

LASERSKO POVR[INSKO KALJENJE JEKEL TER LASERSKO PRETALJEVANJE POVR[INE SIVE IN NODULARNE LITINE

LASER HARDENING OF STEEL AND MELT-HARDENING OF GRAY AND NODULAR IRON

JANEZ GRUM, R. [TURM, P. @EROVNIK

Fakulteta za strojništvo, Aker-eva 6, 1000 Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1997-10-01; sprejem za objavo - accepted for publication: 1997-12-19

Po letu 1970 zasledimo v strokovni literaturi številne raziskave različnih laserskih obdelovalnih procesov kot tudi njihove številne aplikacije. Današnje stanje razvoja in uporabe je, da prevladujejo procesi laserskega rezanja in varjenja, medtem ko so le redke aplikacije v tehniki poboljšanja površinskih lastnosti materialov. V prispevku bodo prikazane nekatere načrtne izkušnje pri laserskem utrjevanju s pretaljevanjem površinskih plasti sive in nodularne litine kot tudi kaljenja jekel.

Ključne besede: lasersko površinsko kaljenje, lasersko utrjevanje s pretaljevanjem, jeklo, siva litina, nodularna litina

Since 1970 a number of investigations have been published on applications of laser in different machining processes and generally in engineering. The present state in the development and in the applications shows that the prevailing laser technologies are laser cutting and laser welding while applications in the field of heat treatment of surface properties of materials are still scarce. The contribution will present some experiences in researching the use of laser in the field of laser surface melt-hardening on gray and nodular irons and surface layer hardening by the method of transformation hardening.

Key words: laser surface hardening, laser melt-hardening, steel, cast iron, nodular iron

1 UTRJEVANJE S PRETALJEVANJEM POVR[INSKE PLASTI

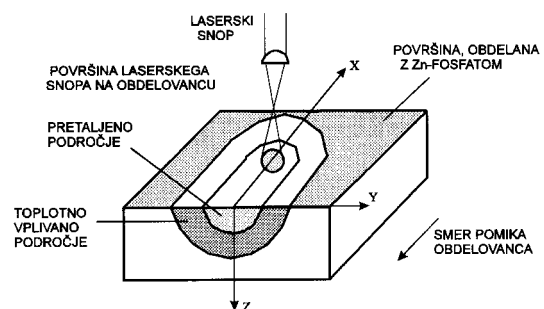
Pri sivi in nodularni litini s perlitno-feritno oziroma feritno-perlitno matrico se pri klasičnih nagnjenih površinskih toplotnih obdelavah pojavijo težave pri zagotavljanju homogene matrice po kaljenju. Zato tudi ne moremo zagotoviti uveljavljene poteka mikrotrdnote po globini kaljene plasti in s tem ne dosežemo uveljavljene obrabne odpornosti. Tako v svetovni literaturi potekajo številne raziskave pretaljevanja površinske plasti različnih vrst sive in nodularne litine kot tudi različnih vrstah malo ali celo močno legiranih litin¹⁻⁵. Izjemno fina in homogena mikrostruktura v površinskem pretaljenem stanju daje zelo enakomerno mikrotrdoto v tej plasti, medtem ko v večji globini dosežemo nehomogeno in značilno kaljeno mikrostrukturo z izrazitim odstopanjem mikrotrdnote od srednje vrednosti. Zanimivo je, da pri dinamično obremenjenih delih in ob istočasni zahtevi po obrabni odpornosti le-teh dosežemo izjemno dobre rezultate. Zato so bile po letu 1990 realizirane številne aplikacije v velikoserijski proizvodnji zelo zahtevnih delov v avtomobilski industriji, kot so npr. odmične in kolenaste gredi ter drugi deli. Gladkost površine pretaljene plasti in majhne notranje napetosti med toplotno obdelavo in tudi prej omogočajo relativno plitek odvzem pretaljenega površinske plasti z brušenjem, da dosežemo zahtevane lastnosti površine brez deformacije delov. Na sliki 1 je prikazan postopek utrjevanja s pretaljevanjem tanke površinske plasti z laserskim snopom. Značilno za ta postopek utrjevanja je, da segrejemo tanko površinsko plast nad temperaturo taljenja. Uveljavljen vnos energije pri

dani moči laserskega izvira dosežemo s spreminjanjem optičnih in kinematičnih razmer. Zaradi hitrega pomika obdelovanca dosežemo hitro segrevanje in ohlajanje, ki ustvari v tanki površinski plasti modificirano mikrostrukturo⁶⁻⁹.

2 MIKROSTRUKTURA MODIFICIRANE POVR[INSKE PLASTI PO PRETALJEVANJU

Mikrostrukturne spremembe pri toplotni obdelavi litine in še prav posebno pri utrjevanju s pretaljevanjem površinske plasti so odvisne od poteka temperaturnih ciklov pri segrevanju in ohlajanju. Pri laserski obdelavi s pretaljevanjem površine dobimo modificirano plast, ki jo sestavljata dve značilni mikrostrukturni coni, in sicer:

- pretaljena cona
- toplotno vplivana ali kaljena cona.



Slika 1: Shematični prikaz postopka laserskega površinskega utrjevanja s pretaljevanjem površine
Figure 1: Schematic presentation of laser surface melt-hardening

2.1 Pretaljena cona

Na mikrostrukturo pretaljene cone vpliva dele' raztopljenega grafita v talini in hitrost ohlajanja povr{inske plasti. Zaradi kratkega interakcijskega -asa laserskega snopa z obdelovancem se pogosto pojavi nepopolno raztapljanje grafita v talini. V kopeli taline prihaja do hidrodinami-nih in hidrostati-nih razmer, ki vplivajo na raztapljanje in gibanje grafitnih lusk ali nodulov proti povr{ini pretaljene plasti. Iz poznavanja velikosti grafita pred pretaljevanjem povr{inske plasti in po njem lahko ugotovimo, kako je potekalo raztapljanje grafita in kak{en je njegov vpliv na mikrostrukturo v pretaljeni plasti. Vsebnost ogljika v pretaljeni coni se zmanj{a zaradi oksidacije in uparjanja grafita. Zelo kompleksne hidrodinami-ne in termodinami-ne razmere v kopeli taline vplivajo na nastanek mikrostrukture v nastali pretaljeni coni. Z difrakcijo rentgenskih 'arkov v pretaljeni plasti (**tabela 1**) smo z opti-no mikroskopijo ugotovili, da je mikrostruktura sestavljena iz ledeburita z dendriti zaostalega avstenita, manj{ega dele'a finozrnatega martenzita na prehodu med pretaljeno in kaljeno cono in lokalno v povr{ju {e manj{ega dele'a neraztopljenega grafita (**slika 2**).

Tabela 1: Rezultati fazne analize lasersko pretaljenega povr{inske plasti sive litine Grade 200 in nodularne litine 400-12, izra'eni v %

Table 1: Results of X-ray diffraction of laser remelted layer on the surface of gray iron Grade 200 and nodular iron 400-12 in %

Material (ISO)	zaostali avstenit	martenzit	'elezov karbid	oksidi 'eleza	grafit
Grade 200	28	20	46	6	/
400-12	34	28	26	7	5

Med strjevanjem pretaljene plasti rastejo dendriti avstenita v smeri proti povr{ini, kar ustreza smeri prevajanja toplote v preostali hladni del obdelovanca. Izjemno hitro ohlajanje tanke pretaljene povr{inske plasti sive in nodularne litine lahko povzro-i v njej naslednje efekte:

- nepopolno raztopitev krogelnega grafita pri nodularni litini
- prerazporeditev neraztopljenih nodulov grafita zaradi vzgonskih in hidrodinami-nih sil
- popolno raztopitev luskastega grafita pri sivi litini zaradi ugodnega razmerja med povr{ino in volumenom
- brazdavost na povr{ini sive litine z luskastim grafitom, ki se pojavi le pri zelo po-asnem gibanju laserskega snopa po povr{ini obdelovanca zaradi toka kopeli taline okoli laserskega snopa in zaradi delovanja tlaka za{-itnega plina na povr{ino taline
- nastanek poroznosti v pretaljeni coni sive litine zaradi uparjanja grafitnih lusk in me{anja taline. Zaradi me{anja taline in zaradi hitrega ohlajanja materiala ostanejo plini ujeti v pretaljeni coni
- razpoke v pretaljeni coni sive litine se pojavijo zaradi temperaturnih in mikrostrukturnih napetosti neposredno po strjevanju, ko ima material relativno nizko mejo te-enja.

Rezultati mikrostrukturalne analize pretaljene povr{inske plasti so potrdili, da je siva litina z luskastim grafitom bistveno bolj ob-utljiva za izbiro optimalnih obdelovalnih razmer. Metalografska analiza in ocenjevanje stanja povr{ine pri pretaljevanju sive litine so pokazali, da je optimalna hitrost pomika laserskega snopa in/ali obdelovanca pri izbrani mo-i ve-ja od 24 mm/s. Nasprotno pa se pri pretaljevanju nodularne litine talina vede precej bolje, saj ne prihaja do tako intenzivnega me{anja taline, kar daje po obdelavi zelo gladko povr{ino. Posledica zelo stabilnih razmer pri pretaljevanju povr{inske plasti nodularne litine je, da lahko izbiramo hitrosti pomika laserskega snopa in/ali obdelovanca v mnogo ve-jem razponu. Dobro kvaliteto povr{ine, 'elena mikrostrukturo in potek mikrotrdote v pretaljeni coni dobimo 'e pri hitrostih pomika ve-jih od 2 mm/s. Glede na izbiro hitrosti pomika lahko dobimo razli-ne vnose energije, s katerimi vplivamo predvsem na globino pretaljene cone.

2.2 Toplotna vplivana ali kaljena cona

V toplotno vplivani ali v-asih tudi tako imenovani kaljeni coni potekajo samo fazne transformacije v trdnem stanju. Osnovna perlitno-feritna mikrostruktura se pri segrevanju transformira v avstenit s koncentracijskim gradientom od luske ali nodula grafita. Nehomogeni avstenit se pri ohlajanju transformira v martenzit z zaostalim avstenitom in v ferit. Pri sivi litini s perlitno matrico sestavljajo toplotno vplivano cono luske grafita v martenzitni matrici z zaostalim avstenitom. Pri nodularni litini s perlitno-feritno matrico pa je toplotno vplivana cona po pretaljevanju sestavljena iz martenzitne matrice z zaostalim avstenitom in feritom z noduli grafita. Zaradi feritne faze v matrici nodularne litine nastanejo pri segrevanju in ohlajanju v toplotno vplivani



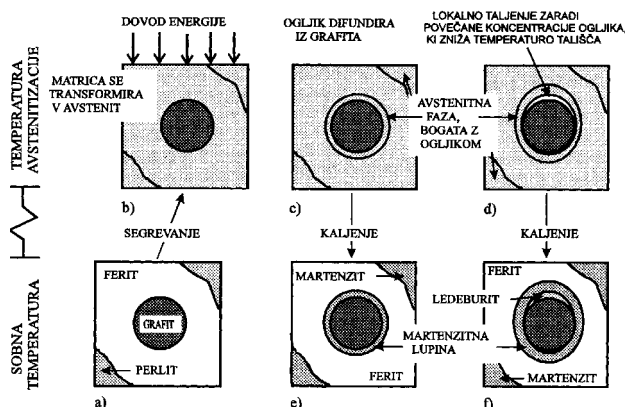
Slika 2: Mikrostrukturni posnetek pretaljene cone, pove-ava 500x
Figure 2: Microstructure of the remelted zone, 500x

coni okoli grafitnih nodulov trde martenzitinne lupine. Pogoj za nastanek martenzitinne lupine je poleg feritne faze okoli nodulov grafita potrebna tudi zadostna hitrost segrevanja preko temperature avstenitizacije in tudi dovolj velika hitrost ohlajanja. Ker poteka celoten proces zelo hitro, se utegne z ogljikom obogatiti le tanjša avstenitna plast okoli grafitnega nodula. Zaradi velike hitrosti ohlajanja pa dosejemo, da se z ogljikom obogatena avstenitna lupina transformira v martenzitinno fazo. Na **sliki 3** je v shematski obliki prikazan nastanek martenzitinne lupine okoli grafitnega nodula po laserskem utrjevanju s pretaljevanjem površine. Na **slikah od 3a do 3d** so prikazane mikrostrukturne spremembe pri segrevanju z laserskim snopom, medtem ko je na **sliki 3c** prikazana okolica grafita v trdnem stanju. S **sliki 3d** pa lahko ugotovimo, da je zaradi povečane koncentracije ogljika prišlo do znižanja talilne temperature litine, zato je nastalo lokalno pretaljevanje v ozkem pasu okoli nodula grafita. Tako dobimo lahko poleg martenzitinne (tako imenovane ledeburitne) lupine, kar je v shematski obliki prikazano na **sliki 3f**.

Na **sliki 4** je prikazan mikrostrukturni posnetek toplotno vplivane cone, v kateri so dobro vidne martenzitinne lupine okoli grafitnih nodulov in v nekaterih primerih (tako imenovane) ledeburitne lupine. Rezultate analize oddaljenosti grafitnih nodulov od površine glede na velikost martenzitinne in eventualno ledeburitne lupine so podani v delu⁶. Eksperimentalne rezultate smo preverili z izraženi po difuzijskih enačbah in ugotovili zelo dobro medsebojno ujemanje.

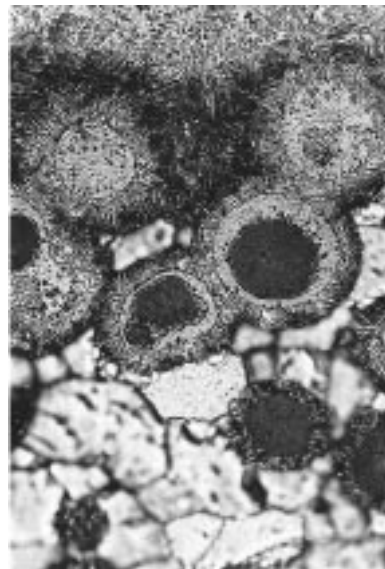
3 ZAOSTALE NOTRANJE NAPETOSTI PO UTRJEVANJU S PRETALJEVANJEM POVRŠINE

V sklopu integritete površine obdelovanca po različnih postopkih laserskega utrjevanja površinske plasti se poleg analiz mikrostrukture in mikrotrdnosti pogosto priključijo (tako imenovane) analize trajne dinamične trdnosti delov in zaostalih notranjih napetosti. Trajna dinamična



Slika 3: Shematski prikaz nastajanja martenzitinne in ledeburitne lupine okoli grafitnih nodulov v toplotno vplivani coni

Figure 3: Formation of hard martensite and ledeburite shells around a graphite nodule in the heat affected zone



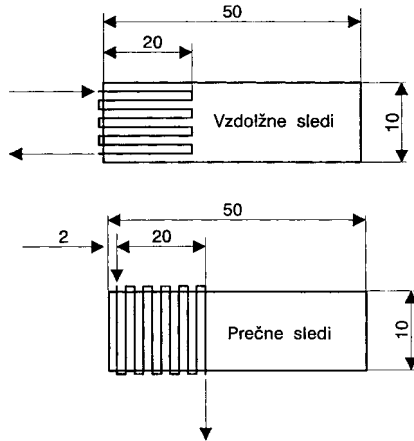
Slika 4: Mikrostrukturni posnetek toplotno vplivane cone, povečava 500x

Figure 4: Microstructure of the heat affected zone, 500x

trdnost delov je odvisna tudi od vrste in postopka površinskega utrjevanja. ^eprav so (tako imenovani) avtorji analizirali različne (tako imenovane) površinskega utrjevanja na različnih materialih in jih tudi razvili do industrijskih aplikacij, pa v strokovni literaturi le redko zasledimo vpliv (tako imenovane) vodjenja laserskega snopa po površini obdelovanca. Postopek merjenja zaostalih notranjih napetosti v površinski plasti smo zasnovali na relaksacijski metodi, pri kateri na osnovi izmerjene deformacije preizkušanca lahko ugotovimo oziroma izražamo, kakšne so notranje napetosti v površinski plasti.

Merjenje zaostalih notranjih napetosti smo opravili na 4 mm debelih ploščatih preizkušancih (širine 10 mm in dolžine 50 mm). Na (tako imenovani) vodjenja laserskega snopa je v vzdolžni smeri 'agast "cik - cak" na dolžini 20 mm (**slika 5a**) in prav tak v prečni smeri po celotni (širini) preizkušanca in na isti dolžini (**slika 5b**). Površina preizkušancev je bila obdelana z Zn - fosfatom z namenom, da se poveča absorpcija laserske svetlobe pri interakciji z obdelovancem. Pri vodjenju laserskega snopa po površini obdelovanca smo zagotovili 30-odstotno prekrivanje pretaljene plasti.

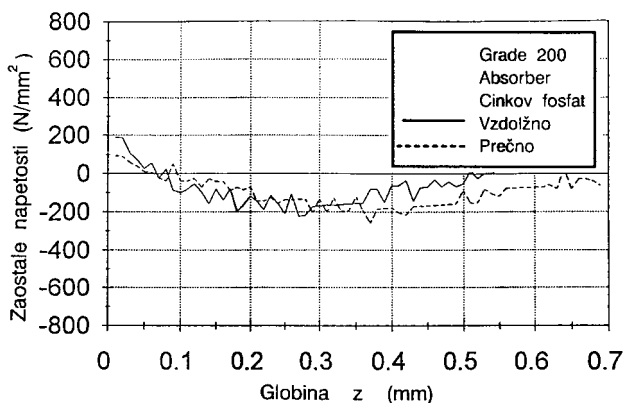
Na **sliki 6** je prikazan potek zaostalih napetosti za oba (tako imenovani) vodjenja laserskega snopa po površini preizkušanca iz sive litine Grade 200 in na **sliki 7** za nodularno litino 400-12. Pri pretaljevanju površinske plasti imamo pretaljeno in toplotno vplivano cono, od katerih vsaka po svoje vpliva zaradi sestave mikrostrukture na volumske spremembe in s tem na zaostale notranje napetosti. V splošnem lahko ugotovimo, da je dele (tako imenovane) ledeburita z zaostalim avstenitom in manjšim dele (tako imenovane) martenzita v pretaljeni coni obeh litin zelo podoben, zato lahko pri (tako imenovani) akujemo tudi zelo podobno velikost in potek zaostalih notranjih napetosti. Izražane



Slika 5: Geometrija preizku{anca in na-ini vodenja laserskega snopa: a) 'agasto ("cik - cak") v vzdol{ni smeri; b) 'agasto ("cik - cak") v pre-ni smeri

Figure 5: Workpiece geometry and different travelling ways of laser beam: a) zig-zag in longitudinal direction; b) zig-zag in traverse direction

zaostale notranje napetosti na povr{ini so za sivo in nodularno litino natezne in nato v globini pod 100 μm preidejo v tla-ne. Kak{ne bodo notranje napetosti v ve-jih globinah, je odvisno v najve-ji meri od na-ina priprave oziroma obdelave preizku{ancev. Izkazalo se je, da je potek zaostalih napetosti zelo podoben in skoraj neodvisen od na-ina vodenja laserskega snopa kot tudi neodvisen od na-ina priprave preizku{ancev z absorberjem. Odstopanja pri izmerjenih notranjih napetostih lahko pripisemo zmanj{anemu dele'u grafita v pretaljeni coni zaradi uparjanja in raztapljanja grafita v talini. Po ohlajanju kopeli taline nastane v pretaljeni coni cementit v avstenitni osnovi, ki vpliva na zmanj{anje volumna. Zato dobimo v tanki povr{inski plasti pretaljene cone pove-ano koncentracijo grafita in druga-no napetostno stanje kot na spodnjem delu pretaljene cone. Razlike v lokalnih notranjih napetostih na mikronivoju lahko



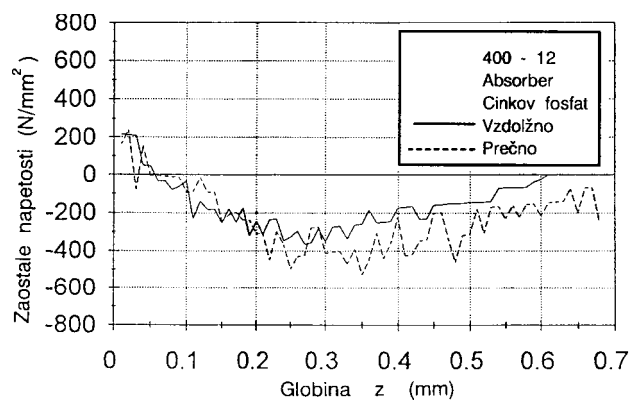
Slika 6: Zaostale napetosti po utrjevanju sive litine Grade 200 s pretaljevanjem povr{inske plasti

Figure 6: Residual stresses in gray iron Grade 200 after surface melt-hardening

izmerimo z rentgensko difrakcijsko metodo, medtem ko nam daje relaksacijska metoda povpre-no velikost zaostalih notranjih napetosti na obravnavanem preizku{ancu v posameznih smereh koordinatnega sistema. Da ne bi povzro-ili vna{anja novih notranjih napetosti z mehanskimi procesi odvzemanja napete plasti, smo se odlo-ili za elektrokemi-ni odzvem materiala preizku{anca na mestu merjenja zaostalih notranjih napetosti. Osnovni princip te merilne metode je, da odstranimo napeto plast na mestu, kjer 'elimo meriti zaostale napetosti. Zaradi elektrokemi-nega raztapljanja napete plasti se poru{i ravnote'no stanje, ki ima za posledico vzpostavljane novega. Posledice le-tega so tudi deformacije, ki jih lahko merimo z razli-nimi senzorji. V na{em primeru smo se odlo-ili za njihovo merjenje z uporovnimi merilnimi listi-i, ki smo jih po ustreznem fizikalnem modelu z ustrežno programsko podporo prera-unali v napetosti. Klju-ni problem pri izra-unu zaostalih notranjih napetosti je bil, kako v dolo-enem trenutku dolo-iti globino odvzema materiala preizku{anca. Postopek je enostaven, -e je -asovni odzvem materiala oziroma raztapljanje preizku{anca linearno.

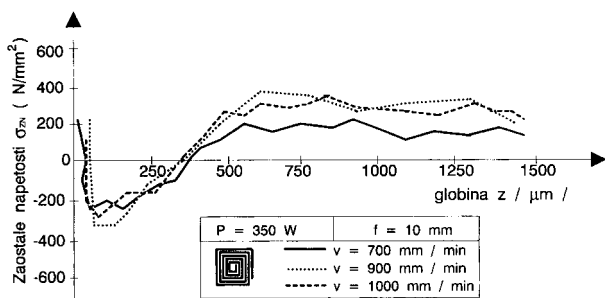
4 ZAOSTALE NOTRANJE NAPETOSTI PO LASERSKEM POVR[INSKEM KALJENJU RAZLI ^NIH JEKEL

Pri laserskem povr{inskem kaljenju tanko povr{insko plast segrejemo preko temperature avstenitizacije. Izbrali smo volfram-kromovo jeklo, namenjeno za izdelavo razli-nih delov orodij za delo v hladnem stanju, ki ga proizvaja Metal Ravne, poznan pod oznako OSIKRO special. Jeklo ima odli-no rezalno sposobnost, dobro 'ilavost in vzdr'ljivost pri dinami-nih oziroma udarnih obremenitvah. Jeklo je bilo le povr{insko kaljeno s prehodom laserskega snopa po povr{ini obdelovanca. Na-ini vodenja laserskega snopa po povr{ini obdelovanca so bili:



Slika 7: Zaostale napetosti po utrjevanju nodularne litine 400-12 s pretaljevanjem povr{inske plasti

Figure 7: Residual stresses in nodular iron 400-12 after surface melt-hardening



Slika 8: Potek zaostalnih napetosti po laserskem povr[inskem kaljenju (oglasta spirala)

Figure 8: Residual stresses profile below the surface after laser surface hardening (square spiral)

- vodenje po oglasti spirali z za-etkom v sredini kaljenega podro-ja
- vodenje v 'agasti "cik - cak" obliki v pre-ni smeri kaljenega podro-ja
- vodenje snopa po {tevilnih zaporednih koncentri-nih krogih s postopnim pove-evanjem premera sledi.

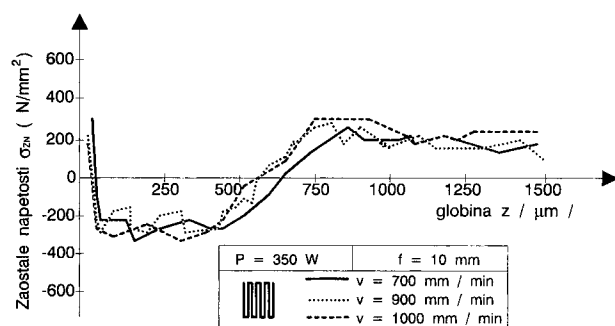
V vseh omenjenih primerih smo vodili laserski snop tako, da smo zagotovili 30% prekrivanje sosednjih kaljenih sledi.

Na slikah 8 do 10 so prikazani poteki in vrednosti zaostalnih napetosti za obravnavano jeklo po laserskem povr[inskem kaljenju. Izbrali smo mo- laserskega izvira 350 W, gori{-no razdaljo le-e 62,5 mm z defokusom 10 mm in razli- ne hitrosti pomikov obdelovanca proti laserskem snopu: 700, 900 in 1000 mm/min. Tako smo dosegli razli- ne vnose energije v povr[insko plast obde- lovanca, ki dajejo razli- no maksimalno temperaturo na povr[ini in s tem tudi razli- no globoke in {iroke kaljene sledi. Na slikah so prikazane porazdelitve zaostalnih notranjih napetosti v odvisnosti od globine toplotno obdelane povr[ine. Rezultati ka'ejo zelo podoben potek izmerjenih zaostalnih notranjih napetosti, -eprav so bili izbrani zelo razli- ni na- ini vodenja laserskega snopa po povr[ini obdelovanca. V obeh primerih smo dobili zelo podobne poteke in vrednosti nateznih zaostalnih napetosti

v povr[inski plasti, ki v globini okoli 350 μm spremenijo predznak in preidejo v tla- ne napetosti in nato pri globi- nah okoli 600 μm zopet preidejo v natezno podro- je. Ve- ja odstopanja smo ugotovili pri toplotni obdelavi povr[ine z laserskim snopom, ki je bil voden po povr[ini v obliki koncentri- nih krogov (slika 10). ^eprav je nje- govo vodenje po povr[ini obdelovanca simetri- no, pa je v tem primeru toplotno obdelana povr[ina manj{a kot v prvem ali drugem primeru. Prav temu je treba pripisati razlike v spremembi poteka in velikosti zaostalnih notran- jih napetosti. Pri koncentri- no vodenem laserskem snopu po povr[ini obdelovanca dobimo izjemno visoke natezne zaostale notranje napetosti v globini okoli 750 μm z vrednostmi med 600 in 800 N/mm^2 . Absolutna vrednost zaostalnih napetosti je bila v tem primeru skoraj za faktor dva do trikrat vi{ja kot v predhodnih primerih. Zaostale notranje napetosti so natezne narave na povr[ini obde- lovanca pri vseh na- inih vodenja laserskega snopa in so okoli 400 N/mm^2 , nato postopno padajo do vrednosti ni- pri globini okoli 70 μm . Tla- ne zaostale napetosti se po- javijo torej v globinah, ve- jih od 70 μm , in dose'ejo ponovni prehod v natezno napetost pri 375 μm (slika 8), pri 580-650 μm (slika 9) in kon- no pri 300-370 μm (slika 10). Maksimalna vrednost tla- nih zaostalnih nape- tosti dosega do 400 N/mm^2 in so glede na na- in vodenja laserskega snopa v zelo razli- nih globinah.

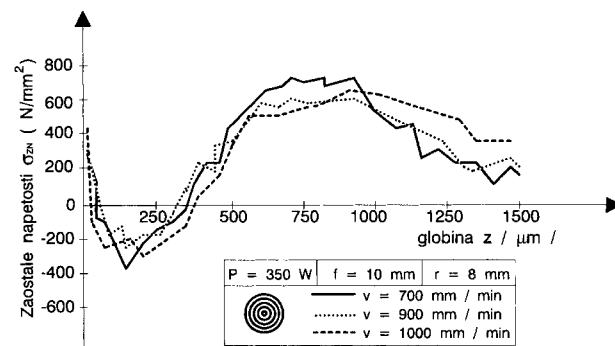
5 SKLEPI

Glede na vse pogostej{e zahteve naro- nikov po zago- tavljanju tla- nih zaostalnih notranjih napetosti v povr[in- ski plasti izdelkov nastane vpra{anje, kako le- te tudi za- gotoviti. Praksa je pokazala, da je mo' no kontrolirati zaostale notranje napetosti z modelnimi preizkusi na ma- terialih, ki jih obdelamo z dano tehnologijo v razli- nih obdelovalnih razmerah. Poznavanje zaostalnih notranjih napetosti na modelnih preizkusih nam z zadovoljivo zanesljivostjo omogo- a ocenjevati njihovo velikost in potek v strojnih ali orodnih delih.



Slika 9: Potek zaostalnih notranjih napetosti po laserskem povr[inskem kaljenju (cik - cak, pre- na smer)

Figure 9: Residual stresses profile below the surface after laser surface hardening (zig - zag, traverse direction)



Slika 10: Potek zaostalnih notranjih napetosti po laserskem povr[inskem kaljenju (koncentri- ni krogi)

Figure 10: Residual stresses profile below the surface after laser surface hardening (concentric circles)

Prikazani rezultati o izmerjenih zaostalih notranjih napetostih ka'ejo, kako pomembna je pravilna izbira mehanske in toplotne obdelave strojnih delov, da dose'emo dobro vedenje v razli-nih tribolo{kih razmerah in/ali v razli-no dinami-no obremenjenem stanju.

Ugotovitve:

- Zaostale notranje napetosti po laserskem povr{inskem kaljenju jekla OSIKRO special so natezne narave do globine okoli 70 μm , nato pa se glede na na-in vodenja laserskega snopa po povr{ini obdelovanca pojavijo tla-ne zaostale napetosti
- Zaostale notranje napetosti po utrjevanju s pretaljevanjem povr{inske plasti sive in nodularne litine ka'ejo zelo podobne poteke in vrednosti, kot so pri laserskem povr{inskem kaljenju jekel, ~eprav so izrazite mikrostrukturne razlike med pretaljeno in kaljeno cono.

6 LITERATURA

- ¹ H. W. Bergman: Current Status of Laser Surface Melting of Cast Iron, *Surface Engineering*, 1 (1985) 2, 137-155
- ² S. Mordike, H. B. Pruel, H. Szengel: Laser Oberflächenbehandlung-eine Produktionsreifes Verfahren für vielfältige Anwendungen, *Nov*

tehnologije toplinske obrade metala, Me/unarodno svetovanje, Zagreb, Croatia, 1990, 1-12

- ³ I. C. Hawkes, W. M. Steen, D. R. F. West: Laser Surface Melt Hardening of S. G. irons; *Proceedings of the 1st international conference on Lasers in manufacturing*, Brighton, Velika Britanija, 1983, 97-108
- ⁴ Y. Guan, J. P. Montagnon, D. Pantelis, Ph. Poupeau, D. Francois: Laser Surface Treatment of Ferrite-pearlitic Spheroidal Graphite Cast Iron, *Memoires et Etudes Scientifiques Revue de Metallurgie*, 87 (1990) 1, 21-32
- ⁵ M. Tsujikawa, M. Hino, M. Kawamoto, K. Okabayashi: "Hard - Eye" Ductile Cast Iron and its Treatment by Laser Quenching, Congress Book: *The 8th International Congress on Heat Treatment of Materials*, Heat & Surface '92, Ed.: I. Tamura, Tokyo, Japan, 1992, 441-444
- ⁶ J. Grum, R. [turm: Microstructure analysis of Nodular Iron 400-12 after Laser Surface Melt-Hardening Procedure, *Materials Characterizations*, 37 (1996) 81-88
- ⁷ J. Grum, R. [turm: Properties of Laser Surface Melt Hardening on Cast Iron, *Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96*, Stuttgart, Nem-ija, 501-508
- ⁸ J. Grum, R. [turm, P. @erovnik: Residual Stresses of Overlapping Laser Melt Hardening of Gray and Nodular Iron, *Fourth European Conference on Residual Stresses*, Cluny en Bourgogne, Francija, 1996, 144-146
- ⁹ J. Grum, P. @erovnik, R. [turm: Measurement and Analysis of Residual Stresses after Laser Hardening and Laser Surface Melt Hardening on Flat Specimens; *Proceedings of the Conference "Quenching '96"*, Ohio, Cleveland, 1996, 181-191