

Tomislav Lukić,
potpukovnik, dipl. inž.
Tehnička uprava GŠ VJ,
Beograd

PRINCIPI PRIMENE LASERA U INDUSTRIJSKOJ OBRADI MATERIJALA

UDC: 621.375.826:621.7.04

Rezime:

Konverzija energije laserskog zračenja u toplotu ozračenog uzorka predstavlja suštinu primene lasera za obradu materijala. Na ishod procesa (režime obrade) bitno utiču energetske i prostorno-vremenske karakteristike snopa laserskog zračenja, kao i svojstva materijala. Uz određena pojednostavljenja, primenom klasičnih metoda, pre svega teorije termoprovodnosti, elektrostatike i dinamike fluida, na relativno lak način može se doći do jednostavnih formula koje omogućavaju brze inženjerske proračune i procene. Na osnovu tako izvedenih zaključaka, u ovom radu je ukazano na neke karakteristike interakcije laserskog zračenja sa materijalom, koje su tipične za najčešća područja primene, kao što su termička obrada, sečenje, bušenje, zavarivanje, markiranje, itd.

Ključne reči: lasersko zračenje, obrada materijala, temperaturno polje, fazni prelazi, duboko protopljanje, ekraniranje plazmom.

PRINCIPLES OF LASER APPLICATION IN INDUSTRIAL METAL PROCESSING

Summary:

Conversion of laser radiation energy into radiated sample heat is the essence of laser application for metal processing. Energy and space-time characteristics of laser beam as well as material properties affect significantly processing results. Applying certain simplifications as well as classical methods, predominantly theories of thermal conductivity, electrostatics and fluid dynamics, there is a relatively easy way to acquire simple formulae for fast engineering calculations and estimations. On the basis of thus obtained conclusions, this paper points out some characteristics of laser radiation interaction with materials, typical for most common application areas such as heat treatment, cutting, drilling, welding, marking, etc.

Key words: laser radiation, material processing, temperature field, phase transition, deep melting, plasma spraying.

Uvod

Obrada materijala je područje primene lasera u kojem specifičnosti laserskog zračenja najmanje dolaze do izražaja. Međutim, mogućnosti koje poseduje laserski snop nema nijedan klasični alat, pa čak ni mnogi alati slični laseru koji se primenjuju u najsavremenijim tehnologi-

jama. Zahvaljujući izvanrednim karakteristikama laserskog zračenja (visoka usmerenost, ekstremno visoki intenzitet, beskontaktno delovanje i dr.), moguća je obrada skoro svih vrsta prirodnih i sintetičkih materijala, od mekih nemetala do raznih vrsta kompozitnih materijala vrlo visoke tvrdoće.

U serijskoj fabričkoj proizvodnji laser je prvi put primenjen kao alat za obradu materijala 1968. godine, u Švajcarskoj, za bušenje rubinskih ležajeva koji se ugrađuju u ručne satove [3]. Od tada u razvoju industrijske tehnologije nastupa novi period u kojem se intenzivno radi na razvoju novih, jeftinijih i preciznijih postupaka obrade materijala primenom laserskog zračenja velikog intenziteta (slika 1). Poslednjih tridesetak godina područja primene lasera u fabričkoj proizvodnji intenzivno su se razvijala i proširivala, a realno je očekivati da će se i narednih godina ovaj proces nastaviti nesmanjenim tempom. Period do 1980. godine karakterišu obimna teorijska i eksperimentalna istraživanja procesa interakcije laserskog zračenja sa materijalom, a nakon 1980. godine u serijskoj industrijskoj proizvodnji počinje masovno da se koristi laserska tehnologija. Danas se smatra da je laserska tehnologija dostigla svoj period zrelosti.

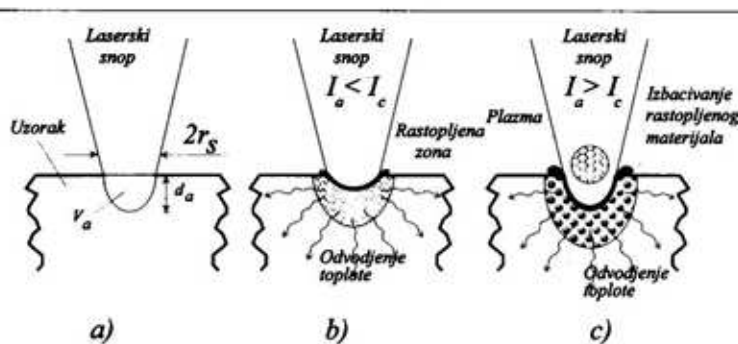
Najrazvijenije zemlje sveta uveliko su ovladale najvažnijim oblastima primene laserskog zračenja u industrijskoj obradi materijala i već skoro dve decenije primenjuju lasersku tehnologiju u serijskoj proizvodnji, naročito u mikroelektronici, avionskoj i automobilskoj indu-

striji, industriji nemetalnih proizvoda, tekstilnoj industriji i dr. U današnje vreme skoro je nemoguće nabrojati sve proizvode koji su izrađeni primenom laserske tehnologije, a svakim danom se pojavljuje sve veći broj novih proizvoda čija se izrada ne može zamisliti bez primene lasera.

Međutim, laserska tehnologija još uvek ne pretenduje da u potpunosti zameni odgovarajuće tradicionalne tehnologije. U mnogim područjima fabričke proizvodnje primena lasera još uvek je opravdana samo ako se time postiže bolji kvalitet proizvoda, veća produktivnost i niža cena. Štedeći vreme i novac, laser se pokazao kao izvanredan alternativni proizvodni alat.

Danas se serijski proizvode industrijski Nd: YAG, CO₂ i eksimerni laseri (tabela 1 [4]) koji obezbeđuju intenzitet zračenja (površinsku gustinu snage) do 10¹⁰ W/cm² u impulsnom i do 10⁷ W/cm² u kontinualnom režimu. Tako visok intenzitet zračenja omogućava rastapanje i isparavanje bilo kojeg poznatog materijala i laku obradu metala, kao i ekstremno tvrdih sintetičkih materijala [4].

Treba napomenuti da se danas u nekim zapadnim zemljama intenzivno radi i na razvoju laserskog oružja u ko-



Sl. 1 - Delovanje laserskog zračenja na materijal:

a) zagrevanje, b) topljenje, c) izbacivanje rastopljenog materijala i obrazovanje plazme

Neki tipični predstavnici lasera za obradu materijala

Tip i model lasera	Talasna dužina λ (μm)	$P_{\text{izl}}(\text{W}), E_{\text{izl}}(\text{J})$		Frekvencija ν (Hz)	Trajanje impulsa τ (ms)	Srednja energija E_{sr} (W)	Prečnik $2r_s$ (mm)	Divergencija θ_d (mrad)	Primena
		TEM ₀₀	multimodni						
CW CO ₂ , TM 41-45, USA	10,6	-	15000 (W)	-	-	-	50	2	C, W, D, H
P CO ₂ , TCB-50, USA	10,6	150 (J)	50 (J)	1-5000	0,5-1000	50	1,7	9	N
P-excimer, HLX-5, USA	0,248-0,35	-	2-5 (J)	0,5	0,02	2,5	45 x 45	2 x 2	M, N
CW Nd: YAG, BL-5000Y, USA	1,06	6 (W)	50 (W)	-	-	-	4	10	M, S, H
PNd: YAG, LAY600A, Japan	1,06	-	150 (J)	200	10	600	10	20	W, D
PNd: staklo, M14E, USA	1,06	40 (J)	-	1	3; 5; 8	-	3 x 9	-	W, D
P Rubinski, 604, USA	0,694	-	10 (J)	10	varijabilni	40	0,2	-	D

CW – kontinualni; P – impulsni; C – sečenje; W – zavarivanje; D – bušenje; H – termička obrada; S – skrajbovanje; M – obrada metala; N – obrada nemetala

jima se intenzitet lasera ekstremno velike snage iskorišćava za uništavanje ili onesposobljavanje sredstava ratne tehnike, kao i za neutralisanje žive sile, pre svega zaslepljivanjem.

Parametri laserskog zračenja

Principi generisanja i pojačanja elektromagnetskog zračenja stimulisanim emisijom, kao i principi njihove praktične realizacije (maser, laser), danas su dobro poznati [1]. Lasersko zračenje odlikuje se ekstremno visokim stepenom koncentracije svetlosne energije u veoma malom prostornom uglu i uskom spektralnom dijapazonu i visokim stepenom prostorne i vremenske koherentnosti. U impulsnom režimu rada sa modulacijom dobrote rezonatora moguće je postići impulse ekstremno kratkog vremena trajanja (10^{-6} – 10^{-12} s), što ima za posledicu veoma veliku snagu zračenja po impulsu (10^6 – 10^{10} W). Posebno je značajno što laserska svetlost, za razliku od obične, poseduje visok stepen prostorne koherentnosti koja je u tesnoj vezi sa usmerenošću laserskog zračenja usled čega je ugao divergencije laserskog snopa veoma mali

– reda mrad. Takav snop se može fokusirati na veoma malu površinu, radijusa reda 10λ (λ – talasna dužina laserskog zračenja od 1 do $10 \mu\text{m}$), usled čega je površinska gustina snage na ozračenju površini veoma velika, reda MW/cm^2 [2].

Usmerenost i fokusiranje laserskog snopa

Laser generiše veoma uzak snop skoro paralelnih zraka. Fokusiranjem laserskog zračenja može se postići ekstremno visoka koncentracija energije na veoma maloj površini (slika 2). Pri tome površinska gustina snage zračenja može biti veća u fokusnoj ravni fokusirajućeg sočiva nego u ravni izlaznog otvora lasera, što predstavlja posebno preimućstvo lasera u odnosu na druge izvore svetlosti [2].

Usmerenost, odnosno divergencija laserskog snopa, određena je konfiguracijom rezonatora i difrakcijom, a definiše se prostornim uglom u kojem se rasprostire najveći deo energije zračenja. Umesto prostornog ugla u praksi se za meru divergencije najčešće upotrebljava ravan-

ski ugao Θ_d koji leži u ravni osnog preseka laserskog snopa.

Iznos divergencije Θ_{dr} prouzrokovane difrakcijom kod ravnog monohromatskog talasa sa ravnomernom raspodelom amplitude po talasnom frontu i iznos divergencije Θ_{dg} fokusiranog talasa sa Gausovom raspodelom amplitude dati su izrazima:

$$\theta_{dr} = 1,22 \frac{\lambda}{D} \quad (1a)$$

$$\theta_{dg} = \frac{\lambda}{\pi r_0} = 0,32 \frac{\lambda}{r_0} \quad (1b)$$

Ako se u formuli (1b) r_0 zameni sa $D/2$, može se uočiti da pri istim prečnicima izlaznog otvora D (slika 2), Gausov snop ima oko dva puta manju divergenciju od ravnog monohromatskog talasa [1].

U konfokalnom rezonatoru, koji se najčešće koristi za dobijanje snopa sa Gausovom raspodelom intenziteta po poprečnom preseku, laserski snop u jednoj tački dostiže najmanji poprečni presek – struk snopa, radijusa $r_0 = \sqrt{L\lambda/2\pi}$, gde je L – dužina rezonatora. Sa udaljavanjem od struka u pravcu prostiranja zračenja, po osi snopa, laserski snop divergira i

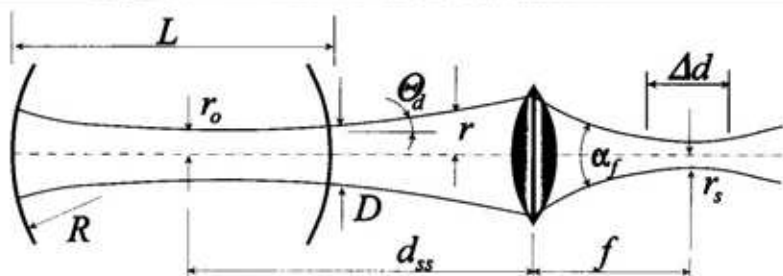
dimenzije poprečnog preseka se uvećavaju. Fokusiranjem laserskog snopa tankim sočivom dobija se novi struk radijusa r_s , smešten izvan rezonatora (slika 2). Ako se prednja fokusna ravan sočiva poklapa sa strukom unutar rezonatora, onda se drugi struk nalazi u zadnjoj fokusnoj ravni sočiva [5].

Radijus preseka snopa u zadnjoj fokusnoj ravni može se izračunati po formuli:

$$r_s = \text{tg}(f \cdot \theta_d) \approx f \cdot \theta_d = \frac{f \cdot \lambda}{\pi \cdot r_0} \quad (2)$$

gde je Θ_d – ugao divergencije u rad. Formula (2) predstavlja pogodnu relaciju za brzu procenu dimenzija poprečnog preseka laserskog snopa (spota) fokusiranog sočivom fokusne dužine f . Minimalne dimenzije spota za osnovni mod TEM_{00} (Gausov snop) nisu manje od $50 \mu\text{m}$ za CO_2 lasere ($\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) i $5 \mu\text{m}$ za YAG lasere ($\lambda = 1,06 \mu\text{m}$) [5]. Može se pokazati da je za kratkofokusna sočiva $r_s = (f/d_{ss})r_0$, što znači da ova sočiva u svojoj fokalnoj oblasti uvećavaju intenzitet upadnog zračenja za $(d_{ss}/f)^2$ puta.

Za ocenu kvaliteta snopa u praksi se često koristi tzv. parametar snopa $q^* = D \theta_d \approx r_s \alpha_f = \text{const}$ (mm · mrad),



Sl. 2 – Fokusiranje laserskog snopa dobijenog u konfokalnom rezonatoru: L – dužina rezonatora, R – radijus zakrivljenosti ogledala, r – radijus snopa, r_0 – radijus struka snopa u rezonatoru, r_s – radijus spota (struka snopa u fokusu), f – fokusna dužina sočiva, D – prečnik izlaznog otvora lasera, Δd – dubina fokusiranja, Θ_d – ugao divergencije, d_u – udaljenost sočiva od struka u rezonatoru, α_f – ugao fokusiranja

gde je α_f – ugao fokusiranja (sl. 2). Vrednost q^* kreće se u granicama od 10 do 30 mm · mrad. Kvalitet snopa definisan je kao recipročna vrednost parametra snopa, $1/q^*$ [8].

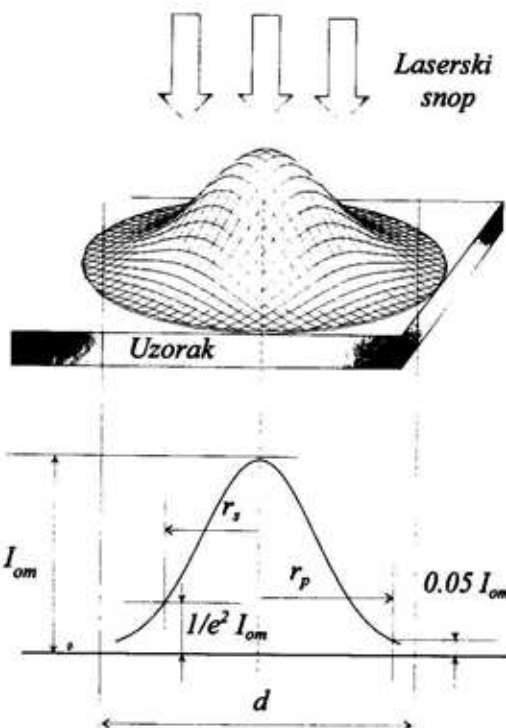
Veoma značajna karakteristika fokusiranog snopa je i dubina fokusa $d = \Delta d/2$ (slika 2). Ona se definiše kao udaljenost od struka fokusiranog snopa do ravni u kojoj intenzitet opadne do vrednosti određene karakterom primene (npr. na 80% maksimalne vrednosti u fokusu) i data je formulom [4, 8]:

$$\Delta d = 2\pi \frac{r_s^2}{\lambda} \sqrt{g^2 - 1} \approx \frac{r_s^2}{q^*} \quad (3)$$

Koeficijentom $g = r/r_s$ određena je širina snopa na udaljenosti $d = \Delta d/2$ od fokusa. Na ovoj udaljenosti intenzitet opadne za $1/g^2$ puta u odnosu na maksimalnu vrednost u fokusu. Na primer, ako karakter obrade zahteva da se intenzitet laserskog snopa na ozračenju površini po svojoj uzdužnoj osi ne sme menjati više od 10%, onda je $1/g^2 = 0,9$, odnosno $g = 1,054$. Za $r_s = 0,1$ mm i $\lambda = 10,6$ μ m, dobija se $\Delta d = \pm 1,04$ mm, što predstavlja dopušteno variranje rastojanja između sočiva i površine obrađivanog uzorka. U slučajevima kada nije moguće strogo kontrolisati ovo rastojanje, potrebno je izabrati sočivo sa što većom fokusnom dužinom kako bi dubina fokusa bila što veća. Jednačine (2) i (3) pokazuju da se za dvostruko veću fokusnu dužinu dobija četverostruko veća dubina fokusa [4].

Prostorno-vremenske karakteristike

Gausov snop (mod TEM_{00}) od posebnog je značaja u najvećem broju slučajeva obrade materijala laserom, naročito



Sl. 3 – Mogući načini određivanja poprečnog preseka laserskog snopa

pri sečenju, zavarivanju i bušenju. Njime se postiže najveća gustina snage u laserskom snopu i najbolja usmerenost. Ovaj mod ima sinfazni talasni front i Gausovu raspodelu intenziteta $I(r)$ po poprečnom preseku snopa koja se ne menja pri prolasku kroz optički fokusirajući sistem [4, 5, 6].

Kod ravnomerne prostorne raspodele intenzitet $I(r) = \text{const}$ po celoj površini poprečnog preseka radijusa r_s dok se kod Gausovog snopa (mod TEM_{00}) intenzitet menja (slika 3) i određen je Gausovom funkcijom:

$$I(r) = I_{om} e^{-kr^2} \quad (4)$$

gde je:

I_{om} – maksimalni intenzitet (u centru snopa),

r – radijalna udaljenost od centra snopa,

$k = 1/r_s^2$ – koeficijent skoncentrisanosti koji određuje oštrinu krive, pri čemu je r_s – efektivni radijus snopa.

Koeficijent skoncentrisanosti zavisi od načina određivanja efektivnog radijusa preseka snopa. Ako se za r_s uzme rastojanje od ose snopa do tačke u kojoj intenzitet na poprečnom preseku osnovnog moda opadne e^2 puta, odnosno amplituda e puta (Gausov radijus), onda je $k = 2/r_s^2$. Imajući u vidu da je $1/e^2 = 0,135$ sledi da je 86,5% ukupne snage skoncentrisano unutar kruga radijusa jednog r_s . Međutim, u praksi se često za radijus snopa uzima rastojanje r_p od ose snopa do tačke u kojoj intenzitet opadne na 0,05 I_{om} (slika 3) i onda je $k \approx 3/r_p^2$ a oko 95% ukupne snage nalazi se unutar kruga radijusa r_p [5].

Integracijom izraza (4) može se izračunati ukupna snaga i maksimalni intenzitet u centru snopa:

$$\begin{aligned} P_t &= \int_0^{\infty} I(r)2\pi r dr = \\ &= \int_0^{\infty} I_{om} e^{-kr^2} 2\pi r dr = \frac{\pi}{k} I_{om}, \\ I_{om} &= \frac{kP_t}{\pi} \end{aligned} \quad (5)$$

gde je:

P_t – ukupna snaga sadržana u modu,
 k – koeficijent skoncentrisanosti.

Trajanje laserskog zračenja određeno je režimom rada lasera. Laseri za obradu materijala najčešće rade u sledećim režimima [5]:

- režim kontinualnog zračenja,
- impulsni režim slobodne generacije (tipična dužina impulsa τ je oko 10^{-3} s

a određena je dužinom trajanja bljeska impulsne lampe pobude),

– režim modulacije faktora dobrote rezonatora (tipične vrednosti τ su 10^{-9} – 10^{-8} s; trajanje impulsa određeno je navedjenjem pobude nad pragom generacije i brzinom Q-prekidača),

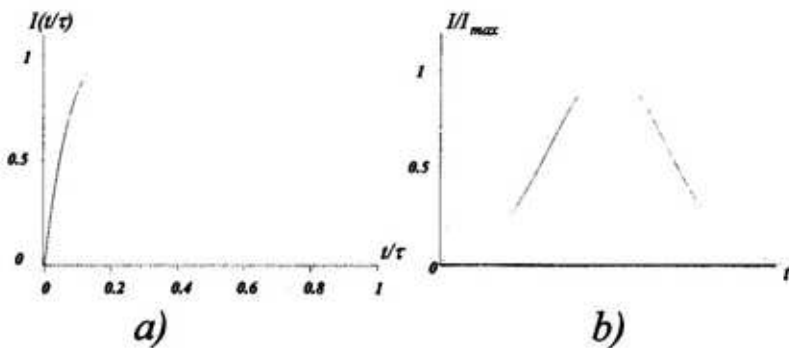
– impulsno-periodični režim ($\tau \approx 10^{-6}$ s; tipičan za CO_2 lasere).

Svako skraćivanje trajanja impulsa nužno vodi smanjenju njegove energije E , ali po pravilu i povećanju srednje snage P_{sr} .

Vremenska forma intenziteta $I(t)$ impulsa takođe zavisi od režima rada lasera. Kada laser CO_2 radi u impulsno-periodičnom režimu ima trouglasti vremenski oblik impulsa (slika 4a). U slučaju kada laser generiše samo jedan, osnovni mod, kriva vremenske raspodele je glatka i ima zvonoliki (Gausov) oblik (slika 4b) [6].

Modovi višeg reda

Transverzalni modovi, odnosno modovi višeg reda [4] imaju izuzetan značaj pri obradi materijala laserskim zračenjem. Red moda direktno utiče na veličinu ugla divergencije, veličinu poprečnog preseka snopa i dubinu fokusa. U pojedinim slučajevima obrade materijala zahteva se veoma visoka gustina snage (sečenje, zavarivanje), radi čega je neophodno koristiti modove najnižeg reda, dok je u nekim slučajevima neophodna ravnomerna raspodela gustine snage po poprečnom preseku snopa (termička obrada površine materijala) pa se koriste i modovi višeg reda (slika 5). Ako modovna struktura laserskog snopa sadrži, osim osnovnog moda TEM_{00} , i modove višeg reda, onda su ukupna snaga moda, divergencija i poprečni presek veći, a dubina fokusa manja, dok su ostale ka-



Sl. 4 – Tipične vremenske forme laserskih impulsa:
a) trouglasti, b) zvonoliki (Gausov) oblik

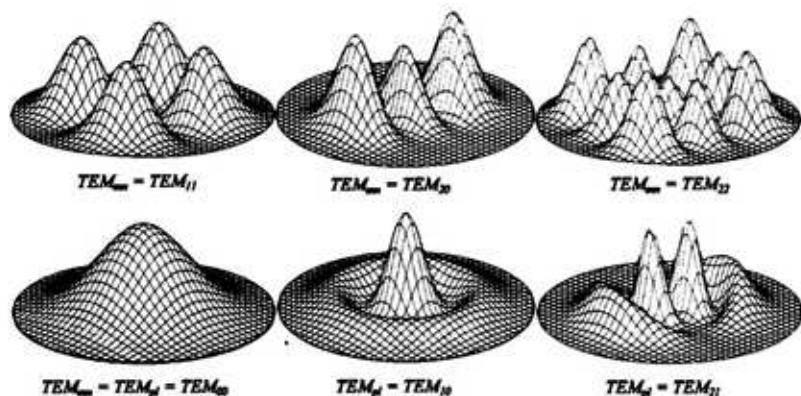
rakteristike približno iste kao kod Gausovog snopa [4].

Nivo snage i modovna struktura izlaznog snopa lasera određuju se u zavisnosti od primene. Gausov snop omogućava duboku penetraciju pri bušenju i velike brzine sečenja, dok pri termičkoj obradi površine nije pogodan zbog varijacija gustine snage po poprečnom preseku snopa. Razvijene su i različite tehnike menjanja oblika poprečnog preseka snopa radi dobijanja željene prostorne raspodele intenziteta [8, 9].

Energetske karakteristike

Za obradu materijala intenzitet I (W/cm^2) predstavlja najvažniju energetsku karakteristiku laserskog zračenja. Saglasno opšteprihvaćenoj definiciji intenziteta u radiometriji, intenzitet laserskog zračenja definisan je energijom koja prođe kroz jedinicu površine poprečnog preseka laserskog snopa u jedinici vremena. U literaturi se često upotrebljava i naziv – površinska gustina snage [3, 6].

Ako je poznat intenzitet, integracijom se lako izračunavaju i druge energet-



Sl. 5 – Oblik transverzalnih elektromagnetskih modova u pravougloj (TEM_{mn}) i cilindričnoj (TEM_{pl}) simetriji

ske veličine kao što su ukupna snaga zračenja sadržana u modu P_t , jednačina (5), kao i energija $E = \int P_t dt$.

Intenzitet kontinualnog laserskog zračenja najčešće je konstantan u vremenu. Intenzitet impulsnog laserskog zračenja određen je energijom E i trajanjem impulsa τ , kao i usmerenošću Θ_d , odnosno radijusom spota r_s , jednačina (2). S obzirom na to da je raspodela zračenja u prostoru i vremenu uglavnom neravnomerna (npr. Gausov snop), često se za izvođenje ocena koristi srednja vrednost intenziteta, $I_{sr} = E_{sr}/S\tau$ gde je E_{sr} – srednja snaga moda, S – ozračena površina a τ – trajanje impulsa [2].

Energetska svojstva laserskog zračenja su u najneposrednijoj vezi sa efektima obrade materijala laserom. Kod impulsnih lasera, zahvaljujući veoma kratkom vremenu dejstva i izvanrednoj mogućnosti fokusiranja, mogu se dobiti ogromne gustine snage po jedinici površine, čak i kada je ukupna energija impulsa veoma mala. Iz sledećeg primera može se videti koliko se laser razlikuje od svih drugih izvora svetlosti.

Laserski snop He-Ne lasera sa Gausovom raspodelom intenziteta, izlazne snage $P \approx 10$ mW i divergencije $\Theta_d \approx 0,1$ mrad, može se, u skladu sa jednačinom (2), fokusirati sočivom fokusne dužine $f \approx 1$ cm na površinu reda 10^{-8} cm². Koristeći formule (4) i (5) za Gausov snop i uzimajući da je $P_t = P = 10$ mW – ukupna snaga snopa, dobija se intenzitet u centru snopa reda 10^6 W/cm². Istovremeno mogu se oceniti i dimenzije fokusiranja snopa. Uzimajući da je dubina fokusa reda $10 r_s \approx 10^{-3}$ cm, dobija se da je zapremina fokusiranog snopa $V \approx 10^{11}$ cm³, a prostorna gustina snage reda 10^9 W/cm³.

Ako bi se želelo da se na istoj površini 10^{-8} cm² dobije intenzitet reda 10^6 W/cm² fokusiranjem nekoherentne svetlosti običnog izvora površine $0,1$ cm², takav izvor bi morao imati snagu ≈ 1 MW [2].

Efektivnost interakcije laserskog zračenja sa materijalom

U krajnjem rezultatu, efektivna obrada materijala laserskim zračenjem zasnovana je na optimalnom transferu energije laserskog zračenja u toplotu površinskog sloja ozračenog uzorka.

Matematički opis interakcije laserskog zračenja i materijala nije jednostavan, a mnoge pojave još nisu dovoljno ispitane i objašnjene. Otuda i relativno mali broj upotrebljivih modela koji se sa zadovoljavajućom tačnošću (makar $\geq 50\%$) mogu primeniti za opis procesa obrade materijala laserom.

Interakcija laserskog zračenja sa neprozračnim materijalima podrazumeva nekoliko karakterističnih stadijuma. To su [3]:

- *apsorpcija* laserskog zračenja u površinskom sloju materijala i prenos energije u dubinu materijala putem oscilacija kristalne rešetke;

- *zagrevanje* materijala bez razaranja njegove strukture i pojava termoelastičnih deformacija;

- *promene faznog stanja* materijala (prelazak u tečnu i gasovitu fazu) u zoni dejstva laserskog snopa, izbacivanje i razletanje izbačenog materijala;

- stvaranje *plazmenog oblaka (plazmene buktinje)* optičkim probojem pare i okolne atmosfere i transformacija prostorno-vremenske strukture laserskog zračenja pri prostiranju kroz plazmu;

– *plastične deformacije* materijala zbog pritiska pare i plazme;

– *hlađenje i otvrdnjavanje* materijala nakon završetka dejstva laserskog zračenja praćeno strukturno-faznim i hemijskim promenama.

Ovi procesi praćeni su difuzionim i hemijskim reakcijama, emisijom čestica, pojavom X-zračenja i drugim pojavama [6].

U praksi se efektivnost interakcije upadne laserske energije i obrađivanog uzorka materijala obično opisuje koeficijentom sprege [4] (apsorpcionom sposobnošću [5]), tj. odnosom apsorbovanog I_a i upadnog I_u intenziteta zračenja:

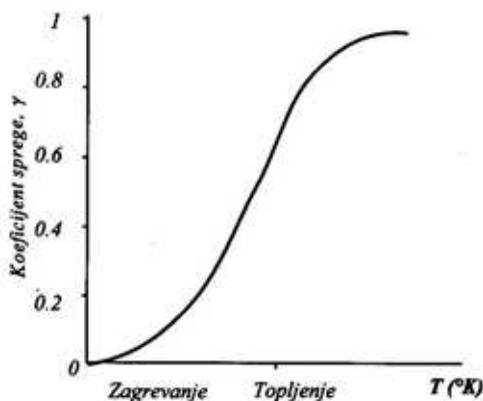
$$\gamma = 1 - R = \frac{I_a}{I_u} \quad (6)$$

gde je R – koeficijent refleksije površine materijala.

Koeficijent sprege određen je ne samo gubicima usled refleksije laserskog zračenja od površine već i gubicima zbog ekraniranja plazmenim oblakom koji nastaje usled jonizacije atmosfere i isparenog materijala u neposrednoj okolini ozraćene tačke. Osim toga, on zavisi od talasne dužine zračenja, vrste materijala, oblika i hemijskog sastava ozraćene površine, karaktera raspodele i nivoa snage fokusiranog snopa, divergencije laserskog snopa, upadnog ugla laserskog snopa u odnosu na površinu i drugih parametara. Posebno je izražena njegova zavisnost od temperature, odnosno faznog stanja ozraćenog materijala (slika 6). Zbog toga je skoro nemoguće dobiti analitičko rešenje za koeficijent sprege već se on određuje eksperimentalno, najčešće kalorimetrijskom metodom [10].

Toplotno dejstvo laserskog zračenja na materijal nije određeno parametrima

upadnog već parametrima apsorbovanog zračenja, pa je apsorpcija energije laserskog zračenja, njen transfer u toplotu i zagrevanje materijala, odnosno postiza-



Sl. 6 – Promena koeficijenta sprege sa temperaturom

nje temperature neophodne za konkretni vid obrade, od najvećeg značaja za obradu materijala. U pojednostavljenom, linearizovanom modelu, pri apsorpciji zračenja u materijalu intenzitet opada po eksponencijalnom zakonu [2, 5, 6]:

$$I(z) = \gamma I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad (7)$$

gde je:

α – koeficijent apsorpcije (cm^{-1}),

z – dubina prodiranja zračenja u materijal.

Energija apsorbovanog zračenja pretvara se u toplotu u tankom površinskom sloju debljine 10^{-6} do 10^{-7} m. Usled toga apsorpcija ima karakter površinskog efekta. Zagrejani deo površinskog sloja može se posmatrati kao tačkasti toplotni izvor čija je efektivna toplotna snaga (intenzitet) određena koeficijentom sprege ($I_a = \gamma I_u$). Od toplotnog izvora toplota se prenosi u unutrašnjost materijala kondukcijom, a jedan deo ostaje

Termofizičke karakteristike nekih metala

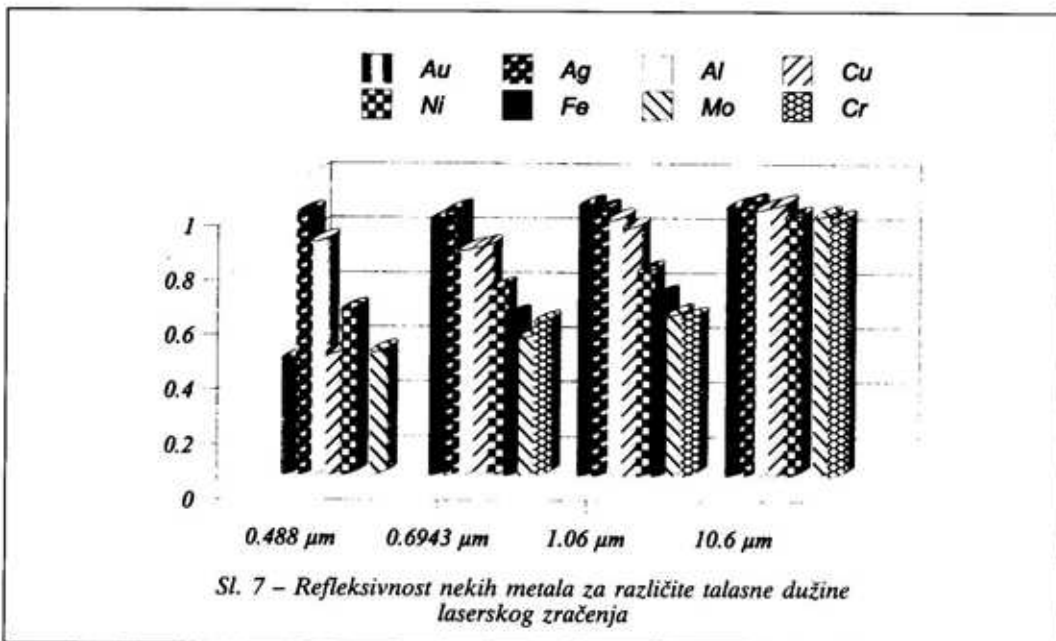
Metal	T_s (°C)	T_v (°C)	ρ (g/cm ³)	K (W/cm°C)	c (J/g°C)	χ (cm ² /s)
Al	661	2,472	2,702	2,37	0,90	0,975
Fe	1,536	2,759	7,86	0,802	0,44	0,232
Si	1,412	2,363	2,33	1,48	0,71	0,895
Cu	1,093	2,573	8,96	4,01	0,38	1,178
Zn	423	913	7,14	1,16	0,39	0,417

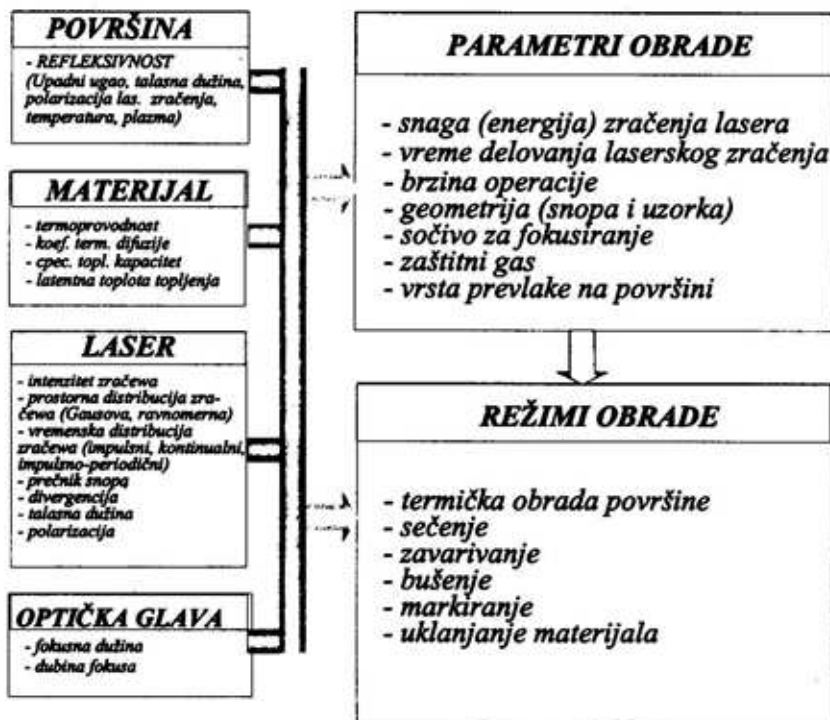
neiskorišćen usled gubitaka koji nastaju zračenjem zagrejana površine i odvođenjem toplote konvekcijom.

Transfer toplote u najvećem stepenu određen je optičkim (sl. 7) i termofizičkim (tabela 2) svojstvima obrađivanog materijala. Neki materijali su veoma reflektivni na sobnoj temperaturi (npr. srebro reflektuje oko 99% upadnog zračenja, zlato 98%, bakar 98%, nerđajući čelik 96% itd., slika 7). S druge strane, reflektivnost znatno zavisi i od talasne dužine laserskog zračenja. Zbog toga se primenjuju različite tehnike smanjenja refleksije: na površinu se nanose odgovarajuće prevlake – apsorberi ili se određenim

postupcima povećava hrapavost površine. Međutim, reflektivnost veoma brzo opada sa povećanjem temperature (koja se praktično dešava trenutno pri dejstvu laserskog zračenja na materijal) pri čemu dolazi i do naglog povećanja koeficijenta sprege (slika 6) i stvaranja uslova za određenu vrstu obrade [3].

Od svih termofizičkih karakteristika, kod metala je za većinu postupaka obrade najvažnija termička difuzivnost χ (cm²/s) koja je definisana kao odnos $K/\rho c$, gde je K (W/cm°C) – termička provodnost, ρ (g/cm³) – gustina i c (J/g°C) – specifična toplota.





Sl. 8 – Faktori koji definišu režime obrade materijala

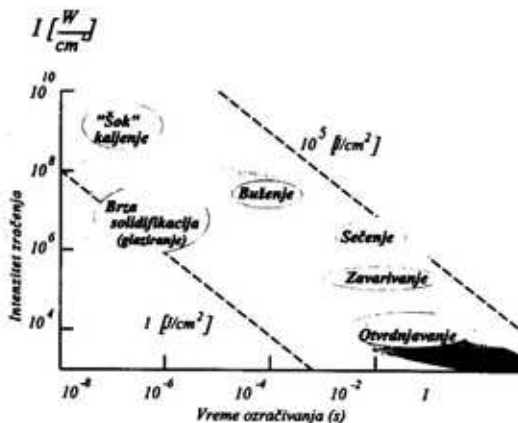
Termička difuzivnost je osnovna mera toplotno-inercionih svojstava materijala. Brzina promene temperature u nekoj tački tela utoliko je veća ukoliko je koeficijent χ veći. Specifična toplotna kapacitivnost c praktično ostaje ista pri promeni temperature od T_{sobno} do temperature isparavanja T_v . Međutim, termoprovodnost K se smanjuje približno 2 do 5 puta pri topljenju metala. Zanimajući ove promene mogu se izvoditi ocene sa greškom manjom od 20% [3].

Režimi obrade

Laserska tehnološka postrojenja koja se danas koriste u industrijskoj proizvodnji obezbeđuju prekrivanje širokih dijapazona energije, dužine trajanja zra-

čenja i srednje snage neprekidnog ili impulsno-periodičnog zračenja. Svaki tehnološki proces zahteva određene prostorno-vremenske i energetske karakteristike zračenja. Tehnološki procesi, zasnovani na čisto toplotnom dejstvu zračenja na obrađivani materijal najčešće koriste impulse trajanja od 10^{-4} do 10^{-2} s i kontinualno zračenje. Primenjujući određeni nivo snage zračenja i dužinu trajanja zračenja može se postići bilo koji željeni tehnološki efekat: zagrevanje i topljenje materijala (termička obrada, sečenje, zavarivanje, lemljenje), isparavanje materijala (bušenje, napanavanje tankih slojeva metala i dielektrika), itd. U elektronskoj industriji impulsno zavarivanje zahteva energiju od 10^2 do 10 J; bušenje i skrajbovanje izvodi se pri energiji do 1 J; kaljenje

reznog alata zahteva energiju do 100 J i dužinu impulsa 10^{-3} s; za sečenje različitih materijala, zasnovano na udarnom („šok“) efektu interakcije zračenja sa materijalom (slika 9), potrebni su impulsi trajanja 10^{-7} do 10^{-4} s itd. [3].



Sl. 9 – Režimi obrade materijala laserskim zračenjem

U obradi materijala laserom razvijene su različite metode koje su određene nizom različitih faktora (slika 8). Metode laserske obrade obrazuju grupe zasnovane na zagrevanju, topljenju i udarnom opterećenju materijala u zavisnosti od

površinske gustine snage zračenja lasera i vremena njegovog dejstva. Ove grupe nazivaju se režimi obrade [4, 5].

Slika 9 prikazuje dijagrame režima obrade koji su dobijeni kombinacijom teorijskih i empirijskih saznanja. Na slici se mogu uočiti vrednosti intenziteta laserskog zračenja i vremena trajanja ozračenja koja odgovaraju različitim režimima obrade i procesima koji prate interakciju laserskog zračenja sa materijalom.

Otvrdnjavanje laserskim zračenjem, zasnovano na faznim prelazima u površinskom sloju materijala, zahteva minimalni intenzitet laserskog zračenja 10^3 do 10^4 W/cm² pri maksimalnom vremenu trajanja impulsa 10^{-2} –1 s. Udarno („šok“) otvrdnjavanje zahteva maksimalni intenzitet zračenja 10^8 – 10^{10} W/cm² pri minimalnoj dužini trajanja impulsa 10^{-6} – 10^{-8} s.

Na slici 9 dati su samo opšti podaci o dijapazonima promene intenziteta, energije i trajanja laserskog zračenja u zavisnosti od vrste obrade. Njihove stvarne vrednosti u konkretnim operacijama zavise od svojstava materijala i primene metoda povećanja efektivnosti interakcije zračenja i materijala.

– nastaviće se –