

DEFORMACIJA VZORCA MED LASERSKIM POVRŠINSKIM PRETALJEVANJEM

DEFORMATION OF SPECIMEN DURING LASER SURFACE REMELTING

Roman Šturm¹, Janez Grum²

¹ Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija

² Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija
roman.sturm@imt.si

Prejem rokopisa - received: 2001-09-17; sprejem za objavo - accepted for publication: 2001-10-25

Med laserskim površinskim pretaljevanjem nastaja toplotno raztezanje materiala pri segrevanju in krčenje pri ohlajanju, kar v povezavi z nastalimi mikrostrukturnimi spremembami v segreti površinski plasti povzroči deformacijo vzorca. Nanjo vplivajo nastale volumske spremembe v materialu med pretaljevanjem tanke površinske plasti, ki povzročijo tudi nastanek notranjih napetosti. Z merjenjem deformacije vzorca med laserskim površinskim pretaljevanjem, kot tudi po interakciji laserskega snopa do ohladitve vzorca na temperaturo okolice, je možno spremljati nastanek in napredovanje deformacije v materialu vzorca. Ugotovljeno je bilo, da informacije o časovno odvisnih spremembah deformacije vzorca prispevajo k boljšemu poznanju razmer med laserskim pretaljevanjem in s tem k boljšemu optimiranju procesa. S kontinuirnim merjenjem deformacije med laserskim pretaljevanjem je bilo dokazano, da ima smer vodenja laserskega snopa po vzorcu velik vpliv na nastanek in velikost deformacije ter povzroči različno ukrivljenost vzorca po ohlajanju na temperaturo okolice.

Ključne besede: lasersko površinsko pretaljevanje, nodularna litina, deformacija

During laser surface remelting, thermal expansion in heating, and contraction of material in cooling, and due to microstructure changes in the heated surface layer, the specimen deforms. This induces volume changes in the material during the process of remelting the thin surface layer and causes internal stresses. By measuring the deformation of the specimen during the remelting process as well as after the laser beam interaction, i.e. to the moment when the specimen cools down to the ambient temperature, it is possible to follow the progress of deformation in the specimen material. It has been found that the information about time-dependent changes in specimen deformation contributes to better knowledge of the conditions during laser remelting and thus better optimization of the process. By continuous measurements of deformation during the laser remelting process, it has been proved that the direction of laser remelting has a considerable influence on the occurrence and size of deformation and results in different degrees of curvature of the specimen on completion of cooling.

Keywords: laser surface remelting, nodular iron, deformation

1 UVOD

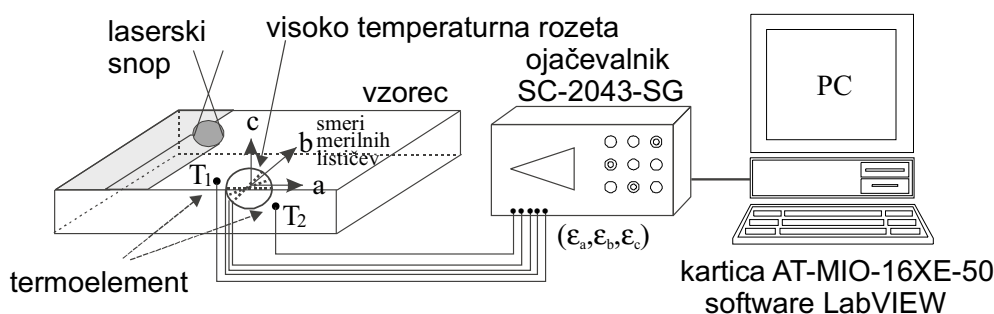
Med laserskim pretaljevanjem površine nastajajo zaradi temperaturnega raztezanja in krčenja materiala in mikrostrukturnih sprememb v površinski plasti deformacije vzorca^{1,2}. Temperaturno raztezanje in krčenje materiala ter nastale mikrostrukturne spremembe med pretaljevanjem tanke površinske plasti povzročijo nastanek zaostalih notranjih napetosti. Z metodo merjenja deformacije vzorca z merilnimi lističi lahko spremljamo spreminjanje deformacije vzorca med samim pretaljevanjem površine, kot tudi po prenehanju delovanja laserskega snopa.

Različne obdelovalne razmere pri laserskem pretaljevanju tanke površinske plasti vplivajo na nastanek različnih deformacijskih stanj vzorca. Različni načini vodenja laserskega snopa po površini vzorca povzročijo razlike v lokalni temperaturi materiala vzorca. S spreminjanjem stopnje prekrivanja pretaljenih sledi vplivamo na velikost predgretja materiala pred segrevanjem/pretaljevanjem z naslednjo sledjo laserskega snopa in na velikost popuščenja napetosti v predhodno pretaljeni plasti³⁻⁶. Prav tako pri laserskem pretaljevanju tanke površinske plasti naraste temperatura celotnega vzorca,

kar povzroča zniževanje napetosti tečenja materiala⁷. Zaradi zmanjšane napetosti tečenja materiala in nastanka notranjih napetosti v materialu med lasersko obdelavo se spreminja ukrivljenost vzorca. Postopno pretaljevanje povzroči spremembe v temperaturi vzorca, kar vpliva na različne ohlajevalne hitrosti pretaljenih sledi oziroma modificiranih površin^{8,9}. Različne ohlajevalne hitrosti v pretaljenih sledih pri posameznih vzorcih vodijo do nastanka različnih deležev posameznih faz v pretaljeni mikrostrukturi in v tej zvezi do različnih deformacij vzorca ter zaostalih napetosti v modificirani površinski plasti.

2 EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Na **sliki 1** je prikazan eksperimentalni sistem za sprotno merjenje deformacij in temperature tankega ploščatega vzorca med postopnim laserskim pretaljevanjem površine. Na spodnjo stran vzorca smo namestili tri-krako 45-stopinjsko visokotemperaturno samokompensacijsko uporovno merilno rozeto z oznako KFU-5-120-D17-11 podjetja Kyowa in dva termoelementa razreda K. Temperaturno območje merjenja



Slika 1: Eksperimentalni sistem za merjenje deformacij in temperature tankega ploščatega vzorca med laserskim pretaljevanjem površine
Figure 1: Experimental system for measuring the temperatures and deformation of the specimen during the process of laser surface remelting

uporabljene visoko-temperaturne uporovne merilne rozete je med $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ in $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Lasersko površinsko pretaljevanje povzroči intenzivno segrevanje tanke površinske plasti, kar pa zaradi prevajanja toplote povzroča segrevanje celotnega vzorca. Nastalo temperaturno polje v vzorcu in sočasne mikrostrukturne spremembe v površinski modificirani plasti povzročajo deformacijo vzorca. Z uporovno merilno rozeto smo merili relativne deformacije vzorca v treh smereh, in sicer v prečni smeri (ϵ_c), vzdolžni smeri (ϵ_a) in 45° na vzdolžno smer vzorca (ϵ_b) (slika 1). Termoelementa, ki sta bila pritrjena v vzdolžni smeri vzorca na levi in desni strani poleg visokotemperaturne uporovne merilne rozete, nam sprotno zapisujeta temperaturo in s tem določata temperaturne cikle spodnje strani materiala vzorca. Taka postavitev eksperimentalnega sistema nam omogoča sprotno in tudi končno ugotavljanje deformacijskega stanja vzorca in njegove temperature med laserskim pretaljevanjem površine kot

tudi kasneje pri ohlajanju vzorca do temperature okolice. Meritve deformacije vzorca so bile narejene na perlitno-feritni nodularni litini 500-7 (ISO). Ta litina je zelo primerna za površinsko utrjevanje z laserskim pretaljevanjem.

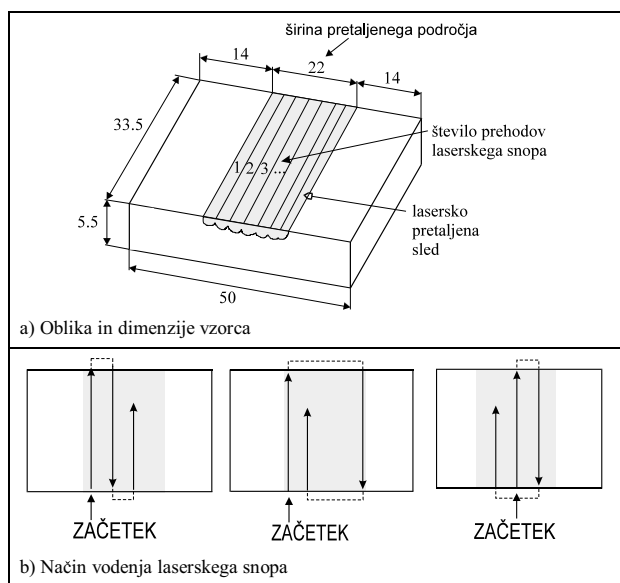
Na sliki 2a so prikazane dimenzije ploščatega vzorca, na katerem smo med laserskim pretaljevanjem površine merili deformacijo in lokalno spreminjanje temperature. Na vzorcu je označena širina celotnega pretaljenega področja, ki je bila omejena z vnosom toplote oziroma z doseženo kritično temperaturo na spodnji strani vzorca, kjer je bila pritrjena uporovna merilna rozeta. Celotno širino pretaljenega področja smo dosegli z različnimi načini gibanja laserskega snopa po površini ploščatega vzorca (slika 2b). Pri tem se je laserski snop pri vsakem prehodu preko površine ploščatega vzorca obrnil 5 mm iz vzorca. Z obračanjem laserskega snopa iz vzorca smo zmanjšali nezaželeno prekomerno segrevanje robov vzorca oziroma njihovo poškodbo.

Parametri laserske obdelave so bili naslednji: moč CO_2 -laserja $P = 1\text{ kW}$, defokus $z_s = 22\text{ mm}$, premer laserskega snopa na površini vzorca $D_b = 3,3\text{ mm}$, hitrost pomika laserskega snopa $v_b = 21\text{ mm/s}$, s čimer smo zagotovili vnos laserske energije na površino vzorca $E = 14,4\text{ J/mm}^2$. Lasersko pretaljene sledi so se dotikale ena druge, torej ni bilo prekrivanja (0%). Vodenje laserskega snopa po površini vzorca brez prekrivanja pretaljenih sledi je bilo narejeno na osnovi meritev širine enojne lasersko pretaljene sledi. Površina obdelovancev je bila kemično obdelana v Zn-fosfatni kopeli, s čimer smo povečali absorptivnost za lasersko svetlobo CO_2 -laserja s $5\text{--}10\%$ na ocenjenih $80\text{--}90\%$.

3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Analiza mikrostrukture in mikrotrdote

V primeru laserskega površinskega pretaljevanja perlitno-feritne nodularne litine 500-7 (ISO) dobimo modificirano površinsko plast debeline do 1 mm , ki jo sestavljata karakteristični plasti in sicer pretaljena in kaljena plast. Z difrakcijo rentgenskih žarkov in z optično mikroskopijo^{1,2} je bilo ugotovljeno, da pretalje-



Slika 2: Izmerje ploščatega vzorca in področje laserskega pretaljevanja površine na vzorcu (a) in načini vodenja laserskega snopa po površini vzorca (b)

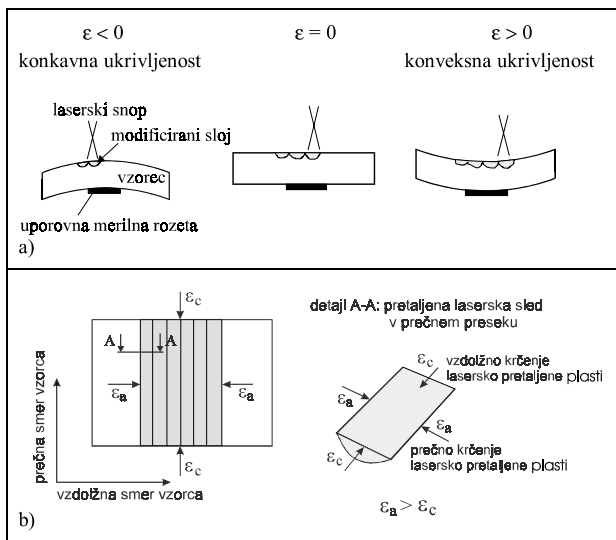
Figure 2: The specimen dimensions and laser surface remelted area (a) and modes of laser beam travel across the specimen surface (b)

no plast sestavljajo dendriti avstenita in ledeburita, martenzit in neraztopljeni noduli grafita. V kaljeni plasti pa dobimo martenzit z zaostalim avstenitom, ferit in nodule grafita.

Mikrotrdota kovinske osnove litine (perlit) je med 200 in 250 HV_{0,1}. Po laserskem površinskem pretaljevanju trdota naraste na 800 - 950 HV_{0,1} v pretaljeni plasti in na 600 - 830 HV_{0,1} v kaljeni.

3.2 Rezultati sprotnega merjenja deformacije vzorca

Med laserskim pretaljevanjem površine se pri segrevanju material vzorca razteza v odvisnosti od temperature. Poleg temperaturnega raztezanja materiala prihaja do pretaljevanja materiala v površinski plasti in do fazne transformacije ferit/perlit v avstenit v plasti pod pretaljeno površinsko. Sledi ohlajanje in nastanek površinske modificirane plasti. Pri ohlajanju poteka poleg krčenja materiala zaradi zniževanja temperature tudi strjevanje taline površinske plasti. Zaradi raztopitve nodulov grafita v talini in transformacije ferita v avstenit se volumen pretaljene in potem strjene površinske plasti zmanjša. To zmanjšanje volumna vpliva na krčenje tanke površinske plasti, kar ima za posledico nastanek nateznih zaostalih notranjih napetosti, izraža pa se tudi s krivljenjem vzorca. V kaljeni plasti pa so zaradi avstenitno-martenzitne transformacije in povečanja volumna zaostale tlačne notranje napetosti¹⁰. Notranje napetosti so glede na znižano napetost tečenja pri povišanih temperaturah materiala vidne tudi kot spremembe ukrivljenosti vzorca. Na **sliki 3a** je v shematski obliki prikazan vpliv temperaturne deformacije vzorca in volumskih sprememb ter s tem povezanih napetostnih



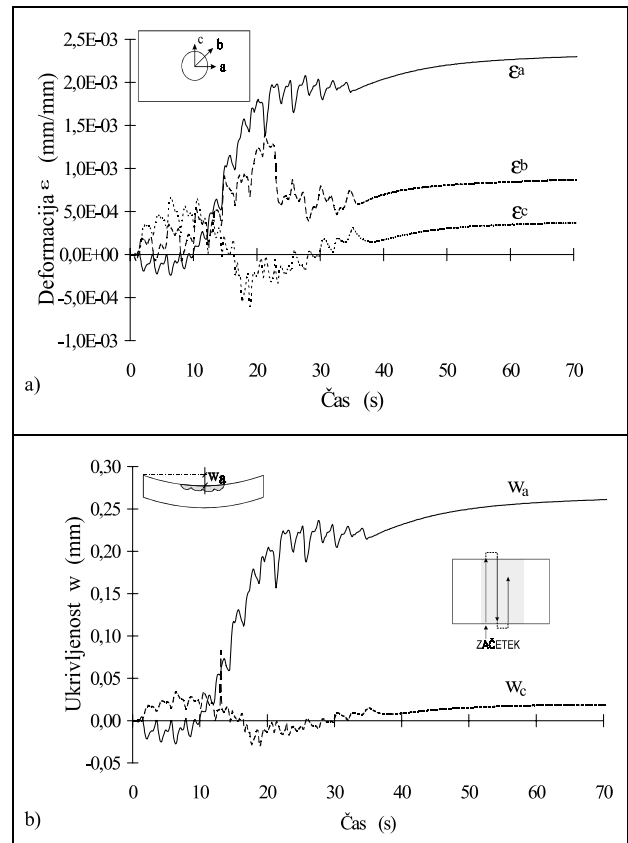
Slika 3: Vpliv temperaturne deformacije vzorca in volumskih sprememb v modificirani površinski plasti na celotno deformacijo vzorca (a) ter velikost deformacij pri strjevanju pretaljene površinske plasti v različnih smereh (b)

Figure 3: Specimen deformation during the remelting and cooling process (a) and remelted layer deformation due to volume changes in different directions (b)

razmer v modificirani površinski plasti na celotno deformacijo vzorca med laserskim površinskem pretaljevanjem.

Na **sliki 3b** so v shematski obliki prikazani učinki krčenja lasersko pretaljenih sledi in njihov vpliv na ukrivljenost tankega ploščatega vzorca. Lasersko pretaljena sled ima manjši volumen kot osnovna mikrostruktura in pri strjevanju sprejme nekoliko večje krčenje v prečni smeri sledi, kot je le-to v vzdolžni smeri. Razlog za različne skrčke glede na posamezne smeri je izrazitejši odvod toplote v prečni smeri sledi v hladni del materiala, kot pa je v vzdolžni smeri sledi v že ogreti material. Tako je krčenje v smeri prečnega preseka pretaljene sledi izrazitejše, kot je le-to v vzdolžni smeri nastale sledi. Smer izrazitejšega odvoda toplote pri ohlajanju nam določa tudi smer strjevanja v pretaljeni plasti na mejni ploskvi trdni material - talina, kar definira tudi smer povečanega krčenja materiala. Vpliv razmer pri strjevanju in nadaljnem ohlajanju pretaljene plasti na ukrivljenost obdelovancev je prikazan v t.i. diagramu ukrivljenosti na **sliki 4**.

Na **sliki 4** so prikazani rezultati merjenja relativnih deformacij vzorca v treh smereh ϵ_a , ϵ_b in ϵ_c in pa iz njih



Slika 4: Rezultati merjenja časovnega spreminjanja relativne deformacije (a) in ukrivljenosti (b) vzorca med procesom laserskega pretaljevanja površine pri "cik-cak" načinu vodenja laserskega snopa

Figure 4: Time dependence of specimen deformation (a) and variation in specimen curvature (b) during the process of laser surface remelting at "zig-zag" laser beam travel

izračunane vrednosti ¹⁰ vzdolžne in prečne ukrivljenosti vzorca w_a in w_c pri "cik-cak" načinu vodenja laserskega snopa. Iz rezultatov, prikazanih na **sliki 4**, lahko ugotovimo:

1. zelo različen potek spreminjanja relativnih deformacij vzorca ϵ_a , ϵ_b in ϵ_c v posameznih smereh
2. največje relativne deformacije ϵ_a so v smeri daljše stranice vzorca, to je v prečni smeri glede na smer laserske sledi
3. v smeri krajše stranice vzorca so relativne deformacije ϵ_c sprva natezne narave, po šestih prehodih laserskega snopa pa preidejo v tlačno
4. v smeri 45° na smer gibanja laserskega snopa so prikazane izmerjene relativne deformacije ϵ_b za več kot polovico nižje od poteka relativne deformacije v vzdolžni smeri vzorca, kar je pričakovano glede na postavitev posameznih krakov v rozeti.

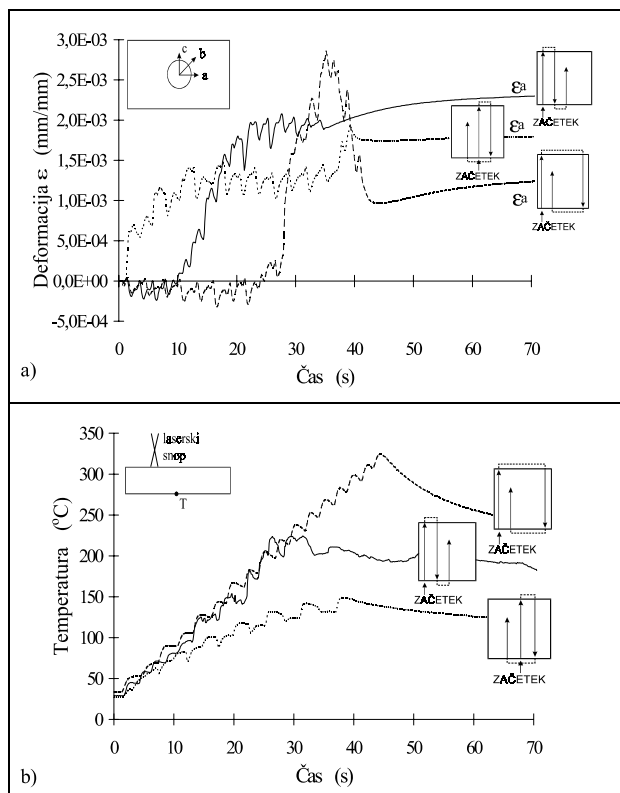
V danem primeru lahko ugotovimo, da je izračunana ukrivljenost vzorca ¹⁰ po laserskem pretaljevanju površine znatno večja v vzdolžni smeri vzorca (w_a) kot v prečni (w_c), ki je hkrati tudi smer laserskega pretaljevanja površinske plasti. Po prenehanju delovanja laserskega snopa se zaradi izenačevanja temperature vzorca (na spodnji strani se material še vedno segreva,

medtem ko je na zgornji strani že dosegel maksimalno temperaturo) konveksna ukrivljenost vzorca še vedno nekoliko povečuje. Potem, ko je doseženo izenačenje temperature po celotnem volumnu vzorca, se deformacijsko stanje stabilizira in dosežemo končno trajno deformacijo oziroma ukrivljenost vzorca.

Na **sliki 5a** so prikazani rezultati merjenja časovnega spreminjanja relativne deformacije vzorca pri različnih načinih vodenja laserskega snopa. Le-ti vplivajo na porazdelitev toplote v vzorcu med segrevanjem in prav tako med ohlajanjem in s tem tudi na doseženo temperaturno polje preko vzorca (**slika 5b**). Kako bo s porazdelitvijo toplotne energije v vzorcu, je poleg načina vodenja laserskega snopa odvisno tudi od količine celotne vnesene energije. Povečevanje temperature vzorca povzroča zniževanje napetosti tečenja materiala, kar odločilno vpliva na časovno spreminjanje deformacijskega stanja vzorca. Najnižje temperature na spodnji strani vzorca dosežemo v primeru vodenja laserskega snopa iz sredine vzorca proti skrajnim robovom v obliki oglate spirale, ko prihaja do odvoda toplote iz sredine proti robovom. Najvišje temperature pa so bile dosežene v nasprotnem primeru vodenja laserskega snopa, tj. od robov proti sredini v obliki oglate spirale, ko prihaja do kopičenja toplote od skrajnih robov pretaljenega področja proti sredini vzorca.

Dobro poznanje temperaturnih in deformacijskih razmer v vzorcu med laserskim pretaljevanjem površine (**slika 5**) nam omogoča ustrezno izbiro načina vodenja laserskega snopa in pa določevanje optimalnih laserskih obdelovalnih parametrov. Pri tem smo ugotovili:

1. Pri "cik-cak" načinu vodenja po štirikratnem prehodu laserskega snopa še ne nastane izrazito deformiranje vzorca. To pride pri naslednjih nekaj prehodih laserskega snopa zaradi pregretja celotnega vzorca in s tem povezanim znižanjem napetosti tečenja materiala. Večji vpliv krčenja materiala se vidi v povečani konveksni deformaciji vzorca. Ko temperatura vzorca preseže 150 °C, se vzdolžna relativna deformacija vzorca stabilizira pri vrednosti $\epsilon_a \approx 0,002$ in se potem do konca laserskega pretaljevanja ne spreminja.
2. Pri krožnem načinu vodenja laserskega snopa z začetkom na zunanjih robovih pretaljenega področja in zaključkom na sredini vzorca v obliki oglate spirale imamo po začetnih osmih prehodih laserskega snopa zelo majhno časovno spreminjanje deformacije vzorca. Takrat imamo na površini vzorca dva pretaljena pasova (levi in desni del) s po štirimi laserskimi sledmi, od katerih se toplota širi v material istočasno proti robovom in sredini vzorca. Ko se pri nadaljnjih prehodih laserskega snopa po površini vzorca zmanjšuje razdalja med pretaljenima pasovoma (levi in desni del), nastane znatno povečanje toplote na sredini vzorca. Posledica višje temperature je izrazitejše znižanje napetosti tečenja materiala v srednjem delu vzorca. To vpliva zaradi



Slika 5: Rezultati merjenja časovnega spreminjanja relativne deformacije (a) in temperature (b) vzorca med procesom laserskega pretaljevanja površine pri različnih načinih vodenja laserskega snopa

Figure 5: Time dependence of specimen deformation (a) and temperature (b) during the process of laser surface remelting at different modes of laser beam travel

krčenja materiala, ki je posledica mikrostrukturnih sprememb, na nastanek velike relativne deformacije vzorca ($\epsilon_a \approx 0,003$). Nadaljnji porast temperature v vzorcu pa deluje v smislu popustnih efektov v pretaljeni površinski plasti, kar vpliva na popuščenje napetosti zaostalega avstenita in na zmanjšano krčenje v njem. Popustni efekti se tako izražajo v zmanjševanju časovnega spreminjanja deformacije vzorca. Po prenehanju delovanja laserskega snopa se v začetku zmanjšujejo in končno celo izginejo vplivi popustnih efektov na spreminjanje deformacije. Zato se relativna deformacija vzorca kmalu stabilizira na končno vrednost $\epsilon_a \approx 0,0012$.

3. Pri krožnem načinu vodenja laserskega snopa, ki poteka iz sredine vzorca proti robovom pretaljenega področja v obliki oglate spirale, pa prihaja do sferičnega prevajanja toplote na vse strani vzorca. Zato že na začetku laserskega pretaljevanja prihaja do izrazitejšega vpliva krčenja materiala zaradi faznih transformacij v pretaljeni plasti, kar vpliva na konveksno ukrivljanje vzorca. Po določenem času, to je po petih prehodih laserskega snopa, se deformacija vzorca stabilizira, saj se izravna temperaturno raztezanje in krčenje vzorca zaradi faznih transformacij v površinski plasti. Ko je dosežena temperatura vzorca okoli 150 °C, to je pri zadnjih dveh prehodih laserskega snopa, se poveča tudi nastala relativna deformacija vzorca na vrednost $\epsilon_a \approx 0,0019$. Po prekinitvi delovanja laserskega snopa preneha krčenje vzorca zaradi faznih transformacij v pretaljeni površinski plasti. Zato lahko ugotovimo vpliv temperaturnega raztezanja materiala v površinski plasti, kar se izkazuje v zmanjšanju konveksne deformacije vzorca, ki pa se tudi zelo hitro stabilizira pri relativni deformaciji $\epsilon_a \approx 0,0017$.

4 SKLEP

Z metodo sprotnega merjenja relativne deformacije na ploščatem vzorcu med laserskim površinskim pretaljevanjem lahko spremljamo deformacijo vzorca,

kar prispeva k poznanju procesa in tudi k njegovemu optimiranju. Dokazali smo, da ima način vodenja laserskega snopa velik vpliv na nastanek in velikost deformacije ter povzroča različne stopnje ukrivljenosti vzorca po ohlajanju na temperaturo okolice. Eksperimentalni rezultati so pokazali, da prihaja v prečni smeri lasersko pretaljene sledi do večjih kontrakcij. Razlog za nastalo deformacijo je v večjem odvajanju toplote v hladen material v prečni smeri pretaljene sledi (ki je v našem primeru v smeri vzdolžne osi vzorca) kot v vzdolžni smeri lasersko pretaljene sledi, ki je že segreti na višjo temperaturo. Smer večjega odvajanja toplote pri ohlajanju definira tudi smer strjevanja na meji med talino in trdnim stanjem, kar določa tudi smer izrazitejšega krčenja materiala. Laserske obdelovalne razmere lahko torej optimiramo tako, da dobimo čim manjše deformacije vzorcev, kar vpliva na boljšo kakovost proizvodov in manjšo količino drage dodatne mehanske obdelave.

5 LITERATURA

- ¹ J. Grum in R. Šturm: Appl. Surf. Sci., 109-110 (1997), 128-32
- ² J. Grum in R. Šturm: Surf. Coatings Technol., 100-101 (1998), 455-58
- ³ H. W. Bergmann: Heat Treatment, ELA-Euro Laser Academy, European Post Graduate Studies, Cambridge, United Kingdom, 1994, 1-27
- ⁴ E. Geissler: Ph. D. Thesis, Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg, Germany, 1993
- ⁵ E. Geissler in H.W.Bergmann: Opto Elektronik Mag., 4 (1988) 4, 396-403
- ⁶ J. Mazumder in W. M. Steen: J. Appl. Phys., 51 (1980) 2, 941-47
- ⁷ J. Domes, D. Müller in H.W. Bergmann: Residual stresses in temperature controlled laser hardened steels, 3rd Eur. Conf. on Residual Stresses, DGM, Frankfurt, Germany, 1992, 79-88
- ⁸ W. Bloehs, B. Grünenwald, F. Dausinger in H. Hügel: J. Laser Appl., 8 (1996) 1, 15-23
- ⁹ W. Bloehs, B. Grünenwald, F. Dausinger in H. Hügel: J. Laser Appl., 8 (1996) 2, 65-77
- ¹⁰ R. Šturm: Surface integrity at laser remelting of gray and nodular iron (in Slovene), Ph D. Thesis, Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, 1998