

Analiza laserskega procesa rezanja na avstenitnem nerjavnem jeklu in ocenjevanje kvalitete reza

Analysis of Laser Cutting on Austenitic Stainless Steel and Quality of the Cut Estimation

J. Grum¹, D. Zuljan, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana

Prejem rokopisa - received: 1995-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-01-22

V delu so predstavljene razmere pri laserskem rezanju po treh merilih, in sicer: z merjenjem temperature v rezalni fronti, z merjenjem makrogeometrijskih značilnosti in mikrostrukture, podprto z merjenjem mikrotrdote. Na osnovi popisa rezalnega procesa smo z merjenjem danih značilnosti dobili vpogled v sposobnosti in kvaliteto laserskega izvira. Na osnovi ocenjevanja kvalitete reza in merjenja temperature v rezalni fronti smo definirali kritično rezalno hitrost za posamezne debeline materiala obdelovanca iz avstenitnega jekla CrNi 18/10.

Ključne besede: lasersko rezanje, avstenitno nerjavno jeklo, mikrostruktura, toplotni pojavi pri laserskem rezanju, makro analiza

The paper presents the condition in the laser cutting process according to three criteria: measurement of temperature in the cutting zone, measurement of macro geometry characteristics, and micro structure properties supported by micro hardness measurements. On the basis of the measurements of these properties, the description of the cutting process gives an insight into the capabilities and quality of the laser source. On the grounds of estimation of the cut and temperature measurements in the cutting zone the critical cutting speed was defined for particular thicknesses of the workpiece material from Cr/Ni 18/10 austenitic steel.

Key words: laser cutting, austenitic stainless steel, microstructure, thermal phenomenon at laser cutting, macroanalysis

1 Uvod

Laser se je kot obdelovalno orodje močno uveljavil tudi v proizvodnem strojništvu, predvsem zaradi številnih tehnoloških prednosti. Med prednostmi te nove obdelovalne tehnologije uvrščamo izjemno kvaliteto obdelave, možnosti za avtomatizacijo procesa in njegovo prilagodljivost različnim velikostim in oblikam ter drugim zelo različnim zahtevam pri obdelavi. Lasersko rezanje uvrščamo v skupino tako imenovanih toplotnih obdelovalnih procesov. Uporaba kisika kot pomožnega plina pri laserskem rezanju poveča njegovo uspešnost pri legiranih jeklih zaradi eksotermičnih reakcij v rezalni fronti. Zaradi izjemno visokih hitrosti segrevanja, rezanja in ohlajanja materiala v rezalni fronti, je zelo zahtevno sprotno spremljanje toplotnih procesov. Le-ti postanejo v rezalni fronti ob prisotnosti pomožnega plina kisika zaradi dodatnih toplotnih in hidrodinamičnih pojavov zelo zapleteni in jih zato težko merimo in nadzorujemo.

Pri analizi laserskega rezanja moramo vedno izhajati iz kvalitete reza. Zato je zelo pomembno, da nastali rez primerno popišemo z različnimi značilnostmi kvalitete. Navadno postopamo tako, da v prvi fazi vizualno ocenimo nastalo kvaliteto reza. Izkušeni strokovnjaki navadno to storijo zelo hitro. Popišejo tudi obliko reza, valovitost oziroma hrapavost površine reza in prisotnost srha na njegovem spodnjem robu. Ocene strokovnjakov pa so navadno zelo subjektivne in rezultati pa so odvisni predvsem od teoretičnega poznavanja laserskega rezanja.

Včasih pa so takšne ocene nezadostne, zato je potrebno opraviti merjenje posameznih značilnosti. Po zgledu številnih raziskovalcev smo se tudi mi lotili takšnega načina popisa kvalitete reza z merjenjem njegovih geometrijskih značilnosti v odvisnosti od obdelovalnih razmer. Za oceno kvalitete smo izbrali naslednje geometrijske značilnosti reza: zgornja in spodnja širina, neravost na zgornjem in spodnjem delu, višina in širina srha na spodnjem delu ter merjenje globine toplotno vplivane cone. Meritve geometrijskih značilnosti smo opravili na metalografskih vzorcih v poliranem oziroma polirano jedkanem stanju na merilnem mikroskopu. Za neodvisno oceno kvalitete reza na osnovi merjenih geometrijskih značilnosti pa smo izbrali tudi ustrezna merila. Za bolj poglobljeno študijo kvalitete reza pa lahko dodatno opravimo tudi mehanske preizkuse in mikrostrukturne analize. Navadno pri obravnavi rezov geometrijske značilnosti dopolnjujemo z mikrostrukturnimi analizami in še z merjenjem mikrotrdote prečno na rezalno fronto. Metalografsko in eventualno kemično analizo površine oziroma podpovršinske plasti opravimo na dveh ali treh mestih po višini reza oziroma na mestih, kjer pričakujemo ali opazimo nezaželene efekte.

2 Eksperimentalna zasnova

2.1 Značilnosti laserskega obdelovalnega sistema

Eksperimentalno delo smo izvedli z laserjem domačega proizvajalca ISKRA - Center za elektrooptiko, sedaj imenovan FOTONA, ki ima računalniško vodeno koordinatno mizo in enoto za krmiljenje firme BOSCH. Računalniška enota je vezana na nadzorni sistem laser-

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

skega izvira, kar omogoča njegov vžig, odpiranje in zapiranje zaslonke in pomožnega plina itd. Pri laserskem rezanju smo zagotovili:

- isto zbirno lečo optičnega sistema, z lego gorišča na površini obdelovanca
- stabilnost porazdelitve energije laserskega izvira na površini obdelovanca
- širok izbor pomika obdelovanca
- čim manjše dinamične vplive med laserskim izvirom in mehanskim sistemom za vodenje obdelovanca
- obliko šobe, ki mora omogočati pravilen pretok pomožnega plina, dana pa mora biti tudi možnost nastavljanja pretočne količine plina.

2.2 Izbira materiala obdelovanca in obdelovalnih razmer

Raziskovalno delo smo opravili na najpogosteje uporabljenem avstenitnem nerjavnem jeklu, legiranem s kromom in nikljem. Jeklo je iz proizvodnega programa Železarne Ravne in ima interno oznako PK 11SP, ki pa mu ustreza oznaka po EN standardu X6CRNITI1810. To jeklo pogosto poimenujemo tudi po glavnih legirnih elementih kromu in niklju in sicer v obliki Cr/Ni 18/10. Jeklo se uporablja v kemični procesni industriji, kjer se od njega zahteva izjemno kemično odpornost. Da je to jeklo zelo pogosto izbrano za raziskavo, govori dejstvo, da pri toplotnih vplivih pogosto prihaja do kemičnih sprememb v pretaljeni coni in s tem do zmanjšanja kemične odpornosti¹¹. Prav tako pa z navadnimi toplotnimi procesi rezanja močno legiranih jekel težko zagotavljamo želeno kvaliteto reza zaradi prenizke povprečne temperature v rezalni fronti. Pri laserskem rezanju s pomožnim plinom kisikom zagotavljamo višje povprečne temperature v rezalni fronti zaradi ozko koncentriranega snopa in nižjih toplotnih izgub.

Kemična sestava izbranega jekla je naslednja: 0.03% C - 0.39% Si - 1.35% Mn - 0.02% P - 0.003% S - 18.0% Cr - 9.1% Ni - 0.35% Ti

Preizkušance za rezanja smo izbrali v obliki ploščic dimenzije 100 x 100 mm² različnih debelin, in sicer: 0,5 - 0,8 - 1,0 - 1,5 in 2,5 mm.

Obdelovalne razmere so bile izbrane glede na zelo širok izbor debelin materiala. Pri tem smo se odločili, da vzamemo nekatere parametre konstantne, medtem ko smo druge prirejali oziroma spreminjali.

Konstantni obdelovalni parametri so bili:

- moč laserja $PL = 450 \text{ W}$
- goriščna razdalja leče $f = 63,5 \text{ mm}$
- oddaljenost gorišča od površine obdelovanca $zf = 0,0 \text{ mm}$
- oddaljenost šobe od površine obdelovanca $s = 2,0 \text{ mm}$
- premer šobe $d = 2,0 \text{ mm}$

Med parametri, ki smo jih spreminjali, so bili kinematični, ki so podani z linearnim izborom rezalnih hitrosti. Vsaki debelini smo priredili po štiri (4) rezalne hitrosti, in sicer med 25 in 50 mm/s. Spreminjali smo jih

glede na debelino obdelovanca, pri čemer smo upoštevali priporočila objavljenih raziskav^{5,6,7}. Tlak pomožnega plina kisika smo spreminjali od 2.0 do 5.5 bara, in sicer: 2,0, 3,0, 4,0 in 5,5 bara. S tem spreminjanjem lahko vplivamo na intenzivnost eksotermičnih reakcij in uspešnejše izpihovanje taline iz rezalne fronte.

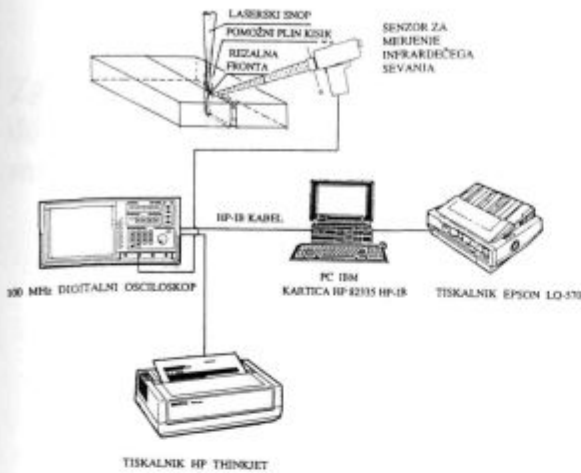
3 Eksperimentalni rezultati

3.1 Merjenje temperature in določanje kritične rezalne hitrosti

Uspešno krmiljenje laserskega obdelovalnega procesa je tesno povezano s poznavanjem toplotnih razmer v rezalni fronti in njeni okolici. Zato lahko na osnovi poznavanja temperaturnih ciklov, ki jih določimo z merjenjem temperatur s termoelementi, ki so postavljeni na določeni oddaljenosti rezalne fronte od potujočega izvira, sklepamo na razmere v rezalni fronti. Merjenje temperature je zaradi ozkega laserskega snopa in majhne globine toplotno vplivanega področja zelo zahtevno, saj je izjemno težko točno postavljanje termoelementov na izbrano oddaljenost od rezalne fronte. Teoretične raziskave temperature v okolici rezalne fronte so opisovali Rosenthal¹ pri plamenskem rezanju ter Rykalin² in Schuöcker³ pri laserskem. Arata⁴ pa je eden izmed prvih raziskovalcev, ki je uspešno izmeril temperaturo v rezalni fronti in jo povezoval s procesi v njej. Olsen⁵ je analiziral procese v rezalni fronti z določevanjem debeline pretaljenega materiala v cirkularni smeri od laserskega izvira. Ugotovljeno je, da pri velikih temperaturnih gradientih dobimo tanko plast raztaljenega materiala v rezalni fronti in majhno debelino toplotno vplivane cone, kar pa v končni fazi zagotavlja boljšo kvaliteto reza.

Pri analizi teh procesov je pomemben popis toplotnih razmer na mestu obdelave in njihovih vplivov na material obdelovanca. Toplotni pojavi pri laserskem rezanju in toplotni odzivi v materialu so bili do sedaj nezadostno raziskani, predvsem zaradi eksotermnih reakcij pomožnega plina kisika z elementi v materialu obdelovanca. Pri analizi procesa laserskega rezanja na avstenitnem nerjavnem jeklu smo se odločili za popis toplotnih razmer z merjenjem temperature v okolici rezalne fronte s termoelementi in v rezalni fronti z optičnim pirometrom. Toplotne odzive v materialu obdelovanca pa smo opazovali z makro analizo reza, mikrostrukturno analizo in mikro kemijsko analizo pretaljene in toplotno vplivane cone.

Na **sliki 1** je prikazana shema merilnega sistema za merjenje gostota infrardečega sevanja (IR) iz rezalne fronte s komponentami za zajemanje, shranjevanje in analizo temperaturnih signalov. Temperaturni signal je proporcionalen gostoti energijskega toka IR sevanja iz rezalne fronte in ga pretvorimo v temperaturo preko karakteristike napetost - temperatura. Temperaturni signal, ki ga zajamemo iz rezalne fronte, vodimo v 100 MHz digitalni osciloskop, kjer signal digitaliziramo in



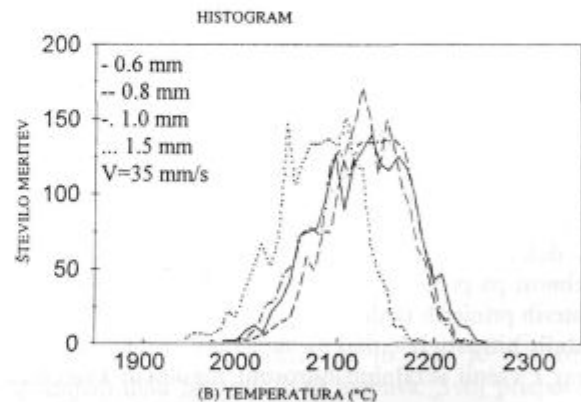
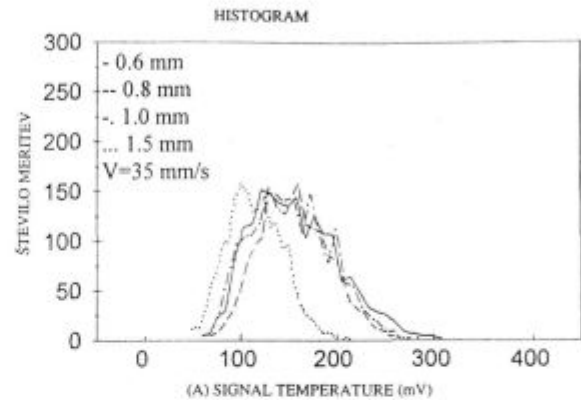
Slika 1: Merilni stavek za merjenje temperaturnega signala iz IR sevanja
Figure 1: Measuring set-up for temperature signal measurement by mean of IR radiation

nato shranimo v PC računalniku za kasnejšo statistično obdelavo.

Na **sliki 2** imamo prikazane porazdelitve temperaturnih signalov v mV (a) in nato še porazdelitve temperature v °C (b) pri rezalni hitrosti 35 mm/s in v odvisnosti od debeline pločevine. Na osnovi izmerjenih temperaturnih signalov oziroma temperature lahko ugotovljamo naslednje:

- pri debelini pločevine 0,6 mm, 0,8 mm in 1,0 mm so srednje vrednosti temperature izjemno visoke, saj presegajo 2100°C. Zelo visoka maksimalna temperatura in prav tako srednja vrednost temperature v rezalni fronti omogoča dobro rezanje in izpihovanje taline s pomožnim plinom kisikom iz rezalne fronte. Nastali rezi so zelo gladki z majhno neenakomerno debelino pretaljene cone in majhno velikostjo srha na spodnjem delu reza
- pri debelini pločevine 1,5 mm lahko ugotovimo, da je srednja vrednost temperaturnega signala oziroma temperature precej nižja kot pri manjših debelinah pločevine. Porazdelitev temperature z nižjo srednjo vrednostjo potrjuje, da je zaradi večje debeline pločevine potrebno za rezanje vložiti več energije, poveča pa se tudi širina reza in debelina pretaljene cone
- iz porazdelitve temperaturnega signala lahko ugotovimo, da so procesi na rezalni fronti zelo pestri zaradi časovnega oziroma krajevnega spreminjanje eksotermnih reakcij vzdolž rezalne fronte
- za oceno uspešnosti rezanja moramo izhajati iz najnižje srednje vrednosti temperature v rezalni fronti pri različnih hitrostih rezanja in debelinah pločevine. Pri nižjih srednjih vrednostih temperature v rezalni fronti material ne moremo prerezati z gladkim rezom in pogosto prihaja na spodnjem delu tudi do znatno povečane širine reza in povečane velikosti srha.

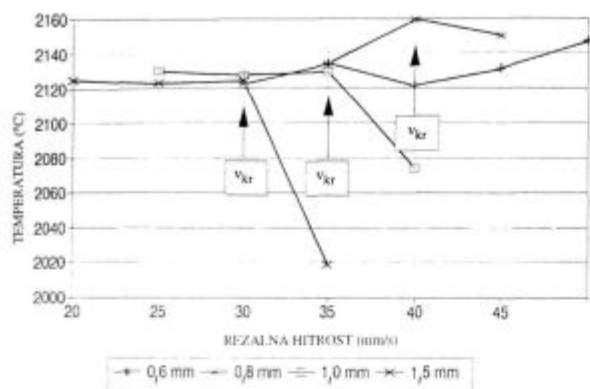
Na **sliki 3** imamo prikazano odvisnost srednje vrednosti temperature v rezalni fronti pri različnih hitrostih rezanja različnih debelin pločevine. Eksperimentalni podatki nam omogočajo določevanje kritične rezalne hitrosti, ki glede na različna merila kvalitete reza dajejo najboljše rezultate. Kritična rezalna hitrost je pri dani debelini pločevine tista, ki daje najtanjšo pretaljeno cono, najmanjše toplotno vplivano področje in najmanjšo



Slika 2: Primerjava temperaturnega signala (a) in temperature (b) pri različnih debelinah avstenitnega jekla pri rezalni hitrosti 35 mm/s
Figure 2: Comparison of temperature signals (a) and temperature (b) in workpieces having various thickness in laser cutting of austenitic steel with cutting speed 35 mm/s

velikost srha na spodnji strani reza. Rezultate izmerjenih temperatur lahko uvrstimo glede na kritično rezalno hitrost v dve skupini, in sicer:

- pri majhnih debelinah pločevine: 0,6 in 0,8 mm, imamo precej visoke srednje vrednosti temperature v rezalni fronti, zato so tudi kritične hitrosti rezanja med 40 in 50 mm/s.
- pri debelini pločevine 1,0 in 1,5 mm lahko ugotovimo, da so pri nižjih rezalnih hitrostih srednje vrednosti temperatur skoraj konstantne in šele pri prekoračitvi kritične rezalne hitrosti le-ta naglo pade. Kritične hitrosti rezanja so za omenjene debeline pločevine 30 mm/s oziroma 35 mm/s.



Slika 3: Določevanje kritične rezalne hitrosti laserskega rezanja pri različnih debelinah obdelovancev avstenitnega jekla

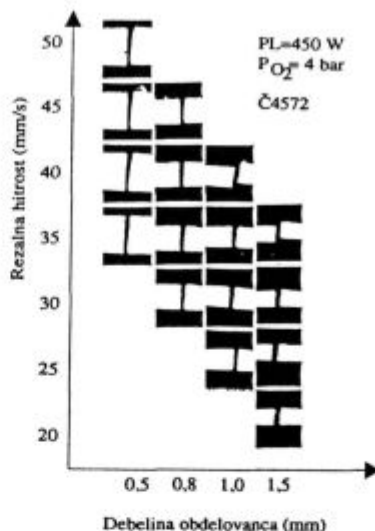
Figure 3: Determination of critical cutting speed in laser cutting various thicknesses of austenitic steel

3.2 Makro analiza reza

V praksi navadno postopamo tako, da v prvi fazi ocenjujemo kvaliteto reza vizualno. Za podrobnejšo sliko pa številni raziskovalci opisujejo kvaliteto reza z merjenjem hrapavosti na različnih mestih reza in njihovih geometrijskih značilnosti. Na sliki 4 so prikazani makro posnetki prereza pločevine pri danih rezalnih razmerah za različne debeline pločevine. Za prikaz smo pločevino le delno prerezali z laserskim snopom in omogočili vpogled v režo reza po debelini pločevine. Z odzemanjem materiala po dolžini pločevine na posebni, zelo fini rezalni napravi smo lahko opazovali profil reza po debelini. S takšno tehniko priprave vzorcev smo obravnavali stanje glede na velikost in obliko reže med levim in desnim delom reza. Prerezi so izjemno kvalitetni, kot posebnost pa predstavlja spodnji del reza, kjer dobimo v nekaterih primerih rahlo žlebasto obliko. Čeprav je izbor rezalnih hitrosti izjemno širok, lahko trdimo, da smo skoraj z vsemi rezalnimi hitrostmi zagotovili kvaliteten rez.

3.3 Mikrostrukturna analiza reza

Drugo in tretje merilo za popis posameznih značilnosti reza zajema standardne podatke za stanje površine in površinske plasti, ki je v strokovni terminologiji poznana kot integriteta površine. Navadno se pri obravnavi rezalnih robov zadovoljimo z analizo mikrostrukture materiala po globini, to je v smeri pretaljane in toplotno vplivane cone in z merjenjem mikrotrdote na različnih nivojih reza. Pri tanjših preizkušancih smo se omejili le na področje I oziroma II, medtem ko smo pri večjih debelinah materiala opravili analizo v vseh treh nivojih. To pa pomeni, da smo morali pri debelejših preizkušancih dodati še tretji nivo v sredini materiala, kar je v skladu z makroanalizo površine in analizo pretaljane in toplotno vplivane cone. Zaradi ekstremnih razmer pri segrevanju oziroma ohlajanju, ki se pojavijo



Slika 4: Makroposnetki robu laserskega reza na avstenitnem nerjavnem jeklu danih debelin

Figure 4: Macrographs of a laser cut on austenitic stainless steel heaving a specified thickness

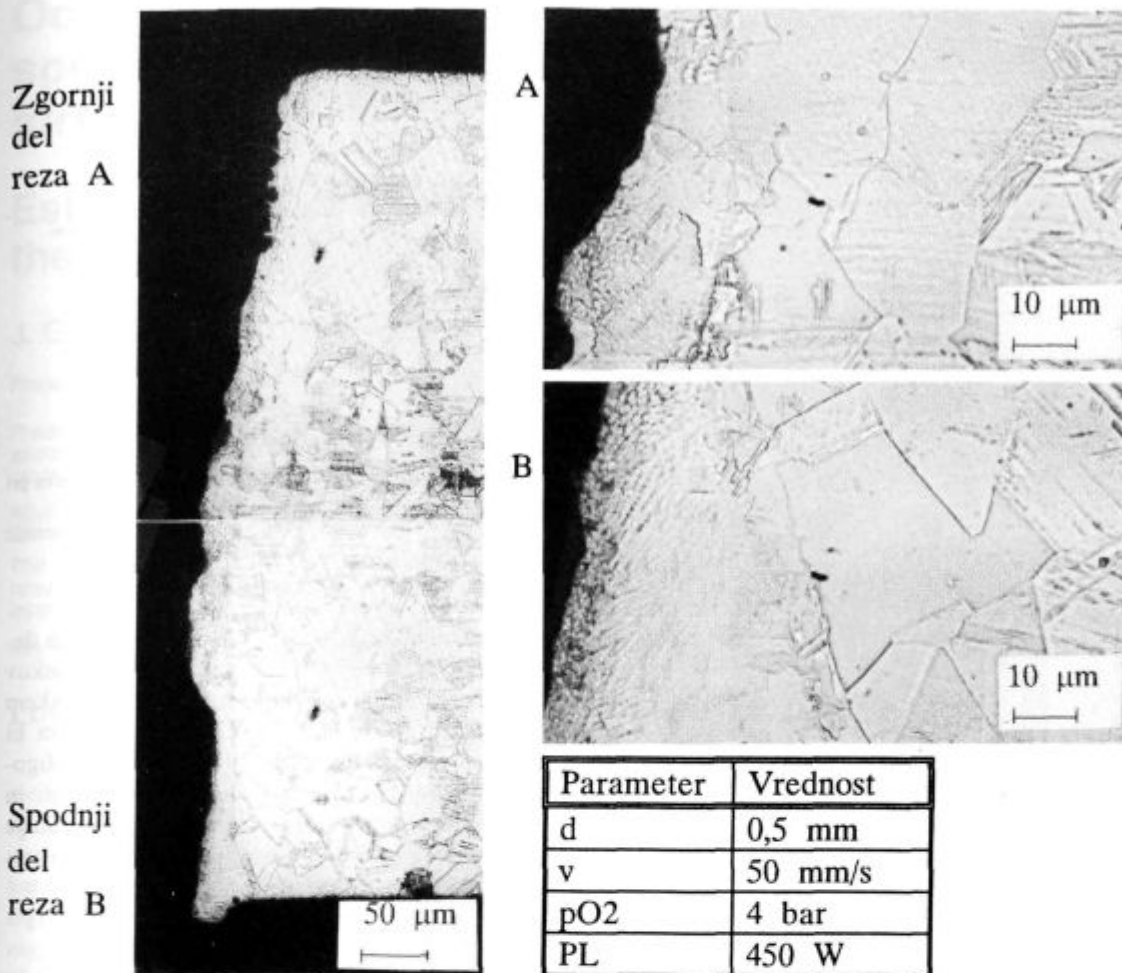
pri laserskem rezanju v rezalni fronti, prihaja do naslednjih procesov:

- taljenje in oksidacija materiala
- izpihovanje taline in oksidov iz rezalne fronte
- ponovno strjevanje tanke površinske plasti, ki jo imenujemo pretaljena plast
- zadrževanje oksidov na površini pretaljene plasti oziroma reza.

Na sliki 5 je prikazan mikrostrukturalni posnetek avstenitnega jekla 18/10 pri 1,5 mm debeli pločevini. Z makrostrukturnega stališča je rez zelo lep in gladek, z neenakomerno debelino pretaljene cone. Zelo močno je poudarjena mikrostrukturalna sprememba na spodnjem delu reza, kjer je višja temperatura, predvsem zaradi prisotnosti taline in oksidov. Dodatno se toplotnim vplivom laserskega snopa pridružijo še izrazitejši toplotni vplivi zaradi kemijskih reakcij med talino in pomožnim plinom kisikom oziroma hidrodinamičnim vplivom nadtlaka pomožnega plina kisika v raztaljenem delu materiala. Zgornji del reza je hlajen z usmerjenim pretokom kisika, medtem ko se le-ta v spodnjem delu reza pri njegovem nastajanju v večji meri porablja za zgorevanje železa, kroma, niklja, titana in drugih sestavin jekla. V pretaljenem stanju tanjših pločevin nam zaradi velike hitrosti odvoda toplote nastane finostrukturalna struktura, medtem ko pri debelejših pločevinah nastane celo stebrasta oblika kristalov. Struktura v nastali tanki plasti je ponovno avstenitna z značilnostmi, ki jih srečamo po litju.

Celotno raziskovalno delo za popis kvalitete reza lahko predstavimo s tremi med seboj različnimi a komplementarnimi merili in sicer:

- I. merilo makrogeometrijske značilnosti reza
- II. merilo spremembe mikrotrdote po globini, pravokotno na rezalno fronto



Slika 5: Mikrostrukturni posnetek toplotno vplivane cone pri debelini pločevine $a=0,5$ mm in rezalni hitrosti 50 mm/s

Figura 5: Micrograph of the heat affected zone at metal thickness $a=0.5$ mm and cutting speed 50 mm/s

- III. merilo mikrostrukturne spremembe, dopolnjene z mikrokemično analizo površine reza, pretaljene in toplotno vplivane cone.

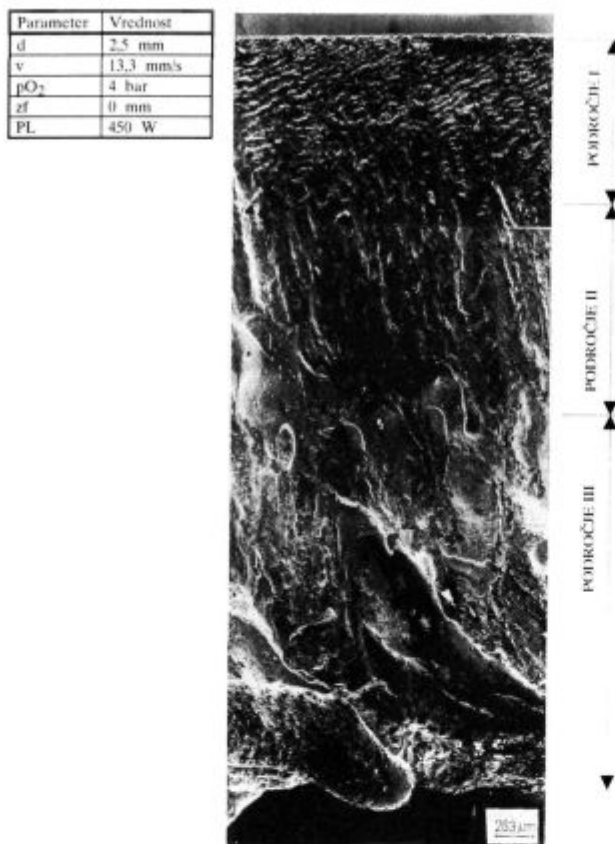
Na sliki 6 je prikazan elektronski posnetek topografije površine reza pločevine debeline 2,5 mm pri rezalni hitrosti 15 mm/s. Iz slike lahko ugotovimo tri značilna področja, in sicer:

- področje I zgornji del reza
 področje II srednji del reza
 področje III spodnji del reza

V področju I dobimo izjemno velike temperaturne gradiente, zato prihaja do relativno fine površine; le-ta je dokaj gladka, z majhno stopnjo hrapavosti. Področje II ima nižji temperaturni gradient, zato so bolj izraziti toplotni vplivi, učinek brazdanja površine je znatno izrazitejši. Zelo pomembno pri opazovanju površine je usmerjena orientacija brazdanja, ki jo lahko opišemo s povečano hrapavostjo površine glede na področje I. V področju III ali spodnjem delu reza imamo najnižji temperaturni gradient, kar je prispevalo k znatno

povečanemu učinku brazdanja in zato je površina v spodnjem delu bistveno bolj hrapava. Svoj prispevek k močnemu brazdanju daje povečana koncentracija toplote, ki ob pretoku kisika močnejše pregreje material na spodnjem delu rezalne fronte, zato kisik pod tlakom odpihne večjo maso taline, kot je to v sredini ali zgornjem delu reza. Poleg tega pa usmerjena orientacija brazd v spodnjem delu reza opozarja na tok taline in oksidov iz rezalne fronte. Iz tega makro posnetka lahko določimo smer potovanja laserskega snopa in nagib rezalne fronte med rezanjem.

Iz elektronskega mikroposnetka na poševnem rezu laserskega reza (slika 7) je razvidna hrapavost površine reza in prisotne okside pri 300-kratni povečavi. Na specifičnih X posnetkih za Fe, Cr, Ni, Mn in Si lahko ugotovimo enakomerno koncentracijo posameznih elementov v oksidih z izjemo železa in kroma. Okolica pretaljene plasti v oksidih je osiromašena železa in kroma. Predvsem iz specifičnih X posnetkov za krom lahko ugotovimo, da je na površini oksidov v zajedi povečana koncentracija kroma. To pa pomeni, da je

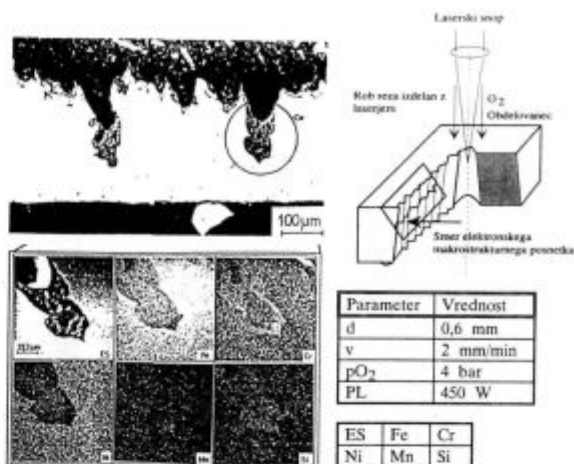


Slika 6: Elektronski posnetek topografije površine reza na nerjavnem avstenitem jeklu debeline 2,5 mm pri rezalni hitrosti $v = 13,3$ mm/s
Figure 6: SEM - graph of the surface of cut on stainless steel with a thickness 2,5 mm at a cutting speed $v=13,3$ mm/s

zaradi zelo hitrega procesa ohlajanja prišlo do difuzije kroma iz raztaljene plasti v površinsko plast oksidov v zajedi. Olsen¹¹ navaja, da nastane zaradi difuzije kroma iz pretaljene plasti v oksidno v pretaljeneni plasti znižana koncentracija kroma. Avtor navaja, da je debelina plasti z znižano koncentracijo kroma v pretaljeni coni lahko debela celo 50 do 100 μm . Žal iz naših specifičnih X posnetkov za krom tega ne moremo potrditi, čeprav smo opazili v površinski plasti sloju oksida povečano koncentracijo kroma. Področje z oksidi je na površini reza v obliki neprekinjene plasti. V nekaterih primerih se talina in oksidi zlijejo na spodnjem robu reza, kar predstavlja njihov srh.

4 Sklepi

Na temelju opravljenih raziskav o makro- in mikrostrukturnem stanju površine in površinske plasti, kar predstavlja zelo pomemben del raziskave integritete površin pri laserskem rezanju, potrjujemo izjemno uspešnost rezanja, predvsem manjših debelin materiala obdelovanja. Laserski sistem je dovolj zanesljiv in ima takšne optične in kinematične lastnosti, da omogoča dobro



Slika 7: Točkovna mikroanaliza kemijskih elementov na robu reza pri laserskem rezanju avstenitnega nerjavnega jekla
Figure 7: Microchemical analysis on laser cut edge at austenitic stainless steel

prilaganje obdelovalnih razmer različnim vrstam in debelinam materialov. Če bi želeli narediti zbirko podatkov o izbiri optimalnih obdelovalnih razmer pri laserskem rezanju različnih vrst in debelin materialov, potem bi morali opraviti dodatne raziskave in eksperimentalno ugotavljati kritične rezalne hitrosti. Dosedanji rezultati in izkušnje pri ocenjevanju kvalitete reza potrjujejo, da je kritična hitrost rezanja zelo zanesljiv parameter za optimiranje laserskega rezanja.

5 Literatura

- Rosenthal D.: Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding Journal*, 20, 1941, 5, 220-225
- Rykalin N., Uglov A., Kokora A.: Laser machining and welding. Mir Publishers, Moscow, 1978
- Schüöcker D.: The physical mechanism and theory of laser cutting. *Industrial Laser Annual Handbook*, PennWell Publ., Tulsa, 1987, 65-79
- Arata Y.: Dynamic behavior in laser gas cutting of mild steel, *Transactions of JWRE*, 8, 1979, 2
- Olsen F.: Cutting front formation in laser cutting. *Annals of CIRP*, 37, 1988, 2, 15-18
- Welch J. M., Bartel W.: Laser Cutting without Oxygen and its Benefits for Cutting Stainless Steels, *Proc. 6th. Conf. Laser in Metalworking*, 1989, 81-85
- Arata Y., Maruo H., Miyamoto I., Takeuchi S.: Improvement of cut quality in laser-gas-cutting stainless steel. *Source Book on Applications of the Laser in Metalworking*, Ed.: E. A. Metzbowner, American Society of Metals Park, Ohio, 1972
- Grum J., Zuljan D.: Thermal response analysis of cutting metal materials with laser improvement of materials, *MATEC'93*, Institute for Industrial Technology Transfer, Paris, 1993, 217-225
- Zuljan D., Grum J.: Detection of heat responses in laser cutting, *15th Conf. on Materials Testing in Metallurgy. 11th Congress on Materials Testing EUROMAT'94, Conference Proceedings*, Ed.: B. Vorsatz, E. Szöke, Balantonszeplak, Hungaria, IV, 1994, 1077-1082
- Grum J., Zuljan D.: Thermal responses in a stainless steels after laser cutting, *2nd Int. Conf. on Prod. Engineering, CIM'93, Zagreb*, 1993, C-37-C-46
- Olsen F.: CO₂ Laser Cutting, Springer-Verlag, London, 1989