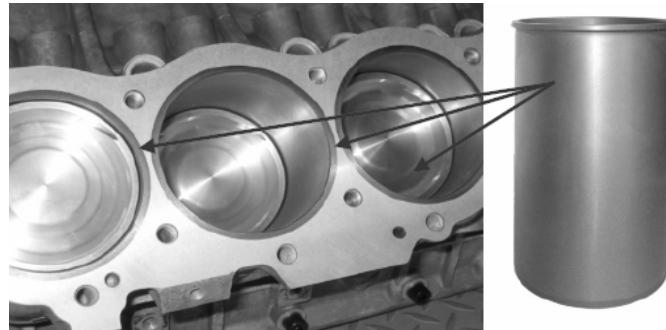


Slika 1.27. Zavisnost čvrstoće loma od dubine brušenja po jednom prolazu za brušenje sa konstantnom posmakom i brušenje sa regulacijom posmične sile

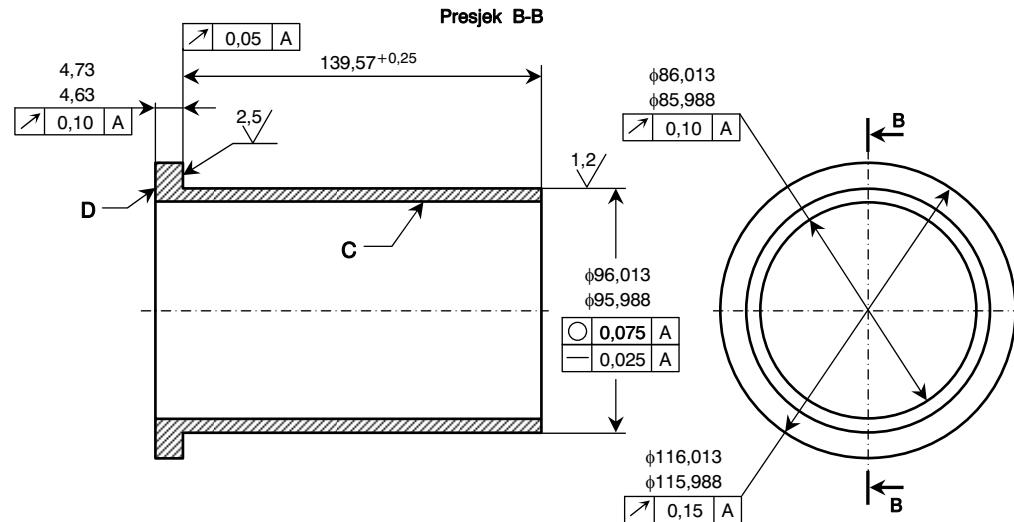
PRIMJER 1. – INTEGRITET POVRŠINE CILINDRA MOTORA SA UNUTRAŠNJIM SAGORIJEVANJEM

Blok motora sa unutrašnjim sagorijevanjem se dugi niz godina izrađivao od livenog gvožđa, prije svega zbog njegove dobre otpornosti na trošenje. Naime, u toku eksploatacije, cilindar je izložen veoma intenzivnom trošenju zbog kliznog tribološkog kontakta klipa i cilindra. Od kvaliteta cilindra i klipova direktno zavisi radni vijek motora sa unutrašnjim sagorijevanjem. Međutim, upotreba liva za izradu cilindara rezultira velikom masom motora, što je u suprotnosti sa modernim trendovima izrade vozila koji treba da imaju manju masu, te koji, na taj način imaju manju potrošnju goriva. Dijelovi motora izrađeni od legura aluminijuma i magnezijuma se sve više koriste upravo s ciljem smanjenja mase. Kao prihvatljivo rješenje koje će zadovoljiti zahtjev velike otpornosti na trošenje, a istovremeno i zahtjev manje mase, danas se koriste cilindrične čahure od livenog gvožđa, slika 1.28. Ove čahure se izrađuju centrifugalnim livenjem, zatim se termički obrade, te upresuju u otvore na bloku motora koji je u ovom slučaju izrađen od aluminijumove legure. Nakon toga se vrši gruba obrada cilindara, te završno honovanje. Zahtjevi integriteta površine za takve cilindre vezani su za veoma visoki kvalitet površine ovih čahura, jer radni vijek motora direktno zavisi od radnog vijeka cilindara. Na slici 1.29 pokazan je crtež poluobrađenog cilindra, a na slici 1.30 zahtjevi integriteta površine. Pošto je čahurasti cilindar od presudnog značaja za funkcionisanje i radni vijek motora, to su zahtjevi integriteta površine za ovaj dio veoma strogi, i zadovoljavanje ovih zahtjeva definitivno povećava cijenu izrade motora. Osim toga, kontrola svih

navedenih zahtjeva integriteta površine podrazumijeva i sofisticirane materijale i opremu za metalurška ispitivanja, kao i obučeno osoblje. Slika 1.31 pokazuje dio izvještaja o navedenoj kontroli. Kao što se vidi, zahtjevi integriteta površine su uglavnom fizički i metalurški, jer se mogu ispitati prije upresivanja čahure u blok motora. Topografski zahtjevi integriteta površine se provjeravaju u završenom bloku motora.



Slika 1.28. Blok motora sa unutrašnjim sagorijevanjem sa čahurama od livenog gvožda

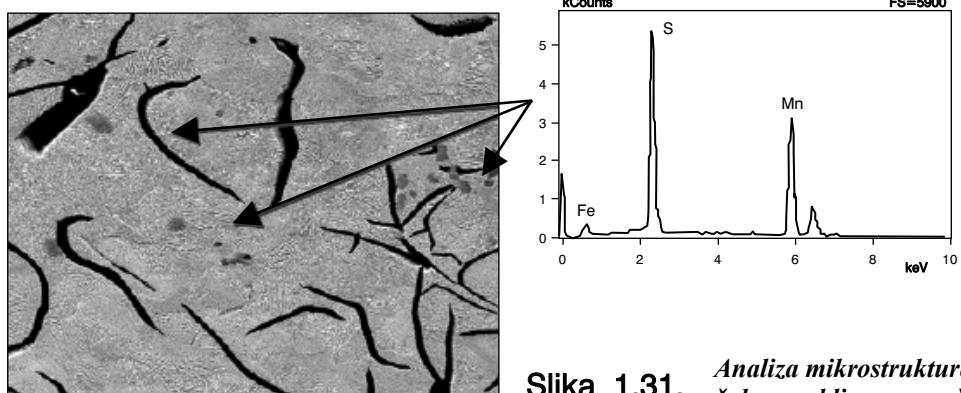


Slika 1.29. Crtež poluobradene čahure (cilindra)

Dozvoljeni vidljivi defekti odlivka na površini cilindra:

1. Maksimalno 4 udubljenja ne veća od 0,5 mm u promjeru i dubini, međusobno udaljeni maksimalno 6,0 mm,
2. Maksimalno 2 grupe finih nepovezanih udubljenja maksimalnog promjera od 0,25 mm. Svaka grupa mora biti unutar kruga od 8 mm.
3. Materijal: W4-G250SP-L2 centrifugalno livenje, sastav: 3,23 do 3,50 % C, 2,25 do 2,80 % Si, 0,04 do 0,07 % S,
4. Mikrostruktura. Zrna grafita moraju da budu tipa A, veličine 4 do 7 po ISO945, tip B je dopustiv, a minimalna količina tipa D i E sa zrnima ne većim od 5,0 mm u dužini kada je njihova širina veća od 2,5 mm,
5. Lamelarnog perlita mora biti minimalno 95%, sa maksimalno 0,5 % ferita, dozvoljeni karbidi i ostali konstituenti moraju biti dispergovani, ne u obliku masivnih čestica ili u mrežastom obliku,
6. Tvrdoća od 95 do 105 HRB, prosječna vrijednost od tri mjerenja na površini D,
7. Tvrdoća po Brinelu od 207 do 285 HB (ISO 6506, opterećenje od 750 kg i kuglica promjera 5,0 mm ili opterećenje od 187,5 kg i kuglica promjera 2,5 mm),
8. Mikrostruktura se treba analizirati na površini trošenja C,
9. Zatezna čvrstoća se ispituje na gornjoj polovini uzorka čahure i treba da iznosi minimalno 240 MPa,
10. Nije dozvoljena vidljiva korozija ili hrđa. Bilo kakvi inhibitori korozije na čahuri nisu dozvoljeni, čahura mora biti suha i čista, bez bilo kakvih zaprljanja koja mogu biti štetna za opremu prilikom presovanja čahure u blok motora,
11. Generalno: zavarivačke popravke nisu dozvoljene, nije dozvoljena vidljiva poroznost na površinama C i D, odlivci moraju biti bez pukotina ili uključaka.

Slika 1.30. Zahtjevi integriteta površine za poluobradenu čahuru



Slika 1.31. Analiza mikrostrukture čahure od livenog gvožđa, veličina flokni i MnS uključci

PRIMJER 2. – INTEGRITET POVRŠINE ZA IMPLANTATE

Veliki broj implantata se izrađuje od čistog titana (cpTi) zbog njegove visoke in-vitro i in-vivo biokompatibilnosti. Titan omogućava direktni kontakt ljudska kost – implantat koji također ima naziv oseointegracija. S ciljem poboljšanja integracije kostiju i implantata izrađenih od titana, koriste se postupci obrade kojima se potiču i intenziviraju hemijske modifikacije vezane za promjene integriteta površine. Ovi postupci obrade su naprimjer, obrada rezanjem, nagrizanje kiselinom, elektropoliranje, anodna oksidacija, obrada sačmom i obrada plazmom. In-vitro studije su pokazale da je hrapavost obrađene površine važan parametar koji utiče na osnovne biološke reakcije nakon ugradnje implantata. Nekoliko studija je pokazalo da je reakcija ćelija poboljšana zahvaljujući, između ostalog, i integritetu površina izrađenih od titana. Neka eksperimentalna istraživanja su pokazala da površine implantata završno obrađene sačmom od čestica Al_2O_3 imaju odlične karakteristike i da zadovoljavaju zahtjeve integriteta površine za ove dijelove. Naime, ovako dobivene površine, koje su inače hrapave, imaju bolji kontakt sa kostima u poređenju sa površinama obrađenih, naprimjer, struganjem. S druge strane, površine obrađene sačmom veličine čestice od 75 μm imaju boje kontaktne karakteristike sa kostima nego čestice manje, ili pak veće veličine, naprimjer, 25 μm i 250 μm . Bez sumnje, ovi rezultati sugeriraju na zaključak da se indirektno, preko parametra hrapavosti R_a , može optimizirati kontakt kostiju sa implantatom.

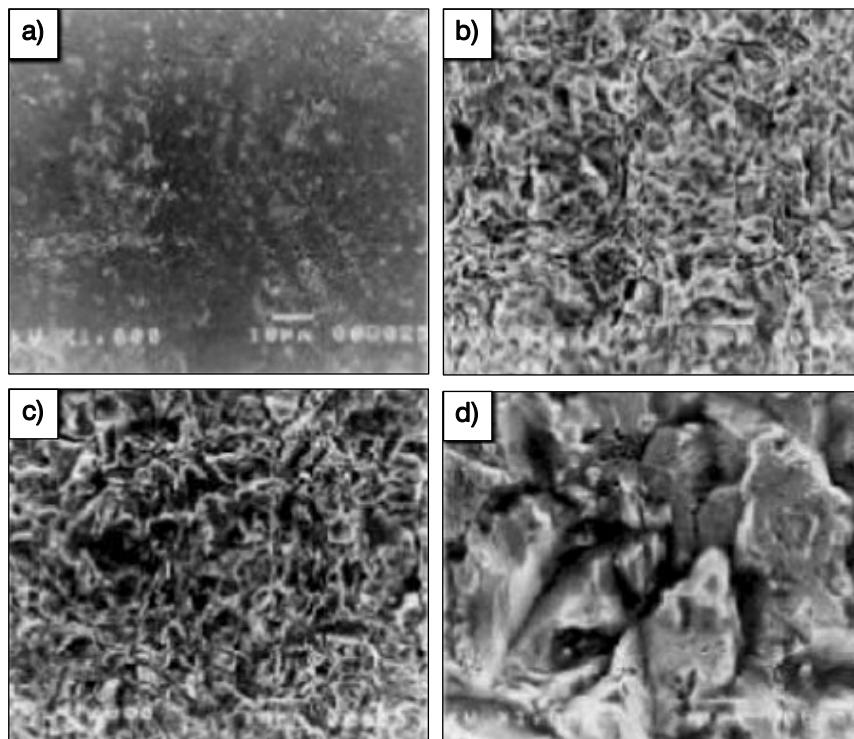
Za procjenu in-vitro biokompatibilnosti titana koristi se kultura osteoblast ćelija (ćelije odgovorne za formiranje kostiju). Pokazalo se da hrapave površine pospješuju razvoj nekih ćelijskih aktivnosti. Prijanjanje ćelije se povećava sa povećanjem hrapavosti površine. Kolagen sinteze, vanćelijska matrica, citokineza su faktori rasta kostolike formacije koja se pospješuje na hrapavim površinama. Međutim, razlike u porijeklu ćelija i eksperimentalnih metoda čini analizu i uporedbu ovih rezultata prilično teškim, ili čak upitnim. Procjene biokompatibilnosti kroz uzgoj ćelija bi trebale biti urađene koristeći isključivo primarne kulture, jer će biomaterijali biti u međudejstvu sa ovim vrstama ćelija nakon in-vivo implantacije. Kultura ćelija koje se koriste u ovim istraživanjima je koštana srž usmjerenja in-vitro od osteoblast ćelije.

Uticaj hrapavosti obrađene površine implantata od titana na vrednovanje razvoja ljudske ćelije koštane srži, zatim porast broja ćelija (poliferacija), ukupni sadržaj proteina, djelovanje alkalne fosfataze i kostolike formacije se ovdje navodi kao primjer uticaja integriteta površine na biološke karakteristike površine. Za eksperimentalno ispitivanje su korišteni diskovi od titana debljine 4 mm i promjera 12 mm. Diskovi su polirani sa SiC brusnom trakom, različite veličine zrnca, prvo 280, zatim 600 i na kraju 1200. Površine diskova su obrađene (tretirane) na sljedeća četiri načina:

1. Poliranje sa Al_2O_3 do konačne veličine zrna od 0,05 μm ,
2. Obrada sačmom (čestice od Al_2O_3 veličine 25 μm),

-
3. Obrada sačmom (čestice od Al_2O_3 veličine 75 μm),
 4. Obrada sačmom (čestice od Al_2O_3 veličine 250 μm).

Svi diskovi su očišćeni u ultrasoničnoj kupki i autoklavu, te sterilisani prije nego su korišteni u eksperimentima uzgoja ćelija. Na kraju, površine su analizirane na skenirajućem elektronskom mikroskopu, slika 1.32. Rezultati su prikazani u tabeli 1.2. Kao što se vidi, posmatrani parametri (razvoj ljudske ćelije koštane srži, porast broja ćelija, ukupan sadržaj proteina, djelovanje alkalne fosfataze i kostolikke formacije) ne mogu se dovoditi u vezu samo sa parametrom hraptavosti obrađene površine od titana (npr. R_a), nego za ocjenu integriteta površine u ovom slučaju se trebaju uzeti u obzir i tekstura površine, topografija, parametri hladnog deformisanja (mikrostruktura, tvrdoča i zaostala naprezanja).



Slika 1.32. SEM snimci površine diskova od titana (1000x): a) poliran sa Al_2O_3 , b) obrada sačmom 25 μm , c) obradom sačmom 75 μm i d) obrada sačmom 250 μm

Tabela 1.2. Rezultati istraživanja razvoja ćelija koštane srži na površini od titana

| | Poliranje | Obrada sačnom 25 µm | Obrada sačnom 75 µm | Obrada sačnom 250 µm |
|------------------------------|----------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| Razvoj ćelija koštane srži | 31,30 ± 9,72 | 32,50 ± 16,08 | 23,80 ± 6,92 | 25,30 ± 14,22 |
| Proliferacija ćelija | 214,30 ± 10,67 | 238,95 ± 13,91 | 183,00 ± 14,70 | 174,35 ± 9,83 |
| Ukupan sadržaj proteina | 7,67 ± 2,41 | 2,87 ± 2,50 | 5,62 ± 1,06 | 6,99 ± 0,95 |
| Djelovanje alkalne fosfataze | 0,20 ± 0,04 | 0,08 ± 0,03 | 0,34 ± 0,07 | 0,28 ± 0,09 |
| Kostolike formacije | 25,24 ± 8,40 | 32,63 ± 18,44 | 40,36 ± 18,60 | 29,60 ± 17,93 |

NAPOMENA:
Razvoj ćelija koštane srži u % od početnog broja poslije 4 sata,
Proliferacija ćelija kao vrijeme dupliranja u satima između 0 i 24 dana,
Ukupan sadržaj proteina, µg proteina/ 10^4 ćelija, normaliziran brojem ćelija nakon 21 dan,
Djelovanje alkalne fosfataze, µmol p-nitrofenol/sat/µg proteina/ 10^4 ćelija, normaliziran ukupnim sadržajem
proteina i brojem ćelija nakon 21 dan,
Kostolike formacije u % ukupne površine diska poslije 21 dan.
Rezultati predstavljaju srednje vrijednosti sa standardnom devijacijom (n = 5).

LITERATURA

1. Hudson, B. (1992) Surface Science An Introduction, Boston: Butterworth Heinemann.
2. Riviere, J.C. (1990) Surface Analytical Techniques, Oxford: Oxford Science Publications.
3. Walls, J.M., ed. Methods of Surface Analysis: Techniques and Applications. 1992, Cambridge University Press: New York.
4. Asthana, P., Micro-and Nano-Scale Experimental Approach to Surface Engineering Metals, in Mechanical Engineering, in Mechanical Engineering. 2006, Texas A&M University: College Station, TX. p. 131.
5. Williams, J.A., Tabor, D. (1977) The role of lubricants in machining. Wear 43: 275-292.
6. Gibbs, J.W. (1928) The Collected Works of J. Willard Gibbs, New York: Longmans, Green and Co.
7. Zangwill, A. (1988) Physics at Surfaces, Cambridge: Cambridge University Press.
8. Langmuir, I. (1960) The collected works of Irving Langmuir; With contributions in memoriam, including a complete bibliography of his works. TWELVE VOLUME SET, New York: Pergamon Press.
9. Hudson, J.B. (1998) Surface Science: An Introduction, New York: John Wiley & Sons
10. Reidenbach, F., ed. ASM Handbook: Volume 5: Surface Engineering 10th edn. 1994, ASM International: Materials Park, OH.
11. Cotell, C.M., Sprague, J.A., Preface, Surface Engineering, in ASM Handbook. 1994, ASM International: Materials Park, OH.
12. King, R.I., Chapter 1: Historical Background, in Handbook of High-Speed Machining Technology, R.I. King, ed. 1985, New York: Chapman and Hall.
13. Graessley, W.W. (2003) Polymeric Liquids and Networks: Structure and Properties, New York: Taylor & Francis.
14. Finch, G.I., Quarrell, A. G., Roebuck, J. S. (1934) The Beilby Layer. Proceedings of the Royal Society of London. Series A 145(855): 676-681.

15. Jirásková, Y., Svobodaa, J., Schneeweissa, O., Davesb, W., Fischer, F.D. (2005) Microscopic investigation of surface layers on rails Applied Surface Science 239(2): 132-141.
16. Hirose, T., Tanigawa, H., Ando, M., Kohyama, A., Katoh, Y., Narui, M. (2002) Radiation effects on low cycle fatigue properties of reduced activation ferritic/martensitic steels Journal of Nuclear Materials 307 311: 304-307.
17. (2003) Characterization and Failure Analysis of Plastics, Materials Park, OH: ASM International. <http://asmcommunity.asminternational.org/portal/site/www/AsmStore/ProductDetails/?vgnextoid=66b975dfaef8110VgnVCM100000701e010Arccrd>
18. Sotnikov, A.A., Stepanov, V.N., Livshits, A.M., Bukchin, S.M. (1994) Improvement of turbine blade systems to reduce cavitation erosion Power Technology and Engineering 28(12): 746-750.
19. Masakazu, O., Hiroshi, M., Kazuyuki, M., Tomoyoshi, O., Masayuki, U. (2005) Surface corrosion of various kinds of metals by atmospheric pollution. Bulletin of Hiroshima Kokusai Gakuin University 38: 69-83.
20. M'Saoubi, R., Outeiro, J.C., Chandrasekaran, H., Dillon Jr., O.W. and Jawahir, I.S. (2008) A review of surface integrity in machining and its impact on functional performance and life of machined products. Int. J. Sustainable Manufacturing 1(1/2): 203-236.
21. Field, M., Kahles, J.F. (1964) The surface integrity of machined and ground high strength steels. DMIC Report 210: 54-77.
22. Field, M., Kahles, J.F. (1971) Review of surface integrity of machined components. Annals of the CIRP 20(2): 153-162.
23. Field, M., Kahles, J.F., Cammett, J.T. (1972) Review of measuring methods for surface integrity. Annals of the CIRP 21: 219-238.
24. Kalpakjian, S. and S.R. Schmid (2001) Manufacturing Engineering and Technology. 4th edition ed, New Jersey: Prentice-Hall.
25. Chou, Y.K., Evans, C.J. (1999) White layers and thermal modelling of hard turned surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture 39: 1863-1881.
26. Griffiths, B.J. (1993) Modeling complex force system, Part 1: The cutting and pad forces in deep drilling. ASME Transactions, Journal of Engineering for Industry 115: 169-176.
27. Bosheh, S.S., Mativenga, P.T. (2006) White layer formation in previous termhard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46(2): 225-233
28. Stead, J.W. (1912) Micro-metallography and its practical applications. Journal of Western Scottish Iron and Steel Institute 19: 169-204.
29. Nakayama, K., Shaw, M.C., Brewer, R.C. (1966) Relationship between cutting forces, temperatures, built-up edge and surface finish Annals of CIRP 24: 211-223.
30. Masounave, J., Youssef, Y.A., Beauchamp, Y., Thomas, M. (1997) An experimental design for surface roughness and built-up edge formation in lathe dry turning. International Journal of Quality Science 2(3): 167-180.
31. Stephenson, D.A., Agapiou, J.S. (1996) Metal Cutting Theory and Practice, New York: Marcel Dekker.
32. Oberg, E., Jones, F.D., Horton, H.L., Ryffel, H.H. (2004) Machinery's Handbook. 27th edn, New York: Industrial Press.
33. Astakhov, V.P. (1998/1999) Metal Cutting Mechanics, Boca Raton, USA: CRC Press.
34. Atkins, A.G., Mai, Y.W. (1985) Elastic and Plastic Fracture: Metals, Polymers, Ceramics, Composites, Biological Materials, New York: John Wiley & Sons.
35. Astakhov, V.P. (2006) Tribology of Metal Cutting. Tribology and Interface Engineering Series, No. 52, ed. B.J. Briscoe, London: Elsevier.

1. UVOD

36. Komarovsky, A.A., Astakhov, V.P. (2002) Physics of Strength and Fracture Control: Fundamentals of the Adaptation of Engineering Materials and Structures, Boca Raton: CRC Press.
 37. Zorev, N.N. (1966) Metal Cutting Mechanics. 1966, Pergamon Press: Oxford.
 38. Javidi, A., ieger, U., Eichlseder, W. (2008) The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. International Journal of Fatigue 30(10-11): 2050-2055.
 39. Seemikeri, C.Y., Brahmkar, P.K., Mahagaonkar, S.B. (2008) Investigations on surface integrity of AISI 1045 using LPB tool. Tribology International 41(8): 724-734.
 40. Liu, J., Yue, Z.F., Liu, Y.S. (2007) Surface finish of open holes on fatigue life. Theoretical and Applied Fracture Mechanics 47(1): 35-45.
 41. Choi, Y., Liu, C.R. (2006) Rolling contact fatigue life of finish hard machined surfaces: Part 1. Model development. Wear 261(5-6): 485-491.
 42. Matsumoto, Y., F. Hashimoto, and G. Lahoti (1999) Surface Integrity Generated by Precision Hard Turning. Annals of the CIRP 48/1: 59-62.
 43. Lennon, A.B., McCormack, B.A.O., Prendergast, P. J. (2003) The relationship between cement fatigue damage and implant surface finish in proximal femoral prostheses. Medical Engineering & Physics 25(10): 833-841.
 44. Paulin, C., Ville, F., Sainsot, P., Coulon, S., Lubrecht, T. (2003) Effect of rough surfaces on rolling contact fatigue theoretical and experimental analysis. Tribology and Interface Engineering Series 43: 611-617.
 45. Hutson, A.L., Niinomi, M., Nicholas, T., Eylon, D. (2002) Effect of various surface conditions on fretting fatigue behavior of Ti-6Al-4 V. International Journal of Fatigue 24(12): 1223-1234.
 46. Chen, H.Y., Hickel, R., Setcos, J.C., Kunzelmann, K-H. (1999) Effects of surface finish and fatigue testing on the fracture strength of CAD-CAM and pressed-ceramic crowns. The Journal of Prosthetic Dentistry 82(4): 468-475.
 47. Bayoumi, M.R., Abdellatif, A.K. (1995) Effect of surface finish on fatigue strength. Engineering Fracture Mechanics 51(5): 861-870.
 48. Asquith, D.T., Yerokhin, A.L., Yates, J.R., Matthews, A. (2007) The effect of combined shot-peening and PEO treatment on the corrosion performance of 2024 Al alloy. Thin Solid Films 516(2-4): 417-421.
 49. Aballe, A., Bethencourt, M., Botana, F.J., Marcos, M., Sánchez-Amaya, J.M. (2004) Influence of the degree of polishing of alloy AA 5083 on its behaviour against localised alkaline corrosion. Corrosion Science 46(8): 1909-1920.
 50. Reddy, B.S.K., Ramamoorthy, B., Nair, P.K. (2005) Surface integrity aspects and their influence on corrosion behaviour of ground surfaces. IE(I)-Journal-PR 86: 35-38.
 51. Poli, C. (2001) Design for Manufacturing: A Structured Approach, Woburn, MA: Butterworth-Heinemann.
 52. Laroux, K. (1988) Troubleshooting Manufacturing Processes: Adapted from the Tool and Manufacturing Engineers Handbook: a Reference Book for Manufacturing Engineers, Managers, and Technicians, Dearborn, MI: SME.
 53. Batchelor, A.W., Lam, L.N., Chandrasekaran, M. (1999) Materials Degradation and its Control by Surface Engineering, London, UK: Imperial College Press.
 54. Astakhov, V.P., Davim, P.J., Tools (geometry and material) and tool wear, in Machining: Fundamentals and Recent Advances, P.J.Davim, Editor. 2008, Springer: London. p. 29-58.
 55. Nehoroshkov, S.V. (2006) Model of heat flows in cutting with inserts having heatsink (in Russian). Research in Russia 5(2): 1254-1256.
-

56. Kim, H.J., Matsumaru, K., Takata, A., Ishizaki, K. (2003) Grinding behavior of silicon wafer and sintered Al₂O₃ by constant-force-feeding grinding systems. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal (ATM)* 5(2): 50-53.
57. Kim, H.J., Matsumaru, K., Takata, A., Ishizaki, K. (2004) Reduction of ceramic machining defects by regulated force feeding grinding system. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing Journal (ATM)* 6(2): 290-297.
58. Castellani, R., de Ruijter, J.E., Renggli, H., Jansen, J.A. (1999) Response of rat bone marrow cells to differently roughened titanium discs. *Clin Oral Impl Res* 10: 369-378.
59. Anselme, K., Linez, P., Bigerelle, M., Le Manger, D., Hardouin, P., Hildebrand, H.F., Lost, A., Leroy, J.M. (2000) The relative influence of the topography and chemistry of TiAl6V4 surfaces on osteoblastic cell behaviour. *Biomaterials* (21): 1567-1577.
60. Bowers, K., Keller, J.C., Randolph, B., Wick, D., Michaels, C. (1992) Optimization of surface micromorphology for enhanced osteoblast responses in vitro. *Int J Oral Maxillofac Impl* 7: 302-310.
61. Martin, J.Y., Schwartz, Z., Hummert, T.W., Schraub, D.M., Simpson, J., Lankford Jr, J., Dean, D.D., Cochran, D.L., Boyan, B.D. (1995) Effect of titanium surface roughness on proliferation, differentiation, and protein synthesis of human osteoblast-like cells (MG63). *J Biomed Mater Res* 29: 389-401.
62. Wennerberg, A., Albrektsson, T., Johansson, C., Andersson, B. (1996) Experimental study of turned and grit-blasted screw-shaped implants with special emphasis on effects of blasting material and surface topography. *Biomaterials* 17: 15-22.
63. Groessner-Schreiber, B., Tuan, R.S. (1992) Enhanced extracellular matrix production and mineralization by osteoblasts cultured on titanium surfaces in vitro. *J Cell Sci* 101: 209-217.
64. Deligianni, D.D., Katsala, N.D., Koutsoukos, P.G., Missirlis, Y.F. (2001) Effect of surface roughness of hydroxyapatite on human bone marrow cell adhesion, proliferation, differentiation and detachment strength. *Biomaterials* 22: 87-96.
65. Cooper, L.F., Masuda, T., Yilheikkila, P.K., Felton, D.A. (1998) Generalizations regarding the process and phenomenon of osseointegration. Part II. In vitro studies. *Int J Oral Maxillofac Implants* 13: 163-174.
66. Wilke, A., Orth, J., Lomb, M., Fuhrmann, R., Kienapfel, H., Griss, P., Franke, R.P. (1998) Biocompatibility analysis of different biomaterials in human bone marrow cell cultures. *J Biomed Mater Res* 40: 301-306.
67. Rosa, A.L., Beloti, M.M. (2003) Effect of cpti surface roughness on human bone marrow cell attachment, proliferation, and differentiation. *Braz. Dent. J.* 14(1): 16-21.
68. Astakhov, V.P. (1998) Metal Cutting Mechanics, Boca Raton: CRC Press.
69. Oberg, E., Jones, F.D., Horton, H.L., Ryffel, H.H. (2008) Machinery's Handbook 28th edn. Toolbox, New York: Industrial Press.