

BUZA GÁBOR

A lézersugaras anyagmegmunkálás energiaviszonyai II.

Avagy: mire megy el az energia?

A lézersugaras anyagmegmunkáló technológiákkal kapcsolatos ismeretek sokrétűsége zavarba ejtően nagy. A szakterülettel csak érintőlegesen foglalkozóknak az ismeretanyagban nehéz eligazodni. A szakcikkek jellemzően csak speciális kérdésekkel foglalkoznak, a szakkönyvek pedig többnyire sok szempont egyidejű tárgyalásával hozzák zavarba az olvasót. Ez a cikksorozat azt a célt kívánja elérni, hogy a felhasználó egy gondolatmenet mentén kaphasson áttekintő képet a lézersugaras anyagmegmunkáló technológiákról. A gondolatmenet vezérfonala a lézersugár energiája. Vizsgáljuk azt, hogy ennek nagysága hogyan és mitől függ, illetve mire fordítódik.

A cikksorozat első részében a nagy átlagteljesítményű, esetenként nagy impulzus-
teljesítményű lézersugaras anyagmegmunkálások sajátosságairól volt szó. Példákon keresztül mutattam be, hogy a lézersugaras technológiák alkalmazása során mindig más konkrét céllal közlünk energiát a megmunkálendő anyaggal. Az eltérő célok közös vonása, hogy minden esetben az anyag célzott felhevülését kívánjuk elérni.

A lézerberendezések teljesítményét a rezonátorból kilépő sugárral jellemzik, és mint láttuk, ennek csak töredéke hasznosul, ezért szükséges számba venni, mire megy el az az energia, ami nem hasznosult. Ezt azért is célszerű alaposan megvizsgálni, mert esetenként lehetőségünk van a veszteségek jelentős csökkentésére, a berendezés hatékonyságának, termelékenységének, alkalmazhatósági körének növelésére.

Érdemes azt is tudni, hogy a szakmai cikkekben, a kísérleti körülmények vagy

technológiák leírása során nem a hasznosult lézersugár teljesítményt adják meg, hanem a berendezésen beállítottat, vagyis a sugárforrásból kilépőt, ami jelentősen különbözik a hasznosulttól.

A lézersugaras anyagmegmunkálások energiaviszonyainak helyes értékelése érdekében tehát meg kell ismerkedni a lézersugaras berendezések jellemző energiavesztéseivel, illetve a hasznosult energia értelmezésével. Az alapján, hogy hol és miért veszítünk a rezonátorból kilépő sugárzás energiájából, nyolc területet határozhatunk meg:

- szóródásból és elnyelésből adódó energiavesztés a rezonátor és a darab között;
- a darabról reflektált és a darabon átjutott lézersugár energia;
- távozó anyaggal elvitt energia;
- a darab sugárzásos hővesztése;
- hőátadási veszteség a darab felületén;
- párolgásos hővesztés;

- hővezetés a darabon belül;
- technológiai indokolatlan túlhevítés.

Szóródásból és elnyelésből adódó energiavesztés a rezonátor és a darab között

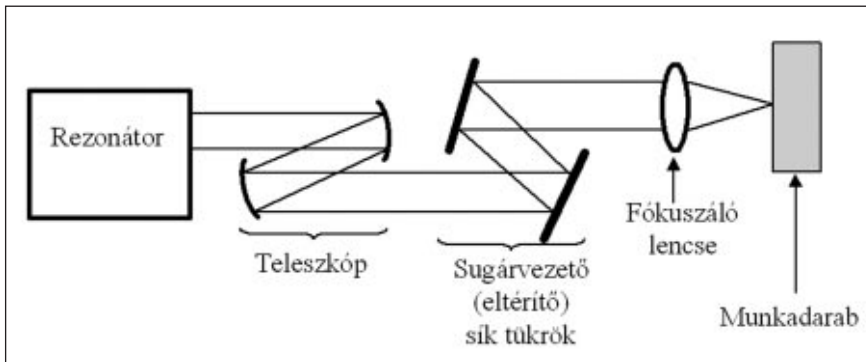
A rezonátor nyitótükreknél kilépő lézersugár egyszerű sík és speciális (parabola, fazettált, fázistoló stb.) tükrökön, lencséken, valamint a levegőn keresztül jut a próbatest felületére. Ezek mindegyikét, a levegőt is optikai elemnek kell tekintennünk, mert bármelyikkel is lép kölcsönhatásba a lézersugár, energiája csökken. A veszteség mértéke függ az optikai elemekkel történő kölcsönhatás jellegétől (tükröződés, elnyelődés vagy áteresztés), az optikai elem anyagától és mennyiségétől, valamint a lézerberendezés alapvető fizikai sajátosságaitól (hullámhosszúság, energiaelosztás a nyalábon belül, üzemmód stb.).

A CO₂ sugárforrásokra jellemző veszteségek

A CO₂ sugárforrásokra jellemző, szóródásból és elnyelésből adódó veszteségek áttekintését a 1. ábrán látható vázlat segíti.

A stabil rezonátoroknak legalább egy konkáv tükröt kell tartalmaznia, aminek következtében minden lézernyalábnak van a rezonátor belső optikai geometriájára jellemző divergenciája, ebből következően rá jellemző helyzetű, legkisebb átmérőjű része. Fizikailag ez a rezonátorból kilépő (nyers vagy primer) sugárnyaláb fókusza, amit a lézertechnikában nyalábdéréknak neveznek. A nyalábdérék helyén a nyalábban haladó fotonok fázisfrontja a terjedési irányra merőleges egyetlen síkban van. Itt tökéletes a koherencia, amit általában a lézersugárzás alapvető jellegzetességének tartanak. A nyalábdérék előtt és mögött a fázisfrontok görbültek.

Dr. Buza Gábor 1975-ben szerzett kohómérnöki oklevelet a miskolci Nehézipari Műszaki Egyetemen. 1975-től 1988-ig a Vaskut, 1988-tól a BME dolgozója. Jelenleg a BME Közlekedésmérnöki Kar Járműgyártás és -javítás Tanszékének docense és a Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közalapítvány Anyagtudományi és Technológiai Intézet igazgatója. Egyetemi doktori értekezését 1986-ban védte meg. 1990 óta a műszaki tudomány kandidátusa, 2008-tól a Miskolci Egyetem címzetes egyetemi tanára. Fő érdeklődési területe: acélok fázisátalakulásának vizsgálata, nagy energiasűrűségű eljárások. Több mint 10 éve intenzíven foglalkozik a nagy teljesítményű lézerek anyagmegmunkálási lehetőségeinek kutatásával.



■ 1. ábra. Jellemző optikai elemek a CO₂ rezonátor és a munkadarab között

A teleszkóp

A lézersugaras anyagmegmunkálás minősége szempontjából leginkább a nyalábderek közvetlen környezete, ahol a koherencia leginkább érvényesül, alkalmas a fókuszáló lencse elhelyezésére. A rezonátorok belső optikai elemeit ezért úgy választják meg, hogy a nyalábderek a rezonátoron kívülre, az anyagmegmunkáló tér középső részére essen.

Abban az esetben, ha a nyitótükör és a fókuszáló lencse közötti távolság a megmunkálás során változik, optikai eszközökkel annyira kell megnyújtani a nyalábdereket, hogy a fókuszáló lencse mozgástartományában minél nagyobb távolságon teljesüljön a koherencia feltétel. Természetesen a koherencia csak egy pontban lehet tökéletes, de a gyakorlatban 1–2 rel% eltérés még megengedett. A technikai szempontból elfogadható nyalábderek hosszúsága akár 10 m is lehet. A nyalábderek megnyújtásához ún. teleszkópra van szükség.

A teleszkóp általában két tükrőlencséből áll. Hatására a nyalábderek jelentősen megnyúlik. A rezonátor és a teleszkóp optikai elemeinek görbületét úgy kell összehangolni, hogy a sugarat a darabra fókuszáló lencse a megnyújtott nyalábderek közepének környezetében legyen. Minél nagyobb mozgásteret akarunk biztosítani a fókuszáló lencsének, annál jobban meg kell nyújtunk a nyalábdereket.

A nagyteljesítményű lézerberendezések döntő többsége tartalmaz teleszkópot. Alkalmazásától akkor lehet eltekinteni, ha a lézersugaras megmunkálás a munkadarab mozgásával is megvalósítható, ill. kompromisszumos megoldásként akkor, ha a fókuszáló lencse mozgási tartománya kicsi és a rezonátorból kilépő sugárzás jó minőségű, vagyis kicsi a lézernyaláb sugárparaméter-szorzata.

A lézersugár teljesítményvesztése tehát a tükrölencsék és a közöttük lévő levegő tulajdonságaitól függ. A veszteség csökkenhet, ha a tükrök minősége jó, ill. a közöttük lévő távolság kicsi, a levegő pedig tiszta, portól és az optikai tulajdonságokat befolyásoló gőzöktől, gázoktól mentes.

Tükrök

A nagyteljesítményű CO₂ sugárforrásokat leggyakrabban lézersugaras vágásra használják. Akár két-, akár háromdimenziós vágásról van szó, csaknem minden esetben a megmunkáló fejben elhelyezett fókuszáló lencsét mozgatják. (Régi konstrukciók megoldásai esetén a munkadarabot (is) mozgatták. Manapság ez már csak speciális esetekben fordul elő.) A teleszkóptól a lencsés vezető optikai úton álló és mozgó síktükrök végzik a sugáreltérítést. A tükrök száma a megmunkáló fej lehetséges mozgásának bonyolultságától függ.

A CO₂ lézersugár eltérítésére és fókuszálására szolgáló tükrök, akár sík, akár fókuszáló, vörösrézbe készülnek, esetenként védőbevonattal. A tükrök, felületi bevonatuktól (dielektromos, keményarany, molibdén stb.) függően, a lézersugár 0,1...2,5%-át nyelik el (a tükrök műbizonylatán a reflexiós képességet adják meg, ami 99,9...97,5% között változik). A nagyteljesítményű berendezések esetén már ekkora abszorpció is elegendő ahhoz, hogy erősen melegedjenek, ezért vízzel hűtik őket. Egy berendezésben összesen 4–10 db teleszkóp és sugárvezető tükrök van. Az ezek által elnyelt és vízűtéssel elvezetett energia (vesztés a tükrökön) becsült mértékét az 1. táblázat mutatja [1]. A táblázat adatainak számítása azzal a feltételezéssel készült, hogy egy rendszeren belül a tükrök reflexiós képessége azonos. A valóságban ez a feltétel persze nem minden esetben teljesül.

1. táblázat. Veszteség az optikai rendszerben

Tükrök száma, db	Tükrök reflexiós képessége, %		
	99,9	99,0	97,5
4	0,40	3,94	9,63
6	0,60	5,85	14,09
8	0,80	7,73	18,33
10	1,00	9,56	22,37

A 99,9% reflexiós képességgel rendelkező tükröket csak a rezonátortéren belül (pormentes, ellenőrzött atmoszféra) használnak, mert ezek nagyon sérülékenyek. Laboratóriumi körülmények között alkalmazhatók a még mindig nagyon sérülékeny, 99,8% reflexiós képességűek. Ipari környezetben a leggyakoribb a 99,0 ... 99,2% reflexiójú tükrök. A sérüléseket (felfröccsenés, por, füst stb. lecsapódás tisztítása) legjobban viselő tükrök molibdénbevonattal készül, de ezen a legnagyobb a lézersugár teljesítményvesztése, ezért csak a sérülés szempontjából legveszélyeztetettebb helyekre építik be. Az adatok alapján becsülhető, hogy a gyakorlatban a tükrökön a rezonátorból kibocsátott sugárzás energiájának 5...10%-a elvész, mire eléri a munkadarabot.

Meg kell jegyezni, hogy ez csak akkor igaz, ha a tükrök optikai szempontból tökéletes állapotban vannak. Enyhe, szabad szemmel nem, vagy alig látható szennyeződés (pl.: benzingőz, oldószer vagy páralecsapódás, apró felfröccsenés) a tükrök felületén az abszorpció ugrásszerű növekedését eredményezi. Ez a tükrök ellenőrzetlen, lokális túlmelegedését eredményezi, ami többek között geometriatorzuláshoz vezet. Ebben az esetben már nem ismerjük a tükrön reflektált sugárnyaláb geometriáját, az energia eloszlását a nyalábon belül.

Egy nagyobb porszem (5...10 μm) megtapadása a tükrök felületén szinte azonnali helyi beégéssel, beolvadással jár. Ennek a tükrök megnövekedett üzemi hőmérséklete, nagyobb oxidációs sebessége, végül „megvakulása” az eredménye. A tönkremenetel sebessége többnyire exponenciálisan növekvő. Szélsőséges esetben (apró porfelhő elszórása a tükrök felületén) akár 1 sec alatt is bekövetkezhet a tükrök teljes tönkremenetel (megolvad a felülete, felforr a hűtővíze, szétduzzan a vízvezető cső stb.).

Azért, hogy az előzőekben vázolt hibák kialakulásának veszélyét csökkentésük, a

tükrök és lencsék közötti teret, vagyis a sugárcsatornát folyamatosan szellőztetik olaj-, oldószer-, vízgőz- és pormentes levegővel. A sugárcsatorna tehát egy enyhén túlnyomásos tér. Ez csökkenti a lézersugár szóródási veszteségét is a levegőben.

Lencse

A CO₂ lézerberendezésekben az ún. lézerfejben lévő lencse fókuszálja az 5...15 mm sugarú nyers lézernyalábot a megmunkálendő felületre, ahol 0,1...0,2 mm sugarú fókuszfolt jön létre. A fókuszáló lencse lehet reflexiós és transzmissziós.

A reflexiósak, vagyis tükrölencsék anyaga megegyezik a síktükrökével, az intenzív igénybevétel (reflektált sugárzás, gőz, szikra stb.) elviselésére minden esetben védőbevonattal készülnek. Reflektáló felületük geometriája sokféle lehet: parabola, integráló, fazettált. Az ilyen lencsére jellemző reflexiós hatások a síktükrök esetében tárgyalttal azonos.

Különösen a lézersugaras vágás esetében van szükség a transzmissziós lencsék alkalmazására (vágógáz nyomás és áramlás létrehozása). Ezek anyaga ZnSe (cinkszelenid: enyhén sárgás színű átlátszó anyag) többrétegű bevonattal. A bevonatok egy része az antireflexiós képesség, másik része a sérülésekkel szembeni ellenálló-képesség javítását szolgálja. Ezeket a lencsét is kell hűteni, de csak a palástjuk felől lehet. A lencséken megvalósuló teljesítményvesztésnek két oka van. Egyrészt a levegő-ZnSe vagy a levegő-lencsebevonat határfelület reflexiója, másrészt a lencse bevonatainak és a lencse ZnSe anyagának abszorpciója. Összeségében 0,5...1%-nyi veszteséggel kell számolnunk, aminek kb. a fele a lencse által elnyelt energia.

A szilárdtest sugárforrásokra jellemző veszteségek

A szilárdtest médiumú rezonátorokból kilépő sugárzás hullámhossza kb. tíze-de a CO₂-jének, ami lehetőséget nyújt arra, hogy üveg-, ill. kvarcszámban vezetve juttassák el a sugárforrásból kilépő sugárzást a megmunkáló helyre. Az optikai szálak szokásos átmérője 30 és 800 μm között van. A szála jellemző kritikus rádiusznál nagyobb ívű hajlítás során az optikai szál nem törik. A levegőhöz képesti törésmutatója, ill. a totálreflexió következtében a sugárzás nem tud kilépni a szál palástján (2. ábra).

Mivel a vékony üvegszál mozgatása egyszerűbb (és olcsóbb) megoldás, mint a tükrök precíz, összehangolt mozgatásával eltéríteni a sugáryalábot (CO₂ lézersugár), ezért ezt a lehetőséget csaknem minden esetben ki is használják. Mindezek következtében a rezonátor és a munkadarab közötti veszteségek más tételéből állnak, mint a CO₂ lézersugár esetén (3. ábra).

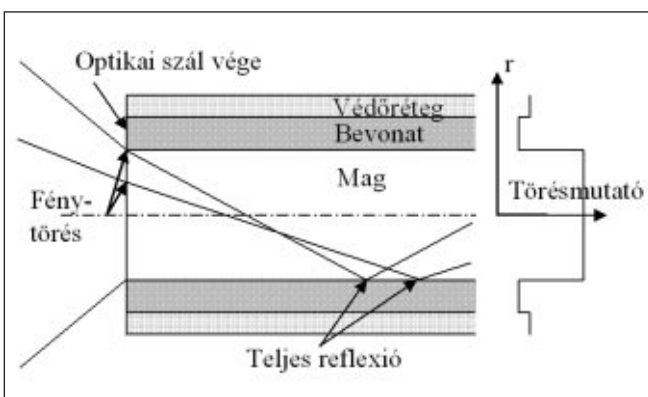
Az akár 20 m hosszú optikai szál a lézersugarat a rezonátorból a lézersugaras megmunkáló fejbe juttatja. A rezonátorból kilépő lézersugarat több optikai szálba is be lehet csatolni. A becsatolás lehet vagylagos, de lehet egyidejű is, a teljesítménymegosztás révén. A lehetőséget a sugárosttoba épített optikai elemek tulajdonságai határozzák meg.

A sugárosttoban át nem eresztő (mozgatható) és/vagy részben átteresztő (nem mozgatható) síktükrök ill. prizmak vannak. A sugárosttó optikai elemeit fókuszáló lencsék követik. Az osztott vagy osztatlan sugáryalábot egy fókuszáló lencse egy optikai szál végére fókuszálja (2. ábra), ahonnan a szál másik végén, kb. 0,4-

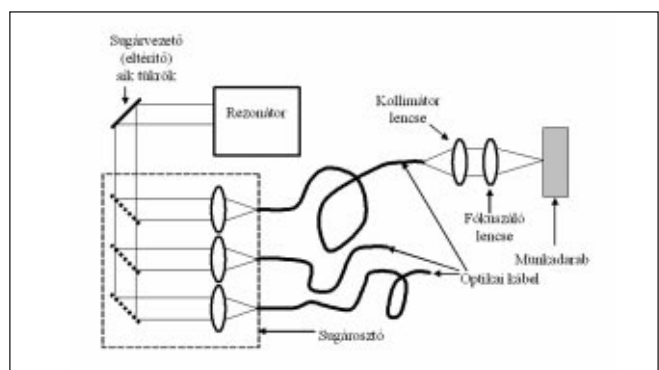
es numerikus apertúrával lép ki. A 40°...50° közötti kúpszögű nyalábot kollimátor lencse formálja, majd egy, a megmunkáláshoz kiválasztott fókuszávolságú lencse a darabra fókuszálja.

A lézersugár törvényszerűen veszít teljesítményéből minden optikai elemen. A teljesítményvesztés okai:

- Elnyelődés (Az atom/molekula, ill. ezek halmaza a fotonokat elnyeli, magasabb energiaszintre kerülnek, felmelegszenek. A veszteség mértéke az anyagtól és a hullámhosszától függ.)
 - Diszperzió (Impulzus üzemmódban eredményez sávszélesedést; az impulzuscsúcscsökkenése jelentős is lehet, noha ez nem feltétlenül jár az impulzus energiájának veszteséssel.)
 - Szóródás (Az anyagban lévő, a lézersugár hullámhosszágnál lényegesen kisebb inhomogenitások okozzák: Rayleigh-szórás, mértéke a fény hullámhosszágnak negyedik hatványával fordítottan arányos. A hullámhosszág felénél nagyobb inhomogenitások esetén: Mie-szórás. Nagy teljesítménysűrűség esetén még: Raman- és Brillouin-szórás.)
 - Tükröződés (Fresnel reflexió: mértéke a $\rho = (n_0 - n_1)/(n_0 + n_1)$ reflexiós együttható négyzetével arányos; ahol n_0 és n_1 az optikai határ két oldalán lévő anyagok törésmutatója. Diffúz visszaverődés: a hullámhosszág tizedénél, kb. 100 nm-nél nagyobb felületi egyenetlenségek következménye.)
 - Szórt visszaverődés. (A hullámhosszág tizedénél, kb. 100 nm-nél nagyobb felületi egyenetlenségek következménye.)
- Az optikai elemek anyaguktól, méretüktől (pl.: szál hossza), mennyiségüktől, antireflexiós rétegek alkalmazásától füg-



■ 2. ábra. Lézersugár becsatolása az optikai szál végébe



■ 3. ábra. Jellemző optikai elemek a szilárdtest rezonátor és a munkadarab között

gően mintegy 5...10% teljesítményvesztést eredményeznek.

Nagyteljesítményű lézersugár száoptikás vezetésekor különösen nagy gondot kell fordítani a munkadarabról reflektálódó lézersugárra, mert a rezonátorból és a munkadarabról érkező sugárzás teljesítménye együttesen már nagyobb lehet a tervezett kritikus értéknél. Ennek eredményeként a szálvégeken a túl nagy hővé alakult veszteség termikus túlterhelést, repedéscsorbulást, azonnali tönkremenetelt eredményezhet. Ennek elkerülése érdekében ajánlott, hogy a lézersugár a munkadarab felületi normálisától legalább 6°-os eltéréssel irányuljon a felszínre. Ebben az esetben ugyanis a munkadarabról reflektált sugárzás nem jut vissza az optikai szálba.

Reflektált és a darabon átjutott lézersugár-energia

A munkadarabban elnyelt és a visszavert energia

Az anyag és az elektromágneses sugárzás kölcsönhatásai közül, különösen a fémek anyagok lézersugaras megmunkálásának tárgyalása során, a reflexió a leginkább vizsgált jelenség. Ennek ismerete nem csak az anyagmegmunkálás szempontjából fontos, hanem a munkavédelem miatt is, hiszen a reflektált sugárzás súlyosan károsító, életveszélyes körülményeket teremthet.

Mivel a fémek anyagokat a lézersugárzások hullámhosszúság tartományában nem tekinthetjük transzoptikusnak, átláthatónak, ezért egyszerűsítve az elméleti állapotot, úgy szokás tekinteni, hogy a

darab felületét érő sugárzás egy része elnyelődik, abszorbalódik, a fennmaradó pedig reflektálódik. Ilyen körülmények között ezt a két jelenséget egymás komplementereként kezelik, együtt ill. felváltva tárgyalják.

A lézersugár–anyag kölcsönhatásra általában jellemző a nem lineáris viszony. Ennek egyik látványos megnyilvánulása a teljesítménysűrűség és az abszorpció kapcsolata.

Ritkán veszik számításba a lézersugár teljesítménysűrűségének az abszorpció mértékére gyakorolt hatását, pedig az rendkívül markáns, határesetben áttörésszerű jelenséget mutat (4. ábra) [2].

A 4. ábrát értékelve az látszik, hogy az egyébként nagyon rossz abszorpciós tulajdonsággal rendelkező rezet a 8–10 · 10⁷ W/cm² teljesítménysűrűségű Nd:YAG (Neodimiummal ötvözött ittrium – alumínium gránát) lézersugárral könnyű vágni vagy hegeszteni. Konkrét esetben: a rezet akkor lehet folyamatos üzemmódú Nd:YAG lézersugárral jól vágni, ha a fókusztávolság kb. 0,1 mm és teljesítménye legalább 6 kW, ami egyébként ma már nem illúzió (1,07 μm hullámhosszúságú, 20 kW teljesítményű, kiváló sugárminőségű Yb-szállézereket is forgalmaznak).

A lézersugár reflexiójának ugrásszerű változását már a nagyteljesítményű ipari lézerek korszakának kezdetén felismerték [3]. Ezzel kapcsolatban azt is kimutatták, hogy a reflexió hirtelen változása a plazmaképződéssel van szoros összefüggésben (5. ábra).

A munkadarab reflexiójának csökkentésére gazdasági és munkavédelmi okokból számos megoldást dolgoztak ki, hi-

szén ezzel csökkenthető a sugárforrás szükséges teljesítménye (olcsóbb berendezés, olcsóbb üzemeltetés) és csökken a balesetveszély is. A megoldások közül sok általános gyakorlattá vált a lézersugaras technológiák alkalmazásában.

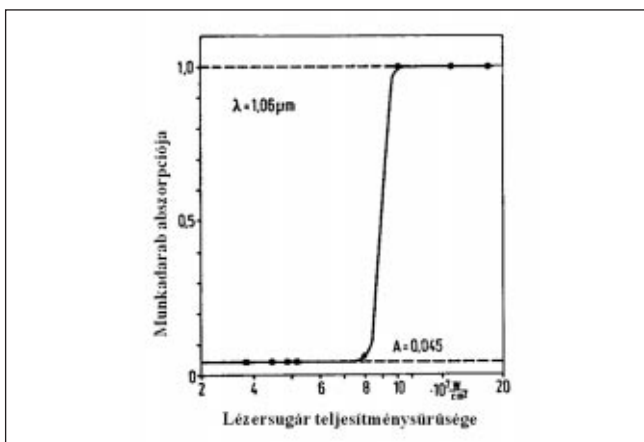
A reflexió komplementerének, az abszorpció mértékének hullámhosszúság függőségét néhány anyagra már a cikksorozat első része bemutatta. Az abszorpció azonban egyéb jellemzőktől is függ, mint pl.: felületi érdesség (annak topográfiáját is beleértve), a sugárnyaláb beesési szöge, a sugár polarizáltsága, a hőmérséklet stb.

A reflexió mértékének csökkentésére kidolgozott módszereket fizikai hatások szerint három csoportba lehet sorolni:

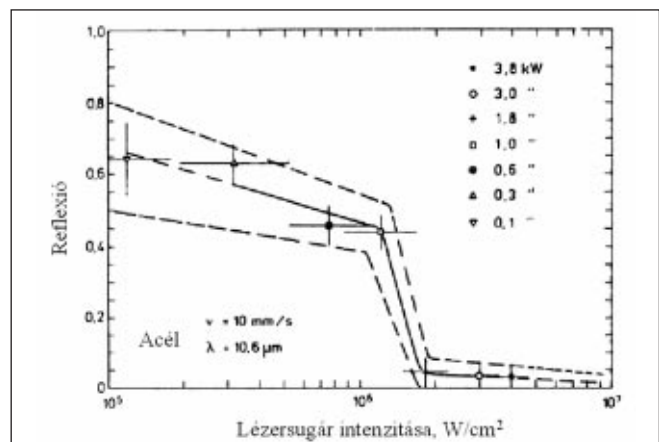
1. a polarizált lézersugár abszorpciójának erős szögfüggése;
2. az abszorpció függése a felületi érdességtől;
3. abszorbaló bevonat létrehozása a munkadarab felületén.

Ad 1.: A p-polarizált lézersugár 70–85°-os beesési szög esetén 35–80%-os abszorpciós fokot eredményez acél felületén [4]. Ezt a kedvező effektust gyakran kihasználják az acél alkatrészekben lévő nútok felületedzésénél, különösen a tömegtermelésben. Általános alkalmazása a szokásos lézersugaras megmunkáló fejek geometriai adottságai miatt nem jellemző.

Ad 2.: A felületi érdesség növekedtével az abszorpció mértéke általában növekszik. Nem lehet viszont egyértelmű függvénykapcsolatot találni pl. az átlagos felületi érdesség R_a értéke és az abszorpció mértéke között [5], ahogyan az a 2. táblázat adataiból is látszik. A tendencia azonban felismerhető: az érdesített felület na-



■ 4. ábra. A Cu abszorpciós fokának változása a lézersugár teljesítménysűrűségének függvényében [2]



■ 5. ábra. A lézersugár reflexiójának változása az acél felületén a lézersugár teljesítménysűrűségének függvényében [3]

2. táblázat. 20 °C-on a felületi érdesség és a lézersugár abszorpciója közötti kapcsolat [5]

35NCD 16 acél felület-előkészítésének módja	R _a érdesség, μm	CO ₂ lézersugár abszorpciós foka, %
Polírozott	0,02	5,15–5,25
Csiszolt	0,21	7,45–7,55
Csiszolt	0,28	7,70–7,80
Mart	0,87	5,95–6,05
Mart	1,1	6,35–6,45
Mart	2,05	8,10–8,25
Mart	2,93	11,60–12,10
Mart	3,35	12,55–12,65
Homokolt	10,65	33,85–34,30

3. táblázat. A felületi állapot és a hullámhosszúság hatása az abszorpciós fok nagyságára

Felület állapota	Abszorpciós fok, %	
	CO ₂ lézersugár, 10,6 μm	Nd:YAG lézersugár, 1,06 μm
Polírozott	4	30
Csiszolt	5–7	33–37
Esztergált	6–8	36–43
Homokolt	21–23	46–51
Oxidált	60–80	60–80
Grafitozott	70–80	70–80

gyobb abszorpciót eredményez, mint a finoman megmunkált. Mivel homokfúvással még bonyolult görbült felületen is könnyű és olcsó egyenletes felületi minőséget létrehozni, a kívánt érdesség biztosítására ez a módszer vált általánosan elterjedté.

Ad 3.: A munkadarab lézersugár hatására bekövetkező felhevülését, az abszorpció javulását gyakran bevonat létrehozásával segítik. A bevonatokkal szemben támasztott legfontosabb követelmények:

- nagy abszorpciós fok az alkalmazott lézersugár hullámhosszúságán;
- nagy hőátadási együttható a bevonat és az alapanyag között;
- jó hővezető képesség;
- kémiai stabilitás a technológiai körülmények között (ne lépjen reakcióba pl. a környezeti atmoszférával);
- alapanyaghoz közeli hőtágulási együttható;
- homogenitás a bevonaton belül;
- ne lépjen kölcsönhatásba a munkadarab anyagával;
- szabadba kerülve még bomlásterméke se legyen egészség- és környezetkárosító;
- a bevonatképzés automatizálhatósága és reprodukálhatósága;
- könnyű bevonatképzés és eltávolítás.

A követelmények többsége szempontjából megfelelő bevonatokat két csoportba lehet sorolni:

- konverziós bevonatok (a bevonatképzésben a munkadarab anyaga is részt vesz);
- felhordott bevonatok.

A konverziós bevonatok létrehozásának jellemző módszerei az oxidálás, a nitrálás, a nitrálás, a foszfátózás és a galvanizálás. Ezeket a módszereket azonban ritkán alkalmazzák, mert a bevo-

tokkal szemben támasztott követelmények közül a g)-t és a j)-t nem, vagy csak kis mértékben képesek kielégíteni (reakcióba lép a munkadarab anyagával, általában bonyolult a létrehozása, nehéz a maradék eltávolítása). Mégis van létjogosultságuk, amennyiben a bevonat anyagának keveredése az alapanyaggal az alkatrész szempontjából nem jelent feltétlenül hátrányos következményt (esetleg ellenkezőleg, pl. felületötöztetés), ill. a bevonatot nem kell minden esetben eltávolítani (pl. az alkatrész korrózióállóságát növeli, kedvező optikai tulajdonság alakul ki stb.).

A felületi minőség és a bevonat anyagának abszorpciós fokra gyakorolt hatását jól érzékeltetik a 3. táblázat adatai. Az értékek Ck 45 minőségű acél alapanyagra vonatkoznak folyamatos üzemmódú, cirkulár-polarizált lézersugár alkalmazása esetén [6].

Az abszorpciós bevonatok hatékonyságának értékelése szempontjából tisztában kell lennünk a bevonatba hatolási úttal a fény intenzitásának csökkenésével, amit a Lambert-féle abszorpciós törvény ír le:

$$\phi = \phi_0 \cdot \exp(-\beta x)$$

ahol:

ϕ fényáram a közegben megtett x út után;

ϕ_0 fényáram a közeg felszínén;

β extinció modulus (annak a rétegvastagságnak a reciprokéval egyenlő, amelyen áthaladva a fényintenzitás az eredeti tizedére csökken);

x a közegbe hatolás mélysége.

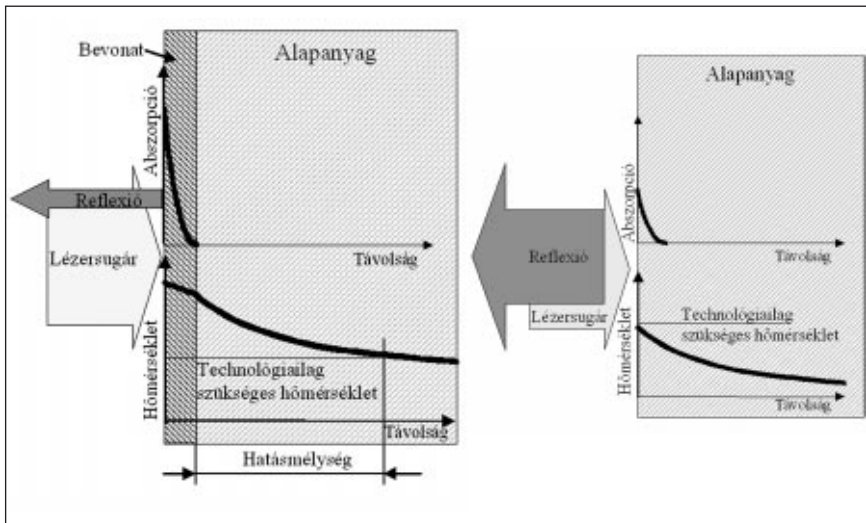
A fémek esetében a lézersugár behatolási mélysége az infravörös sugárzás hullámhosszúságának tartományában 10^{-8} ... 10^{-10} m, tehát a fémek rácsparaméteréhez közeli nagyságrendű (6. ábra). Az abszorpciós bevonatok anyaga esetén

ugyanaz legfeljebb egy nagyságrenddel mélyebb behatolást jelent. E szerint a fókuszált lézersugár energiája nem transzoptikus anyagok esetén csak rendkívül kis vastagságú rétegben fog elnyelődni. Ha a kis behatolási mélység erős reflexióval párosul, akkor az edzés, a felületátolvasztás, a felületötöztetés stb. nem valósítható meg, hiszen még nagy teljesítménysűrűség (W/cm^2) esetén sem nyelődik el kellő mennyiségű energia ahhoz, hogy az általában elvárt, kb. 1 mm vastag anyagréteg a kívánt hőmérsékletre hevüljön.

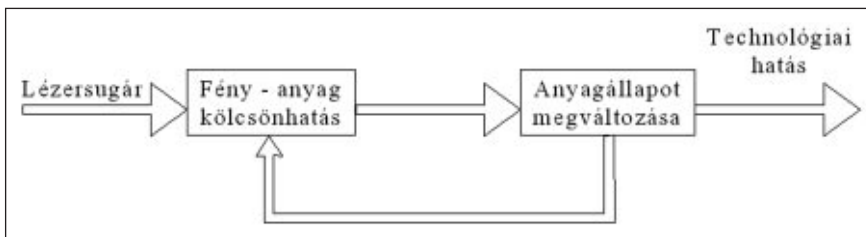
A lézersugár teljesítményének növelése egyébként logikus reakciója lehet annak, akinek még van tartaléka a rezonátorában (a hegesztési kísérletet a sugárforrás csúcsteljesítményénél kisebb teljesítménnyel hajtotta végre). A problémát azonban az jelenti, hogy a sugárzás–anyag kölcsönhatásban a teljesítménysűrűség növekedése gyakran ugrásszerű változást eredményez az abszorpciós képességben, ahogyan azt a 4. ábra is szemléltette.

A lézersugár abszorpciójának növelésére szolgáló bevonatok szokásos vastagsága erősen függ a bevonat anyagától, a felvitel módjától (konverziós bevonatok akár $1 \mu m$ -nél vékonyabbak is lehetnek), de semmiképp nem célszerű $10 \mu m$ -nél vastagabbra választani, mert a bevonatok anyagának hővezető képessége jellemzően rosszabb mint a fémeké, ill. nő a termikus feszültségre visszavezethető lepatogzás veszélye.

A darab lézersugár hatására bekövetkező felhevülésének, így az abszorpciónak a kézbe tartása nem egyszerű feladat. A darab felületi hőmérsékletének változása ugyanis jelentősen befolyásolja az abszorpciós képességét, ami visszahat a hőmérsékletváltozás sebességére (7. ábra). A hőmérsékletnövekedés, és különösen a



■ 6. ábra. Bevonat hatása a reflexióra, ill. a kialakuló hőmérséklet változása



■ 7. ábra. A lézersugár és technológiai hatásának kapcsolatát magyarázó folyamatára

halmazállapot-változások során az abszorpciós viszonyok többnyire ugrásszerűen változnak.

A hőmérsékletnövekedés az abszorpciós viszonyokat több okból is befolyásolja. Ezek közül a legfontosabbak:

- a tárgy felületének változatlan vegyi összetétele esetén az anyagszerkezet megváltozása (fázisátalakulás, halmazállapot-változás);
- a felületi érdesség megváltozása (fázisátalakulás térfogatváltozási hatása, szelektív olvadás, párolgás stb.);
- az abszorbaló felület vegyi összetételének változása (pl.: oxidáció, oxidfilm felszakadása olvadáskor, szelektív párolgás stb.);
- az elektromágneses sugárzás irányának és a munkadarab felületi normálisának iránya közötti szög változása (jellemzően az olvadás során a fajlagos felületi feszültség, a védőgázáram, illetve a gravitáció következtében).

A helyesen megválasztott technológiai paraméterek esetén az állandó vagy a szabályozottan változó teljesítményű lézersugárzás hatására mindezek ellenére gyorsan elérhető az állandósult állapot, a stabil technológiai hatás (hőkezelés, felü-

letolvasztás, hegesztés stb.). A helyes lézersugaras megmunkálások során a termikus viszonyoknak néhány ms-on belül stabilizálódniuk kell. Erre mutat egy példát a 8. ábrához tartozó kísérlet.

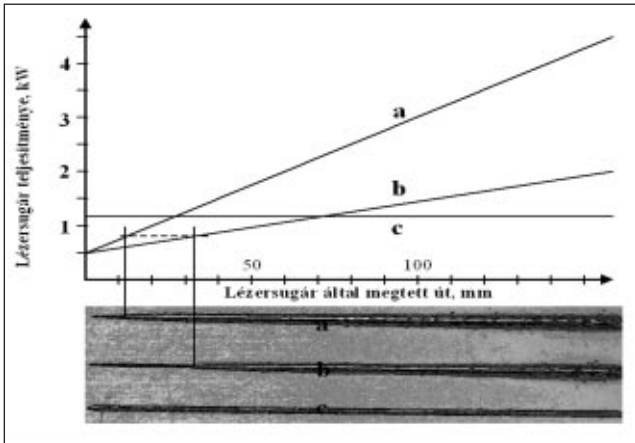
A 8 mm vastag ausztenites saválló acél felületén a képen balról jobbra egyenesen sebességgel halad a lézersugár fókuszfoltja, miközben teljesítménye az első két esetben folyamatosan nő, a harmadikban állandó értékű. A varratokról felülnézetben készített fotón látható, hogy a folyamatosan növekvő lézerteljesítmény hatására egy meghatározott teljesítmény értéknél (mivel minden egyéb körülmény azonos volt, ezért úgy is fogalmazhatunk, hogy teljesítménysűrűség és energiasűrűség nagyságnál) a fény-anyag kölcsönhatás eredményében ugrásszerű változás következett be. Ahogyan azt korábban már láttuk, ez a teljesítmény, teljesítménysűrűség és energiasűrűség érték több tényezőtől is függ, mint pl. a lézersugár energiaeloszlása a nyalábon belül, abszorpciós viszonyok a darab felületén stb. Kezdetben, a határérték alatt, hővezetési vakvarrat keletkezett, fölötte pedig plazmaképződéssel együtt járó úgynevezett mélyvarrat (angol szakirodalom szerint keyhole effect =

kulcslyuk effektus). A fémgőzből és plazmából álló anyagréz kialakulásának hatására a lézersugár elnyelődésének mértéke ugrásszerűen megnőtt. A mélyvarratos hegesztés körülményei között a reflexió mértéke akár 10% alá is eshet! A harmadik kísérletben a határérték fölött +400 W teljesítménnyel haladó lézersugár már az első mm-nél az állandósult állapotnak megfelelő hatást eredményezett.

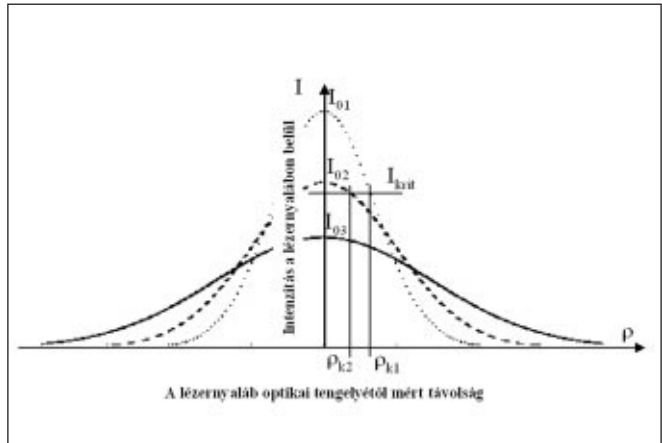
Az, hogy a példa szerinti határérték mekkora lézerteljesítménnyel adódik, számos körülménytől függ. Az egyszerűség érdekében ezek közül ragadjuk ki a lézersugár intenzitását. Fogadjuk el, hogy egy-egy körülmények azonossága esetén egy I_{krit} kritikus lézersugár intenzitásnál nagyobbra van szükség a fémgőz-plazma állapot kialakulásához (lásd: 5. ábra). Tételizzük fel továbbá, hogy az előbb vázolt kísérletünket most három azonos teljesítményű lézersugárral megismételjük úgy, hogy a lézersugár fókusza továbbra is a darab felszínén marad. A három lézersugár közötti különbség most a sugárparaméter-szorzatban legyen, vagyis különböző sugárminőségű nyalábokkal kísérletezzünk.

A 9. ábra diagramja szerint az I_{krit} értéket csak két esetben érzük el: a pontozott és a szaggatott vonallal jelzett intenzitáseloszlás esetén. A harmadik esetben olyan nagy a sugárparaméter-szorzat, ill. az M^2 érték, hogy a darab felszínén nem tud kialakulni a plazmaállapot, ezért nagy lesz a reflektált energia. A reflektált energia nagyságát vizsgálva a két kedvező eset között is van különbség. A jobb sugárminőségű nyalábnak (pontozott vonal) nagyobb sugarú része van az I_{krit} érték fölött ($\rho_{k1} > \rho_{k2}$), mint a rosszabbé (szaggatott vonal), így a nyaláb energiájának nagyobb része nyelődik el hatékonyan. A három esetben tehát különböző lesz a lézersugár energiájának hasznosuló része.

Legjobb lézersugár energiaelnyelődési eredményt a pontozott vonallal, legrosszabbat a folytonos vonallal jellemzett intenzitáseloszlás esetén kapunk. Technológiai hatásukat vizsgálva azt fogjuk tapasztalni, hogy azonos sugárteljesítmény esetén a folytonos vonallal jellemzett lézersugárral legfeljebb hővezetési hegesztést valósíthatunk meg (legkisebb beolvadási mélység), míg a másik két esetben mélyvarratos hegesztést. A legmélyebb varratot és annak legkisebb hőhatásövezetét a pontozott vonallal jellemzett lézersugár esetén érhetjük el.



■ 8. ábra. A lézersugár teljesítménysűrűségének hatása a kialakuló varrat típusára



■ 9. ábra. Intenzitáseloszlás az azonos teljesítményű, de eltérő sugárméretű lézerváltozókon belül

Legyünk figyelemmel arra is, hogy a lézersugár teljesítményének hasznosuló része függ a technológiai céltól is. Az acél lézersugaras edzéséhez például nem kell a plazmaállapotot elérnünk, vagyis a 9. ábrán jelzett I_{krit} -nél kisebb intenzitás érték is elegendő. A kisebb sugárparaméter szorzatú, ill. M^2 értékű sugárral munkadarabunk egy részét indokolatlanul hevítjük túl, rossz esetben, szándékunktól eltérően, a darab felülete meg is olvadhat. Edzés esetén tehát jobban járunk, ha a folytonos vonallal jellemzett lézersugarat alkalmazzuk.

Az abszorpciós bevonatok alkalmazásakor azt is figyelembe kell venni, hogy a bevonat a lézersugaras kezelés közben könnyen elveszítheti hatását. Ez bekövetkezhet azért, mert a hő hatására bom-

lik, oxidálódik, elpárolog, vagy azért, mert a réteg anyaga eltávozik, például azért, mert az alapanyag megolvad, felszakadozik a réteg, esetleg belekeveredik a keletkezett olvadékba. Lézersugaras vágás során a vágandó anyaggal együtt távozik a bevonat. Ennél a technológiánál az abszorpciós bevonat léte vagy hiánya gyakorlatilag nem befolyásolja a vágás termikus viszonyait. Az acélok lézersugaras edzése viszont lényegesen kedvezőbb feltételek között játszódik le a bevonat alkalmazása esetén, mint anélkül.

Irodalom

- [1] www.kugler-precision.com
- [2] Beyer, E. – Wissenbach, K.: Oberflä-

chenbehandlung mit Laserstrahlung, Springer-Verlag, 1998.

- [3] Beyer, E.: Einfluß des laserinduzierten Plasmas beim Schweißen mit CO₂-Lasern, TH Darmstadt, Dissertation, 1985.
- [4] Stern, D.: Absorptivity of cw CO₂-, CO- and Nd:YAG-Laser Beams by Different Metallic Alloys, Institutsbericht ISL Co 233/90, Saint Louis, 1990.
- [5] Rudlaff, R.: Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärten mit Laserstrahlen, G.Taubner Verlag, Stuttgart, 1993.
- [6] Geiger, M. – Hutfless, J.: Laserstrahlbearbeitung, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, LFT, Umdruck zur Vorlesung, Stand WS 93/94.

■ MŰSZAKI-GAZDASÁGI HÍREK

A fény hullámhosszának huszadrésze, a plazmonlézer. A Kaliforniai Egyetem Berkeleyben működő kampuszának kutatói (University of California, Berkeley) olyan lézert hoztak létre, amelynek a mérete körülbelül a huszada a fény hullámhosszának. Erre a plazmonok felhasználása adott módot. A plazmonok a fémek felületén együtt mozgó elektronok csoportjai. Azért kaptak részecskeszerű nevet, mert részecskeszerűen viselkednek. Csakhogy nem elég hosszú élettartamúak a lézerjelenség beindulásához. Ezen a fejlesztők úgy segítettek, hogy a plazmonokat nagyon kicsi üregrezonátorba zárták, a rezonátort egy ezüst felület és a felette mindössze öt nanométerrel elhelyezett kadmi-

um-szulfid félvezető nanoszál vége képezi. A fém és a kadmium-szulfid között a plazmonok csapdába esnek, ettől már elég hosszúra növekszik az élettartamuk a lézerműködéshez.

☞ www.berkeley.edu

Lítium-levegő akkukkal váltanak fel a benzint. A lítium-levegő akkumulátorok egy katalitikus levegő katódot használnak, ami oxigénnel táplál egy lítium anódot. Sokan tekintik a fémalapú akkumulátorok csúcának. Mivel a lítium hevesen reagál a vízzel, egy nemvízes elektrolitot alkalmaznak egy szerves polimer elválasztóhártyával a levegőből történő oxigénelvitel elősegítéséhez.

A technológia elvileg majdnem annyira energia tárolására képes mint egy tank benzín, kapacitása öt-tízszere lehet a lítium-ion akkuknak, amik hamarosan felváltják az eddigi a hibrid járművekben alkalmazott nikkell-kadmium akkumulátorokat.

Az USA Energiaügyi Minisztériumának (DOE) Argonne Nemzeti Laboratóriuma a biztonságos, nagy energiájú és hosszú élettartamú lítium-ion technológiában szerzett tapasztalataikkal próbál megbirkózni a kereskedelmileg is életképes lítium-levegő akkumulátorok által támasztott igen komoly akadályokkal. Az Argonne számos akkumulátor technika kutatásában és fejlesztésében vett részt az elmúlt négy évtizedben, így van mire alapozniuk. A laboratórium