

Lasersko kaljenje s pretaljevanjem površinske plasti sive in nodularne litine

Laser Surface Melt-Hardening of Gray and Nodular Iron

J. Grum¹, R. Šturm, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1995-12-22

Postopek laserskega kaljenja s pretaljevanjem površinske plasti nam omogoča zelo natančno določanje globine modificirane plasti. Pri tem postopku namreč poznamo točen energijski vnos v material, zato so dane možnosti matematičnega napovedovanja globine in širine modificirane sledi pri danih obdelovalnih razmerah. Segrevanje nad temperaturo tališča in potem zelo hitro ohlajanje povzročata pri laserski toplotni obdelavi mikrostrukturne spremembe materiala, ki vplivajo na porast trdote. Rezultate matematične temperaturne funkcije smo preverili z eksperimentom in ugotovili dobro ujemanje, kar nam daje možnost zelo natančnega načrtovanja globine modificirane plasti z lasersko toplotno obdelavo v industriji.

Ključne besede: lasersko kaljenje, pretaljevanje površine, mikrostruktura, potek temperatur

The procedure of laser surface melt-hardening enables very accurate determination of the depth of the modified layer. In this procedure it is possible to know the exact energy input into the material, so the possibilities are given for mathematical prediction of the depth and width of the modified trace in the given heat treatment conditions. Heating above the melting point temperature and then very rapid cooling in laser heat treatment cause microstructure changes of the material which may result in an increase of hardness. The results of the mathematical temperature function were verified by experiments. A good correlation was established, which provides a possibility of very accurate planning of the modified layer depth in laser heat treatment in industrial conditions.

Key words: laser hardening, surface melting, microstructure, temperature distribution

1 Uvod

Različne kvalitete sive in nodularne litine se veliko uporabljajo v industrijskih aplikacijah zaradi dobre livnosti, širokega spektra mehanskih lastnosti, obrabne odpornosti, dobre obdelovalnosti in cenenosti. S pretaljevanjem površinske plasti materiala obdelovanca iz litih želez pa lahko bistveno izboljšamo njihove obrabne lastnosti. Značilno za postopke pretaljevanja površine je, da segrejemo tanko površinsko plast nad temperaturo tališča materiala obdelovanca, ki mu sledi izredno hitro ohlajanje. Tako dosežemo zelene strukturne spremembe v površinski plasti. Lasersko pretaljevanje površine je ena najbolj obetavnih tehnik za mikrostrukturno modifikacijo površine materialov za izboljšanje njihove obrabne in korozijske odpornosti. Veliko tehnoloških razlogov opravičuje uporabo laserjev na tem področju, in sicer: natančna kontrola vnesene energije, možnost avtomatizacije, čistost procesa, majhna debelina modificirane plasti v primerjavi s klasičnimi postopki ter idealna kombinacija žilavega jedra in trde obrabno odporne lasersko pretaljene površine, kar je izjemnega pomena pri majhnih strojnih delih. Poleg tega pa lahko izvajamo utrjevanje površine na majhnih delih zahtevnih oblik, kar pri navadnih postopkih kaljenja ni možno.

Za lasersko toplotno obdelavo se največ uporabljajo CO₂ laserji velikih moči s kontinuirnim načinom delovanja. Ko laserski snop udari na površino kovinskega materiala, se en del svetlobe absorbira, drugi pa se odbije

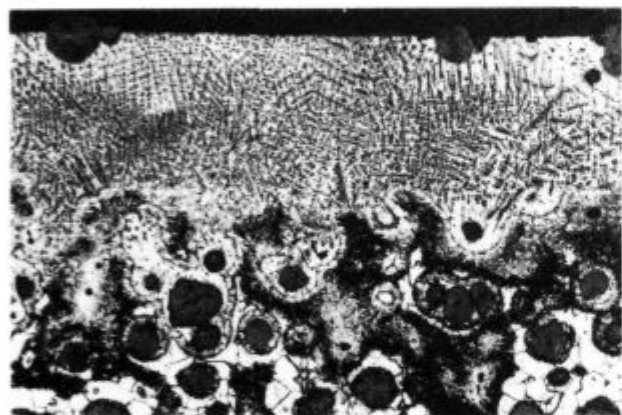
oziroma reflektira. Stopnja absorpcije laserske svetlobe v materialu obdelovanca je odvisna od vrste materiala, površinske obdelave, valovne dolžine in intenzitete laserske svetlobe ter temperature obdelovanca. Ker je absorptivnost laserske svetlobe pri kovinskih materialih pod temperaturo tališča zelo majhna, jo lahko povečamo s tankimi nanosi absorpcijskih premazov ali z ustrezno kemično obdelavo površine. V primerih, ko izvajamo postopke pretaljevanja površine, pa se absorptivnost laserske svetlobe poveča tudi za faktor 6 oziroma na 80%^{1,2}. Zaradi povečane absorptivnosti navadno ni potrebna predhodna priprava površine z absorberji. S pretaljevanjem površine dosežemo tudi večjo globino modificirane plasti, kot pri navadnem kaljenju, kar je izjemno pomembno pri laserskih izviri majhnih moči.

S spreminjanjem lege gorišča optičnega sistema laserskega izvira proti površini obdelovanca oziroma s spreminjanjem lege zunaj žarišča ter hitrosti pomika obdelovanca dosežemo različne vnose energije na njegovo površino, kar povzroči različno hitrost segrevanja površinske plasti in s tem tudi različne globine modificirane plasti. Zaradi izredno kratkega časa interakcije laserskega snopa z materialom obdelovanca se segreje le tanka površinska plast. Po prenehanju delovanja laserskega snopa na obdelovalno mesto sledi samozakalitev s prevodom toplote v hladen del materiala. Proces hitrega segrevanja nad temperaturo transformacije privede pri navadnem kaljenju, kaljenju nad temperaturo tališča pri postopkih pretaljevanja, in potem dovolj hitrem ohlajanju do nastanka metastabilnih mikrostruktur, ki vplivajo na povečanje obratovalnih sposobnosti delov.

¹ Dr. Janez GRUM, redni prof.
Univerza v Ljubljani
Fakulteta za strojništvo
1000 Ljubljana, Aškerčeva 6

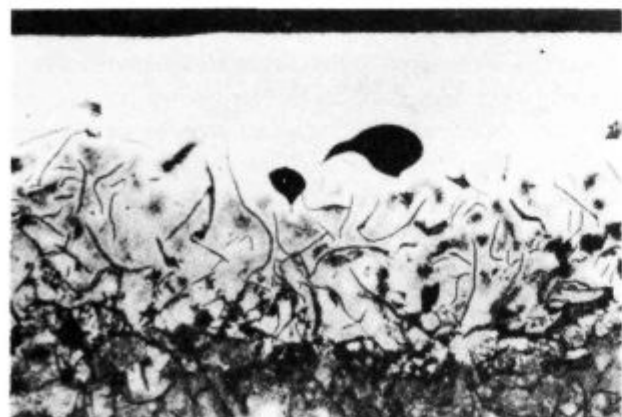
2 Izvedba poskusa

Pri laserski toplotni obdelavi smo z laserskim snopom ustvarili tak energijski vnos, da je prišlo do pretaljevanja površinske plasti perlitne sive litine SL200 in feritno-perlitne nodularne litine NL400. Za preizkus smo uporabili CO₂ laser z močjo 450 W. Laserski snop smo defokusirali glede na površino obdelovanca za 10 mm in tako dobili premer snopa na površini 1,266 mm z zeleno gostoto energije 35700 W/cm². Bistveno drugačna mikrostruktura sive in nodularne litine je zahtevala tudi različne optimalne energijske vnose. Zato smo spreminjali hitrosti pomika obdelovanca proti laserskemu snopu v območju med 2 in 42 mm/s s korakom po 2 mm/s. Ugotovili smo, da morajo biti energijski vnosi precej manjši pri sivi litini zaradi neugodne oblike grafita, ki vplivajo na lokalno toplotno prevodnost perlitne osnove. Luske grafita s svojo obliko zadržujejo in s tem akumulirajo toplotno energijo v površinski plasti. Površino obdelovancev smo pred toplotno obdelavo kemično obdelali z Zn-fosfatom, ki poveča absorptivnost površine materiala za lasersko svetlobo in zagotavlja enakomeren vnos energije.



Slika 1: Mikrostruktura sledi po laserskem pretaljevanju površine, NL400, povečava 100 x

Figure 1: Cross-section of the laser surface melt-hardened trace, NL400, magnification 100 x

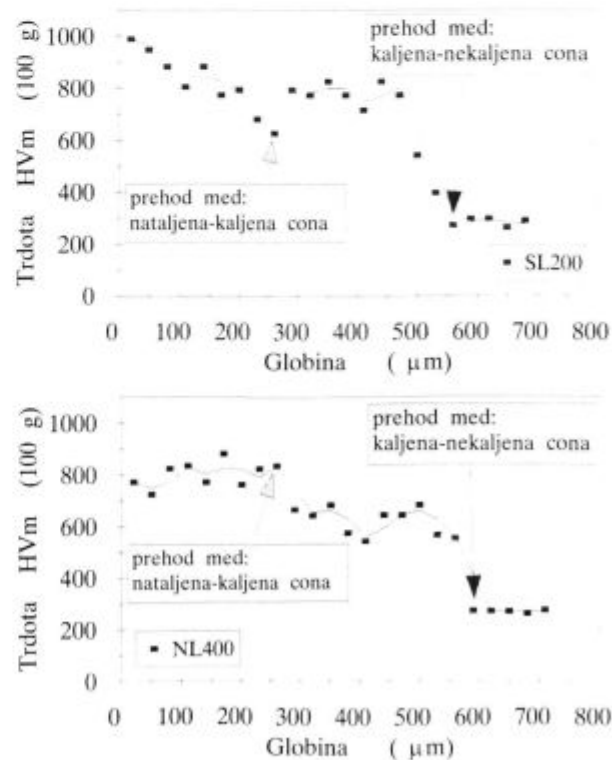


Slika 2: Mikrostruktura sledi po laserskem pretaljevanju površine, SL200, povečava 100 x

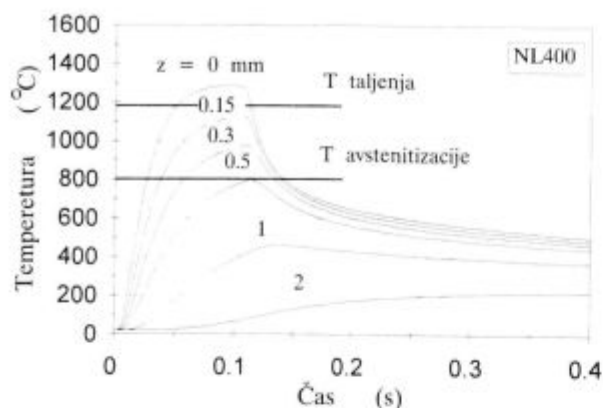
Figure 2: Cross-section of the laser surface melt-hardened trace, SL200, magnification 100 x

Po laserski toplotni obdelavi s pretaljevanjem površine dobimo modificirano površinsko plast, ki je sestavljena iz pretaljene in kaljene plasti. Pretaljena površinska plast je sestavljena iz zelo fine avstenitno-ledeburitne mikrostrukture. Na mikrostrukturo pretaljene plasti vplivajo interakcijski čas in velikost ter oblika grafita v osnovni mikrostrukturi. Tako lahko dobimo v pretaljeni plasti nodularne litine nepopolno raztopljene večje nodule grafita (slika 1). Pri sivi litini pa je prišlo do njene popolne raztopitve, pojavijo pa se plinski mehurji in razpoke (slika 2). Kaljena cona v sivi litini ima martenzitno mikrostrukturo, v kateri so luske grafita. Pri nodularni litini pa je mikrostruktura kaljene cone martenzitno-feritna z noduli grafita. Značilen pojav je nastanek martenzitnih lupin okoli nodulov grafita v feritni okolici.

Uspešnost modificiranja mikrostrukture površinske plasti smo potrdili tudi z meritvami mikrotrdote v prečnem prerezu na sled po globini modificirane plasti. Na sliki 3 je prikazan potek mikrotrdote za sivo in nodularno litino. Na diagramih na sliki 3 so s puščicami označene vizualno ocenjene globine prehoda med pretaljeno in kaljeno cono ter globine prehoda med kaljeno cono in področjem toplotno neobdelanega materiala. Mikrotrdota pri sivi litini je nekoliko višja v pretaljeni coni in postopoma pada od površine do kaljene cone zaradi zmanjševanja deleža cementita po globini. Mikrotrdota na površini je 1000 HV₁₀₀ in postopoma pada v pretaljeni coni do vrednosti 650 HV₁₀₀ na globini 250 μm. V kaljeni coni je mikrotrdota zelo enakomerna in je



Slika 3: Rezultati merjenja mikrotrdote
Figure 3: Results of microhardness measurements



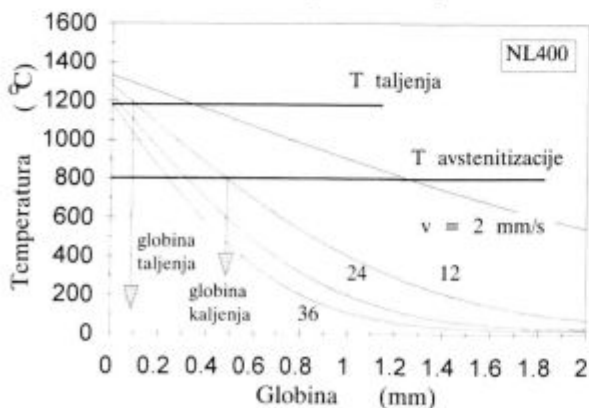
Slika 4: Potek temperatur na določenih globinah v odvisnosti od časa, NL400, $v = 12$ mm/s

Figure 4: Temperature variation at different depths versus time, NL400, $v = 12$ mm/s

okoli 800 HV₁₀₀. Pri nodularni litini se zaradi zmanjšanja koncentracije ogljika v pretaljeni coni zniža tudi mikrotrdota na površini in je po celotni globini okoli 800 HV₁₀₀. V kaljeni coni pa se mikrotrdota giblje med 600 in 700 HV₁₀₀, kar pogojujemo s prisotnostjo feritno-martenzitne mikrostrukture.

3 Matematično napovedovanje globine modificirane plasti

Prednost laserskega kaljenja površinske plasti materiala pred klasičnimi postopki kaljenja je, da lahko opišemo potek temperature oziroma temperaturnega cikla na površini in tudi na izbranih mestih v globini z matematičnimi modeli. Ti so¹⁻⁴ za popis poteka temperature pri laserskem kaljenju zgrajeni tako, da upoštevajo spreminjanje obdelovalnih razmer in fizikalne lastnosti danega materiala. Na **sliki 4** imamo prikazane temperaturne cikle oziroma spreminjanje temperature pri gibajočem se laserskem izviru za opazovano točko na površini oziroma na izbranih globinah v odvisnosti od časa pri hitrosti pomika obdelovanca $v = 12$ mm/s za nodularno litino NL400. Temperaturo tališča smo določili na osnovi izmerjenih ohlajevalnih krivulj,



Slika 5: Maksimalne temperature na določenih globinah po interakciji laserskega snopa, NL400

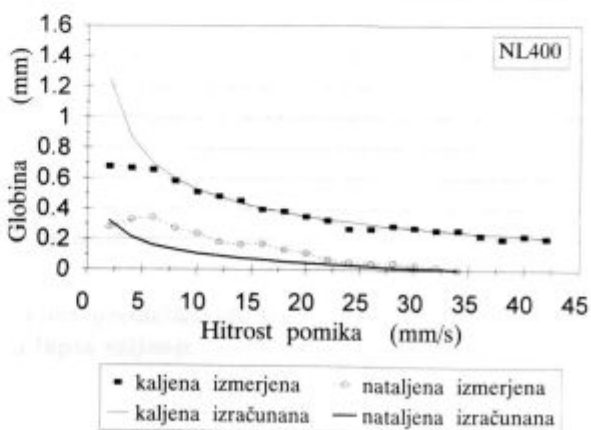
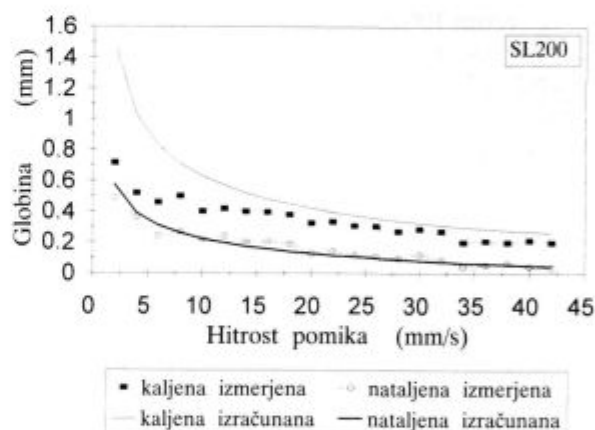
Figure 5: Maximum temperature at different depths after the laser beam interaction time, NL400

medtem ko smo temperaturo avstenitizacije povzeli iz diagramov stanj pri dani vsebnosti ogljika in silicija v litini.

Za posamezne hitrosti pomika obdelovanca smo po interakciji laserskega snopa določili maksimalne temperature na določenih globinah in tako tudi globino pretaljene in kaljene cone (**slika 5**). Tako smo lahko ugotovili, da je pri hitrosti pomika obdelovanca $v = 12$ mm/s globina nataljene cone 0,1 mm in globina kaljene cone 0,5 mm.

Zbrani podatki o poteku temperature nam omogočajo določevanje obdelovalnih razmerah za zeleno globino modificirane plasti. Če upoštevamo še spreminjanje moči in stopnjo defokusacije laserskega snopa glede na površino obdelovanca, potem lahko izvajamo proces optimiranja laserskega kaljenja s pretaljevanjem površine^{5,6}.

Primerjava rezultatov med eksperimentalno izmerjenimi globinami modificirane plasti in globinami, izračunanimi po matematičnem modelu, je prikazana na **sliki 6**. Polno izvlečene črte predstavljajo rezultate izračunane globine kaljene cone (zgornja črta) in globine pretaljene cone (spodnja črta). Rezultati merjenja glo-



Slika 6: Primerjava globin pretaljene in kaljene cone izračunanih z matematičnim modelom in globin izmerjenih po eksperimentu

Figure 6: Comparison between the depths of the melted and hardened zone calculated with a mathematical model and the measured depths after the experiment

bine pretaljene in kaljene cone so podani v istih diagramih s točkami. Merjenje dimenzij oziroma globin posameznih con smo izvedli na merilnem mikroskopu na mikrostrukturah, ki smo jih dodatno potrdili z merjenjem mikrotrdote. Ugotovili smo zelo dobro ujemanje rezultatov matematičnega izračuna globine pretaljene in kaljene plasti z eksperimentalnimi rezultati pri izbranih obdelovalnih razmerah, kar potrjuje uspešnost popisa temperature z matematičnim modelom. Nekoliko večje odstopanje teoretično določenih globin modificirane plasti od izmerjenih smo ugotovili pri kaljenju s pretaljevanjem površine sive litine. Vzrok za nastalo odstopanje je po našem mnenju potrebno iskati v luskasti obliki grafitu, ki zavira prevajanje toplote v globino. Pri premajhnih hitrostih pomika obdelovanca ($v < 16$ mm/s) pride do prevelikega vnosa energije v površinsko plast, kar povzroča pregrevanje taline na višjo temperaturo ter mešanje in brizganje taline v pretaljeno plast, zaradi česar prihaja do povečanja hrapavosti površine oziroma celo do nastanka finih brazd na površini obdelovanca. To pa so že nepravilnosti pri toplotni obdelavi, ki jih matematični model ne zajema.

4 Sklepi

Z laserskim kaljenjem s pretaljevanjem površinske plasti sive in nodularne litine smo dosegli izjemno povečanje trdote v pretaljeni površinski plasti, kar bistveno poveča obrabno odpornost tako modificiranih izdelkov. Mikrostruktura v pretaljeni plasti je izjemno fino in je sestavljena iz avstenita in ledeburita. Mik-

rostruktura v kaljeni plasti pa je odvisna od mikrostrukture matrice in od oblike grafitu (luske, noduli), v pretežni meri pa je martenzitna. Matematično modeliranje razmer pri segrevanju oziroma ohlajanju materiala s popisom temperatur po globini potrjuje, da lahko zelo uspešno izvajamo optimizacijo procesa glede na želeno globino pretaljene in kaljene plasti oziroma globino modificirane plasti. Eksperimentalni rezultati so potrdili, da je nodularna litina zelo ugodna za lasersko toplotno obdelavo, medtem ko je siva litina prav zaradi oblike grafitu znatno bolj zahtevna, če hočemo zagotoviti želeno kvaliteto površine in površinske plasti.

5 Literatura

- ¹ M. Bertolotti (ed.): Physical processes in laser - materials interactions, Plenum press, New York and London, 1983
- ² M. F. Ashby, V. E. Easterling: The transformation hardening of steel surfaces by laser beams - I. hypo-eutectoid steels, *Acta metall.*, 32, 1984, 11, 1935-1948
- ³ H. W. Bergmann: Current status of laser surface melting of cast iron, *Surface engineering*, 1, 1985, 2, 137-155
- ⁴ E. Geissler, H. W. Bergmann: Calculation of temperature profiles, heating and quenching rates during laser processing, Mordike L. (ed.): Laser treatment of materials, papers presented at the European conference on laser treatment of materials 1986, Bad Neuheim, Germany, 1987, 101-114
- ⁵ J. Grum, R. Šturm: Laserska toplotna obdelava sive in nodularne litine, *Konferenca "Inovativna avtomobilska tehnologija IAT'95"*, Radenci, Slovenija, 1995, 355-362
- ⁶ J. Grum, R. Šturm: Laser surface melt - hardening of gray and nodular irons, *Int. conference "Laser material processing"*, Opatija, Croatia, 1995, 165-172