FIATAL MŰSZAKIAK TUDOMÁNYOS ÜLÉSSZAKA XIX.

Kolozsvár, 2014. március 20–21.

LÉZERSUGÁR, MINT AZ ANYAGMEGMUNKÁLÓ TECHNOLÓGIÁK ÚJ SZERSZÁMA

LASER BEAM AS A TOOL FOR MACHINING MATERIALS

BUZA Gábor

*Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft., H-1116 Magyarország,
Budapest, Fehérvári út 130.; Telefon:+36 1 463 05 30; Fax:+36 1 463 05 29,
buzag52@gmail.com*

Abstract

A short review of the history of the industrial applications of laser radiation is given in this article. The development of laser sources used for machining materials is presented up today, together with the expected new development tendencies. Widespread machining technologies are summarized in the order of their importance as reflected by industrial use. Finally the effect of laser beam impulse length on the machined material is presented through examples. Phenomena caused by laser impulses of different length are commented by short physical explanations.

Keywords: laser beam technologies; laser sources; effects of laser impulses

Összefoglalás

A cikk rövid áttekintést ad a lézersugár ipari alkalmazásának történetéről. Bemutatja az anyagmegmunkálásra szolgáló lézersugárforrások fejlődését napjainkig és a várható új fejlesztési irányokat. Összefoglalást ad az elterjedt lézersugaras anyagmegmunkáló technológiákról, azok fontossági sorrendjében, az ipari alkalmazások tükrében. Végül példákon keresztül tárgyalja a lézersugár-impulzusok hosszúságának hatását a megmunkált anyagra. Rövid, fizikai alapokon nyugvó magyarázattal egészíti ki a különböző hosszúságú lézersugár-impulzusok hatására bekövetkező jelenségeket.

Kulcsszavak: lézersugaras technológiák, lézersugárforrások, lézerimpulzusok hatása

Ahogy a lézersugárforrások fejlesztésének üteme, úgy a lézersugaras technológiák körének bővülése is évtizedek óta töretlen. A fejlesztések hajtóerejét, vagyis az új sugárforrástípusok fejlesztését az ipar igényei indukálják. Az alig több mint 50 éves múlta visszatekintő lézersugár szinte hihetetlen pályafutást tudhat maga mögött, és a szakirodalom tanulmányozása alapján bizonyosak lehetünk abban, hogy a dinamikus fejlődés vége még nem látszik, mert nagyon messze van.

1. Már a kezdeteknél...

Mint tudjuk, az első lézerjelenséget 1960. május 16-án figyelhették meg a kaliforniai Hughes Research Laboratories-ban. Akkor még igazi „felvillanásról” szó sem volt, csupán az emittált spektrum egy vonalának szokatlan (korábban nem tapasztalt) erősödését detektálta

Theodor Maiman és munkatársai. A műszaki szempontból is értékelhető tulajdonságegyüttesű lézersugár létrehozásához még évek munkájára volt szükség, mégis, még abban az évtizedben elterjedt az első ipari alkalmazás, a gyémánt húzókövek (alakító szerszám) lézersugaras fúrása (1. ábra). Hangsúlyozni kell, hogy az iparban csak olyan technológiáknak van helye, melyek gazdaságosak.

1.ábra. Gyémánt húzókögyártás a lézersugaras fúrás technológiájával (bal) és a huzalgyártásra szolgáló húzókö jellegzetes geometriája (jobb)

Az első lézersugárforrások médiuma szilárdtest volt, ahogyan Maiman lézerében a rubinkristály. A szilárdtest milyensége tekintetében az akkori alapelv máig sem változott, hiszen az optikailag transzparens hordozó anyagában (a rubin esetében a hordozó az Al_2O_3 , vagyis a korund) egyenletesen elosztva található a gerjesztendő atomok halmaza (a rubin esetében a króm), melyek a stimulált emisszió révén a lézersugár fotonjainak kibocsátója. A korszerű szilárdtestlézerekben a médium transzparens hordozója általában mesterséges anyag, mint például az ittrium-alumínium-gránát (YAG: $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$), vagy speciális összetételű üvegek, a gerjesztendő atomok pedig többnyire a lantanidák csoportjának valamelyik eleme. Persze továbbra is vannak olyan lézermédiumok, melyek a természetben is előfordulnak, mint pl.: Ti:zafír lézerek.

Nem szabad megelégednünk az éppen fénykorát élő mikroelektronika fotonikához csatlakozásáról, a félvezető médiumú diódalézerekről sem. A technika akkori szintje miatt a diódalézerek által kibocsátott fény teljesítménye még nagyon kicsi volt, ezért azokat főleg az informatikában, ill. a telekommunikációban tudták jól használni. Az akkori eredményeket nem szabad alábecsülni, mert a telekommunikációs célra fejlesztett diódák vezettek el a mai korszerű szilárdtestlézerekhez, ésma is ezeket használják gerjesztő sugárforrásként.

2. A sugárforrások fejlődése

Az 1970-es években vált intenzívvé a gázlézerek fejlesztése és ennek eredményeként születtek az új lézersugár alkalmazások. Erre a korszakra tehető a lézersugár alkalmazásainak kiterjedt kutatása a mérés-technika, az anyag-lézersugár kölcsönhatás területén, ill. felgyorsult az informatikai, a távközlési és szórakoztatóipari alkalmazások kutatása, valamint az orvoslás területének meghódítása.

Ebben az időben a He-Ne- és a CO_2 -lézer sugárforrások száma növekedett ugrásszerűen, de valamennyi sugárforrás közül a CO_2 -lézerek voltak azok, melyek a fénytelsítményük révén alkalmasak voltak az ipar igényeit szolgáló technológiák kidolgozására, fejlesztésére. A '70-es évek végén már nem csak az alkalmazott kutatási intézetekben voltak nagy

fényteljesítményű ($P > 1000\text{W}$) lézersugárforrások, hanem egyes ipari termeléssel foglalkozó cégeknél is megjelentek.

A '80-as években jelentek meg az első nagyteljesítményű szilárdtestlézerek. Abban az időben a legelterjedtebben alkalmazott lézermédium az Nd:YAG (neodímiummal ötvözött/szennyezett YAG kristály). Hatékony gerjesztésük azonban még nem volt megoldott. Az alkalmas, megbízható, hosszú élettartamú lézerdiódák hiányában villanólámpákkal kellett gerjesztetni, ahogyan annak idején, húsz évvel korábban Maiman is tette a rubinnal. Ennek következtében, azok a szilárdtest-sugárforrások csak impulzus üzemmódban tudtak működni (a CO_2 kezdetektől fogva képes volt impulzus és folytonos üzemmódú működésre egyaránt). A villanólámpás gerjesztésű sugárforrásoknak másik hátránya volt a rossz sugárminőség (kis M^2 és nagy BPP érték), ami a technológiai alkalmazhatóságot erősen korlátozta. Kifejezetten előnyös volt azonban a CO_2 -lézersugár hullámhosszúságához képesti rövideje (CO_2 : 10.600nm , Nd:YAG: 1.064nm), ami lehetővé tette, hogy hajlékony optikai szálban lehessen a több kW-os teljesítményű fényt is vezetni, ill. jobb abszorpciós viszonyokat teremtsen a fémek esetében. A kW-os nagyságrendű fénytelijsítményt kibocsátó szilárdtest-sugárforrások megjelenésével elindult egy önálló fejlesztési irány, a robotos sugárvetés. (A CO_2 -lézersugarat csak vízzel hűtött vörösréz tükrök segítségével lehet irányítani, melyek precíz mozgatásához nehéz, CNC-vezérlésű szerszámgépekre van szükség, a szilárdtestlézerek fényét pedig hajlékony optikai kábelben is lehet vezetni.)

A '90-es években a gyors axiális áramlású CO_2 -gázlézerek uralták a piacot. Évente csaknem megduplázódott a számuk az ipari termelésben. Elsősorban vágásra használták, leggyakrabban síklemezek vágására. Kibontakozóban volt a 3D-s vágás és a lézersugaras hegesztés technológiája. A lézersugaras technológiák alkalmazására a legnagyobb igénye a fémes anyagok megmunkálására szakosodott gépiparon belül a járműiparnak volt (ez azóta sem változott).

Az ezredfordulón már érezni lehetett, hogy a lézersugaras technológiák végérvényesen megvetették lábukat az iparban. Az iparnak azonban mindig újabb és újabb igényei voltak (ez mit sem változott), amelyeket a „rég” sugárforrásokkal már nem lehetett kielégíteni. A sugárforrás-fejlesztők ezért keresték az új rezonátorépítési megoldásokat. Mivel jó hatásfoka miatt közkedve vált a CO_2 -lézermédium, kifejlesztették a SLAB-lézereket (diffúziós hűtésű CO_2 -lézer), melynek a sugárminősége jobb, mint a gyors axiális áramlásúaké, ráadásul üzemeltetésük gazdaságosabb is. Az ezredforduló időszakának másik nagy eseménye volt a nagy teljesítményű, megbízható működésű, hosszú élettartamú lézerdiódák megjelenése. Ezeket kezdetben megpróbálták minden olyan technológiában alkalmazni, melyekben a CO_2 -lézerek már bizonyították előnyeiket a hagyományos technológiákkal szemben, vagy a hagyományos villanólámpás gerjesztésű szilárdtestlézerek bizonyították gazdaságos alkalmazhatóságukat. A diódák esetében a siker azonban csak néhány alkalmazásban volt kielégítő, amiért egyedül a diódából kilépő lézersugár rossz minősége okolható. A lézerdiódák óriási ütemű gyártására mégis szükség lett, mert a szilárdtestlézer-médiumok gerjesztésére kiválóan használhatók. Ez nagy ugrást jelentett a szilárdtestlézerek alkalmazásában is, mert egyrészt nagyon sokat javult a sugárminőségük, másrészt egyszerűen elérhetővé vált a folytonos üzemmód, hiszen ha a lézerdiódákon átfolyó egyenáram csak akkor szaggatott, ha mi akarjuk, vagyis a gerjesztés és a szilárdtest médiumból kilépő lézersugár folytonossá válhatott.

A XXI. század elején két új lézersugárforrás-típus tartja izgalomban a lézertechnológusokat. Az egyik a szállézer, a másik a koronglézer. Mind a kettő szilárdtestlézer, hullámhosszúságuk gyártótól (pontosabban fogalmazva a lézermédium aktív elemétől) függően 1.000 és 1.100 nm közé esik és mindegyikben lézerdiódák adják a médiumot gerjesztő sugárzást. Lényeges különbség a két sugárforrás között „csupán” a

lézermédium geometriájában van: az egyik esetben egy kb. 0,1 mm átmérőjű, de sok (akár több száz) méter hosszú szál, a másik esetben egy kb. 10 mm átmérőjű és 0,5 mm vastagságú korong alakja van a lézermédiumnak. Mind a kettőnek nagyon jó a sugárminősége és akár 10 kW lézerteljesítményre is képesek (a szállézerreknél nagyobbra is).

3. Az elterjedt technológiák

A lézersugaras anyagmegmunkáló technológiák általánosítható, közös jellemzője, hogy a lézersugár fotonjainak energiáját a foton-elektron kölcsönhatáson keresztül a munkadarab lokális hőmérséklet növelésére használjuk. A növelt hőmérsékletű anyagréteg térfogata és hőmérséklete a lézersugár és az anyag tulajdonságaitól egyaránt függ. Az összefüggések az egyes paraméterekre nézve sem lineárisak (nem lineáris optika), összességében pedig rendkívül bonyolultak. Ennek ellenére vannak „ökölszabályok”, melyek mentén az egyes technológiák lézersugárra vonatkozó igényei (feltételei) jól körülhatárolhatók. Az egyik általánosan alkalmazott ökölszabály a lézersugár teljesítménysűrűségének (felületegységre jutó fényteljesítmény) és az anyag-lézersugár kölcsönhatási idejének meghatározó szerepére alapoz. Az eredményt grafikusan szokás bemutatni (2. ábra).

2. ábra. Lézersugaras technológiák teljesítménysűrűség és kölcsönhatási idő igénye [1]

Az edzés, az átolvasztás, a bevonatolás, a forrasztás és a hővezetési hegesztés esetén hosszú lézersugár-anyag kölcsönhatási időre van szükség, praktikusán ezeket a technológiákat folytonos lézersugárral érdemes gyakorolni. Különösen az edzés esetében kell hangsúlyozni a lézersugaras technológiák lokális jellegét. Nem érdemes egy alkatrész teljes felületét lézersugárral edzeni, mert elveszítjük a koncentrált energiabevitelből származó előnyöket. Gazdaságossági számítások esetében abból kell kiindulnunk, hogy 1 kWh lézersugár-energia előállításához kb. 5..10-szer annyi villamos energiára van szükség még a korszerű

lézersugárforrások esetében is (a diódalézerek esetében csupán háromszor annyira). E tekintetben még mindig a régi CO₂-lézer sugárforrások a kedvezőbbek.

A mélyvarratos hegesztés a lézersugaras technológiák között kitüntetett jelentőségű, mert a varrat mélységéhez képest kevés energiát kell az anyagba juttatni. Ezt azonban csak akkor lehet elérni, ha a munkadarab felületén a lézersugár teljesítménysűrűsége egy határértéknél nagyobb (anyagfüggő, de általában 10^6 W/cm²). Az akár 1:10 = varrat szélesség : mélység arány legfeljebb az elektronsugaras hegesztés technológiájával érhető el.

Jó minőségű vágás a mélyvarratos hegesztésre jellemző teljesítménysűrűséggel érhető el, de rövidebb kölcsönhatási idő esetén, vagyis összességében kevesebb energia befektetésével. A lézersugár által megolvasztott anyagot munkagázzal kell kifűjni a vágórésből.

Ha a lézersugárral megolvasztott töcsából nem fűjük ki az olvadékot (legfeljebb az oxidációtól védő inert gázt alkalmazunk), ill. még tovább csökkentjük a lézersugár-anyag kölcsönhatás idejét, a megolvadt anyagrész nagyon gyorsan ($>10^4$ K/s) hűl. A két lézerimpulzus közötti rövid idő alatt megszilárdult olvadék sok ötvözet esetén az amorf állapothoz vezet.

A rövid lézerimpulzus és az előzőeknél is nagyobb teljesítménysűrűség azt eredményezi, hogy a kölcsönhatás következtében gőz, ill. részben plazma állapotba kerül az az anyagrész, amelyikben a lézersugár fotonjai elnyelődnek. Ez az elv a lézersugaras gravírozás egyik alapja.

A felsorolt technológiákat nyugodtan nevezhetjük hagyományos lézersugaras alaptermőtechnológiáknak. Ma már ennél lényegesen többet ismerünk és alkalmazunk. Még a legegyszerűbbnek tekintett lézersugaras vágáson belül is születtek újabb megoldások, mint például a plazmával, vagy a vízsugárral támogatott (3. ábra) vágás.

3. ábra. Víz-sugárral támogatott lézersugaras vágás elve

4. Az új utak

Miután a lézersugárforrások fejlesztési eredményeként a műszaki feladatok végrehajtásához ma már elegendően nagy lézersugár-teljesítmény áll rendelkezésünkre, ezen a területen a sugárforrás fejlesztések célja a jobb sugárminőség elérése. Ennek ipari haszna például az elérhető lézersugaras vágási sebesség megtízszereződése az utóbbi években. Ilyen körülmények között már a személyautók egyes karosszériaelemeinek 3D-s lézersugaras

vágása is gazdaságossá vált, ami kb. öt évvel korábban elképzelhetetlen volt. (Személyautók B oszlopának lézersugaras vágása.) A 3D-s lézersugaras vágás bevonult a tömegtermelésbe.

Az egyébként nagyon szerteágazó fejlesztések sokaságából válasszunk ki egy fejlesztési irányt és vizsgáljuk annak különböző aspektusait. Vizsgáljuk meg, miért érdemes a lézersugár-impulzusok hosszúságát csökkenteni, ill. milyen fizikai hatásokkal kell az impulzusidő csökkenése esetén számolnunk.

A rövid impulzusidejű és nagy ismétlési frekvenciájú sugárforrásokat elsősorban a mikromegmunkálások területén alkalmazzák és a fejlesztéseknek ez az elsődlegesen megcélzott alkalmazási területe. A mikromegmunkálás egyik előfutára a dízelmotorok befecskendező fűvókáinak fűrése volt. Az üzemanyag gyors és „tökéletes” égését segíti, ha minél apróbb cseppekre porlasztva jut a robbanótérbe. Az egyenletesen apró olajcseppek kialakulását úgy érik el, hogy a kis átmérőjű fűvókán keresztül nagy nyomással préselik át az üzemanyagot. A furat azonban ne csak kicsi legyen, de az alakja is kövesse az áramlástechnikai szempontból ideálist. A hagyományos forgácsoló eljárásokkal már nem lehetett jobb eredményeket elérni.

Vizsgáljuk meg, mi történik a lézersugaras fűrés során az anyaggal, miután kölcsönhatásba lép a lézerimpulzus fotonjaival. Kiindulásként tudnunk kell, hogy a fotonok energiáját az elektronok képesek elnyelni. Ennek következményeként az elektronok kinetikus energiája annyival növekszik, amekkora a foton energiája volt. Az átlagosnál nagyobb kinetikus energiával rendelkező elektronok ütközések során tudnak többletenergiájuktól megszabadulni, így az ütközések következtében – fémes anyagok esetén – a kristályos anyag rácspontjain rezgőmozgást végző fémionok kinetikus energiája is nőni fog. Ezt makroszkóposan mi az anyag melegekedéseként tapasztaljuk.

Milyen részfolyamatokból áll a melegedés, ill. melyik részfolyamatnak milyen időigénye van? Tekintsük át három, különböző prefixummal jellemezhető lézerimpulzus-hosszúság hatását, következményét. Legyen a három prefixum a nano- (10^{-9}), a piko- (10^{-12}) és a femto- (10^{-15}). Mivel ilyen időléptékekben alig van tapasztalatunk, hívjuk segítségül a fényt. Számoljuk ki, mekkora távolságot tesz meg a fény nano-, piko-, vagy femtosecundum idő alatt (az egyszerűség érdekében vegyük a fény haladási sebességét 300.000 km/s -nak, vagyis $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ -nak. Ennek alapján 1 ns alatt a fény 30 cm utat tesz meg, 1 ps alatt $0,3 \text{ mm}$ -t, 1 fs alatt pedig csupán 100 nm -t.

Első lépésként vizsgáljuk meg, mi történik a ns-os nagyságrendbe tartozó lézerimpulzus hosszúság hatására, például a tiszta rézben.

- A lézerimpulzus lényegesen hosszabb ideig tart, mint az elektronok hűlési ideje, vagyis amennyi idő alatt energiájukat át tudják adni a fémionoknak;
- A lézerimpulzus sokkal hosszabb ideig tart, mint a kristályrács felhevülési ideje, vagyis a rács hőmérséklete és az elektronok hőmérséklete kiegyenlítődik (erősen közelít egymáshoz);
- A lézer impulzus végén, az impulzus fotonjainak összes energia nem marad az elnyelődésük térfogatában, egy része hővezetéssel tovaterjed;
- A réz olvadásának és párolgásának térfogata nem azonos a fotonok elnyelődési térfogatával, az elnyelődési térfogat lényegesen kisebb;
- A lézersugár teljesítménye és hatásmélysége elveszíti az elméleti logaritmikus összefüggést (1).

$$\Phi = \Phi_0 \cdot \exp(-x) \quad (1)$$

ahol: Φ a fényáram a közegben megtett x út után; Φ_0 a fényáram a közeg felületén, x a fotonok közegbe hatolásának mélysége.

A második esetben az anyag-lézersugár kölcsönhatási idő, vagyis az impulzusidő legyen ps-os nagyságrendű. Milyen egyezőségekre és különbségekre kell számítanunk?

- A lézerimpulzus még mindig lényegesen hosszabb, mint az elektronok hűlési ideje;
- A lézerimpulzus már rövidebb, mint a kristályrács felhevülési ideje, vagyis a rács hőmérséklete számottevően kisebb, mint az elektronok hőmérséklete, mert az elektronoknak nem volt ideje a fotonoktól származó többletenergijuk maradéktalan továbbadására;
- A lézersugár behatolási mélységére már érvényes a logaritmikus összefüggés (1);
- Még mindig van hővezetés a lézersugarat elnyelő térfogat és környezete között.

Végül vizsgáljuk meg a fs-os nagyságrendű impulzushosszúság következményeit, jellegzetességeit.

- Az impulzus idő lényegesen rövidebb, mint az elektronok hűlési ideje (még nem volt ideje találkozni atommal, ionnal, aminek maradéktalanul átadhatná többletenergiját, amikor az impulzusnak már vége van, vagyis nincs foton utánpótlás);
- Az elektron–kristályrács kölcsönhatás mértéke elhanyagolható, az elektronok alig veszítettek energiájukból;
- A kristályrácsnak nem volt még ideje felmelegedni;
- A lézerimpulzus befejeződését követően azonban „azonnal” bekövetkezik a teljes ionizáció, gyakran kimarad a folyékony és a gőz fázis képződése is (hiperszublimáció?);
- A fotonok elnyelésében résztvevő térfogat határán kívül nincs melegedés (technikai szempontból elhanyagolható);
- A lézersugár behatolási mélysége a teljesítménnyel logaritmikus függvény szerint változik (1).

A három, egymástól lényegesen különböző lézerimpulzus hosszúság hatását vörösréz anyagon a 4. ábra jól szemlélteti.

4.ábra. A lézerimpulzus hosszúságának hatása vörösréz alapanyagra [2]

Az első esetben jelentős mennyiségű olvadék keletkezett, amit a fémgőz nyomása a tócsából, a tócsa közepe felől kifelé hajtott. Mivel a számottevő hővezetés következtében a tócsa fala is meleg volt, az olvadék csak lassan tudott hűlni. A megszilárdult kiáramló olvadékon még a dendrites kristályosodás nyomai is felfedezhetők.

A második esetben már az olvadék teljes térfogatára kiterjedt a gőzképződés, ezért az olvadék áramlása kaotikusabbá vált. Ezért maradhatott vissza az üregben több megszilárdult olvadék.

A harmadik esetben az látszik, hogy az üregben szinte semmi olvadék nem maradt, talán nem is volt. Nem volt, mert az elektronok által elnyelt fotonok energiája olyan gyorsan adódott át a fémionoknak, hogy azok rögtön gőzállapotba kerültek, egy részük tovább ionizálódott. A fázisváltozási folyamat jelentős térfogat-növekedéssel járt, ami az üregből kiáramló részecskéket nagy sebességre gyorsította (lökéshullám, hangrobbanás). A nagy sebességű (nagy kinetikus energiájú) részecskék koptató hatásának eredményét lehet látni az üreg falán.

5. Összefoglaló

A cikk első részében adott áttekintés az anyagmegmunkálásra szolgáló, ipari alkalmazásokra fejlesztett lézersugárforrások fejlődését és a legelterjedtebb technológiák fő jellemzőit tárgyalja. Ennek következtében (a cikk korlátos terjedelme miatt) nem tér ki minden ismert technológiára.

A második részben az aktuális és ismert sugárforrás-fejlesztési irányok alapján, egy példán keresztül mutatja be, milyen új anyagmegmunkálási lehetőségek megjelenésére lehet számítani. A cikk arra is rá kíván mutatni, hogy a közismert lézersugaras makro-technológiák mellett, a jövőben a mikromegmunkálási technológiák is előtérbe kerülnek.

Irodalom

- [1] Bitay Enikő: Lézeres felületkezelés és modellezés, Műszaki Tudományos Füzetek 4, Erdélyi Múzeum Egyesület, Kolozsvár, 2007.
- [2] Stelzmann, C.: Materialbearbeitung mit ultrakurzen Laserpulsen, Oberseminars über Laser-Materie Wechselwirkung an der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2004. 09. 09.

Ez a cikk a „Lézertechnológiák a járműipar és a megújuló energiaforrás hasznosítás szolgálatában” című (TÁMOP 4.2.2.A11/1/KONV2012 0075 azonosító számú) projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.