

INTEGRITETA POVRŠIN PRI LASERSKEM PRETALJEVANJU SILUMINOV

SURFACE INTEGRITY IN LASER REMELTING OF SILUMINS

Janez Grum, Slavko Božič

Fakulteta za strojništvo, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa - received: 1999-07-20; sprejem za objavo - accepted for publications: 1999-07-26

V prispevku so obravnavane mikrostrukture zlitin aluminija s silicijem po litju in vpliv laserskega utrjevanja s pretaljevanjem na spremembo mikrostrukture in trdote v modificirani površinski plasti. Naloga je bila usmerjena v spremljanje sprememb v tanki pretaljeni površinski plasti materiala obdelovanca glede na izbrane pogoje pretaljevanja. Po analizi materiala obdelovanca smo izvedli lasersko toplotno obdelavo z različnimi vnosi energije na njihovo površino. Parametre toplotne obdelave smo spreminjali z različnimi močmi laserskega snopa, defokusnimi razdaljami leče in z različnimi hitrostmi pomika obdelovanca. Z izbranimi obdelovalnimi razmerami smo na površini materiala zagotovili želeni vnos energije na površino obdelovanca, in sicer od 165 do 477 J/mm². Celostna analiza je omogočila dober vpogled v razmere pri laserski obdelavi aluminijevih zlitin in uspešno napovedovanje mikrostrukturnih sprememb v pretaljeni površinski plasti v različnih razmerah pretaljevanja.

Ključne besede: lasersko pretaljevanje površine, aluminijeve zlitine, dovedena energija, mikrostruktura, mikrotrdota

In paper the microstructure of Al-Si alloys and the effects of laser surface melt-hardening on the microstructural changes and hardness of the remelted surface layer are presented and discussed. The changes in the thin remelted surface layer of the workpiece material in chosen heat treatment conditions were investigated. The heat treatment parameters were changed by varying the amount of power source, the lens defocusing distance and the workpiece travelling speed. By careful selection of the heat treatment conditions it was possible to obtain the desired amount of energy input into the workpiece surface between 165 do 477 J/mm². The measurements provided sufficient data for a full description of microstructural changes in remelted surface layer in different laser heat treatment conditions for the selected aluminium alloys.

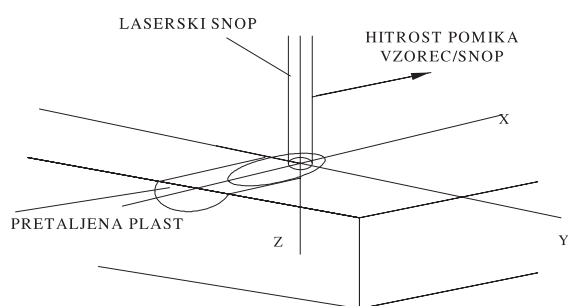
Key words: laser surface remelting, aluminium alloys, energy input, microstructure, microhardness

1 UVOD

Utrjevanje površinske plasti z laserskim snopom se je začelo uveljavljati zaradi gospodarnosti v številnih aplikacijah v maloserijskih in tudi velikoserijskih proizvodnji pred nekaterimi drugimi klasičnimi postopki. S fokusiranjem laserskega snopa lahko pri ustrezni moči in prirejeni hitrosti pomika obdelovanca in/ali laserskega snopa zagotovimo zadosten vnos energije, da je omogočeno hitro segrevanje ali celo pretaljevanje tanke površinske plasti. V inženirski praksi se pogosto uporabljajo aluminijeve zlitine za dele, ki se po mehanski obdelavi vgradijo v funkcionalne sklope. Zato se zanje pogosto uporabljajo zahteve po kvaliteti površine in površinski plasti, ki jo opišemo z integriteto površine. Cilj tega dela je bil opredeliti spremembe v površinski plasti po laserskem pretaljevanju. Lasersko pretaljevanje tanke površinske plasti uvrščamo med postopke utrjevanja površin, ki povzročijo povečano trdoto materiala in s tem tudi povečano obrabno odpornost in je pri številnih zlitinah, ki do temperature taljenja nimajo faznih sprememb, edini postopek utrjevanja. Zato smo raziskovali učinke laserskega utrjevanja s pretaljevanjem tanke površinske plasti izbranih aluminijevih zlitin. Z izbiro ustreznega energijskega vnosa lahko dosežemo hitro lokalno segrevanje materiala nad temperaturo taljenja, kar po samoohlajanju oz. hitrem strjevanju ustvari pretaljeno plast, sestavljeno iz drobno porazdeljene trde faze v

mehki osnovi. Lastnosti pretaljene plasti so odvisne od kemijske sestave zlitine pred pretaljevanjem, od količine vnesene energije na površino vzorca, deloma pa tudi od mikrostrukture. V strokovni literaturi lahko najdemo številne rezultate raziskav utrjevanja tanke površinske plasti s pretaljevanjem različnih aluminijevih zlitin s silicijem in drugimi legirnimi elementi. V aluminij - silicijevi zlitini z bakrom so spreminjali vnos energije in stopnje prekrivanja pretaljenih laserskih sledi ter dokazali, da je uspešnost utrjevanja odvisna od ohlajevalne hitrosti na meji talina - trdno (stanje) in od koncentracije legirnih elementov v zlitini. Luft in soavtorji¹ so raziskali tudi aluminijeve zlitine s kromom, manganom, železom, nikljem, silicijem, kot tudi titanove zlitine z aluminijem, s poudarkom na mikrostrukturi, velikosti in porazdelitvi faz.

Vollmer in Hornbogen² sta raziskala različne aluminijeve zlitine s silicijem, in sicer dve podevtektični, evtektično in nadevtektično zlitino. Pri različnih vnosi energije, ki so jih zagotovili z različnimi gostotami moči in različnimi interakcijskimi časi, so opredelili utrjevanje trdne raztopine. Conquerelle je s soavtorji³ raziskoval aluminijeve zlitine s silicijem z vidika velikosti kristalnih zrn trdne raztopine pri različnih vnosi energije glede na konstantno gostoto moči in različne hitrosti pomika obdelovanca. Obrabna odpornost zlitin je bila opredeljena z vidika porazdelitve velikosti silicijevih delcev v trdi raztopini aluminija in silicija ter z vidika različne stopnje prekrivanja laserskih sledi. Z



Slika 1: Shema laserskega pretaljevanja
Figure 1: Sheme of the laser remelting

mikrostrukturo in mikrokemično analizo so pojasnili obrabne mehanizme z vidika mikroplastične deformacije mehke osnove in katastrofalnih porušitev silicijevih kristalov. Hitro kaljenje in ohlajanje oziroma hitro strjevanje privede do nastanka metastabilnih mikrostruktur, ki so nosilke pomembnih tehnoloških lastnosti, kot so: visoka trdota, obrabna in pogosto tudi povečana korozijska odpornost. Hitro strjevanje je doseženo z gašenjem zaradi odvoda toplote v hladen del materiala z mnogo večjo maso. Postopek je čist, enostavnejši, bolj praktičen in cenejši kot pri klasičnih postopkih toplotne obdelave⁴.

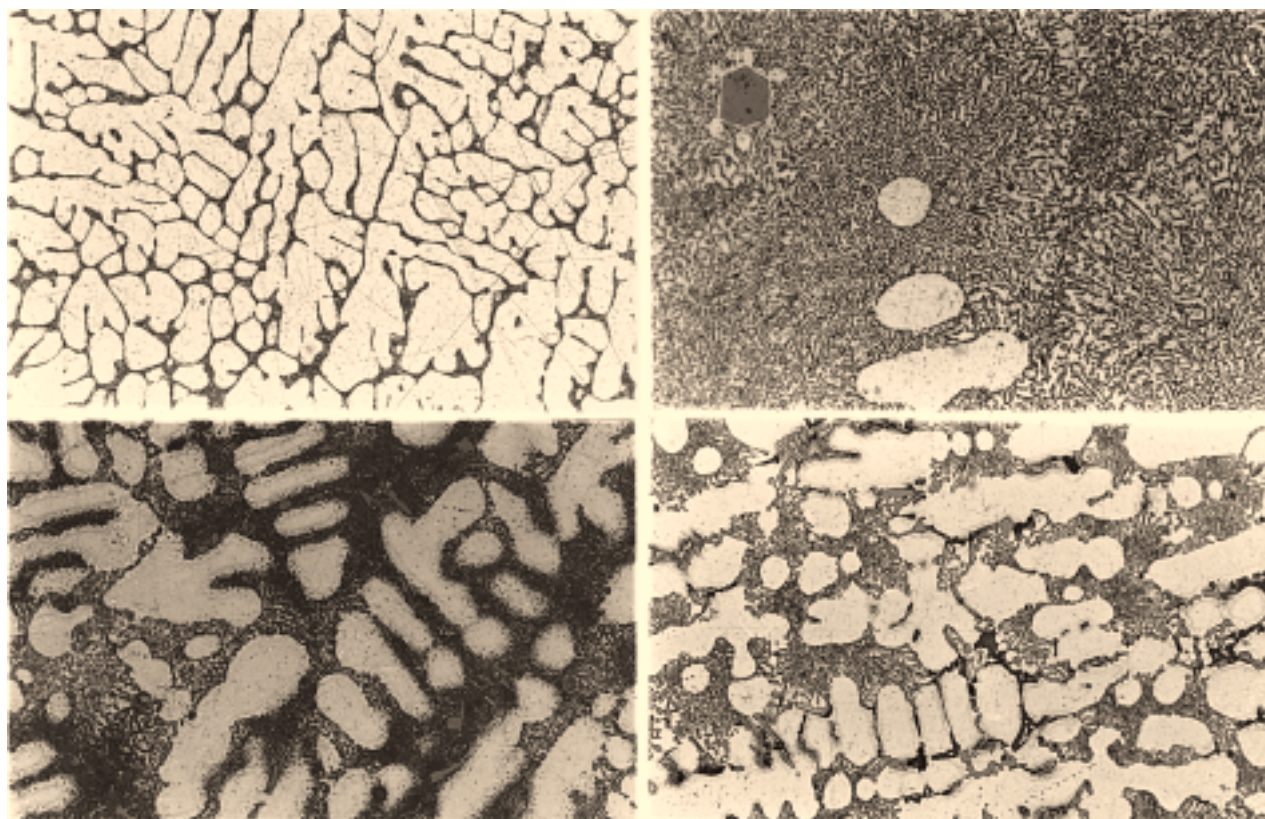
Cilj naše naloge je bil raziskati površinsko utrjevanje aluminijevih zlitin s silicijem in s pretaljevanjem tanke površinske plasti doseči zelo drobno in homogeno mikrostrukturo z enakomerno in povečano trdoto. Na **sliki 1** je v shematični obliki prikazan postopek laserskega pretaljevanja tanke površinske plasti s konstantnim pomikom laserskega snopa v smeri osi x.

Segrevanje površinske plasti materiala je odvisno od razmerja med absorbirano lasersko energijo in toplotno energijo odvedeno s površine. Če je razmerje med vneseno energijo laserskega snopa in odvodom toplotne energije dovolj visoko, temperatura v površinski plasti materiala hitro zraste, material se stali ali celo upari. Globina pretaljene površinske plasti je odvisna od gostote moči laserskega snopa na površini obdelovanca, interakcijskega časa t_i in od fizikalnih lastnosti materiala obdelovanca, kot so: toplotna prevodnost λ , specifična toplota c_p , talilna toplota in gostota materiala ρ .

2 EKSPERIMENTALNI POSTOPEK

2.1 Materiali

V **tabeli 1** so prikazane izbrane aluminijeve zlitine s silicijem in z drugimi legirnimi elementi. Mikrostrukturo smo analizirali v litem stanju in po pretaljevanju tanke površinske plasti. Sestava mikrostrukture pri obravna-



Slika 2: Povečava 100-kratna. Mikrostrukture raziskanih aluminij- silicijevih zlitin pred lasersko obdelavo: AlSi5 (A); AlSi12 (B); AlSi8Cu3 (C) in AlSi12NiCuMg (D)

Figure 2: Magn. 100x. Microstructure of the investigated aluminium- silicon alloys before the laser treatment: AlSi5 (A); AlSi12 (B); AlSi8Cu3 (C) and AlSi12NiCuMg (D)

vanih zlitin je naslednja: trdna raztopina, eutektik in intermetalne spojine.

Tabela 1: Kemična sestava in mikrotrdota aluminij - silicijevih zlitin
Table 1: Chemical composition and microhardness of aluminium - silicon alloys

ZLITINA	KEMIČNA SESTAVA (%)							TRDOTA HV _{1,0}
	Si	Fe	Mn	Mg	Cu	Ni	Ti	
AlSi5	4,76	0,17	0,11	0,01	-	-	0,012	52
AlSi12	12,5	0,24	0,25	-	-	-	0,009	63
AlSi8Cu3	7,7	-	0,4	-	3,5	-	-	76
AlSi12NiCuMg	12	0,01	0,01	1,04	0,93	0,9	0,013	102

Zlitina AlSi5 je pudevtektična. V mikrostrukturi prevladujejo kristalna zrna trdne raztopine aluminija s silicijem, malo je še eutektika iz trdne raztopine in iglic ali lamel silicija. Zlitina AlSi12 je eutektična, zlitina AlSi12CuNiMg pa pudevtektična in vsebuje poleg silicija še različne intermetalne spojine, ki povečujejo trdoto zlitine, npr.: Al₈Si₆Mg₃Fe in Al₃Ni. Aluminijeva zlitina s 7% silicija in 3% bakra je pudevtektična zlitina z mikrostrukturo trdne raztopine aluminija, silicija in bakra ter faze Al₂Cu.

Najnižjo trdoto 51 HV_{1,0} ima zlitina AlSi5, eutektična zlitina AlSi12 ima trdoto 63 HV_{1,0}, zlitina z bakrom 76 HV_{1,0}, zlitina s Cu, Ni, Mg pa ima trdoto 102 HV_{1,0}. Mikrostrukturne slike obravnavanih aluminijevih zlitin so prikazane na **sliki 2**.

2.2 Pogoji laserskega pretaljevanja

Preizkuse laserskega utrjevanja s pretaljevanjem tanke površinske plasti smo opravili na sistemu SPECTRA PHYSICS 820 s karakteristikami, podanimi v **tabeli 2**. Predhodne preskuse smo napravili v razmerah, ki so bile navedene v strokovni literaturi. Na osnovi poznanih odvisnosti za gostoto moči in vnos energije smo izračunali optimalne razmere za nataljevanje.

Gostota moči je odvisna od izbrane moči laserskega izvira in od premera laserske sledi na površini obdelovanca:

$$Q = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot D_b^2} \text{ [W/cm}^2\text{]}$$

P [W]... - moč laserskega izvira

D_b [mm]... - velikost sledi na površini obdelovanca

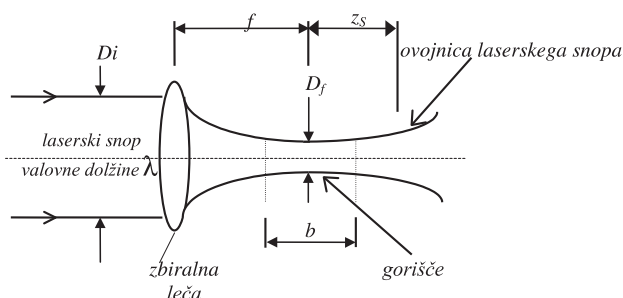
Vnesena energija "E" pa je definirana z razmerjem dovedene energije na enoto površine

$$E = \frac{4 \cdot P}{\pi \cdot v_b \cdot D_b} \text{ [J/mm}^2\text{]}$$

pri čemer je:

v_b [mm/min]... - hitrost pomika laserskega snopa in/ali obdelovanca

Literatura navaja, da je potrebna gostota moči za pretaljevanje površine aluminijevih zlitin s silicijem in drugimi legiranimi elementi med 10⁵ do 10⁶ W/mm² (5,6). V enačbi za gostoto moči Q smo spreminjali moč



Slika 3: Gorišče laserskega snopa

Figure 3: Laser beam focus

laserskega izvira P in defokusno razdaljo zbiralne leče laserske glave z_s. Na kvaliteto pretaljene plasti lahko vplivamo s spreminjanjem naslednjih parametrov: moč laserskega izvira P [W]; defokusna razdalja z_s [mm], ki definira velikost sledi D_b [mm] na površini obdelovanca; hitrost pomika laserskega snopa in/ali obdelovanca v_b [mm/min].

Na osnovi podatkov o izbranih gostotah moči oziroma vneseni energiji smo glede na izračune po enačbah določili pogoje, ki zagotavljajo zadostno količino vnesene energije, potrebne za pretaljevanje površine.

Laserski snop po izstopu iz generatorja laserske svetlobe usmerimo in fokusiramo z zrcali in lečami. Optične zakonitosti fokusiranja svetlobe laserskega snopa z Gaussovo porazdelitvijo moči prikazuje **slika 3**.

Premer laserskega snopa v gorišču izračunamo iz enačbe:

$$D_f = \frac{4 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D_i}$$

D_i [mm] premer izhodnega laserskega snopa

f [mm] goriščna razdalja zbiralne leče

λ [mm] valovna dolžina laserske svetlobe

z_s [mm] defokusna razdalja

Premer laserskega snopa na defokusni razdalji izračunamo iz:

$$D_b = D_f \cdot \sqrt{\left(1 + \left[\frac{z_s}{z_r}\right]^2\right)} = D_f \cdot \sqrt{\left(1 + \left[\frac{4 \cdot \lambda \cdot z_s}{\pi \cdot D_f^2}\right]^2\right)}$$

Izbrani so bili naslednji eksperimentalni parametri:

moč laserskega snopa... P = 1300, 1400 in 1500 W

defokusna razdalja... z_s = 8, 9 in 10 mm

hitrost pomika

laserskega snopa... v_b = 200, 300 in 400 mm/min

2.3 Priprava površine vzorcev z absorberjem

Absorptivnost je definirana kot razmerje med absorbiranim in vpadnim energijskim tokom in se

povečuje z naraščanjem temperature na površini materiala vzorca. Aluminij in aluminijeve zlitine imajo slabo absorptivnost za lasersko svetlobo. Zato je treba na površino aluminijevih zlitin pred laserskim pretaljevanjem nanesti ustrezno absorpcijsko sredstvo. Zato smo uporabili premazno sredstvo na osnovi silikonske smole z dodatkom pigmenta, obstojnega do temperature 650°C. Premazno sredstvo je bilo v obliki goste tekoče smole. Na površino materiala smo ga v plasti z debelino okoli 10 μm nanесли s čopičem. Z absorpcijskim premazom smo dosegli močno povečano absorpcijo laserske svetlobe in vnos energije, ki ustreza izračunani vrednosti.

V tabeli 2 so prikazane posamezne značilnosti laserskega sistema, na katerem smo izvajali utrjevanje s pretaljevanjem površinske plasti.

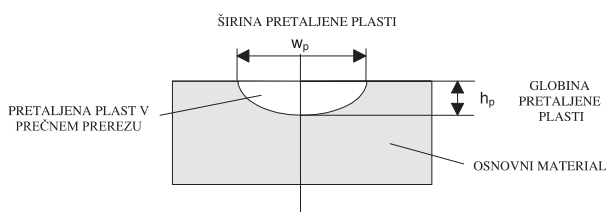
Tabela 2: Parametri laserskega obdelovalnega sistema
Table 2: Parameters of the laser processing system

Tip laserja	CO ₂ laser
Valovna dolžina laserske svetlobe	λ = 10,6 μm
Maksimalna moč laserskega izvira	P = 1540 W
Premer izhodnega laserskega snopa	D _i = 19 mm
Premer laserskega snopa v goriščni točki	D _r = 0,0902 mm
Struktura moda	TEM ₀₀
Zaščitni plin	argon pri tlaku 0,2 bara

3 EKSPERIMENTALNI REZULTATI

3.1 Velikost pretaljene plasti

Utrjevanje premaznega sredstva je bilo opravljeno pri temperaturi okolice (T_{ok}) in pri temperaturah 100, 150, 200 in 250°C. Po priporočilu proizvajalca smo izbrali enoten čas utrjevanja, eno uro. Sledilo pa je polurno ohlajanje v izključeni peči in nato še pri temperaturi okolice na mirnem zraku. Cilj različnih razmer pri utrjevanju termostabilnega smolnega premaza je bil preučiti njegovo absorpcijsko sposobnost za lasersko svetlobo in s tem tudi ugotoviti vpliv na velikost pretaljene plasti po pretaljevanju. Površina se po utrjevanju na videz ni spremenila. Po zagotovilih proizvajalca absorber v procesu pretaljevanja izpari in ne vpliva na nastanek pretaljene plasti. Za preizkus

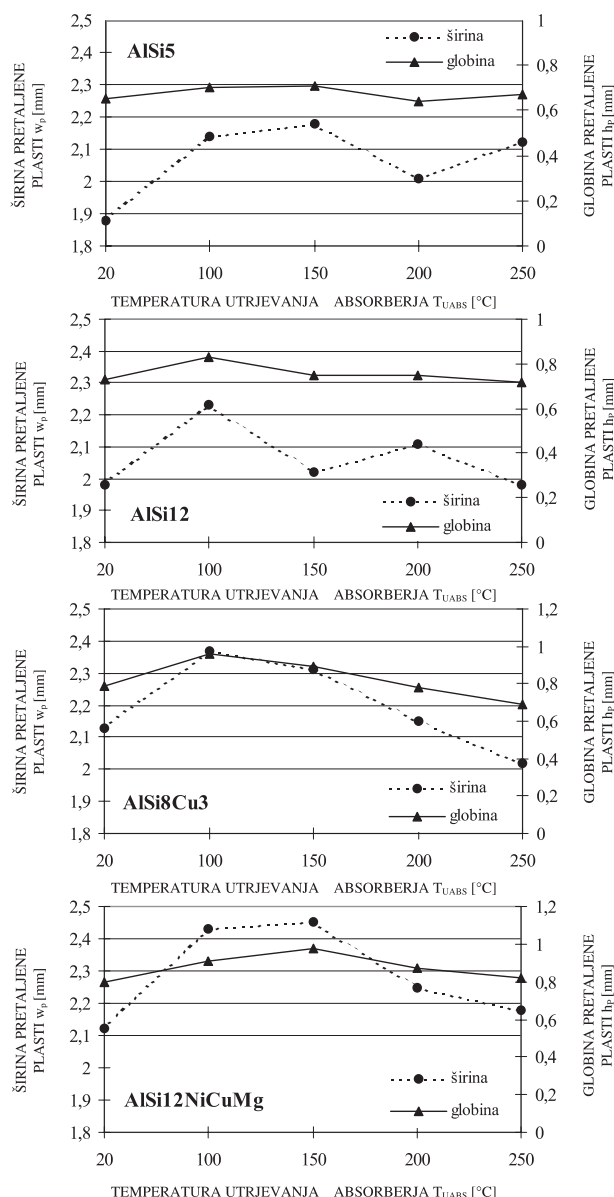


Slika 4: Prečni prerez vzorca s pretaljeno lasersko plastjo
Figure 4: Cross-section of the specimen with the remelted laser trace

absorpcijske sposobnosti pri različnih temperaturah utrjenega premaza smo izbrali naslednje eksperimentalne pogoje:

- moč laserskega izvira P = 1500 W
- hitrost pomika laserskega snopa v_b = 350 mm/min
- defokus z_S = 9 mm.

Na optičnem merilnem mikroskopu smo izmerili globino in širino lasersko pretaljene enojne sledi. Na sliki 4 je prikazana pretaljena plast z označeno širino w_p in globino h_p.



Slika 5: Velikost pretaljene plasti po laserskem pretaljevanju zlitin AISi5, AISi12, AISi8Cu3 in AISi12NiCuMg v odvisnosti od temperature utrjevanja absorberja pri danih obdelovalnih pogojih pretaljevanja: P = 1500W, v_b = 350 mm/min in z_S = 9 mm

Figure 5: Size of the layer obtained by after laser remelting AISi5, AISi12, AISi8Cu3 and AISi12NiCuMg versus solidification temperature of the absorber in the given remelting conditions: P = 1500W, v_b = 350 mm/min and z_S = 9 mm

Tabela 3: Zlitina AlSi12. Globine in širine pretaljene plasti pri različnih pogojih laserskega utrjevanja
Table 3: Alloy AlSi12. Depth and width of remelted layer at different experimental conditions

MATERIAL: AlSi12		HITROST POMIKA VZORCA/SNOPA v_b (mm/min)					
P...moč laserskega izvira z_s ...defokusna razdalja		400		300		200	
		VELIKOST LASERSKE SLEDI; w_p (mm), h_p (mm)					
		w_p	h_p	w_p	h_p	w_p	h_p
P= 1500W	zs=8mm	1,61	0,47	1,88	0,64	2	0,74
	zs=9mm	1,94	0,69	2,02	0,76	2,47	1,05
	zs=10mm	2,09	0,55	2,19	0,82	2,39	0,95
P=1400W	zs=8mm	1,63	0,54	1,74	0,64	2,05	0,81
	zs=9mm	1,74	0,58	1,97	0,73	2,4	1,05
	zs=10mm	1,94	0,68	1,95	0,74	2,42	0,96
P=1300W	zs=8mm	1,53	0,52	1,7	0,65	2,01	0,82
	zs=9mm	1,88	0,7	1,96	0,75	2,27	0,94
	zs=10mm	1,96	0,73	2,18	0,85	2,91	1,31

Na **sliki 5** je prikazan vpliv temperature utrjevanja absorberja na širino in globino pretaljene plasti. Največja je pretaljena sled po utrjevanju absorberja med 100 in 150°C. Pri zlitini AlSi12 in AlSi8Cu smo dobili največjo sled, če je bil absorber utrjen pri nižji temperaturi, okoli 100°C, pri zlitinah AlSi5 in AlSi12CuNiMg pa pri temperaturi utrjevanja absorberja okoli 150°C.

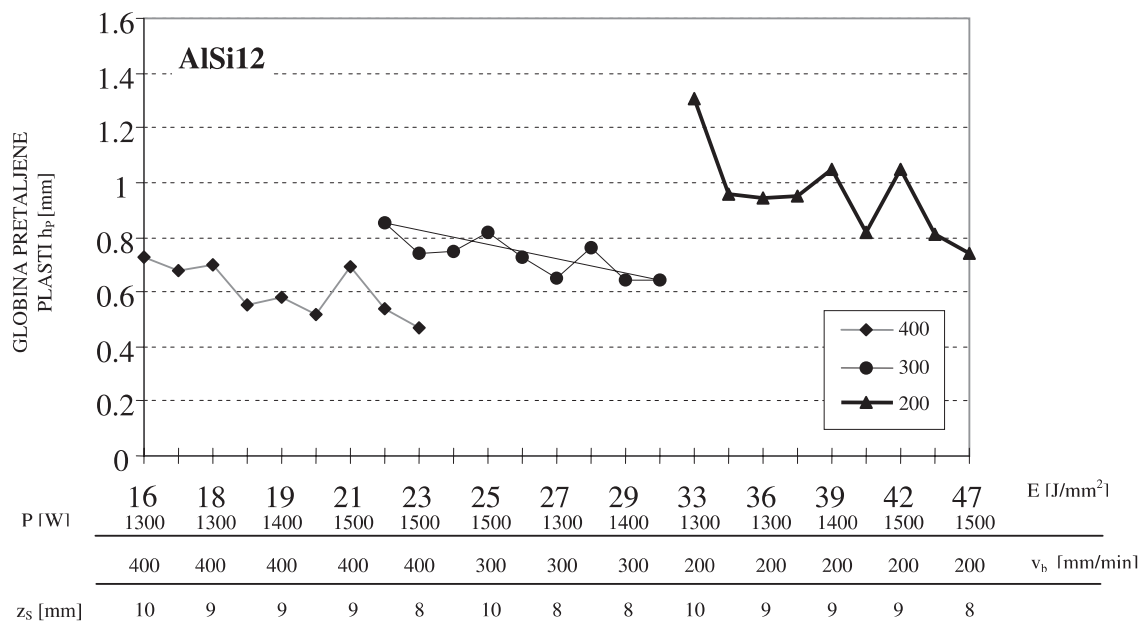
V nekaterih primerih je bila velikost pretaljene plasti pri višji temperaturi utrjevanja absorberja enaka ali celo nižja kot po utrjevanju absorberja pri temperaturi okolice. Druge ugotovitve:

- Največja širina plasti je bila dosežena v zlitini AlSi12CuNiMg, in sicer $w_p=2,5$ mm
- Največja globina plasti je bila dosežena v zlitini AlSi12CuNiMg, in sicer $h_p=2,45$ mm

- Najmanjša širina plasti je bila dosežena v zlitini AlSi5, in sicer $w_p=2,3$ mm
- Najmanjša globina plasti je bila dosežena v zlitini AlSi5, in sicer $h_p=2,2$ mm
- Razlika med največjo širino in globino pretaljene plasti pri vzorcih z absorberjem, utrjenim pri temperaturi okolice, in tistim, utrjenim na temperaturi 100-150°C, je bila 14%.

V **tabeli 3** so prikazane širine in globine pretaljene plasti za različno moč snopa in pomik vzorca AlSi12.

Najmanjšo širino pretaljene sledi $w_p=1,53$ mm smo dobili pri najmanjši moči in največji hitrosti pomika laserskega snopa $v_b=400$ mm/min, največjo širino pretaljene sledi $w_p=2,91$ mm pa pri najmanjši hitrosti pomika laserskega snopa $v_b=200$ mm/min. Drugi, zelo pomemben podatek je globina pretaljene sledi h_p , ki se



Slika 6: Globina pretaljene površinske plasti h_p v odvisnosti od vnosa energije za zlitino AlSi12

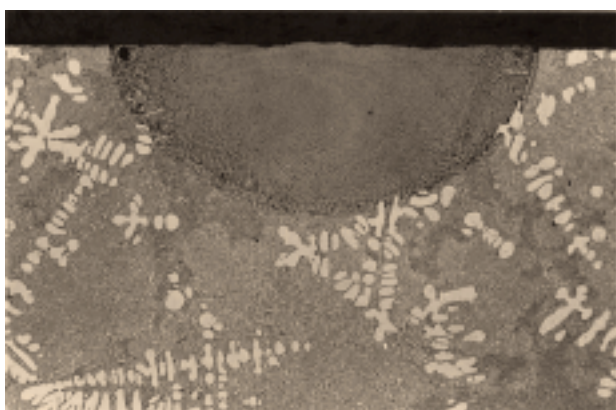
Figure 6: Depth of the remelted surface layer h_p versus energy input for alloy AlSi12

giblje od najmanjše 0,47 mm do največje 1,31 mm. Širina pretaljene sledi je znatno večja od globine, in sicer kar za faktor tri do štiri. Podatki v **tabeli 3** povedo, da so nastala odstopanja dovedenih močeh pri isti moči laserskega izvira in isti hitrosti pomika laserskega snopa med različnimi defokusnimi razdaljami. Razmere pri pretaljevanju so bile zelo stabilne, zato menimo, da je do odstopanj v globinah pretaljenih sledi lahko prišlo le zaradi zmanjšane učinka absorpcijskega nanosa. Napake zaradi merjenja velikosti pretaljenih sledi lahko izključimo, ker so bile meritve izvedene pri pravih povečavah in z merilnikom, ki omogoča točnost meritev na mikrometrski skali.

Na **sliki 6** je prikazano spreminjanje globine pretaljene plasti v odvisnosti od vnosa energije za plasti, nastale pri različnih hitrostih pomika laserskega snopa, in sicer za nižji vnos energije ($v_b=400$ mm/min), srednji vnos energije ($v_b=300$ mm/min) in najvišji vnos energije pri najmanjši hitrosti pomika laserskega snopa $v_b=200$ mm/min. Največji vpliv na nastalo globino ima hitrost pomika laserskega snopa, medtem ko je manjši vpliv stopnje defokusa. Zaradi različnih stopenj defokusa je bil premer laserskega snopa na površini od 1,2 do 1,4 mm, medtem ko je bila dosežena širina pretaljene plasti w_p od 1,61 do 2,91 mm. Lahko torej ugotovimo, da se zaradi prevajanja toplote v hladen material vzorca poveča širina pretaljene plasti do 30% pri najmanjših vnosih energije do 110% pri največjih vnosih.

3.2 Mikrostruktura v pretaljeni površinski plasti

Makro- in mikrostrukturno analizo pretaljene plasti smo naredili le na vzorcih z enojno sledjo. Zaradi zelo hitrega odvajanja toplote v notranjost se je material na površini strdil zelo hitro. Usmerjenost zelo drobnih dendritov trdne raztopine definira vektor odvoda toplote na mejni površini med talino in trdno zlitino. V pretaljeni plasti nastane nova mikrostruktura, ki jo opišemo s



Slika 7: Povečava 40-kratna. Mikrostruktura na prečnem prerezu pretaljene plasti za zlitino AlSi12. Pogoji pretaljevanja: $P = 1500W$; $z_s = 8mm$; $v_b = 400mm/min$

Figure 7: Magn. 40x. Microstructure on the cross-section of the remelted layer for the alloy AlSi12. Remelting conditions: $P = 1500W$; $z_s = 8 mm$; $v_b = 400 mm/min$

spremembo dendritov ter deležem eutektika. Nastala mikrostruktura v pretaljeni plasti je zelo drobna in enakomerna.

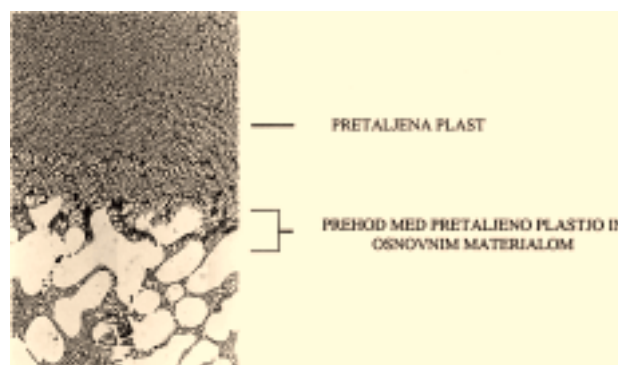
S spremembo hitrosti pomika obdelovanca in/ali laserskega snopa smo spreminjali tudi globino pretaljene plasti. To spreminja velikost in smer vektorja odvoda toplote in vektor hitrosti strjevanja taline na mejni površini in v končni fazi spreminja mikromorfologijo eutektika. Na **sliki 7** je prikazan presek enojne pretaljene plasti pri zlitini AlSi12. Širina in globina pretaljene plasti je odvisna od razmer in se lahko spreminjajo v širokem razponu. Pretaljena površina je enakomerna, malo hrapava in primerna za številne aplikacije.

Na **sliki 8** je prikazana mikrostruktura podevtektične zlitine AlSi8Cu3. Pretaljeno plast lahko popišemo z dvema conama:

- pretaljena cona
- prehod med pretaljeno cono in osnovno mikrostruk-turo.

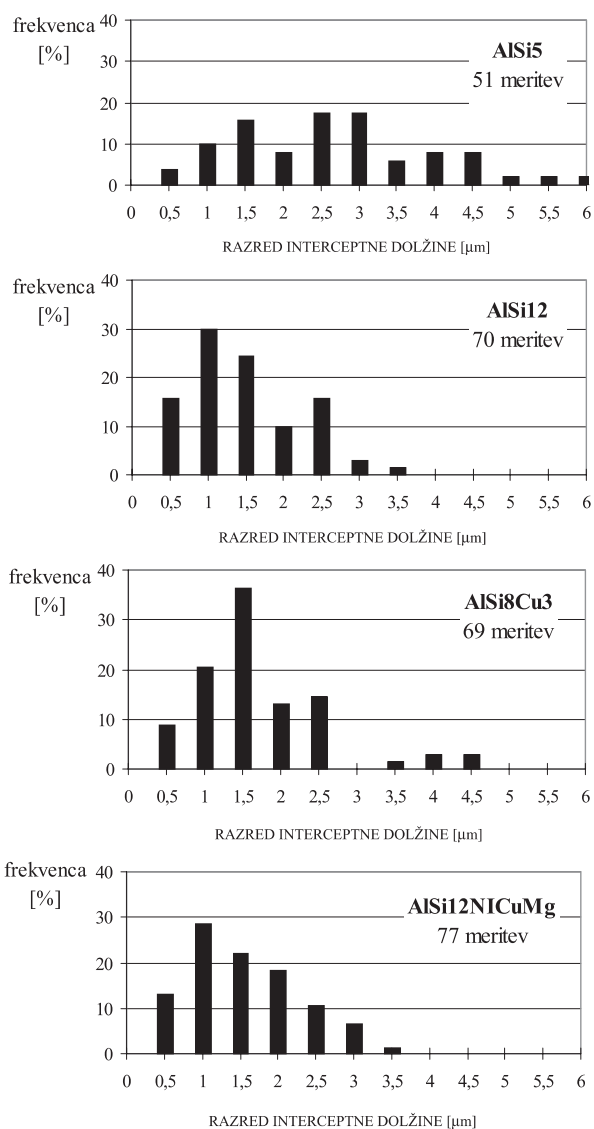
Stereološko analizo smo izvršili z merjenjem interceptne dolžine dendritov. To meritev smo opravili na posnetkih iz elektronskega mikroskopa pri 7500-kratni povečavi. Pri tej povečavi smo lahko dovolj zanesljivo merili interceptne dolžine okoli $0,5 \mu m$, kar popolnoma ustreza zahtevam opisa mikrostrukturnih razlik. Na **sliki 9** je prikazana porazdelitev velikosti interceptnih dolžin za dendrite trdne raztopine v zlitinah. Najmanjše število meritev interceptnih dolžin je bilo od 51 za zlitino AlSi5 in največje do 77 za zlitino AlSi12CuNiMg. Največje interceptne dolžine okrog $6 \mu m$ smo izmerili pri podevtektični zlitini AlSi5. Povprečne interceptne dolžine pri posameznih zlitinah se močno razlikujejo in je najnižja v eutektičnih zlitinah AlSi12 in AlSi12CuNiMg in podevtektični zlitini AlSi8Cu3. Znatno večja pa je povprečna interceptna dolžina pri podevtektični zlitini AlSi5 in je med $2,5$ in $3,0 \mu m$.

Izmerjene interceptne dolžine so bile pri zlitini AlSi5 v območju med $0,5$ in $6 \mu m$, medtem ko je pri drugih zlitinah območje znatno nižje, in sicer od $0,5$ do $3,5 \mu m$ oziroma $4,5 \mu m$. Porazdelitev in velikost silicijevih



Slika 8: Povečava 200-kratna. Mikrostruktura na prečnem prerezu v prehodnem področju med pretaljeno cono in osnovnim materialom

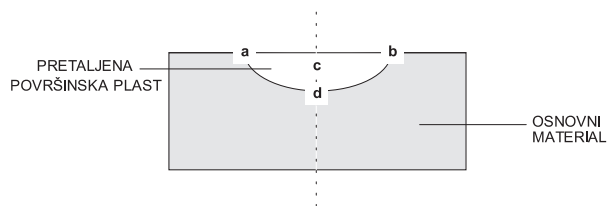
Figure 8: Magn. 200x. Microstructure on the cross-section in the transition area between the remelted layer and the base material



Slika 9: Porazdelitev interceptnih dolžin za dendritna zrna matriksa. Pogoji pretaljevanja: $P=1500W$, $z_S=8mm$, $v_b=400mm/min$

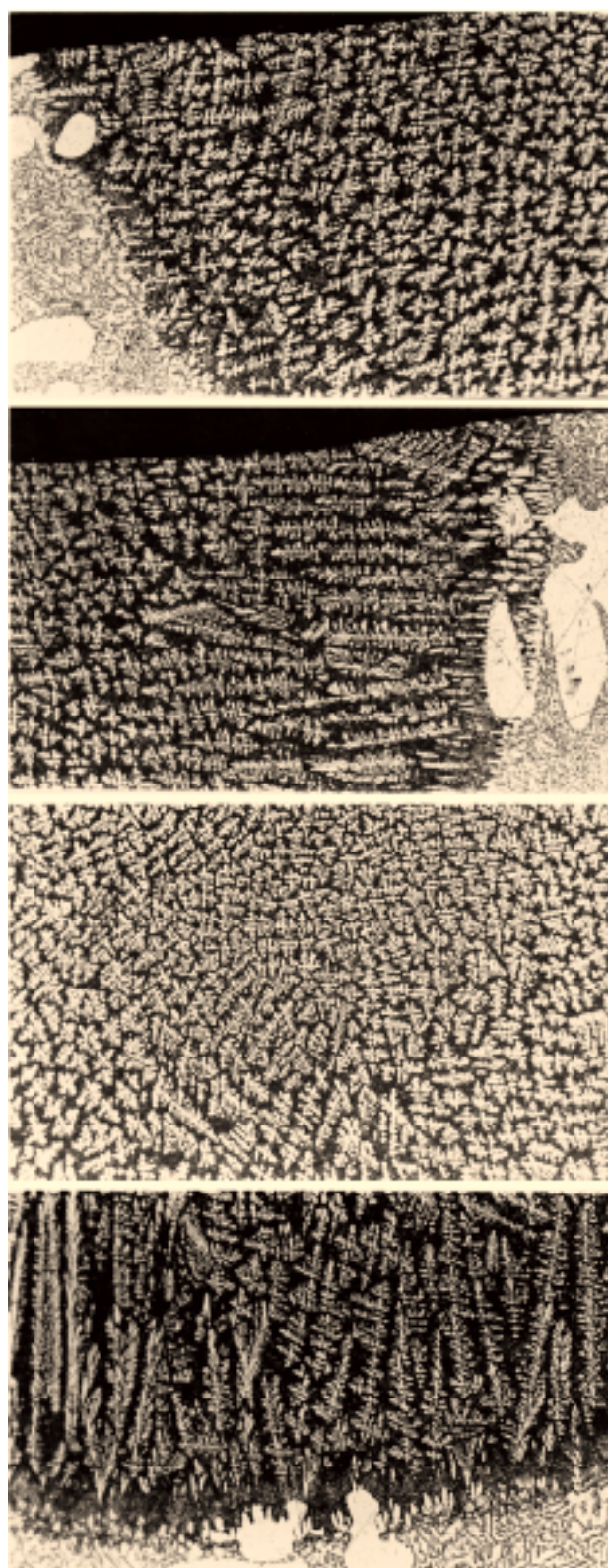
Figure 9: Distribution of the intercepting lengths on matrix dendrite grains. Remelting conditions: $P=1500W$, $z_S=8mm$, $v_b=400mm/min$

kristalov in trdota matriksa določajo mehanske lastnosti in obrabno obstojnost pretaljene površinske plasti. Dodatno pa v zlitini AISi8Cu3 in v zlitini AISi12NiCuMg vplivajo na mikrostrukturo in mehanske lastnosti pretaljene plasti tudi izločki intermetalnih



Slika 10: Izbrana mesta za stereološko analizo pretaljene plasti

Figure 10: Selected spots for stereologic analysis of the remelted layer



Slika 11: Povečava 200-kratna. Mikrostruktura pretaljene plasti na izbranih mestih. Zlitina: AISi12. Pogoji pretaljevanja: $P=1500W$; $z_S=8mm$, $v_b=200mm/min$

Figure 11: Magn. 200x. Microstructure on the selected spots. Alloy: AISi12. Remelting conditions: $P=1500W$; $z_S=8mm$, $v_b=200mm/min$

spojin, ki so bile pod ločljivostjo posnetkov v elektronskem mikroskopu in močno povečujejo trdoto.

Na **sliki 10** so prikazana mesta, na katerih smo opravili mikrostrukturno analizo pretaljene plasti (mesto c) in prav tako analizo mikrostrukture na prehodu med pretaljeno in osnovno mikrostrukturno (mesto a, b in d).

Na **sliki 11** so prikazane mikrostrukture v točkah, kjer je bila izvršena stereološka analiza zlitine AlSi12. Na prehodu med pretaljeno cono in osnovnim materialom na mestu "b" je nastalo področje z izrazito usmerjenostjo dendritov. Manj izrazito pa je dendritno strjevanje na nasprotni strani na mestu "a" in je podobno strjevanju v osrednjem delu pretaljene plasti na mestu "c". Na spodnjem delu pretaljene plasti na mestu "d" pa lahko ugotovimo, da strjevanje poteka pri podobnih ohlajevalnih razmerah kot na mestu "b". Zaradi zelo velikih hitrosti strjevanja nastaja prenasočena trdna raztopina, kar povečuje trdoto pretaljene plasti.

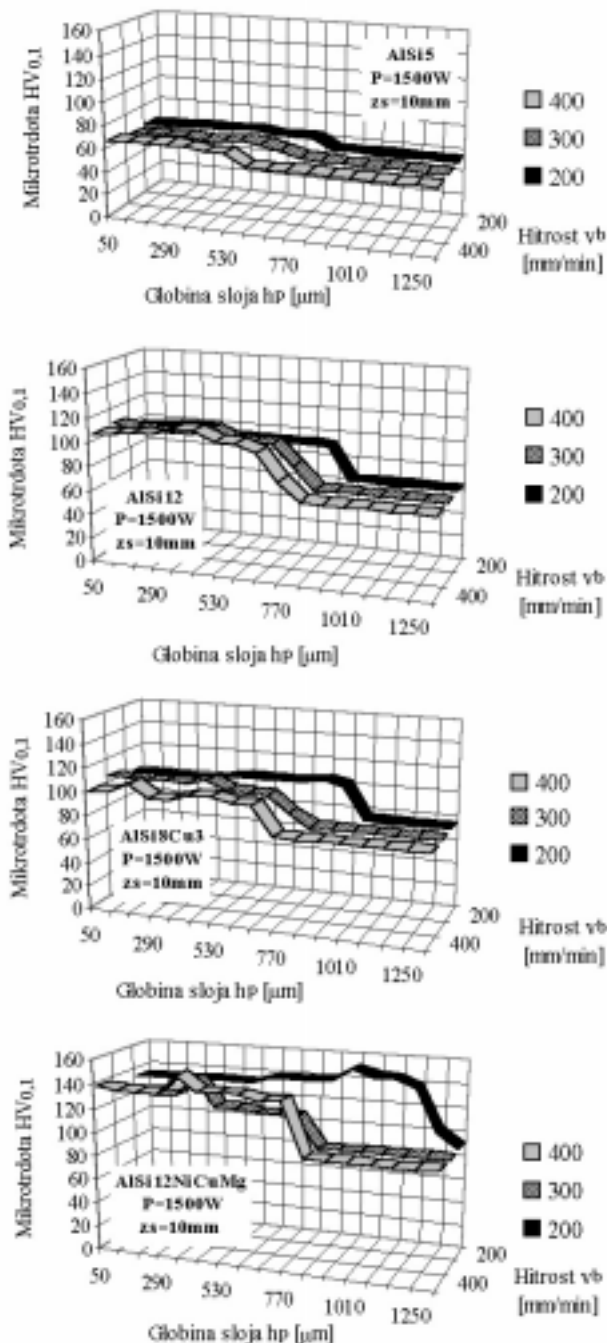
3.3 Mikrotrdota v pretaljeni plasti

Mikrotrdota je bila izmerjena po Vickersovi metodi po globini osrednjega dela pretaljene plasti v dveh vrstah z zamikom odtiskov med njima in z zamiki med vtiski po globini v velikosti štirih diagonal vtiska. Trdota je bila izmerjena pri obremenitvi 1N z najmanj 10 vtiski znotraj pretaljene plasti. Na **sliki 12** so prikazane mikrotrdote za vse obravnavane zlitine. Vnos energije je bil za posamezne zlitine različen in smo ga spreminjali z različnimi hitrostmi laserskega snopa po površini vzorca.

Iz odvisnosti na **sliki 12** lahko ugotovimo naslednje:

- Potek mikrotrdote po globini pretaljenih plasti je za posamezne vrste zlitin zelo podoben. Od količine vnesene energije pa je odvisna globina s povečano trdoto, zato je pri manjših hitrostih pomikov laserske svetlobe po površini vzorca dosežena večja globina pretaljene plasti in s tem tudi večja globina z enakomerno in povečano trdoto.
- Najnižja mikrotrdota v pretaljeni plasti med 60 in 65 $HV_{0,1}$ v odvisnosti od segrevanja in ohlajanja je dosežena v zlitini AlSi5. Mikrotrdota padevektične zlitine se je povečala od 52 $HV_{0,1}$ v izhodiščni zlitini na 62 $HV_{0,1}$ v pretaljenem stanju. Povečanje mikrotrdote dosega okoli 20%.
- Po pretaljevanju eutektične zlitine AlSi12 in zlitine AlSi8Cu3 je potek mikrotrdote zelo podoben. Dosežena mikrotrdota je okoli 100 $HV_{0,1}$, kar pomeni za 30 do 40% povečanje mikrotrdote zlitine glede na izhodiščno stanje. To povečanje pripisujemo enakomerni porazdelitvi drobnih delcev silicija in prenasočenemu matriksu. Mikrotrdota je nekoliko večja v notranjosti pretaljene plasti kot tik ob površini.
- V zlitini AlSi12NiCuMg dosežemo po pretaljevanju površinske plasti maksimalno mikrotrdoto do 160 $HV_{0,1}$ in povprečno mikrotrdoto okoli 140 $HV_{0,1}$. Največja globina pretaljene plasti je pri hitrosti pomika laserskega snopa $v_b=200\text{mm/min}$ in je okoli

$h_p=1,3\text{mm}$. Podobno kot pri prejšnjih dveh zlitinah tudi v tej zlitini dosežemo porast mikrotrdote v osrednjem delu pretaljene plasti v globini med 350 in 450 μm pri obeh večjih hitrostih pomika laserskega snopa in med 600 in 1100 μm pri najnižji hitrosti pomika. Največjo utrditev smo našli v spodnjem delu pretaljene plasti.



Slika 12: Potek mikrotrdote za tri hitrosti pomika vzorca. Aluminijske zlitine: AlSi5; AlSi12; AlSi8Cu3 in AlSi12NiCuMg. Pogoji pretaljevanja: P=1500W; z_S=10mm

Figure 12: In depth microhardness for the remelted layer by three travelling rates. Aluminium alloys: AlSi5; AlSi12; AlSi8Cu3 and AlSi12NiCuMg. Remelting conditions: P=1500W; z_S=10mm

4 SKLEPI

S pomikom laserske svetlobe po površini vzorca dosežemo hitro segrevanje, taljenje in strjevanje materiala. Utrjevanje zaradi hitrega strjevanja je čisto, enostaven, praktičen in cenen postopek v primerjavi z drugimi postopki površinske toplotne obdelave. Naslednje ugotovitve potrjujejo učinkovitost laserskega utrjevanja s pretaljevanjem tanke površinske plasti:

- Laserski snop pri izbranih parametrih obdelave omogoča zelo intenziven vnos energije na površino oziroma v površinsko plast aluminijevih zlitin. Po strjevanju te plasti nastane mnogo bolj drobnozrnata mikrostruktura, kot je bila pred lasersko obdelavo.
- Z laserskim pretaljevanjem tanke površinske plasti smo dosegli načrtovano povečanje trdote na površini in znatno večjo mikrotrdoto po globini pretaljene plasti. V pretaljeni tanki površinski plasti je doseženo maksimalno povečanje mikrotrdote med 60 in 160 HV_{0,1} v odvisnosti od vrste aluminijeve zlitine, kar je 20 do 40% nad trdoto pred lasersko obdelavo.
- Dimenzije pretaljene cone se v dani zlitini pri določenih parametrih ne spreminjajo bistveno, kar potrjuje stabilnost procesa laserske toplotne obdelave. Z relativno majhnim razponom pri vnosu laserske energije smo pri teh razmerah zagotovili optimalno kvaliteto in dimenzijo pretaljene površinske plasti. Pri pretaljevanju je bila dosežena globina pretaljene plasti med 0,47 in 1,31mm.

Vse te ugotovitve potrjujejo sklep, da je lasersko utrjevanje s pretaljevanjem tanke površinske plasti aluminijevih zlitin kakovosten in sodoben proces, ki zagotavlja tršo površino in ohrani žilavo jedro.

5 LITERATURA

- ¹ Luft U., Bergmann W., Mordike B. L.: Laser Surface Melting of Aluminium Alloys; *Paper presented at the European Conference on Laser Treatment of Materials*, Bad Nauheim 1986, Laser Treatment of Materials, Eds.: B. L. Mordike, DEM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel **1987**, 147-163
- ² Vollmer H., Hornbogen E.: Microstructure of Laser Treated Al-Si Alloys; *Paper presented at the European Conference on Laser Treatment of Materials*, Bad Nauheim 1986, Laser Treatment of Materials, Eds.: B. L. Mordike, DEM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel **1987**, 163-170
- ³ Conquerelle G., Fachinetti J. L.: Friction and Wear of Laser Treated Aluminium-Silicon Alloys, *Paper presented at the European Conference on Laser Treatment of Materials*, Bad Nauheim 1986, Laser Treatment of Materials, Eds.: B.L. Mordike, DEM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel **1987**, 171-178
- ⁴ Antona P. L., Appiano S., Moschini: Laser Surface Remelting and Alloying of Aluminium Alloys, *Paper presented at the European Conference on Laser Treatment of Materials*, Bad Nauheim 1986, Laser Treatment of Materials, Eds.: B.L. Mordike, DEM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel **1987**, 133-145
- ⁵ Grum J., Božič S., Šturm R.: Surface Integrity in Laser Remelting of Aluminium Alloys, *Proceedings from Materials Solutions Conference on Aluminium Casting Technology*, Rosemont, Illinois, 1998, Eds.: M. Tiryakioglu, J. Compbell, ASM International Materials Park, Ohio, USA, **1998**, 277-284
- ⁶ Hawkes I. C., Steen W. M., West D. R. F.: Laser Surface Melt Hardening of S.G. Irons; *Proceedings of the 1st International Conference on Laser in Manufacturing*, Brighton, UK, **1983**, 97-108