

Vpliv toplotne obdelave in brušenja na zaostale notranje napetosti

Influences of Heat Treatment and Grinding on Internal Residual Stresses

J. Grum¹, P. Žerovnik, D. Ferlan, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-04-21

Strojni deli so pogosto obremenjeni s trajno dinamičnimi obremenitvami, zato je potrebno zelo skrbno konstruiranje, da ne pride do nezaželenih koncentracij napetosti v materialu. Številne raziskave pa so potrdile, da poleg oblikovanja izdelka močno vpliva tudi napetostno stanje v materialu, ki ga ustvarimo zaradi slabo načrtovane obdelovalne tehnologije. Notranje napetosti, ki jih po prenehanju obdelave imenujemo zaostale, so močno odvisne od obdelovalnega postopka in od razmer pri obdelavi. Merjenje zaostalih napetosti smo izvedli z relaksacijsko metodo, ki je zasnovana na elektrokemičnem odvzemu napete površinske plasti. Posledica anodnega raztapljanja je vzpostavljanje novega ravnovesnega stanja, ki ga spremljamo z merjenjem deformacije med odvzemanjem. Iz časovnega spreminjanja deformacije materiala vzorca in poznane globine odvzema lahko izračunamo velikost zaostalih notranjih napetosti po globini napete površinske plasti. Zaostale notranje napetosti so bile analizirane pri različnih razmerah površinskega kaljenja in brušenja.

Ključne besede: toplotna obdelava, induktivno kaljenje, brušenje, zaostale napetosti

Machine parts are very frequently submitted to continuous operating loads, therefore have to be very carefully designed to avoid undesirable stress concentration. A number of research studies have shown that besides the design itself an important role is played also by the stress state created in the material by carelessly planned manufacturing technologies. Internal stresses which are, since the completion of manufacturing, termed residual internal stresses very much reflect the manufacturing procedures and machining conditions. The measurements of residual stresses were carried out by the relaxation method based on the electrochemical removal of the stressed surface layer. The anode dissolution results in a newly created equilibrium state which was followed by measuring the deformation during the removal. From the time variation of the deformation of the specimen material and the known depth of the removal at the given moment, it is possible to calculate the size of residual internal stresses as a function of depth of the stressed surface layer. Residual internal stresses are analyzed for different surface hardening conditions and also after grinding at different machining conditions.

Key words: heat treatment, induction hardening, grinding, residual stresses

1 Uvod

Triboološke sposobnosti delov so pogosto močno odvisne od pravilne izbire materialov in zanje prirejene obdelovalne tehnike. Pri tem ne zadošča le pravilna izbira obdelovalnega stroja, ampak v pretežni meri obdelovalne oziroma kinematične razmere med orodjem in obdelovancem. Le te so definirane v obdelovalnem procesu s kombinacijo materiala orodja in obdelovanca. Zato so raziskave usmerjene tako, da je možno za neko kvaliteto površine napovedati najboljše izkoriščanje stroja in orodja pri najmanjši porabi energije. V splošnem lahko sklenemo, da materiali za orodja z višjo temperaturno obstojnostjo omogočajo tudi intenzivnejšo obdelavo enakega materiala obdelovanca kot pri materialu orodja z nižjo temperaturno obstojnostjo. Poleg tega pa lahko močno vplivamo na razmere v obdelovalnem procesu s spreminjanjem geometrije orodja ter s hladilnim in/ali mazalnimi sredstvom.

Mehanskim obdelovalnim procesom se pogosto priključijo še različni postopki toplotne obdelave. Pri tem gre za kaljenje in popuščanje jekel, kar omogoča nastanek zelene mikrostrukture in lastnosti materiala oziroma izdelka. Pri konstrukcijskih jeklih spremenimo po

kaljenju in visokem počučanju martenzitno mikrostrukturo v bolj žilavo in manj trdno, primerno za dinamično obremenjene dele. V drugo skupino postopkov prištevamo površinsko utrjevanje delov, pri katerih dosežemo visoko trdoto v tanki površinski plasti in poboljšano obrabno odpornost. Za spreminjanje tribooloških lastnosti površin uporabljamo odvisnost trdote in temperature, ki jo imenujemo popustno karakteristiko. Zmotno je mišljenje, da je dovolj, da mehansko obdelan material vgradimo v sklop in že lahko pričakujemo zeleno obratovalno dobo. Izdelek ima ustrezno obratovalno dobo, odvisno od obratovalnih razmer.

Da bi dosegli zeleno obratovalno dobo je potrebno zadostiti naslednjim osnovnim zahtevam:

- izbrati moramo ustrezen material
- izdelek moramo glede na zunanjo obremenitev primerno oblikovati (konstrukcija)
- izbrati je potrebno ustrezne lastnosti surovca, ki bo zagotavljal po obdelavi pridobivanje končnih lastnosti izdelka
- izbrati je potrebno ustrezen postopek mehanske in toplotne obdelave.

Praktični rezultati potrjujejo, da lahko s pravilno izbiro materiala dosežemo le 10-20% zahtevane obratovalne dobe izdelka. Ta je idealna, ki jo dobimo s pravilno izbiro materiala, pravilno konstrukcijo ter pravilno mehansko in toplotno obdelavo.

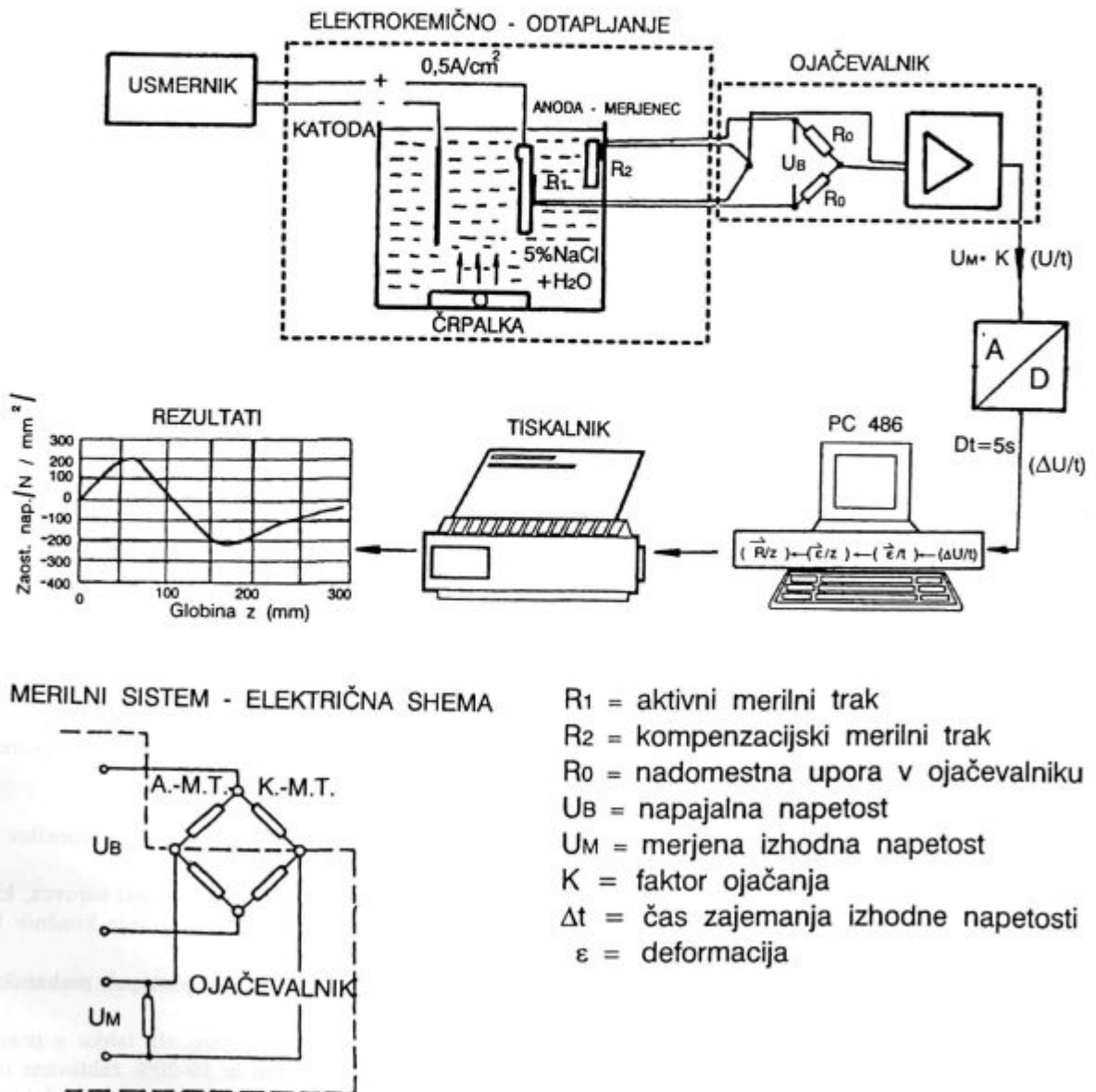
¹ Dr. Janez GRUM, redni profesor
Fakulteta za strojništvo
Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana

2 Merjenje zaostalih notranjih napetosti

Začetki merjenja zaostalih notranjih napetosti segajo v začetek tega stoletja, ko so želeli ugotoviti vzroke za deformacijo paličastih polizdelkov po toplem in hladnem preoblikovanju^{1,2}. Prekomerne deformacije jeklarskih polizdelkov so vplivale na povečano obrabo in poškodbe orodij pri mehanski obdelavi. Zato je bila potrebna znatno večja nadmera surovcev, in tudi večji odvzem materiala pri mehanski obdelavi ter daljši časi obdelave, s tem pa tudi povečani stroški; s tem so bili potrebni tudi daljši časi obdelave. Obstajala je tudi verjetnost, da se bo po končni mehanski obdelavi obdelovanec deformiral zaradi prevelikih notranjih napetosti, tako da ne bodo dosežene želene dimenzije izdelka. Metode za merjenje

zaostalih notranjih napetosti so bile v začetnem razvoju enostavne in porušne narave, ki so se izvajale na polizdelkih ali tudi na specialnih vzorcih. Kasneje, po letu 1980, pa so se začele uveljavljati tudi ultrazvočne in mikromagnetne neporušne metode¹⁻³.

V našem primeru uporabljamo za merjenje zaostalih napetosti porušno relaksacijsko metodo na vzorcih ploščatih ali valjastih oblik. Na **sliki 1** je prikazan sistem za merjenje zaostalih notranjih napetosti po tej metodi, kjer odtapljanje omogoči relaksacijo materiala pod odstranjenim materialom. Elektrokemično odtapljamo vedno material s tiste površine, na kateri želimo ugotoviti potek zaostalih napetosti, do izbrane globine. Posledica je, da pride do deformacije vzorca zaradi vzpostavljanja novega ravnotežnega stanja. Deformacijo

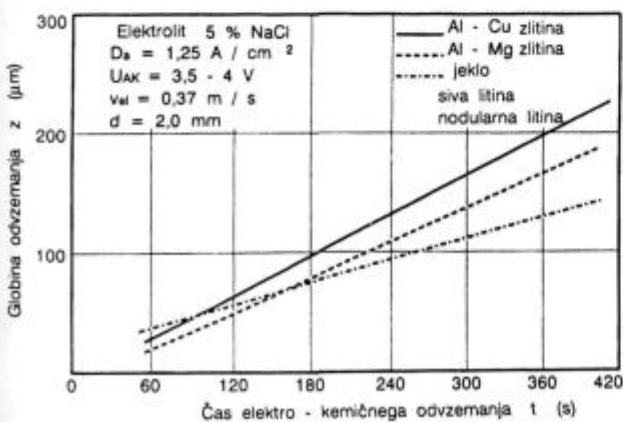


Slika 1: Merilni sistem za merjenje zaostalih napetosti z relaksacijsko metodo z elektrokemičnim odvzgom površinske plasti
Figure 1: Measuring system for residual stresses measurements by relaxation method with electro-chemical removal of surface layer

izmerimo z uporovnimi merilnimi lističi, ki so nalepljeni na hrbtni strani napetega vzorca. Vzorec je priključen kot anoda, nasproti nje pa je katoda iz nerjavnega jekla. Obe elektrodi sta v neki razdalji v elektrolitu (5 odstotna vodna raztopina NaCl), ki ga pretakamo da odstranimo produkte raztapljanja in pline iz reže ter vzdržujemo stalno temperaturo. Zaradi temperaturnih vplivov imamo v elektrolitu še dodatni vzorec z nalepljenim uporovnim merilnim lističem. Diferencialno mostično napetost, ki pri tem nastane, ojačamo in preko AD pretvornika vodimo digitalizirane vrednosti v računalnik, ki s svojo programsko opremo opravi vse potrebne izračune $\Delta U(t)$. Tako izračunamo lahko tudi časovni potek deformacije $\epsilon(t)$ po globini raztapljanja, če poznamo časovno karakteristiko elektrokemičnega anodnega raztapljanja, ki je odvisen od vrste anodnega materiala in gostote toka, velikosti reže med elektrodama, hitrosti pretoka elektrolita med elektrodama in napetosti med anodo in katodo.

Časovno spreminjanje anodnega raztapljanja materiala po globini mora imeti linearno karakteristiko, da lahko z zadostno natančnostjo ugotovimo spreminjanje deformacije z globino odzema $\epsilon(z)$. Na osnovi izračunane deformacije lahko nato izračunamo zaostalo notranjo napetost v isti globini. Numerične podatke o napetostnem stanju lahko v vsakem trenutku izpišemo in tudi analiziramo. Podatke nato izpišemo v tabelarični obliki ali pa izrišemo v obliki diagramskega prikaza na risalniku.

Na **sliki 2** je prikazano časovno spreminjanje globine odzema $h(t)$ materiala vzorca pri elektrokemičnem odvzemu. Te preizkuse smo opravili v različnih obdelovalnih razmerah za posamezne vrste materialov. Iz podatkov lahko ugotovimo, da je anodni odzjem ali elektrokemično raztapljanje časovno linearno. Na sliki so prikazane tri časovne karakteristike anodnega raztapljanja različnih aluminijevih in železovih zlitin. Iz podatkov v diagramu pa sledi, da po 7 minutah raztapljanja dose-



Slika 2: Spreminjanje globine elektrokemičnega odvzema v danih obdelovalnih razmerah

Figure 2: Variation of depth of electro chemical removal in the given machining conditions

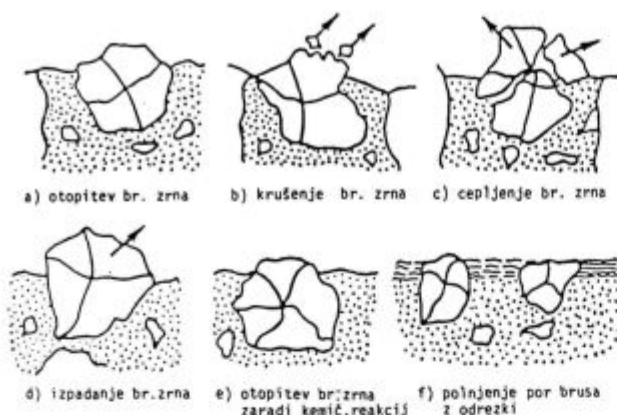
žemo globino odvzetega materiala med 140 in 220 μm , odvisno od vrste materiala. Da dosežemo globino odzema 1,2 mm, je potrebno 30- do 60- minutno raztapljanje. Čeprav so časi anodnega raztapljanja relativno kratki, pa celoten postopek priprave vzorcev z lepljenjem merilnih uporovnih lističev zahteva celo do 3- krat daljše čase.

3 Vpliv brusnega materiala in režima brušenja na zaostale napetosti v kaljenem orodnem jeklu

Za raziskavo vplivov brušenja in vrste brusnega materiala smo izbrali kaljeno legirano orodno jeklo za delo v hladnem stanju OCR 12VM.

Med obdelovalnimi procesi zavzema vidno mesto brušenje, posebno takrat, ko zahtevamo, da deli po toplotni obdelavi odgovarjajo tako geometričnim kot tudi trdnostnim zahtevam. Za brušenje puščamo na obdelovancih dodatek materiala, ki naj pri toplotni obdelavi ne presega od 0,1 do 0,6 mm, pri naravno trdih materialih pa lahko tudi do 1 mm. Na velikost dodatka torej vplivajo: vrsta predhodne obdelave, stanje jekla, velikost obdelovanca in togost stroja.

Brusno orodje je sestavljeno iz brusnih zrn, ki pomenijo vsak zase enorezno orodje z majhnimi klini, ki pa so med seboj povezani z ustreznim vezivom. S sočasnim spreminjanjem volumskega deleža brusnih zrn in veziva lahko vplivamo na različne strukture brusca, ki pa se ne obrabljajo enako. To pa pomeni, da s spreminjanjem vrste materiala za bruse in vezivo lahko dosežemo enake učinke tudi s spreminjanjem strukture brusca. Nasprotno pa lahko s primerno kombinacijo vplivnih veličin dosežemo povečano obstojnost ali obrabno odpornost brusca pri enakih kinematičnih razmerah. Obraba brusnih zrn je posledica mehanskih in toplotnih vplivov, kar ima za posledico zmanjšano rezalno sposobnost. Na **sliki 3** so prikazane osnovne oblike obrabe brusnega orodja, ki jih opišemo z značilnimi spremembami na brusnih zrnih. Zaradi mehanskih obremenitev se na kontaktnih ali tornih ploskvah med brusnim zrnem in materialom obdelovanca ustvarjajo kratkotrajni in povečani toplotni učinki. V takšnih primerih lahko prihaja do otopitve brusnih zrn (a), krušenja (b) ali cepljenja (c). V primerih, ko so sile na brusnem zrnju med rezanjem večje od vezivnih sil med zrnji, prihaja do izpadanja zrn (d) in s tem do rezanja materiala obdelovanca z novimi oziroma ostrimi brusnimi zrnji. Pri tem je zelo pomembno, da izberemo takšne rezalne razmere, ki bodo omogočile izpad brusnih zrn, potem ko je zmanjšana njihova rezalna sposobnost. Na **sliki 3e** lahko opazimo otopitev brusnega zrna zaradi kemičnih reakcij v kontaktni coni med njimi, in obdelovancem pri visokih temperaturah. Ko ne prihaja do kemičnih reakcij se pogosto srečamo s pojavom polnjenja por z bruski obdelovanca in produkti obrabe brusnega zrna (f). V splošnem bi lahko ugotovili, da z otopitvijo brusnih zrn nastanejo večje kontaktne površine



Slika 3: Osnovne oblike obrabe brusnega orodja
 Figure 3: Basic wear form of grinding grains

med brusom in obdelovancem in s tem tudi vnos izrazi-
 tejših toplotnih učinkov v površinsko plast obdelovanca.
 Sprememba stanja orodja vpliva na torne sile med brus-
 nim zrnom in obdelovancem in s tem tudi na tribološke
 oziroma toplotne razmere v kontaktni coni in s tem
 odločilno vplivajo na potek in velikost zaostalih napetosti
 po brušenju⁴⁻⁶.

Brušenje preskušancev smo izvedli na stroju za ravno
 brušenje in spremljali učinke brusnega materiala pri
 blagem in grobem preizkusu brušenja. Posamezni režimi
 brušenja so opredeljeni z globino rezanja, primikom ob-
 delovanca in hitrostjo brusa. Tako so bili izbrani nasled-
 nji režimi:

a) Blagi režimi brušenja

globina rezanja $a = 0,02 \text{ mm}$
 premik obdelovanca $ap = 0,3 \text{ mm/hod}$
 hitrost brusa $v = 0,36 \text{ m/s}$

b) Grobi režim brušenja

globina rezanja $a = 0,1 \text{ mm}$
 premik obdelovanca $ap = 0,3 \text{ mm/hod}$
 hitrost brusa $v_w = 0,36 \text{ m/s}$

Rezalne hitrosti so zaradi različnih premerov posa-
 meznih vrst brusov naslednje:

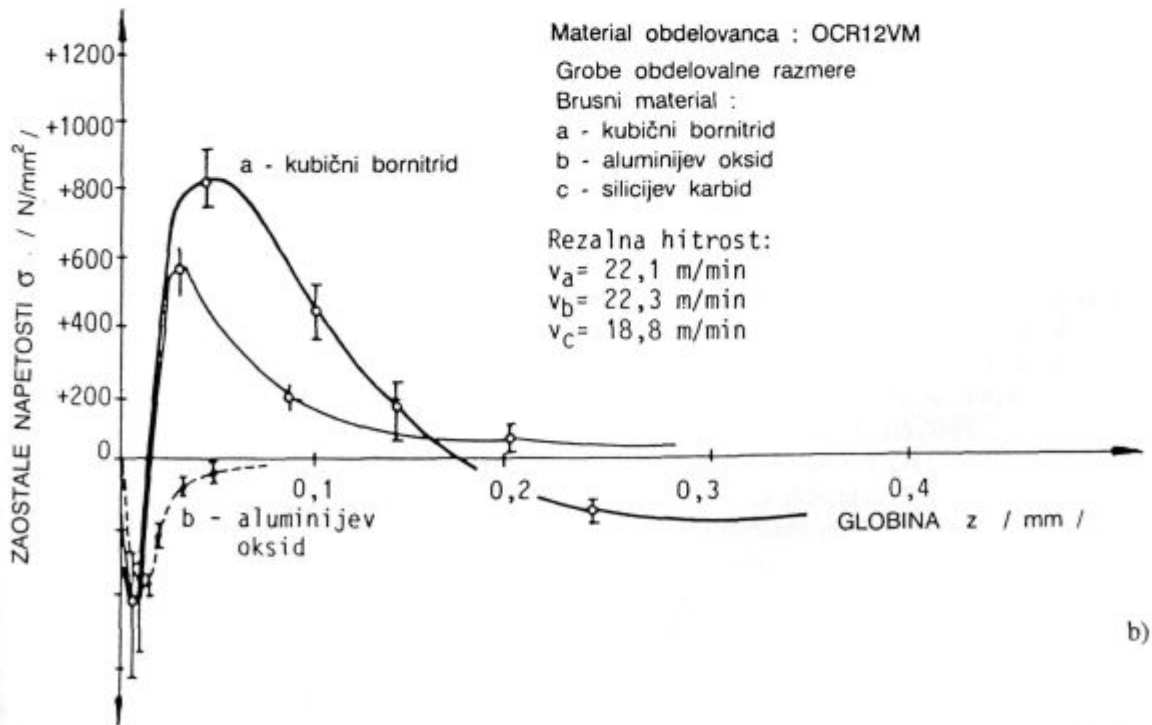
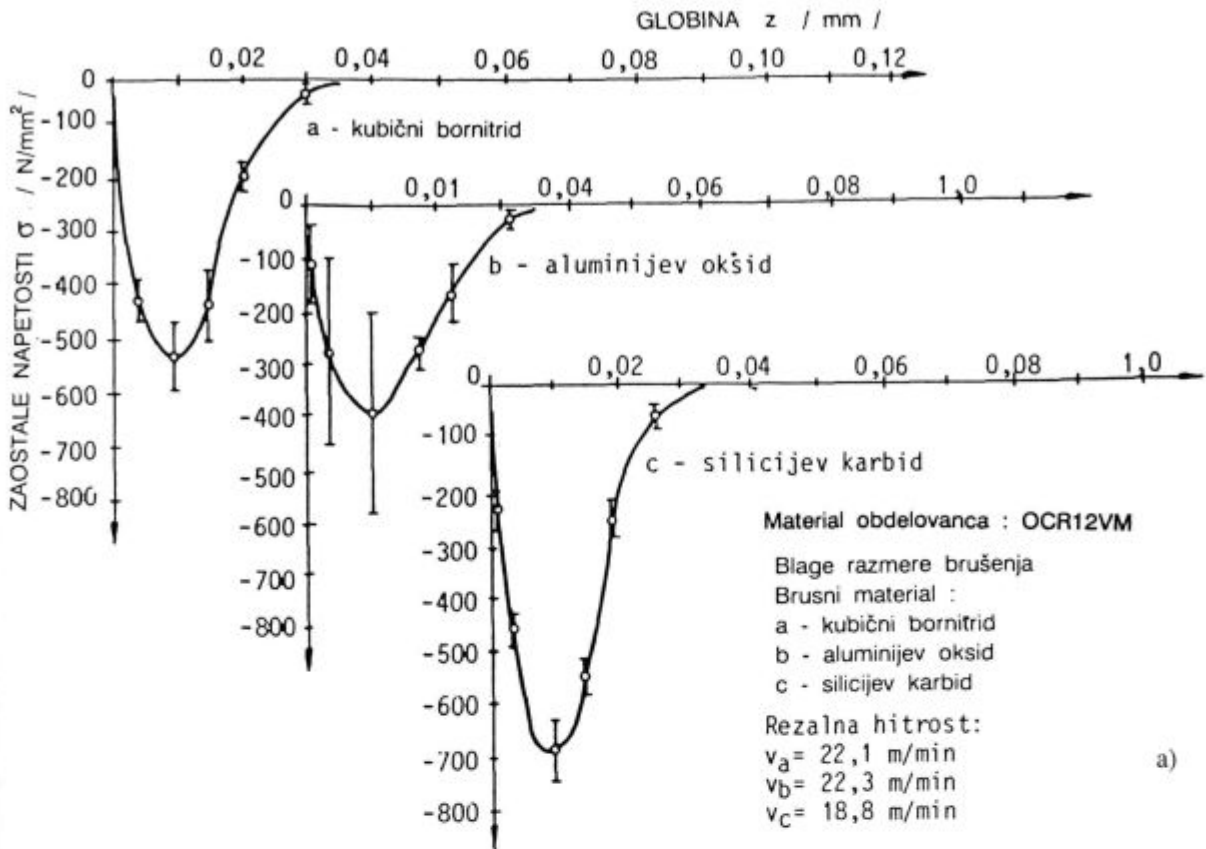
$v = 22,1 \text{ m/s}$... aluminijev oksid
 $v = 22,3 \text{ m/s}$... silicijev karbid
 $v = 18,8 \text{ m/s}$... kubični bor nitrid

Učinke, vrste in stanja brusnega orodja smo spreml-
 jali z merjenjem mikrotrdote, zaostalih napetosti in hra-
 pavosti površine obdelovanca po kaljenju in ravnem
 brušenju. Opravili pa smo tudi mikrostrukturno analizo.
 Na **sliki 4** so prikazani poteki in povprečne vrednosti
 zaostalih notranjih napetosti po brušenju z različnimi
 vrstami brusnega materiala iz z blagimi (**slika 4a**) ozi-
 roma z grobimi obdelovalnimi režimi (**slika 4b**).

Povprečne velikosti zaostalih napetosti v površinski
 plasti preizkušancev, ki so bili brušeni v blagih režimih
 so vseskozi tlačne narave. Ekstremne vrednosti tlačnih
 zaostalih napetosti nastanejo v globini $0,01 \text{ mm}$ in so
 med -400 do -680 N/mm^2 , odvisno od vrste brusnega

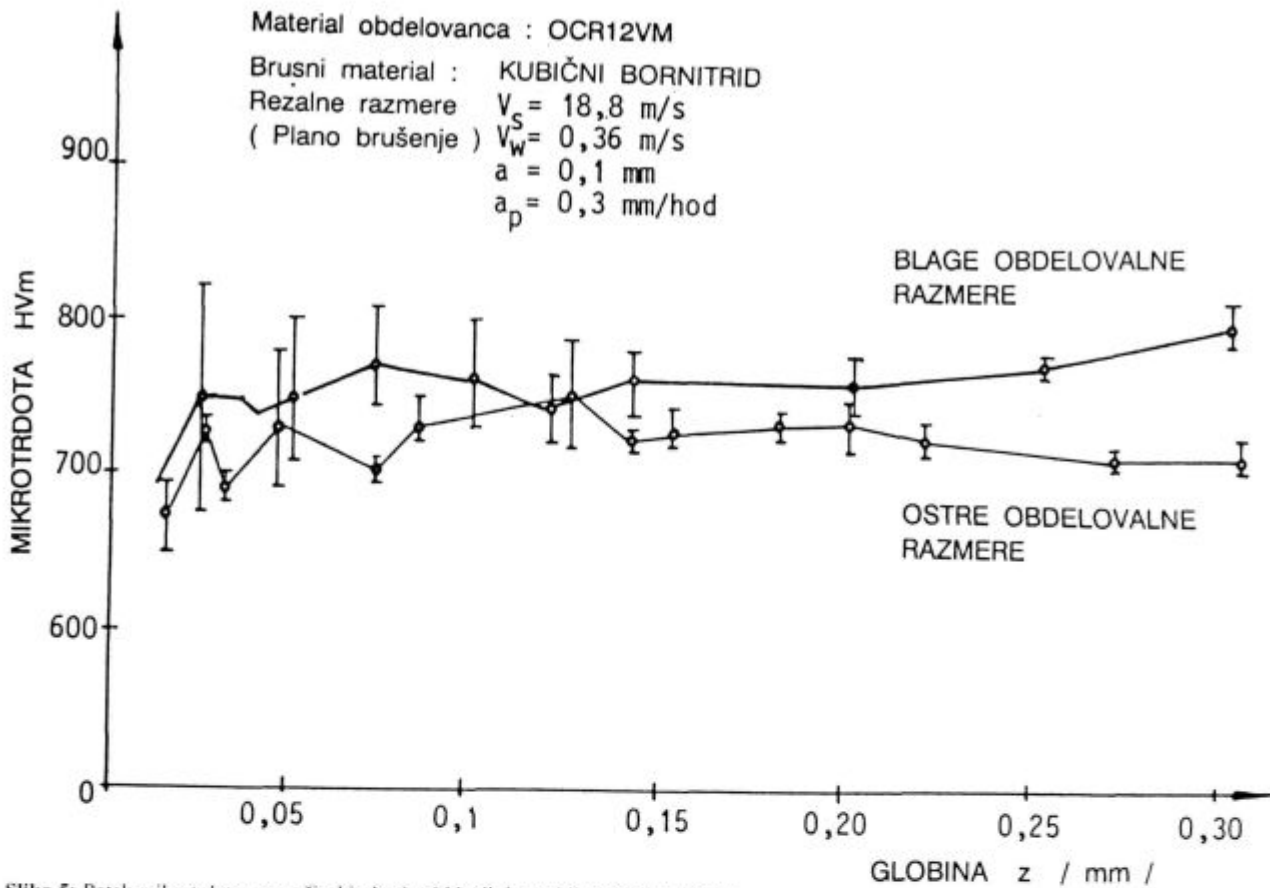
materiala. Posamezne vrste brusov imajo enako zrnato,
 strukturo, vrsto veziva in trdoto, razlike so le pri fizikal-
 nih lastnostih brusnih materialov. Aluminijev oksid ima
 v primerjavi s silicijevim karbidom približno za 50%
 nižjo mikrotrdoto, skoraj 100% boljšo toplotno prevod-
 nost in za 20 - 25% višjo toplotno vzdržljivost^{4,5}. Brusna
 zrna iz aluminijevega oksida imajo boljšo toplotno
 prevodnost in toplotno vzdržljivost ter nižjo trdoto od
 brusnih zrn silicijevega karbida^{4,5}. To pomeni, da lahko
 pričakujemo zelo podobne obdelovalne in obrabne
 razmere brusnih zrn in s tem tudi zelo podobne poteke
 zaostalih napetosti v površinski plasti obdelovanca. Toda
 odločitev o tem, kakšne bodo te zaostale napetosti, bo
 dala velikost primične sile F / daN . Ta lahko povzroča
 drobljenje brusnih zrn ali celo njihovo izdrtje. Ker je
 potreben pritisk za drobljenje brusnih zrn iz aluminij-
 jevega oksida v primerjavi s silicijevim karbidom nižji za
 skoraj 50%, lahko pričakujemo različne obrabne me-
 hanizme. Brusna zrna aluminijevega oksida se zaradi
 krusenja ali celo cepljenja sama ostrijo in zelo ugodno
 vplivajo na stanje površine obdelovanca. Brusna zrna iz
 silicijevega karbida so po brušenju obdelovanca otopela
 in so puščala toplotne učinke v površinski plasti obde-
 lovanca. Tako, otopelo brusno zrno vpliva v primerjavi z
 ostrim brusnim zrnom na povečanje torne sile in na
 zmanjšanje rezanja ter s tem na povečane toplotne efekte
 v obdelovancu. Posledice toplotnih razmer v površinski
 plasti kaljenega obdelovanca povzročajo pri grobem
 brušenju reavstenitizacijo in ponovno gašenje⁴. Nastala
 mikrostruktura je sicer zelo fino zrnata, ostane marten-
 zitna z zmanjšujočim se deležem zaostalega avstenita v
 globino. Pri grobem režimu brušenja nastane pregrevanje
 in reavstenitizacija v znatno večjih globinah kot pri
 blagem. Zaradi ponovnega kaljenja pa tanka površinska
 plast sprejme tudi tlačne zaostale napetosti, ki se zaradi
 hitrega ohlajanja po prehodu brusa po površini ne
 sprostijo. Zato prevladujejo tlačne zaostale napetosti v
 površinski plasti, ki pa v odvisnosti od obdelovalnih
 razmer spremenijo celo njen predznak. Tako pri grobem
 režimu brušenja prevladujejo tlačne napetosti v tanki
 površinski plasti, ki pa se v večjih globinah zaradi nastalega
 zaostalega avstenita in manjšega vpliva hladne de-
 formacije spremenijo v natezne. Omenjene razmere do-
 bro prikažejo meritve mikrotrdote po globini (**slika 5**).
 Zaradi povečanih toplotnih učinkov in hitrega ohlajanja
 tanke površinske plasti je prišlo do nastanka zaostalega
 avstenita z martenzitom, kar je imelo za posledico padec
 mikrotrdote. Čeprav se je znižala njena absolutna vred-
 nost, pa se je povečala velikost notranjih napetosti, kar
 pripisujemo izrazitejšemu vplivu hladne deformacije
 zaostalega avstenita in manjšemu vplivu temperaturnih
 napetosti.

Grobi režimi brušenja pa povzročajo bistveno spre-
 menjeno velikost in potek notranjih zaostalih napetosti v
 površinski plasti obdelovanca. Zanimivo je, da so v enaki
 globini, okoli $10 \mu\text{m}$ dosežene maksimalne tlačne no-
 tranje napetosti med -400 do -500 N/mm^2 in so skoraj
 neodvisne od vrste brusnega materiala. Pri brusu iz ple-



Slika 4a: Zaostale napetosti v površinski plasti obdelovanca pri blagih režimih brušenja; b: Zaostale napetosti v površinski plasti obdelovanca pri grobih režimih brušenja

Figure 4a: Residual stresses in workpiece surface layer at gentle grinding conditions; b: Residual stresses in workpiece surface layer at rough grinding conditions



Slika 5: Potek mikrotrdotne v površinski plasti pri blagih in grobih režimih brušenja
 Figure 5: Microhardness profile in workpiece surface layer at gentle and rough grinding conditions

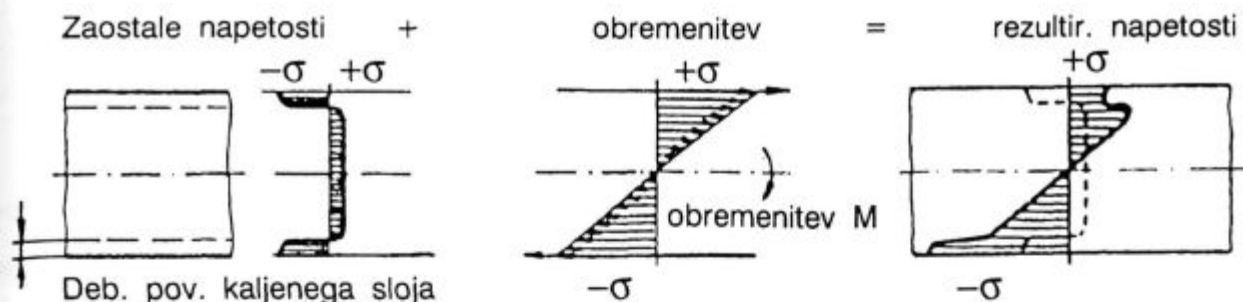
menitega korunda ugotovimo zelo podoben potek tlačnih zaostalih napetosti kot pri blagih režimih brušenja. Opazimo le rahlo povečanje globine površinske plasti s tlačnimi napetostmi, ki je od 35 na 70 μm . Pri brusu iz silicijevega karbida in kubičnega bor nitrida pa lahko zasledimo močno spremembo poteka zaostalih napetosti, ki so posledica izrazitejših toplotnih vplivov oziroma mikrostrukturnih sprememb v večjih globinah. Mikrostrukturne spremembe so rezultat preobrazbe avstenita v martenzit z zaostalim avstenitom, ki je običajen pri kaljenju jekla brez popuščanja. To pa pomeni, da imamo pri grobem režimu brušenja v zgornjih plasteh tlačne zaostale napetosti zaradi prevladujočih učinkov utrditve materiala, ki se v večjih globinah zmanjšujejo zaradi mikrostrukturnih sprememb. Najizrazitejše toplotne učinke zaznamo pri brusu iz kubičnega bor nitrida, saj sprejme natezno zaostalo napetost celo okoli 1000 N/mm^2 , medtem ko je ta napetost pri brusu iz silicijevega karbida le 550 N/mm^2 . V obeh primerih so te napetosti izjemno visoke, kadar imamo visoko dodatno obremenitev pri obratovanju dela. Posebej pa postanejo razmere nevarne, kadar imamo še druge notranje napetosti v nateznem področju pod površinsko plastjo.

4 Vpliv načina induktivnega kaljenja in brušenja na zaostale notranje napetosti

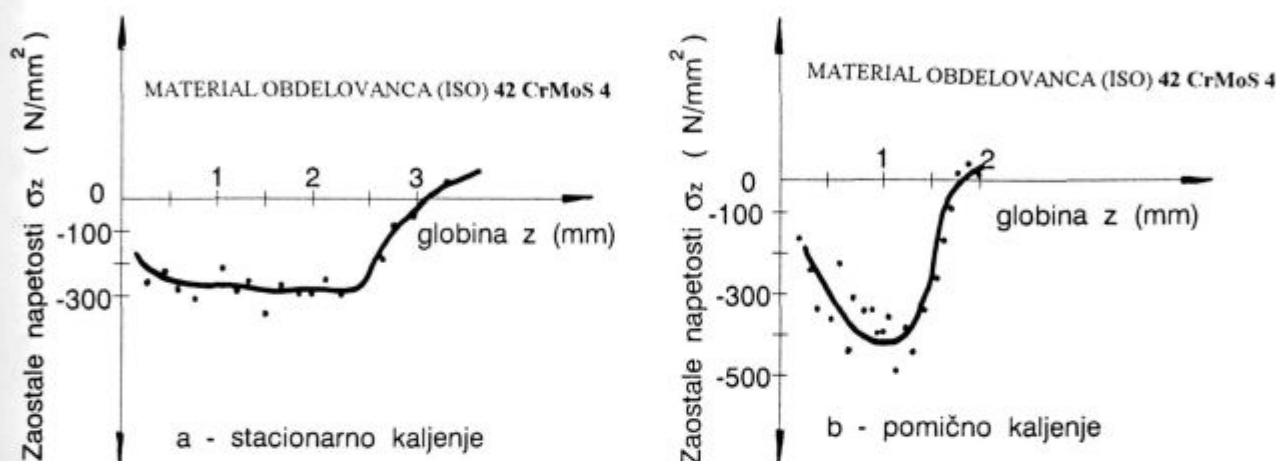
Zaostale napetosti nastajajo pri vseh mehanskih obdelavah jekel in tudi pri večini postopkov površinske toplotne obdelave. Zato je zelo pomembno, kakšne mehanske postopke obdelave uporabljamo po površinski toplotni obdelavi konstrukcijskega dela. Navadno izberemo fino brušenje ali pa tudi bolj kvalitetne postopke, npr.: poliranje in lepanje.

Prevelike zaostale napetosti v konstrukcijskem delu skrajšujejo njegovo obratovalno dobo, ker se neposredno seštevajo s tistimi, ki jih povzročamo z obremenitvijo strojnega dela. To pomeni, da so rezultirajoče napetosti za vrednost zaostalih napetosti premaknjene v tlačno ali natezno področje. Slika 6 prikazuje, kako se vedejo napetosti v obremenjenem obdelovancu, ki ima na površini tlačne zaostale napetosti.

Tlačne zaostale napetosti pozitivno vplivajo na celotno napetostno stanje v izdelku, ker preprečujejo nastanek in rast razpok. Zato moramo za predpisovanje mehanske in toplotne obdelave ter analizo napetostnega stanja zelo dobro poznati stanje materiala. Zaostale napetosti imajo lahko tudi pozitiven vpliv, če so le-te na



Slika 6: Zaostale notranje napetosti po površinskem kaljenju zmanjšujejo natezne napetosti v zgornji plasti
 Figure 6: Internal residual stresses after surface hardening reduce tensile stresses in upper layer



Slika 7: Zaostale napetosti po različnih načinih površinskega induktivnega kaljenja: a) stacionarno kaljenje; b) pomično kaljenje
 Figure 7: Residual stresses after various kinds of induction surface hardening: a) stationary hardening; b) travelling hardening

površini oziroma v površinski plasti tlačne narave in ne spremenijo predznaka tudi v obremenjenem stanju. Površinsko kaljenje je torej, napetostno gledano, ugodna toplotna obdelava, vendar pa samo kaljenje zahteva pravilno izbiro profila tanke površinske plasti vzdolž obdelovanca^{7,8}.

Ponazoritev si pogledjmo na dveh diagramih zaostalih napetosti po induktivnem površinskem kaljenju, prikazano na **sliki 7a in 7b**. Prvega smo dobili z induktivnim kaljenjem s trovojnjo zanko brez pomika (a- stacionarno kaljenje) in drugega s pomično zanko (b- pomično kaljenje). V obeh primerih smo uporabljali enako krom-molibdenovo jeklo za poboljšanje 42CrMoS4.

Prikazan primer nazorno pove, da sta velikost in porazdelitev zaostalih napetosti odvisni tudi od izbire postopka površinskega kaljenja. Na velikost zaostalih napetosti imajo pri posameznih postopkih induktivnega površinskega kaljenja močan vpliv: velikost in oblika visokofrekvenčne zanke, velikost reže med zanko in obdelovancem in pa razmerje med močjo induktorja in časom segrevanja.

Dodatno smo za študij integritete površin po induktivnem kaljenju in brušenju izbrali večje število preizkušancev, ki so bili induktivno kaljeni v enakih obde-

lovalnih razmerah in nato brušeni s tremi brusnimi parametri, in sicer:

- a ... normalni brusni parametri
- b ... blagi brusni parametri - za 25% zmanjšan pomik brusa, kot je pri a
- c ... ostri brusni parametri - za 25% povečan pomik brusa, kot je pri a.

Na **sliki 8** so prikazane zaostale notranje napetosti po induktivnem kaljenju in brušenju v navedenih obdelovalnih razmerah. Velikost in potek zaostalih notranjih napetosti po induktivnem kaljenju so odvisne od režima segrevanja in ohlajanja oziroma gašenja. Izrazitejši vpliv na nastanek zaostalih notranjih napetosti imajo mikrostrukturne spremembe, v manjši meri pa vplivajo tudi temperaturne razlike^{9,10}. Mikrostrukturne spremembe v površinski plasti povzročajo nastanek tlačnih zaostalih napetosti, ki so v našem primeru med -800 N/mm^2 in -1150 N/mm^2 . Učinkovitost površinske toplotne obdelave brez brušenja površine ali z njimi lahko ocenimo z različnimi merili, ki so zasnovani na merjenju mikrotrdote po globini oziroma z merjenjem zaostalih napetosti. Tlačne zaostale napetosti v površinski plasti lahko ocenimo z naslednjimi merili:

- velikost maksimalne napetosti $\sigma_{Z\text{Nmax}}$

- začetno mesto močnejšega spreminjanja zaostalnih napetosti, ki pomeni mejno področje Z_F
- globina kaljene plasti Z_K .

Rezultati izmerjenih zaostalnih napetosti po induktivnem kaljenju in brušenju so naslednji:

- normalne brusne razmere;

$$\sigma_{ZNmax} = -800 \text{ N/mm}^2$$

$$Z_F = 2,0 \text{ mm}$$

$$Z_K = 3,5 \text{ mm}$$

- blage brusne razmere;

$$\sigma_{ZNmax} = -900 \text{ N/mm}^2$$

$$Z_F = 2,4 \text{ mm}$$

$$Z_K = 3,7 \text{ mm}$$

- grobe brusne razmere;

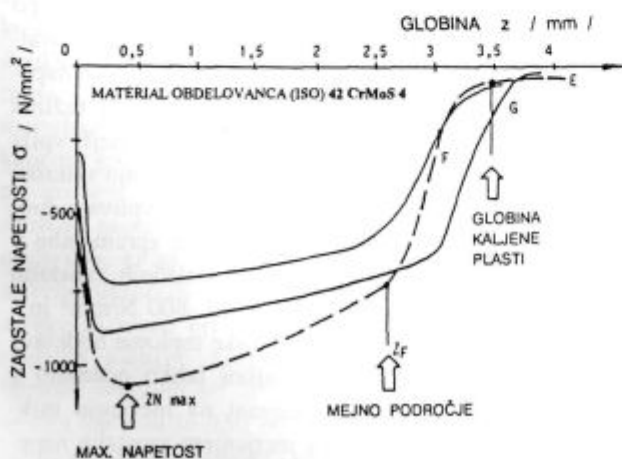
$$\sigma_{ZNmax} = 1150 \text{ N/mm}^2$$

$$Z_F = 2,6 \text{ mm}$$

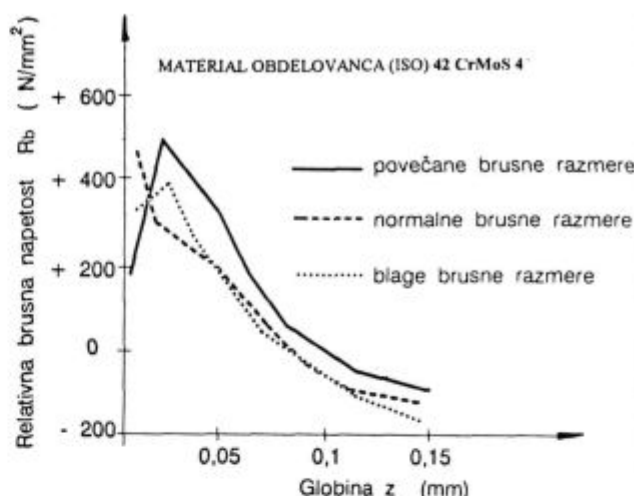
$$Z_K = 3,5 \text{ mm}$$

Ugotovimo lahko, da je velikost in potek tlačnih zaostalnih napetosti izredno ugoden za dinamično obremenjene strojne dele. V primerih, ko želimo oceniti uspešnost toplotne obdelave, moramo za dane zunanje obremenitve predpisati poleg globine kaljene plasti tudi ustrezno velikost mejnega ali prehodnega področja v globini induktivno kaljenega materiala.

Brusne zaostale napetosti na površini preizkušanca smo izračunali iz deformacij, ki smo jih odčitali v petkrat finešem rastru kot pri računanju kalilnih zaostalnih napetosti. Te so natezne narave (slika 9). Največje vrednosti dosegajo v globini do 20 μm , kjer so od +370 do +520 N/mm^2 , v globini od 0 do 110 μm pa preidejo v manjše tlačne, med 110 do 200 μm pa vpliv brušenja izgine. Z brušenjem smo torej v površinski plasti zmanjšali tlačne zaostale napetosti, nastale pri induktivnem kaljenju. V splošnem lahko ugotovimo, da potek napetosti ustreza načinu obdelave in obdelovalnim razmeram. Pri blagih razmerah brušenja nastanejo brusne napetosti predvsem zaradi mehanskih vplivov, pri ostrejših pa se izrazito



Slika 8: Potek zaostalnih napetosti po induktivnem kaljenju in brušenju
Figure 8: Residual stresses profile after induction hardening and grinding



Slika 9: Brusne napetosti so natezne po brušenju v različnih brusnih razmerah

Figure 9: Grinding residual stresses are tensile after grinding at various grinding conditions

poveča temperaturni gradient in večji del zaostalnih napetosti pripisujemo temperaturnim razlikam v površinski plasti.

5 Sklepi

Iz analize toplotne obdelave in brušenja površine v različnih obdelovalnih razmerah lahko sklenemo naslednja:

Pri predpisovanju obdelovalnega procesa in režimov mehanske in toplotne obdelave je potrebno posvetiti posebno pozornost pravilni izbiri materiala orodja z ozirom na vrsto in lastnosti obdelovanca.

Blage obdelovalne razmere brusilnega procesa na kaljenem orodnem jeklu imajo za posledico nastanek tlačnih zaostalnih napetosti zaradi učinkov utrjevanja materiala. Toplotni učinki so premajhni, da bi povzročili volumsko spremembo in s tem spremembo napetostnega stanja.

Grobe obdelovalne razmere brušenja kaljenega orodnega jekla dajejo učinke plastične deformacije materiala (utrditve), ki se jim pridružijo še toplotni (mikrostrukturne spremembe). Učinki utrditve materiala so prisotni le takrat, ko ni usklajeno odpadanje brusnih zrn z nastajanjem njihove otopitve. Otopela brusna zrna sicer povečujejo toplotne učinke, izraziteje pa vplivajo na utrditve materiala. Tako dobimo v zelo tanki površinski plasti še vedno tlačne zaostale napetosti, ki v večjih globinah preidejo v natezne.

Relativne brusne zaostale napetosti pri rotacijsko pomičnem postopku induktivnega kaljenja smo ugotovili po ustrezni analitični poti. Brusne zaostale notranje napetosti so pretežno natezne narave v površinski plasti in lahko v večjih globinah od 20 μm preidejo v tlačne.

Raziskave so pokazale, da je nujno združevanje triboloških razmer v obdelovalnem procesu z vključevanjem stanja orodja in preučevanja njegovega vpliva na integriteto površin. To je skupno ime za opis stanja materiala v površinski plasti, ki jo označimo z merjenjem mikrotrdote, mikrostrukturno analizo in merjenjem zaostalih notranjih napetosti.

Očitno je torej, da vse intenzivnejše obdelovalne tehnike postavljajo tehnologe pred zelo zahtevno nalogo predpisovanja obdelovalnih razmer, ki morajo zagotoviti ustrezno integriteto površine na obdelovancu.

6 Literatura

¹ A. Field, J. F. Kahles, J. T. Cammet: A Review of Measuring Methods for Surface Integrity, *Annals of the CIRP*, 21, 1972, 2, 219-237
² M. Field, J. F. Kahles: Review of Surface Integrity of Machined Components, *Annals of the CIRP*, 20, 1971, 1, 107-108

³ M. Field, J. F. Kahles: Review of Surface Integrity of Machined Components, Key-Note-Paper No. 6, *Annals of the CIRP*, 20, 1971, 2, 153-163
⁴ R. P. Lindsay, R. S. Hahn: On the Basic Relationships between Grinding Parameters, *Annals of the CIRP*, 19, 1971, 657-666
⁵ M. Moris, R. Snoeys: Heat Affected Zone in Grinding Operations, *14th MTDR Conf. Manchester*, 1973, 659-669
⁶ M. C. Shaw: Fundamentals of Wear, *Annals of the CIRP* 19, 1971, 553-544
⁷ P. Leskovar, J. Grum: The Metallurgical Aspects of Machining, *CIRP Reports and News, Annals of the CIRP*, 32, 1986, 2, 537-550
⁸ P. Leskovar, J. Grum: Pomen raziskav obrabnih procesov v proizvodnem strojništvu, *Zbornik referatov "Tribologija v teoriji in praksi"*, Ljubljana, 1986, 169-185
⁹ J. Grum, D. Ferlan: Obdelovalna tehnika in integriteta površin, *Obdelovalna tehnika, 1. seminar*, Fakulteta za strojništvo, VTO strojništvo v Mariboru, Ljubljana 1989, 1-35/1-48
¹⁰ J. Grum, P. Žerovnik: Vpliv integritete površin na tribološke sposobnosti delov, *Prva jugoslovanska konferenca za tribologijo, YUTRIB 1989*, Zbornik radova, Kragujevac 1989, 58-61