

Lézeráteresztő fém-polimer kötés kialakításának vizsgálata

Bauernhuber Andor^{1*}, Markovits Tamás¹, Takács János¹

¹BME Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék

* andor.bauernhuber@gjt.bme.hu



A műanyag és fém alkatrészek együttes felhasználásának intenzív növekedése felgyorsítja a kötéstechológiák fejlesztését is. Az egyik korszerű megoldást a fémek és a műanyagok kötésére a lézersugaras fém-polimer kötés jelenti, amely a két alapjaiban eltérő alapanyag-típus között unikális kötést tesz lehetővé. Meghatároztuk a lézeráteresztő, penetrációs módszerrel kialakított acélcsap és PMMA lemez kötéséknél a kötés jellemzőire ható főbb befolyásoló tényezőket. Megvizsgáltuk a kölcsönhatási idő, a nyomóerő, a fém mikro- és makro geometriai jellemzők, és a kötés során kialakuló termikus jelenségek hatásait a kötés szilárdságára, végül a lézeres kötés a ragasztással hasonlítottuk össze.

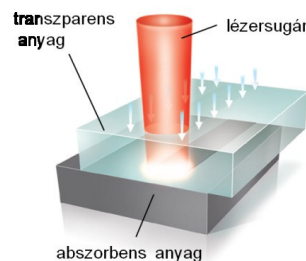
Kulcsszavak: PMMA, acél, lézer, áteresztés, kötés.

1. Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben a műanyagok térhódításának lehetünk szemtanúi az élet szinte valamennyi területén. A trend oka az anyagcsaládra jellemző kis sűrűség, a tömegre vetített nagy szilárdság és a viszonylag könnyű megmunkálhatóság. Ezek a jellemzők lehetővé teszik, hogy a műanyagokat felhasználva az ipar, különösen a járműipar az új környezetvédelmi előírásoknak és a járművek kibocsátás-csökkentését előíró irányelveknek is meg tudjon felelni [1]. Az eszközeink, így járműveink fő szerkezeti anyagát adó fémek azonban nem válhatnak ki teljes mértékben: a fémek műanyagokhoz mért nagy szilárdsága, hőállósága egyelőre nélkülözhetetlenné teszi felhasználásukat a tömeggyártásban. A polimer-fém elemek összekötésével kapott hibrid konstrukciók egyszerre képesek kihasználni a műanyagok és a fémek kedvező tulajdonágait: a szilárdság megtartása mellett készíthetünk jóval kisebb tömegű alkatrészeket [2]. A két anyagcsalád hibrid kötése új lehetőségeket nyit meg a kötéstechológiák területén. A lézeráteresztő műanyaghegesztés elvét alkalmazó lézersugaras fém-polimer kötés az irodalomban az angol rövidítés alapján LAMP-kötésnek is (Laser Assisted Metal Plastic joining) nevezik [3]. A LAMP technológia a lézer által biztosított előnyeinel fogva lehet versenyképes a többi technológiával szemben: a lézerrel készült kötések jó minősége és reprodukálhatósága, a könnyű automatizálhatóság és nagy gyártási rugalmasság valamint a nagyobb sebesség és rövidebb ütemidő az eljárás tömegtermelésben való alkalmazását teszik lehetővé [4, 5]. Megszűnik ezen kívül a segédanyagok

felhasználásának szükségessége, és ez által kezelési problémáik is.

A kötés a legtöbb esetben lemezek között átlapolt geometriával, vonal mentén hozzák létre. A kötés készítését az 1. ábra mutatja be.

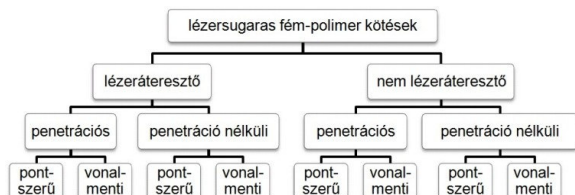


1. ábra. Lézeráteresztő hibrid kötés készítésének vázlatja [6]

A kötéshez alapvetően egy a lézert áteresztő, azaz transzparens műanyag- és egy fém elempár szükséges, amelyeket átlapolva szorítanak össze. A transzparens anyag döntően átengedi a sugarat, míg az abszorbens fém elnyeli, és benne hő fejlődik. A két anyag érintkezési felületén a műanyag a lézersugárral felhevített fém hőjének egy részét átveszi, felhevül, majd megolvad, és a nyomás hatására kitölti a fém felületén található érdességi struktúrát és mikroüregeket. A létrejövő kötés „láthatatlan”, mert a kapcsolódó elemek külső felülete nem sérül, és a lehűlés után máris terhelhető [3].

A leírt LAMP kötéstípus elkészíthető pontszerű geometriával is. Ebben az esetben fémcsapot kötünk

műanyaglemezzel, a már bemutatott módon: a műanyagon átjutó lézersugár a csapot felhevíti, és a csap hője egy részét a lemeznek adja át. A lemez megolvad, a csap pedig az alkalmazott nyomóerő hatására a lemezbe nyomódik, vagyis a kötés penetrációs kötés. A LAMP kötések felosztását az előbb említett szempontoknak megfelelően a 2. ábra szemlélteti.



2. ábra. A LAMP kötési eljárások felosztása

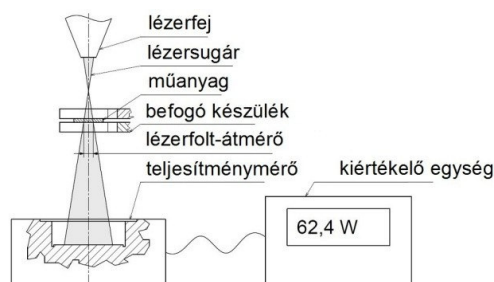
A bemutatott technológia fejlesztése még kezdeti stádiumban van. Az eljárásokkal foglalkozó kutatások általában folyamatos üzemű szilárdtest- és diódlézereket alkalmaznak különböző acélok és alumínium, valamint műszaki műanyagok, mint a poliamid, a polietilén-tereftalát és a polikarbonát átlapolat lemez-lemez kötésére. A jelenleg vizsgált anyagpárok száma tehát elég szűkös, a kötés minőségét befolyásoló tényezők, hatásaik és a kötés közben lejátszódó folyamatok pedig csak részben ismertek, vagy ismeretlenek. Igen ritka az impulzusüzemű lézerek alkalmazása a kötés készítéséhez és a pontszerű penetrációs kötés vizsgálata is, amely azonban képes lehet a hagyományos kötőelemek kiváltására. Ezen motiváció alapján a BME Gépjárművek és Járműgyártás Tanszékén zajló kutatás során impulzusüzemű Nd:YAG lézerrel készítettünk pontszerű, penetrációs lézéráteresztő kötések, és a kísérletek során a különböző technológiai paraméterek, mint a lézeres impulzusbeállítások, fémcsap-geometria, műanyag típus, hevítési idő és a nyomóerő hatását vizsgáltuk a kötés jellemzőire. Első célunk a lézer-anyag kölcsönhatás leírása volt a kötés körülményei között; vizsgáltuk a műanyag lézeres áteresztését valamint a fémcsap hőmérsékletének alakulását a kötés közben. Célunk volt ezen kívül a kötés kialakulásának feltárása, és a felsorolt technológiai tényezők kötésjellemzőkre (benyomódás, szakítóerő) gyakorolt hatásának feltárása is. A kötést végezetül a ragasztással is összehasonlítottuk.

2. Kísérletek leírása

A kutatás során egy LASAG SLS 200 típusú impulzusüzemű Nd:YAG szilárdtest-lézert használtunk,

amelynek hullámhossza 1064nm, módusszerkezete pedig TEM00. A csapok anyaga valamennyi kísérlet esetén S235 jelű $R_a = 0.8-1.5\mu\text{m}$ felületi érdességű szerkezeti acél, míg a műanyag 2mm vastag poli(metil-metakrilát) (PMMA acríplex XT) lemez volt.

A műanyagok áteresztését a teljesítmény mérésével végeztük el: a kicsatolt lézerteljesítmény mérése után a lézersugár útjába helyeztük a vizsgálandó műanyaglemezt, majd mértük a teljesítmény változását az időben. A vizsgálathoz Labmaster Coherent típusú teljesítménymérőt használtunk, a mérés vázlatát a 3. ábrán látható.



3. ábra. Az lézersugár-áteresztésmérés kísérleti elrendezése

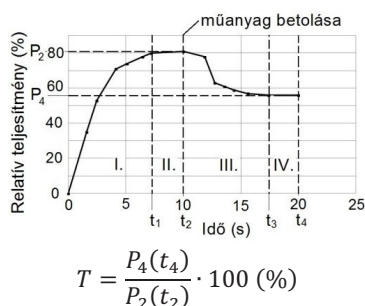
A mérések során a lézersugár-foltátmérő, az impulzusteljesítmény és az impulzusidő poli (metil-metakrilát) (PMMA) áteresztésére gyakorolt hatását vizsgáltuk. A műanyaglemez vastagsága 2mm, a besugárzás ideje pedig minden esetben 10s volt, a vizsgálatokat háromszor ismételtük meg. A beállításokat az 1. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Az lézersugaras áteresztésmérés során használt lézerbeállítások adatai

Beáll. sz.	P_a (W)	f_p (Hz)	E_p (J)	t_p (ms)	P_p (kW)
1.	200	5	40	10	4
2.	200	100	2	0,5	4
3.	200	10	20	10	2
4.	200	26	7,5	10	0,75

A mérés során kapott jellegzetes diagram látható a 4. ábrán, ahol a folyamat során mért legnagyobb értékhez (P_2) viszonyított teljesítményt ábrázoltuk a besugárzási idő függvényében. Az első szakaszban (I.) a teljesítménymérő műszer belső tehetetlensége miatt néhány másodperc alatt veszi fel az állandó értéket. A második szakaszban (II.) a teljesítmény már nem

változik; ez az érték tekinthető a 100%-os áteresztéshez tartozó teljesítménynek. Ekkor a műanyaglemez a lézersugár útjába helyezzük, és a folyamat harmadik szakaszába (III.) lépünk: a teljesítmény a műanyaglemez hatására csökkenésnek indul. A negyedik, utolsó szakaszban (IV.) a teljesítmény ismét állandó; az ekkor mérhető és a 2. szakaszban mért teljesítmény hányadosa felel meg a műanyag áteresztésének (T). Miután a diagram első és második szakasza nem hordoz műanyagra vonatkozó információt, ezért a továbbiakban csak a III. és IV. szakaszt ábrázoljuk.



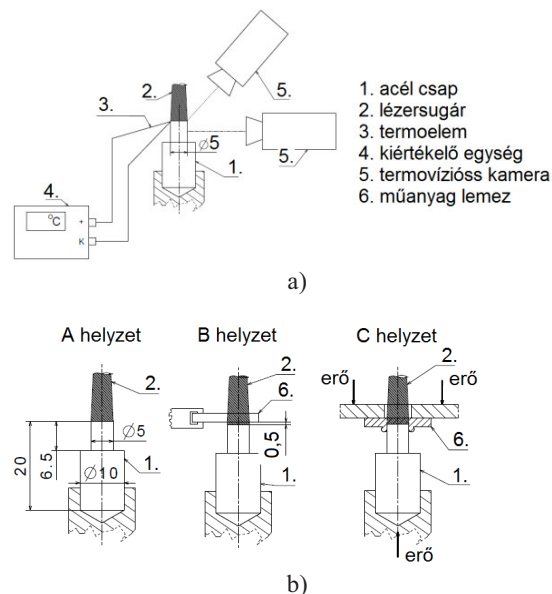
4. ábra. Az áteresztésmérés során kapott jellegzetes diagram és szakaszai, illetve az áteresztés (T) számítása

A lézersugaras áteresztés mérésére alkalmazott módszer előnye, hogy a lézeráteresztő polimer-fém kötés létrehozásánál alkalmazott lézersugár hullámhossz, teljesítménysűrűség, hatásidő-tartomány, üzemmód, impulzus beállítások, polimer típusok, vastagságok és adalékok esetén is alkalmas a polimerek áteresztésnek, és az áteresztés időbeni változásának mérésére.

A termikus mérések során a csap hőmérsékletét, illetve a hőmérséklet eloszlását vizsgáltuk. A fémcsap hőmérsékletét a csap palástjának felső részére, az él mellé hegesztett K típusú termoelemmel, míg az eloszlást FLIR A325sc típusú termovíziós kamerával rögzítettük (5. a) ábra). A hőmérséklet eloszlását a csap palástjára merőlegesen és azzal 45°-os szöget bezáró irányból is vizsgáltuk úgy, hogy a kamera a csap homlokfelületét is lássa.

A PMMA műanyagnak az acél hőmérsékletére gyakorolt hatását három eltérő kísérleti elrendezéssel vizsgáltuk meg. Az első, „A” helyzetben a csapot közvetlenül hevítettük a lézersugárral, műanyagot nem alkalmaztunk. A második, „B” helyzetben a műanyagot a lézersugár útjába helyeztük, de úgy, hogy az a csap homlokfelülete felett 0,5mm-rel helyezkedjen el, és az acélhoz ne érjen hozzá. A harmadik, „C” helyzetben a csap műanyagba

történő belenyomódásával kötést készítettünk. Ilyen módon lehetővé vált, hogy a műanyag áteresztésének és hővezetésének valamint hőkapacitásának acél hőmérsékletére gyakorolt hatását szétválasszuk. A kidolgozott elrendezést az 5. ábra, a beállítások adatait pedig a 2. táblázat mutatja be.



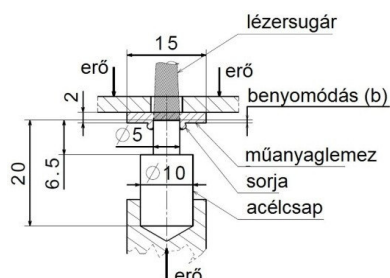
5. ábra. A hőmérsékletmérés vázlata termoelemmel és termovíziós kamerával (a), és helyzetek a PMMA acél hőmérsékletére gyakorolt hatásának vizsgálatához (b)

2. táblázat. A hőmérsékletmérés során használt lézerbeállítások

Beáll. sz.	P_a (W)	t_{bes} (s)	f_p (Hz)	t_p (ms)	E_p (J)
1.	200	4	100	0,5	2
2.	200	4	5	9,9	40
3.	200	7	100	0,5	2

A kötési kísérletek során a mintát a műanyaglemez felől sugároztuk be a lézersugárral, amely műanyagban áthaladva a fém felületén nyelődik el, és közvetlenül a fémeket hevíti. A lézersugár foltátmérője egyenlő volt és egybeesett a csap palástfelületével. Az acél hevülése során a hő egy részét átadja a PMMA anyagnak, így a műanyagot közvetve hevítjük. A műanyag a hőmérséklet növekedésével lágyul és viszkozusan folyós állapotba kerül, ezért az acélcsap az alkalmazott nyomóerő miatt a műanyagba nyomódik. Eközben a csap homlokfelülete előtt újabb és újabb anyagréteg hevül fel, ami a lágyulás után a csap palástja mentén, hátrafelé távozik, és a műanyag belépő felületén a csap körül sorját képez. Az

anyagok gyors lehűlése után létrejön a kötés. A kötés kísérletek elrendezését a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra. A kötéshez felhasznált műanyaglemez és acélcsap geometriája, valamint a benyomódási mélység értelmezése

A kísérletek során alapesetben használt beállítások: a nyomóerő értéke 3,2 N, a lézeres beállítások értékei pedig: $f_p=100$ Hz, $t_p=0,5$ ms, $E_p=2$ J, ahol f_p az impulzusfrekvencia, t_p az impulzusidő és E_p az impulzusenergia.

A hevítési idő hatásának vizsgálatakor a hevítési időt $t_h=3$ s és $t_h=7$ s közt módosítottuk.

A nyomóerő hatásának vizsgálatakor a beállított erőértékek $F_{ny}=3,2$ N, 6 N, 9,2 N voltak.

A kötések készítésekor 4,75 l/perc mennyiségű argon védőgázt használtunk.

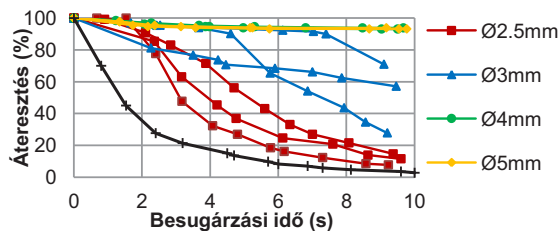
A ragasztási kísérletek során LOCTITE® 454™ és LOCTITE® 496™ cianoakrillát alapú gyorskötésű ragasztót használtunk. A csapokat közvetlenül homlokfelületükön a műanyaglemezhez, vagy a műanyaglemezbe mart 5mm átmérőjű lapos fenekű zsákfuratba ragasztottuk. A furatok mélysége 0,9 mm volt, hogy ragasztás felülete egyenlő legyen a lézeres kötéskor kialakuló kapcsolódási felülettel, és az eredmények összehasonlíthatóak legyenek. A ragasztás után a darabokat 3 percig szorítottuk össze 2 N erővel, a kötési idő 24 óra volt.

A kötések szilárdságát szakítóvizsgálattal minősítettük.

3. Eredmények

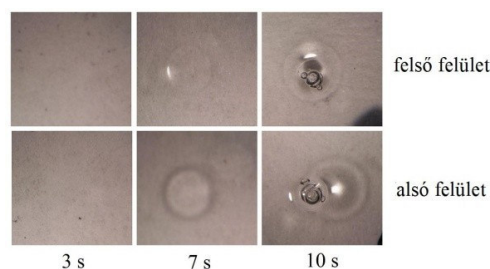
3.1. Lézersugár-áteresztésmérés

Elsőként a PMMA áteresztésének változását láthatjuk a lézersugár foltátmérőjének függvényében a 7. ábrán, ahol minden görbe egy-egy méréshez tartozik.



7. ábra. A PMMA áteresztésének változása különböző lézerező-átmérők esetén

Látható, hogy 5mm-es és 4mm-es átmérők esetén az áteresztés a vizsgált időtartományban állandó, és egyforma érték. A 3mm-es átmérők esetén a görbék eltérő idő után csökkenő értéket mutatnak, míg a 2,5mm-es átmérő esetén az áteresztett teljesítmény értéke a besugárzás kezdete után azonnal csökkenni kezd. A jelenség oka, hogy az állandó átlagos lézerteljesítmény és a csökkenő lézerező-átmérő miatt a teljesítménysűrűség értéke a folt területén négyzetesen nő. A folt területén elnyelt hőmennyiség ezért feltorlódik, ami az anyag lokális túlhevülését, és bomlását eredményezheti. A bomlás során keletkező buborékok az elnyelést erőteljesen megnövelik, mert a beérkező sugárzást szórják az anyagban, tovább fokozva ezzel a jelenséget. A folyamat során a besugárzási idő előrehaladtával a PMMA lemezben létrejövő változásokat a 8. ábra mutatja be.

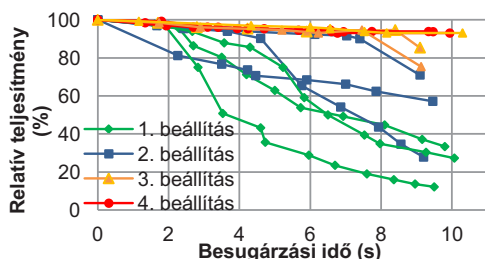


8. ábra. A PMMA lemez olvadása és degradációja a besugárzás folyamán

Elmondható tehát, hogy létezik egy olyan kritikus lézerező-átmérő, amelyet meghaladva a polimer áteresztése annak bomlása miatt csökkenni kezd, és a foltátmérő további csökkenésekor az áteresztés romlása egyre nagyobb mértékű. A kritikus érték felett maradván ugyanakkor a vizsgált időtartományban a lézersugár-áteresztés értéke állandó marad.

A következőkben a lézerező-impulzusok tulajdonságainak hatását láthatjuk az áteresztésre, állandó átlagteljesítmény mellett, az eredményeket a 9. ábra

szemlélteti. A méréseket 3 mm-es foltátmérő mellett végeztük, hogy a kritikus lézerefolt-átmérő mellett az egyes beállítások közti különbség hatása láthatóvá váljon.

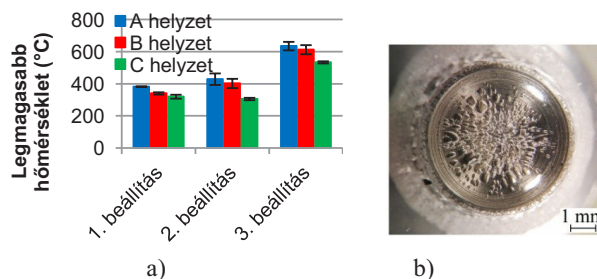


9. ábra. A lézerbeállítások hatása a PMMA áteresztésének változására

Az eredmények és az áteresztés változása az impulzusteljesítmény-sűrűséggel és az impulzusok hosszával (impulzusedő) mutat összefüggést: az 1. beállítás esetén az impulzusteljesítmény-sűrűség 566W/mm², az impulzusok hossza pedig 10ms; ebben az esetben az áteresztés-romlás a besugárzás hatására azonnal elkezdődik. A 2. beállítás esetén az impulzusteljesítmény-sűrűség az 1. beállítással azonos 566W/mm²-es érték, de az impulzusok hossza kevesebb, 0,5ms; ekkor az anyag áteresztésének csökkenése időben jellemzően később következik be. A 3. beállítást alkalmazva az impulzusteljesítmény-sűrűség 307W/mm², az impulzusok hossza ismét 10ms; ekkor az anyag áteresztés-csökkenése két esetben csak a folyamat végén (7s után), míg egy esetben egyáltalán nem következik be. A 4. beállítás esetén az impulzusteljesítmény sűrűsége már csak 100W/mm², míg az impulzusok hossza 10ms; látható, hogy ekkor az anyag a lézert sugarat a vizsgálat idejéig el tudja viselni károsodás nélkül. Az eredményekből következik, hogy impulzus üzemi lézerek esetén nem elegendő a lézert sugar átlagteljesítményének megadása, mert a lézert kicserélés módja hatással van az áteresztésre. Rögzített átlagteljesítmény-sűrűség és impulzusedő mellett tehát létezik egy kritikus impulzusteljesítmény-sűrűség amelyet meghaladva az áteresztés romlani kezd, és amelyek alatt az áteresztés állandó. Az impulzusteljesítmény-sűrűség további növelése az áteresztés nagyobb értékű csökkenését eredményezi. Az eredmények alapján a kritikus impulzusteljesítmény-sűrűséget az impulzusedő és a foltátmérő is módosíthatja, hiszen nagyobb foltátmérő és kisebb impulzusedő esetén a kritikus teljesítménysűrűség nagyobb érték.

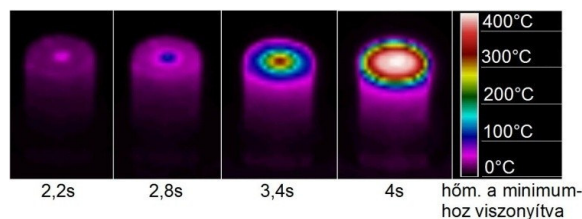
3.2. A LAMP kötés kialakulását befolyásoló felületi hőmérsékletek vizsgálata

A termikus vizsgálatok eredményeit a 10. ábra mutatja be. A különböző, 5. b) ábrán bemutatott helyzetek esetén mérhető hőmérsékletek összehasonlításából látható, hogy a PMMA lemez hogyan módosítja az acél felületének hőmérsékletét. A műanyaglemez áteresztésének hatására a csapok hőmérséklete mintegy 7%-kal csökkent (A és B helyzet), míg a kötés létrehozása közben a műanyag a csap hőmérsékletét 17%-kal csökkentette. A hőmérséklet azonban még így is minden esetben meghaladta a műanyag 290°C-os bomlási hőmérsékletét [7], aminek hatására a műanyagban a fémfelülethez közeli anyagrétegben bomlástermékek, vagyis gázbuborékok jelennek meg. A hőmérsékletcsökkenés oka tehát többre: hozzájárul a műanyag hőkapacitása és áteresztése, a műanyag bomlásának hőigénye, és a bomlás miatt romló áteresztés is. A megjelenő buborékokra a 10. ábra mikroszkópi képe mutat példát.

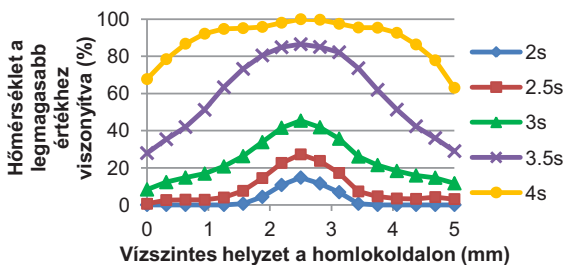


10. ábra. A csap pereménél mért legnagyobb hőmérsékletek a különböző helyzetek és beállítások esetén (a) és a csap homlokfelületénél megjelenő buborékok (b)

A 10. ábrán látható buborékok eloszlását a homlokfelület felett az ott megfigyelhető hőmérsékleteloszlás magyarázza, amelyet a 11. és 12. ábra mutat be.



11. ábra. A csap homlokfelületének termovíziós kamerával készített felvételei a hevítés folyamán

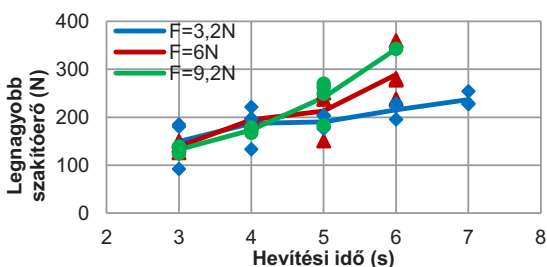


12. ábra. A csap homlokfelületének átmérője mentén kialakuló hőmérséklet-eloszlások a hevítés folyamán

Látható, hogy a kötés készítése során leggyorsabban és a legmagasabb hőmérsékletre a csap homlokfelülete hevül fel, ezért az itt található polimer bomlása intenzívebb, és hosszabb idejű. A hőmérséklet-eloszlást a lézersugar TEM00 módusa, vagyis a Gauss teljesítménysűrűség-eloszlás magyarázza, ahol a nyalámban mérhető teljesítmény a középpontban a legnagyobb, és sugárirányban a Gauss eloszlásnak megfelelően csökken.

3.3. A kötésérősséget befolyásoló főbb jellemzők

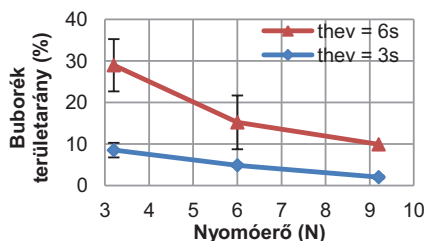
A kísérletek részeként vizsgáltuk a hevítési idő és a nyomóerő hatását a benyomódásra és a szakítóerőre. A különböző lemezvastagságoknál alkalmazott hevítési idő minimális értéke általában $t_h=3s$, mert ennél rövidebb ideig történő hevítéskor a műanyag nem éri el a láguláshoz szükséges hőmérsékletet, míg az időmaximum 2mm vastag lemez esetén $t_h=7s$, aminél a nyomóerő hatására a csap a lemezt még éppen nem lyukasztja át a hevítés alatt. Az eredményeket a 13. ábra mutatja be.



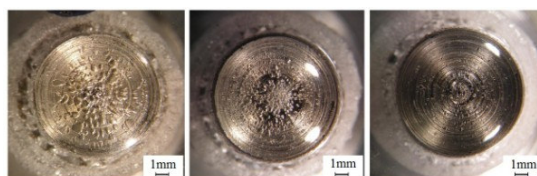
13. ábra. A hevítési idő és a nyomóerő hatása a benyomódásra és a szakítóerőre

Az ábrákon látható, hogy a hevítési idő és a nyomóerő a benyomódást a várakozásoknak megfelelően növeli, hiszen a hosszabb hevítés magasabb hőmérsékletet eredményez, ahol a műanyag viszkozitása kisebb, és az alkalmazott nyomóerő hatására a csap mélyebben süllyed a műanyagba. A hevítési időt növelve a

szakítóerő is növekszik, aminek magyarázata a mélyebb benyomódás hatására létrejövő nagyobb kapcsolódási felület a két anyag közt. Megfigyelhető, hogy a szakítóerő a benyomódás változásánál kisebb ütemben nő valamennyi nyomóerő esetén. A jelenség oka a hevítési idővel emelkedő csaphőmérséklet és az ebből adódó egyre intenzívebb műanyagbomlás. A bomlás során keletkező gázbuborékok a szilárdságot rontják, hiszen anyagfolytonossági hiányt jelentenek, és a terhelhető keresztmetszetet csökkentik. A buborékok képződése azonban a nyomóerő növelésével mérsékelhető, mert a polimer intenzív bomlása a nyomás emelkedésével nagyobb hőmérsékletek felé tolódik. A buborékok területe a homlokfelület felett így a nyomóerő 3-szorosára növelésével jelentősen csökkenthető, amint azt a 14. és 15. ábra bizonyítja.



14. ábra. A nyomóerő hatása a kötés készítése során képződő buborékok összesített területére



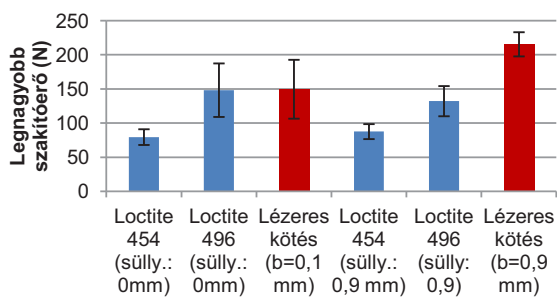
15. ábra. A buborékképződés 6s-os hevítési idő és változó nyomóerő esetén

A bemutatott buborékképződés a kötéskészítés során minden esetben fellép, ezért a kötés kísérő jelensége. Ennek oka, hogy a benyomódás és ez által a kötés csak abban az esetben jön létre, ha a műanyag viszkozitása már elég kicsi, és azt a nyomóerő le tudja győzni. Ez azonban a homlokfelület inhomogén hőmérséklet-eloszlása miatt csak akkor következik be a teljes felület felett, amikor a középpont hőmérséklete a bomlási hőfokot már meghaladta, és a buborékok képződése beindult.

3.4. A LAMP és a ragasztott kötés összehasonlítása

Annak érdekében, hogy az új LAMP technológiát a már alkalmazott technológiák közt el tudjuk helyezni, a

kötést ragasztással hasonlítottuk össze. Az alkalmazott ragasztók a műanyagot és a fémet is jól nedvesítették, ennek ellenére a ragasztott kötések szilárdsága esetünkben a lézeres kötéssel készített kötésével egyenértékű, vagy annál gyengébb. Az eredmények alapján, amelyeket a 16. ábra szemléltet, elmondható tehát, hogy a használt ragasztókkal és az adott geometriával készített kötéssel szemben a lézeres eljárás versenyképes lehet, hiszen nem igényel hozzáadott anyagot, jól automatizálható, és a ragasztásnál lényegesen gyorsabban létrejön a kötőerő.



16. ábra. Ragasztott és LAMP eljárással készült kötések szakítóerejének összehasonlítása (b: benyomódási mélység)

4. Értékelés

Cikkünkben bemutattuk a lézer-anyag kölcsönhatás jellemzőit a kötés kialakításakor használt lézeres beállítások illetve a kötéshez használt PMMA és acélcsap esetére. Meghatároztuk a hevítési idő, a nyomóerő és az alakzáró csapeometria hatását a kötés a benyomódására és a maximális szakítóerejére, és leírtuk a kötéskísérő buborékosodás jelenségét és okait. Az eredményeinkből az alábbi következtetések vonhatók le:

A lézersugaras áteresztésmérésre használt módszer alkalmas különböző műanyagok áteresztésének és időbeni változásának meghatározására a kötés körülményei között;

Az áteresztés értékét a lézeres impulzusbeállítások befolyásolják: kritikus értéket meghaladó beállítások esetén az áteresztés csökkenni kezd a besugárzás ideje alatt;

A kötés során kialakuló hőmérséklet nagyobb, mint a PMMA bomlásai hőmérséklete, ezért a kötés készítése közben keletkező gázbuborékokat a műanyag bomlása okozza. A hőmérséklet eloszlása a lézer TEM00 módusszerkezetének hatására kialakuló, és annak megfelelő jellegzetes eloszlás;

A hevítési idő és a nyomóerő növelésével a benyomódás és a kötés szakítóereje is növekszik.

A képződő buborékok fölött a szilárdságot rontják, de a buborékok kialakulásának intenzitása a nyomóerővel kézben tartható;

A vizsgált geometriájú kötés esetén a lézeres kötés a ragasztással versenyképes, mert hasonló szilárdságot eredményez, számos további technológiai előny mellett.

5. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok (OTKA) pénzügyi támogatásáért (OTKA 109436), valamint a Henkel Magyarország Kft-nek és a Rhodium Kft-nek a kísérletekhez nyújtott támogatásért.

Irodalom

- [1] J. P. Bergmann, M. Stambke: Potential of laser-manufactured polymer-metal hybrid joints. *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 84 – 91 (2012)
- [2] A. Cenigaonandia, F. Liébana, A. Lamikiz, Z. Echegoyen: Novel strategies for laser joining of polyamide and AISI 304. *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 92-99 (2012)
- [3] Y. Kawahito, Y. Niwa, S. Katayama: Laser direct joining between stainless steel and polyethylene terephthalate plastic and reliability evaluation of joints. *Welding International*, Volume 28, No. 2, pp. 107-113 (2014)
- [4] W. Tillmann, A. Elrefaey, L. Wojarski: Toward process optimization in laser welding of metal to polymer. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 41, Issue 10, pp. 879–883 (2010)
- [6] <http://www.lpkf.com/newsletter/rapid-pcb-prototyping/597/652/203.htm>, 2015.01.14.
- [5] T. Markovits, A. Bauernhuber: Investigating the shape locking phenomenon in case of LAMP joining technology. *Physics Procedia*, Vol. 39, pp. 100-107 (2012)
- [7] A. Bauernhuber, T. Markovits: Investigating thermal interactions in the case of laser assisted joining of PMMA plastic and steel. *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 811-817 (2014)