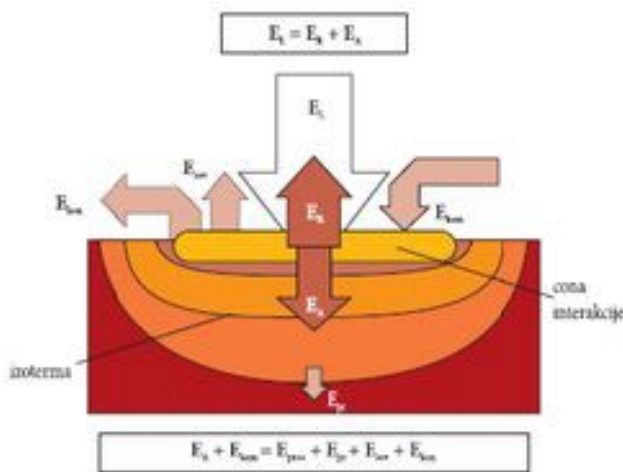


2.3.1 Rezanje z laserjem in konkurenčnimi tehnologijami

Laserska obdelava je konec sedemdesetih let dosegla svojo zrelo dobo, čeprav so bili osnovni principi delovanja laserja znani že pred drugo svetovno vojno. Leta 1960 je bil izdelan laser na trdno snov (rubinski laser), sledili pa so mu plinski laserji (CO₂, He-Ne, Ar itn.). Toda šele kombinacija laserja s krmilnim sistemom NC je laser privedla tudi v proizvodnjo. Danes se na področju laserskega rezanja največ uporabljajo CO₂- in Nd-YAG-laserji. V zadnjih desetih letih gre razvoj predvsem v nove koncepte izvorov žarka, izboljšanje kakovosti žarka in s tem obdelave, v povečevanje robustnosti laserskih sistemov, zmanjšanje stroškov izdelave pri povečani moči laserjev in višje podajalne hitrosti ter vključevanje laserskih sistemov v velike računalniško krmiljene obdelovalne centre, ki so enako učinkoviti pri velikoserijski proizvodnji kot pri hitrih spremembah v obliki in vrsti obdelovancev prototipne izdelave.

Značilnosti laserskega rezanja



Žarek, ki je izvor sevalne energije E_L , je fokusiran na površino obdelovanca; tako dosežemo zadostno površinsko gostoto moči, da se material segreje, stali ali tudi upari. Material del laserske energije v obliki svetlobe določene valovne dolžine absorbira v obliki toplote, del jo odbije E_R , del pa jo lahko tudi prepusti skozi. Absorbirana laserska energija E_A služi kot toplota, potrebna

za fazne spremembe materiala obdelovanca v območju interakcije. Pri laserskem rezanju skušamo zagotoviti razmere, pri katerih se material obdelovanca stali in odstrani, preden pride do pomembnega prevajanja toplote E_{pr} v okolico reza. Izgube zaradi sevanja E_{sev} in konvekcije E_{kon} so zanemarljive. Energijsko bilanco laserskega rezanja prikazuje Slika 1.

V primerjavi s skupnimi značilnostmi termičnih postopkov je laserska obdelava povezana s pomembnim fizikalnim fenomenom, povezanim z interakcijo žarka z materialom obdelovanca. Najpomembnejše lastnosti materiala za lasersko obdelavo so:

1. Lastnosti, povezane z absorpcijo, definirajo, kako dobro se energija svetlobe veže z nekim materialom. Te lastnosti so stanje površine, absorpcijski koeficient in reflektivnost pri valovni dolžini laserske svetlobe določenega izvora.

2. Lastnosti, ki so povezane s prenosom toplote oz. toplotnim tokom v materialu in določajo temperaturno porazdelitev. To sta predvsem toplotna prevodnost κ in difuzija d , ki ovirata rezanje. Iz tega sledi, da z laserjem učinkoviteje režemo toplotne izolatorje (plastične mase, lesne izdelke, gume, tekstil ...) kot prevodnike (kovine).

3. Termodinamične lastnosti določajo količino energije (toplote), ki je potrebna za želene fazne spremembe v materialu, taljenje in izparevanje. To so predvsem gostota ρ , specifična toplota c , temperatura tališča T_t in vrelišča T_v ter talilna toplota Q_t in izparilna toplota Q_i .

Ne smemo pozabiti tudi fizikalnokemijskih lastnosti, povezanih predvsem z reakcijami materiala na rezalne pline. Pri laserskem rezanju namreč v procesu sodeluje curek rezalnega plina. V primeru rezanja konstrukcijskih jekel s kisikom predstavlja eksotermna reakcija dodaten izvor energije E-kem (Slika 1). Po navadi plin dovajamo soosno z žarkom, v posebnih primerih pa tudi od strani ali s spodnje strani obdelovanca. Curek plina ima poleg fizikalnokemijskega učinka nalogo izpihovati raztaljeno gradivo iz rezalnega kanala. Zaradi pretoka plina lahko izgubimo del absorbirane toplote v obliki konvekcije E-kon.

OBDELJENA [mm]	KONVEKCIJA [mm]	T ₀ [mm]
1	0,02	0,1-1
3	0,05	0,5-2,5
5	0,07	1-5
10	0,10	3-6
15	0,23	9-18
20	0,26	8-16

Prav kombinacije intenzitete žarka in vrste ter tlaka rezalnega plina v povezavi z materialom obdelovanca nam določajo tri osnovne načine laserskega rezanja.

A Lasersko sublimacijsko rezanje

Večina materiala se z visoko intenzivnostjo laserskega žarka upari in odnese pod nizkim pritiskom inertnega plina (dušik in tudi stisnjen zrak med 10 do 100 kPa).

Materiali: les, papir, širok spekter umetnih mas, od kompozitov do keramike

- + majhna hrapavost na površini reza, majhno območje odvisno od toplote (HAZ1), visoka hitrost podajanja za zgoraj naštetih materiale
- za rezanje kovin na ta način je potrebna zelo veliko energija

B Lasersko talilno rezanje

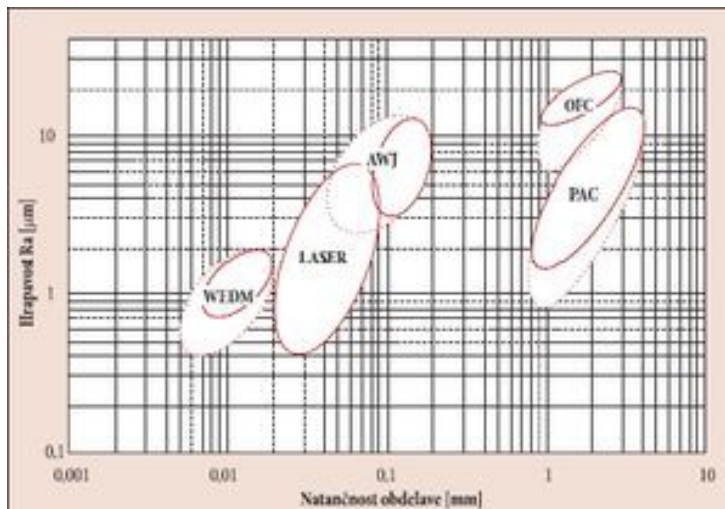
Material je segret in staljen z laserskim žarkom ter odnesen s tokom inertnega plina. Pri tem med plinom in obdelovancem ne pride do eksotermne reakcije. Za rezalni plin se uporablja predvsem dušik in argon pod visokim tlakom (1 do 2 MPa).

Materiali: visokolegirana in Cr-Ni-jekla, nikljeve legure, titanove zlitine

- + neoksidirana površina reza, majhna HAZ in oksidacija ob učinkoviti zaščitni atmosferi, t. i. »clean cut«
- večja hrapavost površine reza zaradi staljenega materiala, nizka hitrost podajanja in zaradi velike porabe rezalnih plinov visoki stroški obdelave

C Lasersko plamensko rezanje

Reaktivni asistenčni plin – kisik (približno 500 kPa) se uporablja za povečanje dovedene energije v obliki eksotermne reakcije in oksidacije (gorenja) materiala, segretega z laserjem.



Materiali: nizkoogljična jekla

- + oksidacija železa zviša absorpcijski koeficient za sevanje CO₂-laserja na 90 %, eksotermno gorenje daje tudi do 70 % procesne energije; iz tega sledi visoka hitrost rezanja pri nižjih laserskih močeh
- rezultati rezanja (jeklo : oksidna plast na površini reza), vendar brez bistvenih mehanskih sprememb

Značilnosti reza pri laserski obdelavi

Hrapavost Ra pri obdelavi z laserjem je zelo odvisna od materiala. Material določa, kateri način laserskega rezanja izberemo (sublimacijski, talilni ali plamenski). Na hrapavost še posebej vpliva debelina materiala (Slika 2). Ra se giblje med 1 in nekaj več kot 10 µm, v izjemnih primerih je tudi manj kot 1 µm (sublimacijsko rezanje polimerov). **Koničnost reza** u je definirana z odstopanjem realne konture reza od idealne pravokotne. **Zaostajanje žarka** R vpliva na dimenzijsko odstopanje, saj pri rezanju majhnih radijev prihaja do napake, ki je izrazita na spodnjem robu pločevine. Pri rezanju tankih pločevin ima zaostajanje majhen vpliv na odstopanje od želenih dimenzij. Obe značilnosti reza se pojavljata tudi pri drugih postopkih s koncentriranim

izvorom energije, vendar sta prav pri laserskem rezanju najmanj izraziti. Na Sliki 2 so prikazane okvirne vrednosti za koničnost in hrapavost pri rezanju konstrukcijskih jekel v odvisnosti od debeline materiala. Na vrednost vplivata predvsem izvor laserskega žarka (moč, kakovost žarka, goriščna razdalja idr.) in mesto merjenja na površini reza.

Za posamezno obdelavo pri določeni laserski moči je treba nastaviti naslednje parametre in jih nato ohranjati čim bolj konstantne:

- lečo ustrezne goriščne razdalje,
- višino gorišča,
- šobo z najprimernejšo odprtino in višino reže med šobo in površino obdelovanca,
- pretok asistenčnih oz. rezalnih plinov,
- hitrost pomikanja.

Izbira teh parametrov je izkustvena, vendar so vrednosti za različne primere obdelave toliko podobne, da je za večino običajnih primerov mogoče nastaviti zadovoljive pogoje že po nekaj eksperimentih. Tehnologija zahteva izkušenega operaterja za vodenje in vzdrževanje sistema. S podajalnimi mizami povečamo stopnjo produktivnosti in zmanjšamo neproduktivne pripravljalne čase. Operater lahko tako med obdelavo oz. rezanjem odpremi predhodno serijo in pripravi novo.

KARAKTERISTIKE	LASER	AWJ	OFC	PAC	WEDM
PROCES					
vrsta energije	termična	mehanična	termična	el + termična	el + termična
natančnost porizije [mm]	$\pm 0,01^1$	7-0,01	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,0025$
natančnost obdelave [mm]	$\pm 0,02^1$	$\pm 0,1$ (0,03)	± 1	$\pm 0,8 - 3$	$\pm 0,01$ (0,005)
hitrost odzvalanja $V = v + f$	7000 ^{mm}	1800 ^{do}	$< 10^{-1}$ na vsakem	3000 ^{mm}	300 ^{mm}
[mm ³ /min]	1000 ^{mm}	25000 ^{mm}	$(4 \cdot 10^{-5})$ na vsakem	2000 ^{mm}	100 ^{mm}
hitrost odzvalanja $V = v + f$	$> 10000^{\text{mm}}$			$1,5 - 15 \cdot 10^3$	
hitrost reza [mm]	1	1	cca. 8	6	1
min. radij [mm]	$0,1 - 0,4^1$	0,4 - 1,2	cca. 3	1,5 - 2	0,02 - 0,3
min. izvertina ϕ [mm]	$0,5$ (0,05) ²	1,2 - 10,31	10	10	-
hitrost reza [mm]	$0,15 - 0,4$	0,6 - 1,4	1 - 2	1,5 - 8	0, - 0,35
osvajanje:	material		$T_{\text{reza}} < T_{\text{m}}$	el. postopek	el. postopek
debelina t [mm]	$40 - 25^1$	1 - 70 (200) ²	3 - 1500	1 - 150	0,2 - 300 (500)
hrapavost R_a [μm]	0,4 - 7	3 - 15	12,5 - 25 (40)	1,6 - 4 (0,8)	0,8 - 1,5 (0,4)
koničnost α [mm]	$0,02 - 0,2$	0,1 - 0,25 (0)	0,1 - 2	0,1 - 2	0,001
razsota napetosti (N/mm ²)	$(\cdot)^3$	≈ 500	$(\cdot)^3$	$(\cdot)^3$	< 1500
HAZ [mm]	$0,05 - 0,2$		(0,1) 0,3 - 5	0,25 - 4	0,02
razdalja reza [mm]	$0,011 - 0,17$	$0,01 - 0,15^1$	$0,05 - 0,13^1$	$0,01 - 0,13^1$	-
valovitost λ [μm]	1 - 50	3 - 100	100 - 2000	2 - 50	-
ok [mm]	0,1 - 0,5	0,03 - 0,07	0,5 - 2	0,5 - 2	-
ogled	sklepe	prekizni, mat	oligena	oligena	mat

Konkurenčni postopki

Področje materialov, ki jih lahko režemo z laserjem, je zelo široko. V tem pogledu je boljši rezalni način rezanje z AWJ2 (abrazivnim vodnim curkom), vendar je postopek navadno veliko počasnejši pri rezanju materialov na območju debelin, kjer postopka konkurirata. Rezanje z abrazivnim vodnim curkom je primerno za materiale, kjer je laser neučinkovit (reflektivni, krhki ali debelejši materiali). Tako se ni težko odločiti, kateri postopek izbrati za neki material, če sta na razpolago obe tehnologiji.

OFC3 – plamensko rezanje se največkrat uporablja za razrez konstrukcijskih jekel, vendar s tem postopkom režemo tudi nekaj drugih eksotermno-oksidnih kovin. OFC ni primerno za aplikacije, kjer se mora rezalni postopek hitro ustaviti in ponovno začeti; plamena in curka kisika namreč ne moremo enostavno prižgati in ugašati. Rez moramo začeti v sredini pločevine s prebijanjem startne luknje, kar povzroči

eksplozijski izmet kovine in časovno zapoznelost za prebijanje. Glavna prednost plamenskega rezanja je zelo nizka investicija v sistem v primerjavi z laserskim sistemom in drugimi rezalnimi napravami.

PAC4 – plazemsko rezanje je zelo učinkovit grobi postopek za razrez električno prevodnih kovin. Na razpolago je veliko različnih kombinacij plazemskih in zaščitnih plinov, ki jih lahko uporabimo, da izboljšamo rezalno performanco na različnih kovinskih materialih in aplikacijah. Ko komponente v nadaljevanju varimo, je geometrija reza celo prednost postopka, vendar je kakovost odrezane površine omejitev pri uporabi te tehnologije. Natančnost rezanja in kakovost površine reza ne konkurirata z laserskim rezanjem pri pločevinastem materialu in materialu v tankih ploščah. S tem namenom je razvito novo t. i. visokotolerančno plazemsko rezanje (HTPAC5). Ta postopek ustvarja kakovost laserskega reza na tanjših materialih (do 10 mm) pri nižjih rezalnih hitrostih. Rezalne hitrosti so velike, vendar je postopek neprimeren za obdelavo nekovin.

Žična erozija (**WEDM**)⁶ zaradi tipičnih tehnoloških značilnosti pokriva področje najfinejše obdelave kovinskih oz. elektroprevodnih materialov v majhnih serijah. Zadnje čase se obdeluje tudi neprevodna keramika, na katero je prej nanesen prevodni grafi t. Kljub razmeroma nizki investiciji in strojni uri zaradi nizke hitrosti odnašanja konkurira drugim rezalnim postopkom le na področju grobe (v rangu laserske in AWJ) obdelave debelejših trših materialov.

Figure 1 is a chart showing the relationship between power density (W/cm²) and depth of cut (mm) for various laser cutting processes. The chart is divided into four main sections: LASER, PAC, OFC, and WEDM. The x-axis represents depth of cut in mm on a logarithmic scale from 1 to 1000. The y-axis represents power density in W/cm² on a logarithmic scale from 1 to 150. The chart is color-coded: red for organic materials, orange for constructional steels, and blue for aluminum. The chart also indicates the type of material being cut: organic materials, constructional steels, and aluminum.

Process	Power Density (W/cm²)	Depth of Cut (mm)	Material Type
LASER	350 MPa	70	organic materials
	1000 W	20	organic materials
	1000 W	6	constructional steels
	1500 W	8	constructional steels
	1500 W	12	constructional steels
	3000 W	15	constructional steels
	5000 W	20	constructional steels
	5000 W	25	constructional steels
	5000 W	28	constructional steels
	5000 W	30	constructional steels
PAC	1500 W	3	Cr-Ni steels
	1500 W	5	Cr-Ni steels
	3000 W	6	Cr-Ni steels
	3000 W	10	Cr-Ni steels
	3000 W	15	Cr-Ni steels
	6000 W	20	Cr-Ni steels
	1500 W	3	aluminum
	2500 W	4	aluminum
	2500 W	5	aluminum
	5000 W	8	aluminum
OFC	30 A	6	constructional steels
	40 A	10	constructional steels
	100 A	15	constructional steels
	200 A	20	constructional steels
	200 A	50	constructional steels
	600 A	150	constructional steels
WEDM	150	30	aluminum
	150	300	aluminum

Tabela 1 prikazuje kvantitativno primerjavo med konkurenčnimi postopki rezanja s stališča procesnih značilnosti in lastnosti odrezane površine. **Največ pozitivnih ocen – prednosti zasledimo prav pri laserskem in rezanju z abrazivnim vodnim curkom.** Slaba stran obeh postopkov so visoki investicijski in obratovalni stroški.

TPR
Klemenšek

Mag. Davorin Kramar, dr. Mihael Junkar
Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani



[Rezanje z laserjem in konkurenčnimi tehnologijami](#)