

Vpliv kemijske sestave jekel na lasersko toplotno obdelavo

Influence of Steel Chemical Composition on the Laser Heat Treatment

S. Spruk¹, ITPO Ljubljana
A. Rodič, IMT, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-10-22

Pri laserski toplotni obdelavi dosežemo visoke temperature v izredno kratkem času. Karakteristične temperature premen pri jeklih so odvisne od kemijske sestave, hitrosti ogrevanja ter hitrosti ohlajanja. Študirali smo vpliv parametrov toplotne obdelave in kemijske sestave jekel na mikrostrukturo in trdoto jekel po laserski toplotni obdelavi. Za preiskave smo uporabili tri različna jekla: nizkoogljikovo ogljikovo jeklo CK 15, srednjeogljikovo ogljikovo jeklo CK 45 in orodno visokoogljikovo kromovo jeklo OCR 12. Ta jekla imajo različna temperaturna območja premen α v γ ter različna območja raztaljevanja. Za poskuse smo uporabili laserski varilnik Nd-steklo z močjo 150 W.

Ključne besede: laser, toplotna obdelava, kemijska sestava, mikrostruktura, jeklo

At the laser heat treatment high temperatures are attained in a very short time. Characteristic temperatures of steel transformation are dependent on chemical composition, heating and cooling processes. The influence of heat treatment parameters and chemical composition of steels on microstructure and steel hardness, after laser heat treatment was studied. Three different steels were applied for the investigation: low carbon steel CK 15, medium carbon steel CK 45, and high carbon tool steel OCR 12. The steels have different transformation temperatures of α to γ and different melting range. The Nd-glass laser was applied for the investigation.

Key words: laser, heat treatment, chemical composition, microstructure, steel

1 Uvod

V zadnjih desetletjih se pri izdelavi orodnih jekel posveča posebno pozornost izotropnosti materiala, zato so se v svetu uveljavili postopki, ki zagotavljajo večjo homogenost oz. izotropnost jekel. To so postopki prašnate metalurgije, postopek EPŽ (električno pretaljevanje pod žlindro) in postopki termične obdelave, ki z difuzijo povečajo izotropnost materiala. Ena takih metod je toplotna obdelava z laserskim žarkom. Laserska tehnologija ima pred dosedaj poznanimi konvencionalnimi tehnologijami številne prednosti, zato je vedno bolj zastopana v praksi¹⁻⁵. Predvsem je zanimiva laserska toplotna obdelava jekel zaradi dobre kombinacije žilavega jedra in trde finostrukturne površinske plasti, ki poveča obrabno odpornost materiala. Pri laserski toplotni obdelavi namreč nastane sprememba mikrostrukture na površini vzorca, ki ga obdelujemo. Pri ledeburitnem tipu jekel s to vrsto toplotne obdelave lahko spremenimo velikost in razporeditev karbidov. Trenutno laserski varilniki še niso posebno uporabni v primerih, ko želimo doseči večje globine površinsko obdelane plasti. Globine, ki jih lahko dosežemo z lasersko toplotno obdelavo, so reda velikosti od nekaj μm do približno 1 mm.

Mikrostruktura utrjene plasti je odvisna od temperaturnega gradienta, določenega z gostoto moči na enoto površine in toplotnimi lastnostmi materiala, ki ga obdelujemo. Prav tako je odvisna tudi od hitrosti segrevanja

in ohlajanja, kontroliranega z interakcijskim časom t , ki je funkcija hitrosti pomikanja laserskega žarka ali obdelovanca⁶. Mikrostrukturo lahko spreminjamo od strjevalne kaljene do kaljene iz vmesnega področja med A_{c1} in A_{c3} . V nekaterih primerih ima površinska raztaljena in ponovno strjena plast višjo trdoto kot plast, ležeča pod njo, ki je mehkejša, toplotno vplivano področje⁷. Zadovoljivo toplotno obdelavo površine celega vzorca dobimo s prekrivanjem laserskih sledi.

Cilj našega dela je bil raziskati vpliv različnih parametrov toplotne obdelave ter različne kemijske sestave jekel na mikrostrukturo, trdoto in velikost cone, povzročene z lasersko toplotno obdelavo.

2 Eksperimentalno delo

Za preiskave smo uporabili vzorce nizkoogljikovega ogljikovega jekla CK 15, srednjeogljikovega ogljikovega jekla CK 45 ter orodnega visokoogljikovega kromovega jekla OCR 12. Proizvajalec jekel je Metal Ravne. Kemijska sestava je podana v tabeli 1.

Tabela 1: Kemijska sestava jekel CK 15, CK 45 in OCR 12, vsebnost posameznih elementov je v masnih %

Jeklo	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	S (%)	P (%)
CK 15	0.163	0.274	0.488	0.25	0.019	0.021
CK 45	0.46	0.22	0.57	0.19	0.016	
OCR 12	2.1	0.3	0.3	12.0		

Proces toplotne obdelave smo izvedli z laserskim varilnikom proizvajalca J. K. Lasers, z lasersko palico Nd-

¹ Mag. Sonja SPRUK
Inštitut za tehnologijo površin in optoelektroniko
1000 Ljubljana, Teslova 30

steklo. Vzorce jekel CK 15, CK 45 in OCR 12 smo izpostavili laserskemu žarku s frekvenco 15 Hz, dolžina pulza je bila 15 ms, hitrost pomikanja vzorcev 5 mm/s. Žarišče laserskega žarka se je najprej nahajalo na površini vzorca, nato smo z mikrometrskim vijakom premaknili lečje po optični osi navzdol ter tako prestavili žarišče 5 oz. 7 mm v globino vzorca. S tem smo spremenjali gostoto moči na enoto površine. Po toplotni obde-

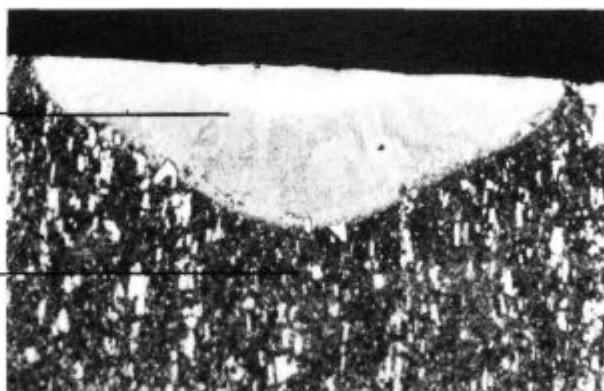
lavi smo vzorce prečno prerezali in izdelali metalografske obruse, ki smo jih jedkali z nitalom in zlatotopko. Spremembe v mikrostrukturi, povzročene z lasersko toplotno obdelavo, smo preiskovali z optično in SEM mikroskopijo. Trdoto smo merili na neizpostavljenih in laserskemu snopu izpostavljenih vzorcih s 100 g obtežbo po Vickersu.

med lasersko toplotno obdelavo

po ohlajanju

v področju kapljevine

v področju γ



zaostali avstenit+
martenzit+
evtektski karbidi

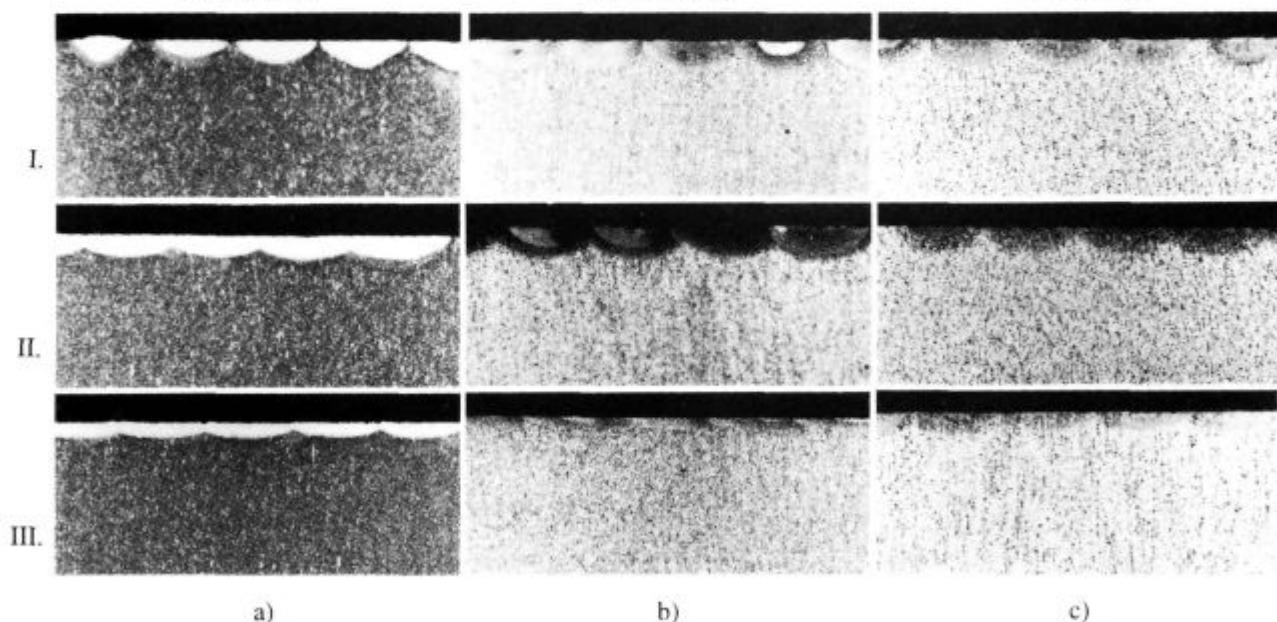
martenzit+
karbidi

Slika 1: Mikrostruktura jekla OCR 12 po laserski toplotni obdelavi, jedkano z zlatotopko, 150x
Figure 1: Microstructure of the OCR 12 steel after laser heat treatment, etched by aqua regia, 150x

jeklo OCR 12
 $T_1 = 1382\text{ }^\circ\text{C}$
 $T_s = 1230\text{ }^\circ\text{C}$

jeklo CK 45
 $T_1 = 1508\text{ }^\circ\text{C}$
 $T_s = 1467\text{ }^\circ\text{C}$

jeklo CK 15
 $T_1 = 1522\text{ }^\circ\text{C}$
 $T_s = 1491\text{ }^\circ\text{C}$



Slika 2: Vpliv parametrov toplotne obdelave in različne kemijske sestave jekel OCR 12, CK 45 in CK 15 na mikrostrukturo in velikost cone, povzročene z lasersko toplotno obdelavo.

I. žarišče laserskega žarka na površini vzorca, II. žarišče laserskega žarka 5 mm pod površino vzorca, III. žarišče laserskega žarka 7 mm pod površino vzorca

Figure 2: The influence of heat treatment parameters and different chemical composition of OCR 12, CK 45 and CK 15 steels on the microstructure and zone size, induced by heat treatment.

I. laser beam focus on the sample surface, II. laser beam focus 5 mm below the surface, III. laser beam focus 7 mm below the surface

3 Rezultati

3.1 OCR 12

Jeklo se je pod vplivom laserskega žarka raztalilo, nastala je homogena talina, ki se je ponovno strdila. Plast s strjevalno mikrostrukturo je pri sobni temperaturi sestavljena iz martenzita, eutektskih karbidov in zaostalega avstenita. Dendritna mikrostruktura je zaradi hitrega taljenja in strjevanja izredno fina, razdalje med sekundarnimi dendritnimi vejami so velikostnega reda $1 \mu\text{m}^7$. Karbidi po obliki prehajajo iz ostrorobih v zaobljene, kar je posledica raztapljanja. Pod talilno cono je cona toplotnega vpliva, katere mikrostruktura je po ohlajanju sestavljena iz karbidov in martenzita (slika 1).

Iz slike 2a je razvidno, da prihaja zaradi predgrevanja materiala do poglobljanja in širjenja predvsem talilne cone, manj pa cone toplotnega vpliva. Ta pojav je najbolj očiten v primeru, ko je žarišče laserskega žarka na površini obdelovanega vzorca. Razdalja med prvo in drugo lasersko sledjo je precej velika, potem pa se manjša, dokler se laserske sledi med seboj ne zlijejo. Če laserski žarek defokusiramo, tako da premaknemo žarišče v globino 5 oz. 7 mm, dobimo na površini snop z večjim premerom, tako da se že začetne laserske sledi v obeh primerih stikajo. Z merjenjem globine smo ugotovili večanje talilne cone. Iz rezultatov lahko ugotovimo, da se velikost talilne in toplotno vplivane cone spreminja tudi s spreminjanjem gostote moči na enoto površine. Bolj ko je snop defokusiran, manj globoka je talilna cona (od 100 do $170 \mu\text{m}$), medtem ko ostaja globina toplotno vplivane cone približno konstantna ($110 \mu\text{m}$). To smo opazili tudi pri lasersko toplotno obdelanih jeklih CK 15 in CK 45. V conah, ki so bile pod vplivom laserske toplotne obdelave, smo izmerili mikrotrdoto po Vickersu. Ta je v talilni coni približno 520 HV 0,1, v coni toplotnega vpliva pa okoli 570 HV 0,1. Mesto pre-

hoda iz talilne v toplotno vplivano cono ima najvišjo trdoto, in sicer okoli 730 HV 0,1.

3.2 CK 45

Pri izbranih parametrih laserske toplotne obdelave se je jeklo raztalilo. Talina se je ponovno strdila, nastale so tri ločene cone (slika 3). V prvi opazimo samo martenzit. V drugi, toplotno vplivani coni je v mikrostrukturi martenzit in bainit. Tretja cona je sestavljena iz netransformiranega ferita, martenzita in nekaj malega bainita. V primeru, ko je fokus laserskega žarka na površini vzorca, se prve laserske sledi med seboj ne stikajo, nadaljne sledi pa se zaradi predgrevanja pričnejo prekrivati. Vzrok za to je v poglobljanju in širjenju talilne cone. To je manj očitno v primeru, ko je fokus 5 ali 7 mm pod površino vzorca, kajti zaradi širšega žarka se prekrivanje laserskih sledi pojavi že na začetku toplotne obdelave (slika 2b). Opazimo, da se talilna cona tako po širini kot tudi po globini močno razlikuje od tiste pri toplotno obdelanem visokooogljičnem kromovem jeklu OCR 12, kjer je bila le-ta precej večja. To lahko pripišemo strjevalnemu intervalu, ki je pri jeklu OCR 12 pri nižjih temperaturah kot pri CK 45 in CK 15. Po podatkih iz literature imajo ta jekla naslednje temperature⁸:

OCR 12 ima $T_1 = 1382^\circ\text{C}$ in $T_s = 1230^\circ\text{C}$

CK 45 ima $T_1 = 1508^\circ\text{C}$ in $T_s = 1467^\circ\text{C}$

CK 15 ima $T_1 = 1522^\circ\text{C}$ in $T_s = 1491^\circ\text{C}$

3.3 CK 15

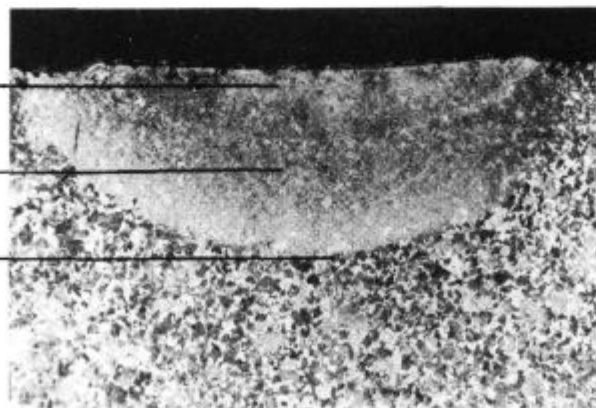
S slike 2c je razvidno, da se je pri vseh treh različnih parametrih laserske toplotne obdelave jeklo CK 15 raztalilo, nastale so tri, med seboj ločene cone. Prva, talilna, je po ohlajanju sestavljena iz martenzita in spodnjega bainita. Naslednja, ki jo opazimo, je cona toplotnega vpliva. V mikrostrukturi opazimo na mestih perlitnih zrn martenzit, v okolici pa je spodnji in zgornji bainit ter ferit. Avstenit ob času laserske toplotne obde-

med lasersko toplotno
obdelavo

v področju kapljevine

v področju γ

v vmesnem področju
med A_{c1} in A_{c3}



po ohlajanju

martenzit

martenzit+bainit

netransformirani
ferit+martenzit+
bainit

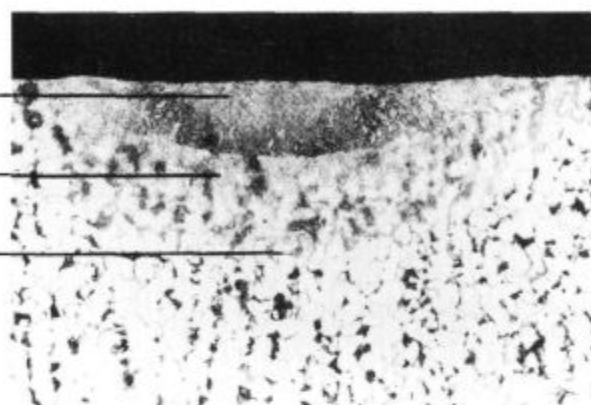
Slika 3: Mikrostruktura jekla CK 45 po laserski toplotni obdelavi, jedkano z nitalom, 150x
Figure 3: Microstructure of the CK 45 steel after laser heat treatment, etched with nital, 150x

med lasersko toplotno
obdelavo

v področju kapljavine

v področju γ

v vmesnem področju
med A_{c1} in A_{c3}



po ohlajanju

martenzit+bainit

martenzit+bainit+
ferit

bainitno martenzitna
zrna+ferit

Slika 4: Mikrostruktura jekla CK 15 po laserski toplotni obdelavi, jedkano z nitalom, 150x
Figure 4: Microstructure of the CK 15 steel after laser heat treatment, etched with nital, 150x

lave ni bil homogen, kjub temu da so bile temperature izredno visoke. Predpostavljamo, da je bil čas toplotne obdelave prekratek. Točka A_{c3} se pri kratkih časih ogrevanja pomakne k višjim temperaturam, kar je razvidno s **slike 5**⁹. Zrna so majhna (velikost zrna 9 po primerjalni tabeli ASTM), ker zaradi kratkih časov pri visokih tem-

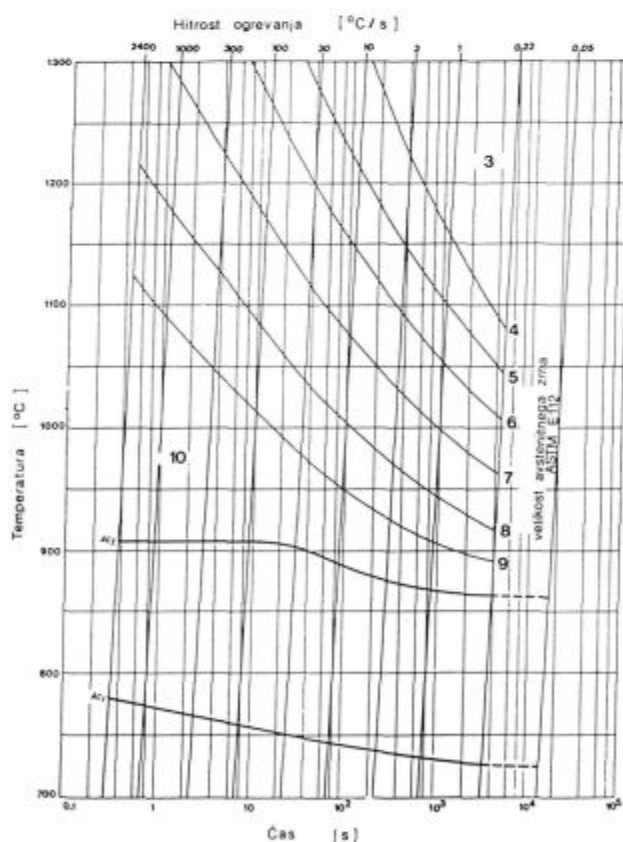
peraturah nimajo časa zrasti. Na **sliki 4** opazimo še eno cono, sestavljeno iz bainitno martenzitivnih zrn v perlitnih zrnih ter ferita. Sledi osnovna mikrostruktura, ki je sestavljena iz ferita in perlita. V primeru, ko je žarišče laserskega žarka na površini vzorca ali 5 mm pod njo, ne pride do prekrivanja laserskih sledi. Če pa je žarišče laserskega žarka 7 mm pod površino vzorca se laserske sledi dotikajo med seboj in globina talilne cone rahlo narašča. Velikost talilne cone je še manjša kot pri toplotno obdelanem jeklu CK 45, kar je razumljivo glede na kemijsko sestavo jekla CK 15.

Iz rezultatov merjenja mikrotrdote lahko ugotovimo, da se izmerjene trdote v talilni coni gibljejo od 360 do 390 HV 0,1, v toplotno vplivani coni pa so približno 360 HV 0,1. Tudi pri tem jeklu smo najvišjo trdoto izmerili na mestu prehoda iz talilne v toplotno vplivano cono.

4 Sklepi

S pomočjo pulzirajočega laserskega varilnika z lasersko palico Nd-steklo smo preiskali vpliv različnih parametrov toplotne obdelave in kemijske sestave jekel na mikrostrukturo, trdoto in velikost cone, povzročene z lasersko toplotno obdelavo jekel OCR 12, CK 45 in CK 15. Na podlagi dobljenih rezultatov lahko sklenemo naslednje:

- Kot rezultat laserske toplotne obdelave dobimo fino-zrnato površinsko plast, ki je sestavljena iz dveh con, talilne in toplotno vplivane cone.
- Z zmanjševanjem gostote moči na enoto površine se manjša globina talilne cone, medtem ko ostaja globina toplotno vplivane cone približno konstantna.
- Prekrivanje laserskih sledi povzroči predgrevanje materiala in s tem poglobljanje in širjenje cone, povzročene z lasersko toplotno obdelavo.
- Na velikost talilne in toplotno vplivane cone vpliva kemijska sestava jekla. Višji procent ogljika povzroči globljo talilno cono.



Slika 5: Velikost avstenitnega zrna v odvisnosti od časa in temperature toplotne obdelave

Figure 5: Austenite grain size in dependence of time and temperature of the heat treatment

Zahvala

Delo je finančno podprlo Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije, Ljubljana, projekt J2-7641-1536.

5 Literatura

- ¹ S. Mandziej, M. C. Seegers, J. Godijk, *Materials Science and Technology*, 5, 1989, 350-355
- ² M. Hino, M. Hiramatsu, K. Akiyama, H. Kawasaki, M. Tsujikawa, M. Kawamoto, *Proceedings of the 5th World Seminar on Heat Treatment and Surface Engineering IFHT '95*, Isfahan, Iran, 1995, 529-534

- ³ L. J. Yang, S. Jana, S. C. Tam, *Journal of Materials Processing Technology*, 21, 1990, 119-130
- ⁴ P. Oakley, *Proceedings of the International Conference Laser Material Processing*, Opatija, 1995, 143-154
- ⁵ A. Shachrai, E. Secemski, *Engineering Lasers*, 1992, 6-8
- ⁶ J. M. Pelletier, P. Sallamand, S. Asika, *Proceedings of the 5th World Seminar on Heat Treatment and Surface Engineering, IFHT '95*, Isfahan, Iran, 1995, 523-528
- ⁷ S. Spruk, B. Praček, A. Rodič, *Kovine, Zlitine, Tehnologije*, 30, 1996, 1-2, 143-146
- ⁸ Interna dokumentacija Metal Ravne
- ⁹ J. Orlich, A. Rose, P. Wiest, *Atlas zur Wärmebehandlung der Stahl*, Verlag Stahleisen M.B.H. Dusseldorf, 1973, 34