

VPLIV LASERSKEGA POVR[INSKEGA PRETALJEVANJA NA ZAOSTALE NAPETOSTI V TANKIH PLO[^AH

INFLUENCE OF LASER SURFACE REMELTING CONDITIONS ON RESIDUAL STRESSES IN THIN PLATES

JANEZ GRUM, R. [TURM

Fakulteta za strojni[tvo, A[ker-eva 6, 1000 Ljubljana

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

Lasersko povr[insko pretaljevanje je eden izmed najboljih postopkov za modifikacijo povr[ine feritno-perlitne nodularne litine. Z njim je mo[no dose-i zelo visoko obrabno odpornost litega 'eleza, ki jo lahko primerjamo s povr[insko kaljenimi jekli. Lastnosti modificirane plasti so odvisne od mikrostrukture pred toplotno obdelavo in od koli-ine vnesene toplotne energije v povr[insko plast obdelovanca. Raziskovalno delo je usmerjeno na raziskavo zaostalih napetosti po laserskem povr[inskem pretaljevanju feritno-perlitne nodularne litine 500-7 (ISO). Ugotavljanje zaostalih napetosti je bilo izvedeno z relaksacijsko metodo, ki deluje po principu merjenja deformacij obdelovanca.

Klju-ne besede: lasersko povr[insko pretaljevanje, zaostale napetosti, nodularna litina, tanke plo[-e

Laser surface remelting is one of the best procedures for surface modification of ferrite-pearlite nodular irons. By this procedure it is possible to achieve a very high wear resistance of cast irons which can be compared with the wear resistance of surface hardened heat-treatable steels. The properties of the modified layer depend on the microstructure prior to heat treatment and on the amount of energy input transferred into the surface layer of the workpiece. The research work was focused on the study of residual stresses after laser surface remelting of ferrite-pearlite nodular iron 500-7 (ISO). The identification of residual stresses was performed using the relaxation method, which consisted in measuring workpiece deformation.

Key words: laser surface remelting, residual stresses, nodular iron, thin plates

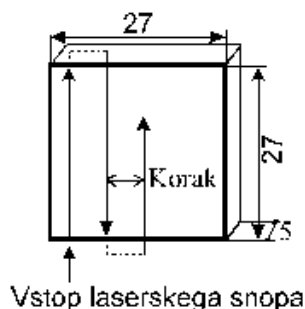
1 UVOD

Nodularna litina se veliko uporablja v in'enirski praksi zaradi nizke cene ter dobre livnosti in obdelovalnosti, zahtevane pri finalizaciji strojnih delov. Tem delom iz nodularne litine lahko z modifikacijo povr[ine s toplotno obdelavo bistveno izbolj[amo obrabno odpornost najbolj izpostavljenih delov¹⁻⁴. Zato smo raziskali u-inke toplotnega utrjevanja z laserskim pretaljevanjem tankih povr[inskih plasti. Z izbiro ustreznega energijskega vnosa dose'emo hitro lokalno segrevanje materiala preko temperature taljenja, kar po samoga[enju ustvari modificirano plast 'elene trdote in globine^{1,5}. Zahtevane hitrosti ohlajanja modificirane povr[inske plasti zlahka dose'emo z difuzijo toplote v preostali del hladne mase obdelovanca. Tako dobimo v pretaljeni povr[inski plasti fino-zrnato in zelo trdo ledeburitno mikrostrukturo. Lastnosti modificirane plasti so odvisne od mikrostrukture materiala pred toplotno obdelavo in od koli-ine vnesene energije v povr[ino obdelovanca⁶⁻⁸. Delo je osredoto-eno na raziskavo zaostalih napetosti po laserskem povr[inskem pretaljevanju tankih plo[- iz feritno-perlitne nodularne litine 500-7 (ISO).

2 EKSPERIMENTALNI POSTOPEK

Za lasersko povr[insko pretaljevanje smo uporabili CO₂-laser z Gaussovo porazdelitvijo energije in maksimalno mo-jo 1,5 kW, ki jo lahko zvezno reguliramo. Eks-

perimenti so bili izvedeni pri mo-i laserskega izvira 1 in 1,5 kW ter stopnji defokusiranja med 22 in 34 mm pri gori[-ni razdalji le-e 127 mm. Premer laserskega snopa D_b na povr[ini obdelovanca se je tako gibal med 3,3 in 5,1 mm. Hitrost pomika laserskega snopa v_b smo spreminjali v obmo-ju med 15 in 21 mm/s. Tako smo spreminjali koli-ino dovedene energije na povr[ino obdelovanca v obmo-ju med 14,4 in 16,3 J/mm². Pri tej dovedeni energiji je bila globina pretaljene plasti med 0,3 in 0,4 mm. Absorptivnost povr[ine materiala obdelovanca na lasersko svetlobo z valovno dol'ino $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ smo pove-ali s kemi-nim nanosom absorberja Zn-fosfata. Preskusi laserskega povr[inskega pretaljevanja so bili narejeni tako, da je bilo zagotovljeno 0%, 15%, 30% in 50% prekrivanje [irine pretaljenih sledi. S prekrivanjem le-teh dose'emo popolnoma pretaljeno plast z enakomerno globino po celotni povr[ini obdelovanca in 'eleno globino modificirane plasti. Dimenzije obdelovancev oziroma vzorcev, v na'em primeru so tanke plo[-e iz nodularne litine 500-7, so bile prilagojene izbranemu postopku laserskega pretaljevanja in zahtevam pri merjenju zaostalih napetosti (27 x 27 x 5 mm). **Slika 1** prikazuje na-in vodenja laserskega snopa po povr[ini vzorca in njegove dimenzije ter vstopno in izstopno mesto laserskega snopa na vzorcu. Koraki med posameznimi laserskimi sledmi so bili izbrani tako, da so zagotovili izbrano stopnjo prekrivanja.



Slika 1: Geometrija obdelovanca in na-in vodenja laserskega snopa
Figure 1: Workpiece geometry and the way of laser beam travel

3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Mikrostruktura

Mikrostrukturne spremembe pri laserskem površinskem pretaljevanju nodularne litine so odvisne od temperaturnih razmer med segrevanjem in ohlajanjem površinske plasti. V vseh primerih nastane modificirana površinska plast, ki je sestavljena iz dveh značilnih con, in sicer pretaljene in kaljene cone.

3.1.1 Pretaljena cona

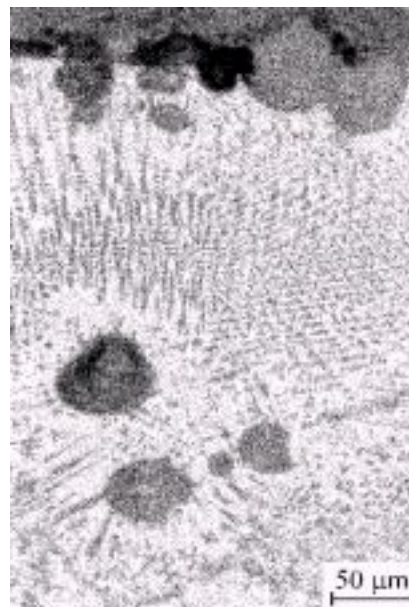
Na mikrostrukturne spremembe v pretaljeni površinski plasti v največji meri vplivajo ohlajevalne hitrosti in stopnja raztopitve grafitu v talini. Zaradi kratkega interakcijskega časa je raztapljanje grafitu v talini nepopolno. Nepopolno raztopljeni noduli grafitu so lahko pod vplivom vzgonskih in dinamičnih sil v bazenu taline potisnjeni celo na površino taline, kjer se lahko pod laserskim snopom uparijo ali pa jih curek zažigalnega plina celo odpihne. Zaradi tega je lahko vsebnost ogljika v talini manjša kot je povprečna vsebnost ogljika v litini. To pa vpliva na nastanek različnih mikrostruktur v pretaljeni plasti. Ugotovili smo, da pretaljeno plast sestavljajo dendriti avstenita s cementitom, nekaj martenzita in nepopolno raztopljeni noduli grafitu. Dendriti avstenita rastejo med hitrim strjevanjem taline v smeri proti površini, kar odgovarja smeri odvoda toplote pri ohlajanju vzorca (**slika 2**).

3.1.2 Kaljena cona

V kaljeni coni pride samo do transformacije v trdnem. Med segrevanjem se perlitni del matrice transformira v avstenit, ki se pri gaženju transformira v martenzit s prisotnim zaostalim avstenitom. Feritni del matrice pa po avstenitizaciji in gaženju ostane kot ferit.

3.2 Mikrotrdota

Z rezultati meritev mikrotrdote smo potrdili mikrostrukturne spremembe v materialu in pokazali, da je lasersko površinsko pretaljevanje uspešna metoda za utrjevanje površinske plasti. Trdota osnovnega materiala v mehkem stanju je bila med 200 in 250 HV_{0,1}, po laserski



Slika 2: Pretaljena cona, povečava 200x
Figure 2: Remelted zone, magnification 200x

obdelavi pa naraste na 800-950 HV_{0,1} v pretaljeni plasti in na 600-830 HV_{0,1} v martenzitni mikrostrukturi kaljene plasti.

3.3 Zaostale napetosti

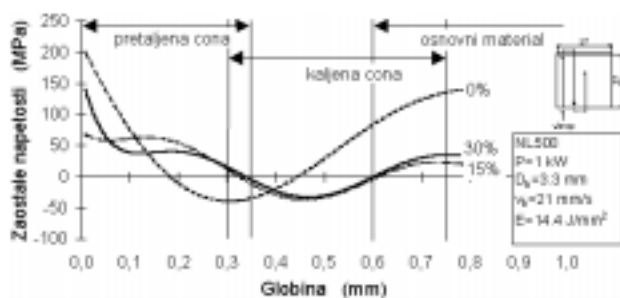
Poznanje napetostnega stanja v modificirani površinski plasti je zelo pomembno posebno v dinamično obremenjenih strojnih delih. Zaostale napetosti so zelo odvisne od razmer pri ohlajanju pretaljene plasti, kar vpliva na nastanek različnega volumskega deleža zaostalega avstenita, cementita in martenzita. Specifični volumni nastalih faz so v odvisnosti od količine ogljika podani v **tabeli 1**. Avstenit ima najmanjši specifični volumen. Zaradi tega vpliva količina zaostalega avstenita na velikost nateznih zaostalnih napetosti v pretaljeni plasti. Površina z nateznimi notranjimi napetostmi pa je občutljiva na nastanek in razvoj razpok, ki lahko pripeljejo do porušitve strojnega dela.

Tabela 1: Specifični volumni faz¹⁰

Table 1: Specific volume of constituents¹⁰

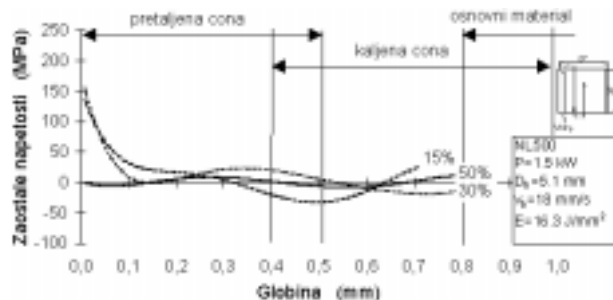
Faza	Specifični volumen (m ⁻¹⁰) ³
Avstenit	11.394 + 0.3155 C
Martenzit	11.775 + 0.370 C
Ferit + karbidi	11.786 + 0.163 C
Cementit	12.873

Segrevanje in ohlajanje v relativno tankih ploščah je zelo odvisno od moči in premera laserskega snopa na površini obdelovanca, interakcijskega časa in stopnje prekrivanja pretaljenih sledi. Na **slikah 3 in 4** lahko vidimo potek zaostalnih napetosti v globino modificirane



Slika 3: Zaostale napetosti pri razli-nih stopnjah prekrivanja pretaljenih sledi: $P = 1 \text{ kW}$, $D_b = 3,3 \text{ mm}$, $v_b = 21 \text{ mm/s}$, $E = 14,4 \text{ J/mm}^2$

Figure 3: Residual stresses at different degrees of overlapping of the remelted traces: $P = 1 \text{ kW}$, $D_b = 3,3 \text{ mm}$, $v_b = 21 \text{ mm/s}$, $E = 14,4 \text{ J/mm}^2$



Slika 4: Zaostale napetosti pri razli-nih stopnjah prekrivanja pretaljenih sledi: $P = 1,5 \text{ kW}$, $D_b = 5,1 \text{ mm}$, $v_b = 18 \text{ mm/s}$, $E = 16,3 \text{ J/mm}^2$

Figure 4: Residual stresses at different degrees of overlapping of the remelted traces: $P = 1,5 \text{ kW}$, $D_b = 5,1 \text{ mm}$, $v_b = 18 \text{ mm/s}$, $E = 16,3 \text{ J/mm}^2$

plasti kot funkcijo razli-nih parametrov laserske obdelave. Iz rezultatov na **sliki 3** lahko sklenemo naslednje:

- pri mo-i laserskega snopa $P = 1 \text{ kW}$ in premeru $D_b = 3,3 \text{ mm}$ ter hitrosti pomika $v_b = 21 \text{ mm/s}$ dobimo pri razli-nih stopnjah prekrivanja pretaljenih sledi zelo podobne poteke zaostalih napetosti. V povr[inski pretaljeni plasti so zaostale napetosti nateznega zna-aja in se s pove-evanjem stopnje prekrivanja le malo zni'ajo, in sicer iz obmo-ja 200 MPa v obmo-je med 100 in 150 MPa.
- sprememba nateznih zaostalih napetosti v tla-ne se zgodi na prehodu iz pretaljene v kaljeno cono. Maksimalne tla-ne zaostale napetosti se pojavijo na sredini kaljene plasti in so med 30 in 50 MPa.

S pove-evanjem mo-i laserskega snopa ($P = 1,5 \text{ kW}$) in njegovega premera ($D_b = 5,1 \text{ mm}$) in s tem tudi koli-ine dovedene energije $E = 16,3 \text{ J/mm}^2$ dose'emo v tankih plo[ah ve-je predgrevanje. To ima za posledico ni'je ohlajevalne hitrosti. V teh temperaturnih razmerah pa pridejo zaradi prekrivanja pretaljenih sledi do ve-jega izraza popustni efekti. Pri 50% prekrivanju pretaljenih sledi ima za posledico nastanek take mikrostrukture, ki skoraj nima zaostalih napetosti (**slika 4**).

Z difrakcijo X-'arkov smo analizirali koli-ino faz v pretaljeni plasti. V **tabeli 2** so prikazani rezultati izmerjenih dele'ev faz v pretaljeni plasti pri razli-nih razmerah laserske obdelave in pri razli-nih stopnjah prekrivanja pretaljenih sledi.

Tabela 2: Faz v pretaljeni plasti v vol.%

Table 2: Constituents of the remelted layer in vol.%

Obdelovalne razmere	Prekrivanje	Avstenit C_γ	Martenzit $C_{\alpha'}$	Cementit Fe_3C	Grafit
$P = 1 \text{ kW}$ $D_b = 3,3 \text{ mm}$	0%	28%	33%	34%	5%
$P = 1,5 \text{ kW}$ $D_b = 5,1 \text{ mm}$	50%	/	55%	42%	3%

Iz rezultatov v **tabeli 2** in na **slikah 3 in 4** lahko sklenemo, da so pri izostanku zaostalega avstenita v mikrostrukтури pretaljene plasti natezne zaostale napetosti

minimalne. Ve-ja je koli-ina martenzita v pretaljeni plasti, ni'je so natezne zaostale napetosti.

4 SKLEPI

Na osnovi rezultatov mikrostrukturne analize in meritev mikrotrdote lahko sklenemo, da je lasersko povr[insko pretaljevanje nodularne litine s feritno-perlitno matrico zelo uspe[no pri pove-evanju trdote povr[inske plasti. Tako modificirana povr[inska plast pridobi ve-jo obrabno odpornost. Lasersko povr[insko pretaljevanje zagotovi dovolj veliko debelino modificirane plasti z 'elenimi mikrostrukturnimi spremembami in zelo ugodnim profilom mikrotrdote. Po laserskem povr[inskem pretaljevanju ka'ejo izmerjene vrednosti zaostalih napetosti podoben potek v globino, in sicer natezne v pretaljeni plasti in tla-ne v kaljeni. Pri ve-jih vnosih energije, ki jih lahko dose'emo z ve-jo mo-jo izvira in s pove-evanjem premera laserskega snopa na povr[ini vzorca, dobimo izrazitejše pregrevanje v materialu vzorca, kar vpliva na zmanj[evanje hitrosti ohlajanja. To ima za posledico nastanek martenzitno-ledeburitne mikrostrukture v pretaljeni plasti. Posledica izbire tak[nih obdelovalnih razmer, ki pove-ujejo pregrevanje vzorca, je zmanj[anje dele'a zaostalega avstenita v mikrostrukтури, kar daje minimalne natezne zaostale napetosti. Torej se pri laserskem povr[inskem pretaljevanju tankih plo[iz feritno-perlitne nodularne litine 500-7 lahko izognemo nateznim zaostalim napetostim, -e izberemo take parametre laserske obdelave, ki ustvarijo dovolj veliko pregretje. To zagotovi zni'anje ohlajevalnih hitrosti in s tem najprej pri vi[ji temperaturi nastanek manjše koli-ine zaostalega avstenita v ledeburitni mikrostrukтури. Drugi vpliv je popu[anje modificirane plasti zaradi pregrevanja, povzro-enege s prekrivanjem sledi. Pri dovolj veliki stopnji prekrivanja pretaljenih sledi nam popustni efekti zagotovijo transformacijo zaostalega avstenita v martenzit in popu[anje 'e prisotnega martenzita, kar se zaradi pove-anja volumna martenzita proti avstenitu izra'a v zni'anju nateznih mikrostrukturnih napetosti.

5 LITERATURA

- ¹ F. H. Reinke, Local Electric Arc Remelting Process for the Generation of Wear - Resistant White Iron Layer on Workpieces of Grey Cast Iron, Especially Camshafts and Cam Followers, AEG Elotherm, Remscheid, 1983
- ² H. W. Bergmann, D. Müller, T. Endres, R. Damascheck, J. Domes, A. S. Bransden, Industrial Applications of Surface Treatments with High Power Lasers, *Materials Science Forum*, 163-165 (1994) 377-404
- ³ H. W. Bergman, Current Status of Laser Surface Melting of Cast Iron, *Surface Engineering*, 1 (1985) 2, 137-155
- 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 R. Vilar, F. J. Solgado, Figuira, R. Sabino, Laser Surface Melting of Cast Iron, *Eclat'90, Surface Treatments - Liquid State*, 1990, 593-604
- ⁶ D. L. Gravey, L. Maiffredy, A. B. Vannes, A Simple Way to Estimate the Level of the Residual Stresses after Laser Hardening, *Journal of Mechanical Working Technology*, 16 (1988) 65-78
- ⁷ J. Grum, R. [turm, Characteristics of Laser Surface Melt-Hardening and Possibilities of Optimizing the Process, *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Quenching and The Control of Distortion*, Cleveland Marriot Society Center, Cleveland, Ohio, USA, 1996, 193-200
- ⁸ J. Grum, R. [turm, P. @erovnik, Measurement and Analysis of Residual Stresses After Laser Hardening and Laser Surface Melt-Hardening on Flat Specimens, *Proceedings of the 2nd Int. Conf. on Quenching and The Control of Distortion*, Cleveland Marriot Society Center, Cleveland, Ohio, USA, 1996, 181-191
- ⁹ J. Grum, R. [turm, Laser Surface Melt-Hardening of Gray and Nodular Iron. Proc. of the Int. Conference Laser Material Processing, Opatija, Croatia, 1995, 165-172
- ¹⁰ K. H. Jack, Carbides and Nitrides in Steel; *Materials Science and Engineering*, 11 (1973) 1-27