

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
KÖZLEKEDÉSMÉRNÖKI ÉS JÁRMŰMÉRNÖKI KAR

**Lézersugaras fém-polimer kötés kialakításának és  
tulajdonságainak vizsgálata**

Tézisfüzet

Készítette:

**Bauernhuber Andor**  
okleveles gépészmérnök

Témavezető:

Dr. Markovits Tamás  
egyetemi docens

Budapest, 2015

## 1. Motiváció

A környezetvédelem erősödése és az energiatakarékosságra való törekvés az utóbbi években jelentős változást okozott eszközeink, különösen járműveink anyagaiban [1]. A tömegcsökkentési célok hatására egyre nagyobb a különböző műanyagok aránya a járművekben: tömeghez viszonyított nagy szilárdságuk miatt a műanyagok lehetővé teszik a hagyományos szerkezeti anyagok, mint az acél helyettesítését [2]. Mivel azonban a fémek a műanyagoknál nagyobb hőállósággal, merevséggel és szilárdsággal rendelkeznek, ezért gyakran nem válthatók ki teljes egészében. Szükségessé válik tehát a fémek és a műanyagok kötése, amelyre a gyakorlatban is egyre több példát találunk. Az így készült alkatrészek általában olyan hibrid elemek, amelyek fémeket és műanyagokat egyaránt tartalmaznak. Ilyen módon biztosítható az alkatrész elvárt merevsége a tömeg jelentős csökkentésével, vagyis egyszerre használhatóak ki a fém és a műanyag előnyös tulajdonságai [3, 4].

A fémek és műanyagok kötésére ezért számos eljárás terjedt el, azonban a legtöbb eljárás nem tesz lehetővé szélesebb körű, általános alkalmazást és a hagyományos kötésgeometriákat sem. Valamennyi eljárás rendelkezik továbbá olyan hátrányokkal, ami az elkészült kötés alkalmazását, szilárdságát korlátozza, vagy nehezen illeszthető a tömegtermelésbe [5]. A jelenlegi kutatások célja tehát az olyan kötéstechnológiák kifejlesztése, amelyek költséghatékonyak, jól automatizálhatók, rugalmasak és gyorsak, ami által jól alkalmazhatók a tömegtermelésben, és így a járműgyártásban is [1, 6].

Az elmúlt években a lézerek robbanásszerű fejlődésének és alkalmazásbeli bővülésének lehetünk szemtanúi. A lézersugár előnyei közé tartozik, hogy a hőbevitel koncentrált, ezért a hőhatásövezet kicsi, az anyagban nem kívánt változások a lehető legkisebbek. A lézersugár robotok segítségével pálya mentén mozgatható, a kicsatolt teljesítmény pedig programból szabályozható, ezért alkalmas 3 dimenziós geometriák rugalmas megmunkálására is. A lézersugár jól fókuszálható, valamint rendkívül gyors, és a legtöbb esetben utómunkálásra sincs szükség, ami a technológia időszükségletét tovább csökkenti [7, 8, 9, 10, 11, 12]. A leírt előnyök miatt a lézeres eljárás a kötéstechnológiákkal szemben támasztott követelményeket is teljesíteni képes.

Az utóbbi évek újításai közé tartozik a lézerek alkalmazása a fémek és műanyagok kötésére is. Habár a lézereket fém-fém és műanyag-műanyag

hegesztésére már igen régóta használják, és az elv, amely a műanyagok és fémek kötését lehetővé teszi, több évtizede ismert, a lézersugaras fém-polimer kötést csak az utóbbi években tapasztalt trendek hívták életre. Az eljárás kutatása a világ több pontján intenzíven folyik, hiszen óriási potenciált hordoz magában: a fémek és műanyagok megbízható, szilárd és közvetlen kötése, amely a tömegtermelés elvárásainak meg tud felelni, a jelenleg ismert tervezési elvek és technológiák változását hozhatná. Az értekezésben leírt eljárással létrehozott kötés alkalmas lehet arra, hogy a jelenleg alkalmazott eljárások hátrányait kiküszöbölje, ami komoly előnyt jelenthet számára a jövőbeli alkalmazások során.

Jelen értekezés célja, hogy a témában eddig felhalmozott tudományos ismereteket tovább gyarapítsa, a kötés közben lejátszódó jelenségekről leírást adjon, meghatározza a kötés szempontjából fontos technológiai jellemzőket, amelyek a kötés minőségét befolyásolják, ezáltal közelebb juttatva a technológiát a jövőbeni alkalmazáshoz.

## **2. Irodalmi áttekintés**

A fém-polimer kötés készítéséhez alapvetően egy lézersugárzást áteresztő műanyag és egy lézersugárzást elnyelő fém szükséges. A kötésben, amelyet legtöbbször átlapolt geometriával készítenek el, a lézersugár számára átjárható anyag kerül a besugárzás felőli, általában felső oldalra, míg az elnyelő anyag alulra, a besugárzás irányával ellenkező oldalra. A lézersugár a felső, áteresztő műanyagban javarészt áthalad, és az elnyelő fémhez érve részben elnyelődik, felhevítve azt. A felhevült fém hője egy részét a felső műanyag számára átadja, aminek hatására az megolvad. A folyamat közben a két anyag határozott kapcsolatának biztosítása érdekében nyomóerőt alkalmaznak. A nyomóerő hatására az olvadt műanyag a fém felületével szoros kapcsolatba kerül, kitölti a felület mikroüregeit és egyenetlenségeit, és létrejön a kötés szilárdságát adó adhézió [13].

A lézerrel készített fém-polimer kötések a világ több pontján is aktívan kutatják. A kutatások célja gyakran az emberi szervezetbe ültethető úgynevezett mikro-elektromechanikai rendszerek tokozásának elkészítése. A kutatók ebben az esetben legtöbbször poliimid, polietilén-tereftalát és titán kötést készítettek el Yb:YAG lézer alkalmazásával. A kutatók az anyagok közt XPS technikával kimutatták Ti-O és Ti-C kovalens kötésekről számoltak be, valamint kimutatták a felületi érdesség kötésegerősséget növelő hatását [14,

15, 16]. Seiji Katayama és társai a terület úttörői, számos értékes eredmény közreadói: munkájuk során többek közt austenites korrózióálló acél és polietilén-tereftalát valamint poliamid kötését készítették el diódalézer segítségével, átlapolt geometriával. A szerzők minden esetben beszámolnak a műanyagban keletkező apró buborékokról, amelyek forrása a műanyag bomlása [17]. A feltételezés szerint a buborékok azonban a kötésest növelik, mert a fejlődő buborékok által okozott nagy nyomás az anyagok jó kapcsolatát eredményezi, hatására a műanyag a fém felületi egyenetlenségeit kitölti [18]. A szerzők XPS eredményekre támaszkodva a fémfelület oxidja és a polimer funkciós csoportjai közt kialakuló kovalens kötések feltételeznek. W. Tillmann és társai szerint a műanyag bomlása szintén megfigyelhető a kötés felülete mentén, a buborékok forrásaként pedig az anyag bomlását jelölik meg. A szerzők szerint a lézernyaláb mozgatási sebességének és a lézer teljesítményének függvényében a kötészilárdságnak optimuma van, amely a buborékok területének változásával magyarázható [19]. C. Lamberti és kollégái szerint a kötésestért a felhasznált alumínium oxidjai és a poliamid poláros csoportjai közt létrejövő hidrogénhid-kötés a felelős [20]. Több kutatócsoport növelte az átlapolt lemezkötések szilárdságát eredményesen a fém strukturálásával: a fém felületére forgácsolással vagy lézeres strukturálással barázdákat, hornyokat vagy apró furatokat készítettek [21, 22, 23, 24]. A. Roesner és társai polikarbonát és poli(metil-metakrilát) lemezek kötését készítették el korrózióálló acélcappal, diódalézer segítségével. A kutatók az anyagok erős kötést hozták létre, amit a fémcsap felületének durvításával és alakzáró geometriájával eredményesen növeltek [1].

### **Az irodalmi eredmények összefoglalása**

A közlemények alapján a lézéráteresztő műanyaggal készített kötések közt elkülöníthetünk penetrációs és penetráció nélküli kötést. Penetrációs esetben a fémalkatrész a hevítés és az alkalmazott nyomás hatására a műanyagba nyomódik, nem penetrációs esetben a kötés benyomódás nélkül készül. Mindkét esetben megkülönböztethetünk pontszerű és vonalmenti kötésgeometriát is.

A tudományos közlemények feldolgozása alapján megállapítható, hogy szinte kizárólag folyamatos üzemű szilárdtest-lézereket alkalmaznak a lézersugaras kötés készítésére, ezért nincs semmiféle információ arról, hogy hogyan viselkedik a polimer az impulzusüzemű lézersugár hatására, illetve változik-e a műanyag áteresztése a nagyenergiájú, de rövid impulzusok

hatására. A polimerek lézersugaras áteresztését általában igen kis teljesítmények és folyamatos üzem mellett vizsgálják, a besugárzás idejének hatása és a nagyobb teljesítmények esetén kialakuló kölcsönhatás ismeretlen. Az impulzusüzem ritka alkalmazása miatt szintén kevésbé ismert a lézeres impulzusbeállítások lézersugár-polimer kölcsönhatásra gyakorolt hatása. A kötés közben kialakuló termikus viszonyok a legtöbb esetben tisztázatlanok. A közleményekben nem foglalkoznak a legalapvetőbb fémes szerkezeti anyagok, mint a szénacélok kötésével. A kutatások egyetlen kivétellel az átlapolat lemez-lemez kötés kutatásával foglalkoznak. A pontszerű, illetve benyomódással, vagyis penetrációs módon készített kötésekről ezért szinte alig található információ, pedig az ipari gyakorlatban igen gyakran szükséges a pontszerű kötések készítése. Mindamelllett, hogy a témában a világ számos pontján zajlanak kutatások, a kötést kísérő folyamatok ismeretlenek, vagy azok leírása hiányos. A buborékképződés jelenségéről például sok szerző tesz említést, de a buborékok kialakulásának pontos folyamata és a buborékok pontos hatása a szilárdságra nem tisztázott. Igen kevés a kötés készítése közben alkalmazott nyomás hatásáról közölt információ annak ellenére, hogy a kötési mechanizmus fontos részeként említik a szerzők a polimer és a fém határfelületén kialakuló nyomást. Miután a pontszerű kötések készítése alig vizsgált terület, nagyon kevés az adat a fém mikro- és makrogeometriájának kötésszilárdságra gyakorolt hatásáról is.

### **3. A kutatás célkitűzései**

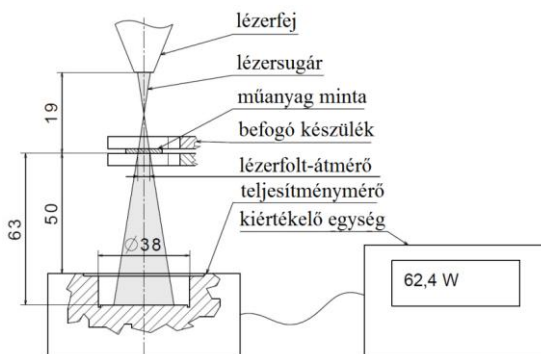
A fém-polimer kötések szakirodalmi ismereteinek feldolgozása alapján a kutatás során olyan impulzusüzemű, Nd:YAG lézerrel készített, lézéráteresztő, pontszerű, penetrációs kötés vizsgálatát tűztem ki célul, amely a jövőben az iparban is hasznosítható új eljárás alapjait képezheti. A kutatás részletes célkitűzései ennek megfelelően a következők:

- a lézersugár-anyag kölcsönhatás vizsgálata területén:
  - olyan, a lézersugaras áteresztés meghatározására alkalmas módszer kidolgozása, amely lehetővé teszi a műanyagok áteresztésének vizsgálatát a besugárzási idő függvényében, a kötésnél alkalmazott körülmények között (műanyag típus, vastagság, lézeres beállítások);
  - a lézersugár-átlagteljesítmény, az impulzusbeállítások és a lézersugár-foltátmérő hatásának vizsgálata a kötéshez használt műanyagok lézersugaras áteresztésére a kidolgozott módszer segítségével;

- fém csap lézersugaras hevítés hatására kialakuló hőmérsékletének és hőmérsékleteloszlásának meghatározása;
- a fém-polimer kötés létrehozásának területén:
  - a kötés kialakulási folyamatának meghatározása szerkezeti acél és a kötés kialakításához legalkalmasabb műanyag esetén: a kötést jellemző benyomódás és buborékképződés folyamatának leírása;
  - a különböző technológiai beállítások, mint a lézersugár-átlagteljesítmény illetve az impulzusbeállítások, a hevítési idő, a nyomóerő valamint a benyomódási mélység és a buborékképződés összefüggéseinek feltárása;
  - a kötések szilárdságát befolyásoló főbb tényezők, mint a lézersugár-átlagteljesítmény és impulzusbeállítások, a hevítési idő, a nyomóerő, a csapfelületi érdesség, a lemezvastagság, illetve a fém csap mikro- és makrogeometria szilárdsággal kapcsolatos összefüggéseinek feltárása;
  - a lézersugárral készített kötés összehasonlítása azonos geometriájú ragasztott kötéssel.

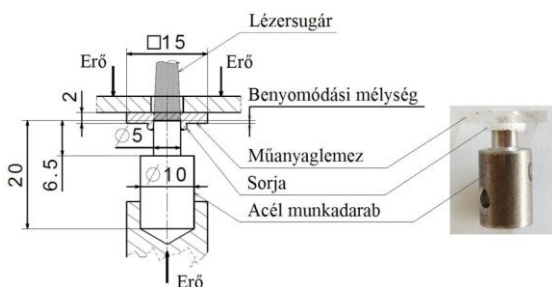
#### **4. Vizsgálati anyagok, eszközök és módszerek**

A kötési kísérletekhez elsősorban poli(metil-metakrilát), míg az áteresztés-mérési kísérletekhez poli(metil-metakrilát) és polipropilén műanyaglemezeket használtam fel. A lemezek vastagsága a kötési kísérletek során 2 - 5 mm, míg az áteresztés-mérési kísérletek során 2, 5 és 10 mm volt. A kötések készítéséhez 5 mm átmérőjű, S235 anyagú szerkezeti acélcsapokat használtam. A ragasztott kötések készítésekor Loctite 454 és Loctite 496 típusú cianakrilát bázisú ragasztókat alkalmaztam. A kötések készítéséhez és az áteresztési vizsgálatok során is LASAG SLS 200 típusú impulzusüzemű Nd:YAG lézert használtam. Az áteresztésmérés kísérleti elrendezését az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. Az áteresztésmérés során alkalmazott kísérleti elrendezés

Az áteresztésmérés során a vizsgált műanyagot a sugár kicsatolása után 10 s-mal a lézernyaláb útjába juttattam, majd ezt követően újabb 10 s-ig sugároztam be, a folyamat közben pedig a lézernyaláb teljesítményét egy teljesítménymérő pogácsával mértem. A 10 s-os várakozásra a műanyag nyaláb útjába való juttatása előtt azért van szükség, hogy a teljesítménymérő műszer a rá eső teljesítmény értékét fel tudja venni, és a lézernyalábra jellemző állandó teljesítményértéket jelezzen ki. A kicsatolt sugár legnagyobb mért teljesítménye és a műanyag betolása után mért teljesítmény ismeretében az áteresztés %-ban kifejezett értéke számítható, és változása a besugárzási idő függvényében ábrázolható. A kísérletek során megadott lézerfolt-átmérő a műanyag alsó oldalán, a lézersugár kilépésénél szóródás nélkül várt érték.



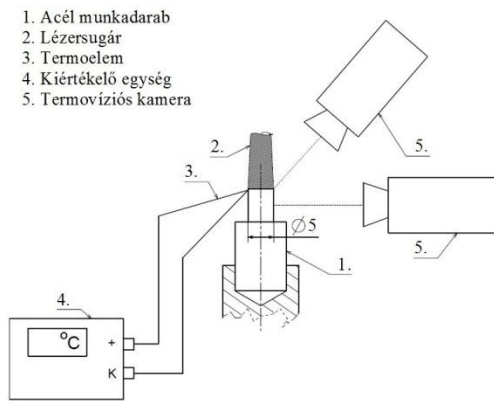
2. ábra. A kötési kísérletek során alkalmazott kísérleti elrendezés, a kísérleti minták geometriája és a kész kötés

A kötési kísérletek vázlatos elrendezését és az elkészült mintát a 2. ábra szemlélteti. A kísérlet során a lézersugár a műanyagon javarészt áthaladva közvetlenül hevítette a fémcsap homlokfelületét, amellyel a lézerfolt

egybeesett. A hevítés közben a fémcsap felhevül, hője egy részét átadja a műanyagnak, amely ennek hatására megolvad. Az alkalmazott nyomóerő hatására a csap a lemezbe süllyed. A kötés néhány másodperc alatt elkészül.

A kötések elkészítése után megmértem a fémcsap benyomódásának mélységét a műanyaglemezbe. A kötések szaktívizsgálat segítségével minősítettem, amelynek eredményeként meghatároztam a kötési erőt.

A fémcsap hőmérsékletét a fémcsap palástjára, az él mellé hegesztett termopárral vizsgáltam, míg a hőmérsékleteloszlást a 3. ábrának megfelelően termovíziós kamera segítségével rögzítettem.



3. ábra. A hőmérsékletmérés során alkalmazott kísérleti elrendezés

Megvizsgáltam a fémcsap mikro- és makrogeometriájának kötészilárdságra gyakorolt hatását is. A felületi érdesség hatásának vizsgálatokor a csap palástján és homlokán megnöveltem az érdességet. A kötési erő további növelése érdekében különböző alakzáró geometriákkal (kúpos, menetes, hornyolt vagy peremezett) is kötést készítettem.

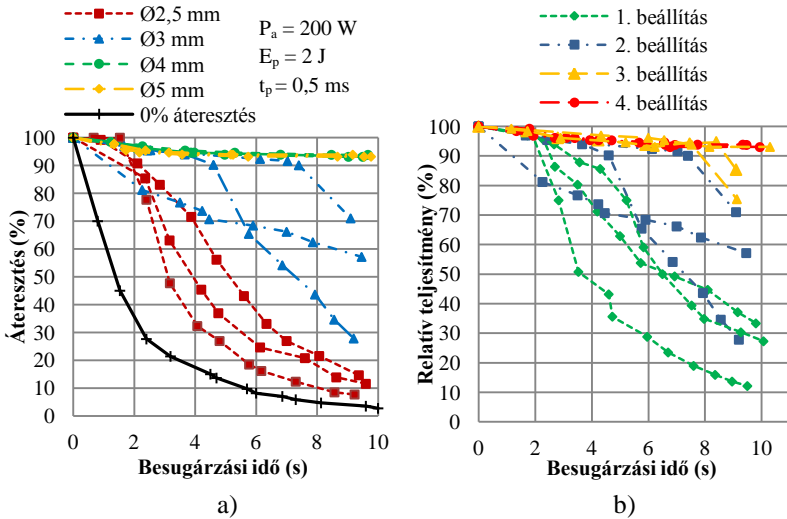
A ragasztási kísérletek során készült minták a lézeres kötéshez használt készülékben, azzal azonos körülmények közt készültek. A PMMA lemezbe néhány esetben 5 mm átmérőjű, lapos fenekű furatot készítettem, és a csapokat a furatokba ragasztottam bele.

A kísérleti minták vizsgálatára sztereó- és fénymikroszkópot, valamint elektronmikroszkópot használtunk. A műanyag termikus jellemzőit DSC és TGA módszerekkel, bomlását pedig gázanalizátor segítségével határoztuk meg.



## 5. Eredmények bemutatása

Az áteresztés-mérési kísérletek segítségével meghatároztam különböző műanyagok áteresztését impulzusüzemű Nd:YAG lézerrugár alkalmazásakor. A méréshez alkalmazott módszer lehetővé teszi az áteresztés mérését a polimer típusától, vastagságától, összetételétől függetlenül, és segítségével a polimer áteresztésének időbeli változása is meghatározható. A módszer segítségével a vizsgált polimerek besugárzás ideje alatt mutatott viselkedése alapján három esetet különböztettem meg: az első esetben a polimerek áteresztése a kísérlet körülményei közt a besugárzás ideje alatt nem változik. A második esetben az anyag áteresztése a besugárzás idő első tartományában állandó, majd csökkenni kezd. A harmadik esetben az áteresztés a teljes besugárzási időtartományban csökken. Az áteresztés csökkenésének oka a polimer termikus degradációja: a degradáció során az anyagban buborékok keletkeznek, amelyek a lézerrugárzást szórják és visszaverik, ezáltal csökkentve az anyag áteresztését.



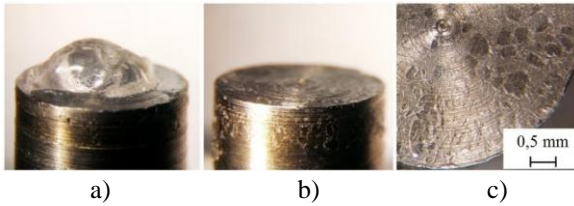
Beáll. sz.	$P_a$ (W)	$f_p$ (Hz)	$E_p$ (J)	$t_p$ (ms)	$P_p$ (kW)	$\rho_a$ (W/mm <sup>2</sup> )	$\rho_p$ (W/mm <sup>2</sup> )
1.	200	5	40	10	4	28,3	566
2.	200	100	2	0,5	4	28,3	566
3.	200	10	20	10	2	28,3	307
4.	200	26	7,5	10	0,75	28,3	100

4. ábra. A lézerrugár-átmérő (a) és a lézerrugár beállítások (b) hatása a PMMA áteresztésének változására

Impulzusüzemű lézersugár esetén az áteresztés értékére kritikus esetben a beállított lézerimpulzusok teljesítménye, lézerfolt-átmérője, teljesítménysűrűsége és ideje is hatással lehet. Ha az impulzusüzemű lézersugár átlagteljesítmény-sűrűsége meghalad egy kritikus értéket, akkor a polimer áteresztése a besugárzási időtartományon belül csökkenni kezd. Ugyanakkor az áteresztés nemcsak az átlagteljesítmény-sűrűségtől, hanem az impulzusteljesítmény-sűrűségtől is függ: ha az impulzusteljesítmény-sűrűség adott értéknél nagyobb, akkor az áteresztés romlani kezd még akkor is, ha az átlagteljesítmény-sűrűség értéke önmagában nem éri el a kritikus értéket. A bemutatott módszerrel a kritikus paraméterek meghatározására is lehetőség nyílik, amelyeket meghaladva az anyag áteresztése az alkalmazott lézeres hatásidő alatt csökkenni kezd. A PMMA áteresztésének változását a lézerfolt-átmérő, a lézerimpulzus-beállítások és a besugárzási idő függvényében a 4. ábra mutatja be.

Mérésekkel meghatároztam az acélminták lézeres hevítési folyamat alatt kialakuló jellegzetes hőmérsékleteloszlását, és a műanyaglemez hatását a kötés során az acél felületén kialakuló hőmérsékletre. Bemutattam, hogy a minták hevítési sebességét és a hevítési idő alatt elért legnagyobb hőmérsékletet a lézeres impulzusbeállítások befolyásolják, és kimutattam, hogy a műanyaglemez az acél hőmérsékletét a folyamat során 93%-os áteresztése és a felhevüléshez és fázisátalakulásokhoz szükséges hőigénye miatt csökkenti. Meghatároztam a csap felületén kialakuló jellegzetes hőmérsékleteloszlást, amely a kötés készítése során a műanyag viselkedését döntően befolyásolja. A hőmérsékleteloszlás a lézersugárra jellemző  $TEM_{00}$  teljesítmény-eloszlás és a csap geometriájából adódó hőelvonás együttes hatásaként alakul ki.

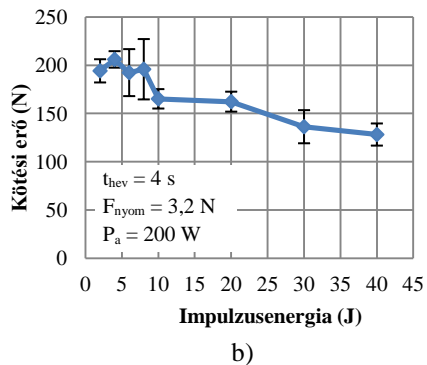
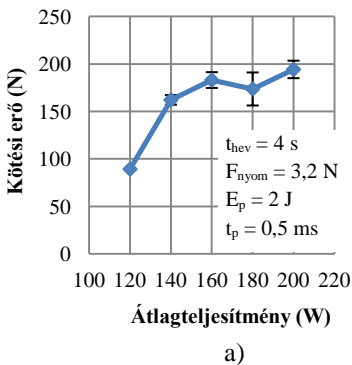
Leírtam a lézéráteresztő pontszerű penetrációs kötések létrejöttének folyamatát, és kiválasztottam a kötés készítésére alkalmas műanyagokat. A választás a PMMA-ra esett annak kedvező kötésszilárdsága, és jó optikai tulajdonságai miatt. A műanyag és az acél határfelületén erős adhéziós kötés alakul ki, mert az elszakított acélminták felületén felfedezhetőek a PMMA anyag kisebb-nagyobb darabjai: a felületen gyakran szabad szemmel is jól látható műnagszigetek, illetve mikroszkóp segítségével beazonosítható vékony műanyagréteg marad (5. ábra), vagyis a kötés optimális esetben az alapanyagban szakad el.



5. ábra. A felületen maradó PMMA 4 s (a) és 6s (b, c) hevítési idők esetén

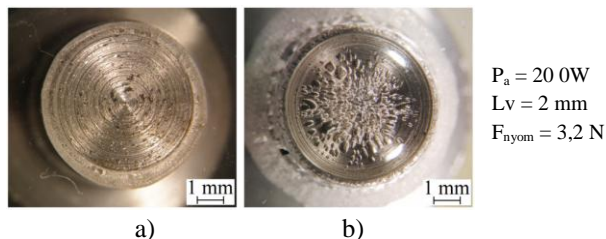
A kötési kísérletek folyamán minden esetben gázbuborékok keletkeznek, amelyek a műanyag bomlási hőmérséklet fölé történő hevítése miatt, a műanyag bomlástermékéből alakulnak ki. A buborékok eloszlása, alakja és mérete az acél felületi hőmérsékleteoszlásával, a lézeres hevítés hosszával és a kötés készítése során kialakuló műanyag áramlásával hozhatók összefüggésbe: a hevítési idő növelésével a buborékok területe növekszik, míg darabszámuknak maximuma van.

A kötés szilárdságára az eredmények szerint befolyással vannak a lézeres beállítások értékei is. Az átlagteljesítmény növelésével a nyomódás is nő, amelynek a növekvő hőmérséklet és a csökkenő műanyagviszkózitás az oka. A teljesítménynövelés a kötési erőt is növeli, azonban az erő értékét az egyre intenzívebb buborékképződés korlátozza. A lézeres impulzusbeállításoknak az általam vizsgált tartományban csak akkor volt befolyása a kötés minőségére, ha nagy energiájú impulzusokat használtam. A kötés nyomódása ekkor gyengén, míg a szilárdság jelentősen csökkent, amelynek oka a kötés készítése során kialakuló alacsonyabb hőmérséklet. Az átlagteljesítmény és az impulzusenergia hatását a kötési erőre a 6. ábra mutatja be.



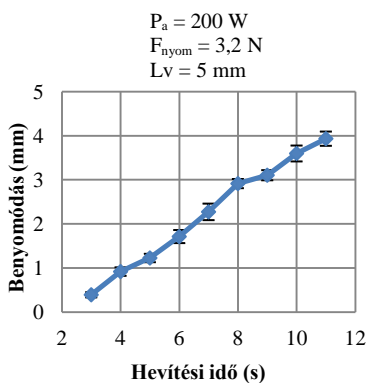
6. ábra. A lézeres átlagteljesítmény (a) és az impulzusenergia (b) hatása a kötési erőre

A kötés szilárdságát befolyásoló legfontosabb tényezők közé tartozik a hevítési idő és a kötés készítése során kialakuló benyomódás. A hevítési idő növelésével a benyomódás növekszik, mert a hőmérséklet emelkedik, a műanyag viszkozitása pedig csökken. A benyomódással a két anyag kapcsolódási felülete növekszik, amely a kötést erősíti, de a hevítési idő növelésével a műanyagban keletkező buborékok száma és területe is nő, ami a kötés szilárdságát rontja. A gázbuborékok az anyagban anyagfolytonossági hiányt jelentenek, vagyis az anyagot gyengítik, mert a kötés terhelhető keresztmetszetét csökkentik. A kötést nem sikerült a gyengítő buborékok kialakulása nélkül elkészíteni, mert a homloklafületre jellemző hőmérsékleteloszlás miatt a középpontban a műanyag már bomlani kezd, amikor az él mentén található műanyag még nem elég lágy, hogy a benyomódást lehetővé tegye. A kötés készítése közben kialakuló buborékokat mutat be a 7. ábra.

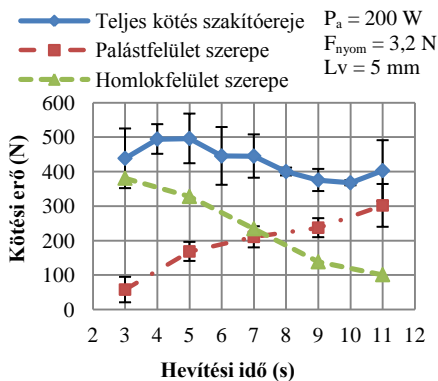


7. ábra. Buborékosodás a homloklafületen 3 s (a) és 7 s (b) hevítési idők esetén

Kötés készítése során keletkező buborékok elsősorban a fémcsap homloklafülete felett jönnek létre, ezért a homloklafület szerepe a kötési erő kialakításában a hevítési idő növekedésével csökken. Ezzel szemben a palástfelület jelentősége a kötéserő kialakításában a hevítési idővel együtt növekedő benyomódás miatt erősödik. A két jelenség felelős a hevítési idő-kötési erő diagram jellegzetes alakjáért, amely adott esetben maximumot mutat: az erő mindaddig növekszik, amíg a buborékképződés a homloklafület szerepét nem csökkenti olyan mértékben, hogy azt palástfelület növekvő szerepe már nem tudja kompenzálni. A homlok- és palástfelület szerepe a kötésben a szakítódiagramok alakjában is kimutatható. A palástfelületen a műanyag és az acél eltérő hőtágulása miatt a kötés erősségét javító, zsugorkötéshez hasonló jelenség mutatható ki. A hevítési idő benyomódásra és kötési erőre gyakorolt hatását a 8. ábra mutatja be 5 mm vastag PMMA lemezekkel készült kötés esetére.



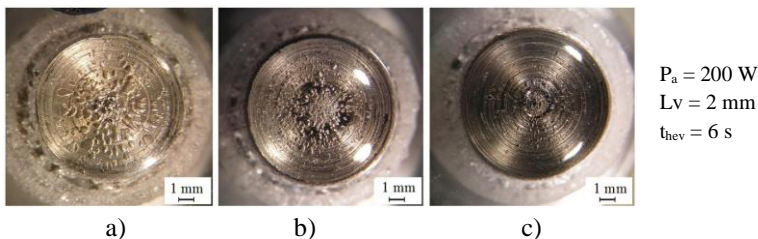
a)



b)

8. ábra. A hevítési idő hatása a benyomódásra (a) és a kötési erőre (b), illetve a csap homlok és palástfelületének kötéseső kialakításában betöltött szerepe

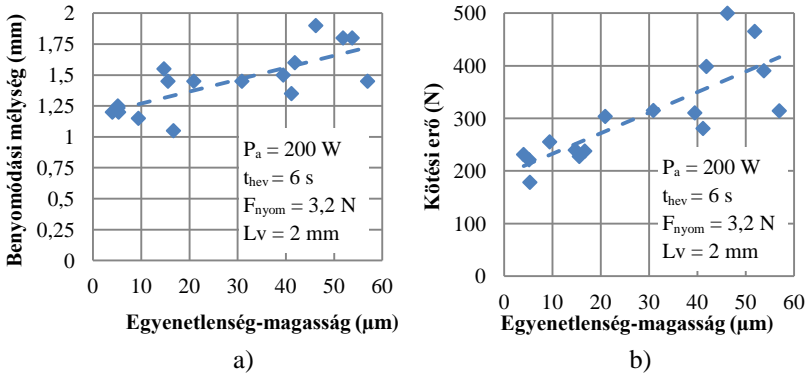
A kötés készítése során keletkező buborékok tehát a kötés szilárdságát csökkentik, azonban az alkalmazott nyomóerő jó megválasztásával a buborékképződés folyamata szabályozható, mert a nyomóerő növelésével a buborékok képződése lelassul, területük csökken, ami a kötés szilárdságát javítja, a 9. ábra szerint.



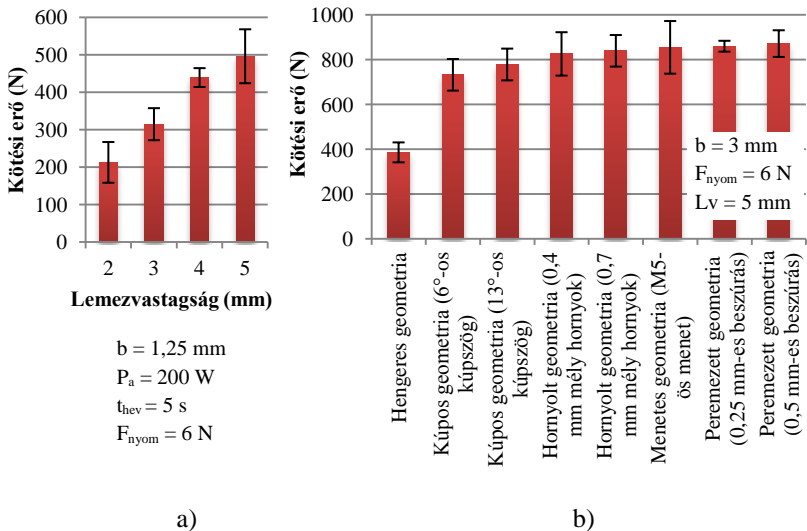
9. ábra. Azonos, 6s hevítési idő és 3,2N (a), 6N (b) illetve 9,2N (c) nyomóerő mellett készült minták felülnézete

A kötési erő hatékonyan javítható az acél és a műanyag megfelelő mikro- és makrogeometriájának megválasztásával: a homlokfelület növekvő érdessége a lézere nyelődés hatását javítja, ami a hőmérséklet emelkedése miatt mélyebb benyomódást, és nagyobb kapcsolódási felületet eredményez. A nagyobb kapcsolódási felület és az érdesség növelésével erősödő mechanikai adhézió együttesen a kötés szilárdságának erős növekedését okozzák. A felületi érdesség benyomódásra és kötési erőre gyakorolt hatását a 10. ábra szemlélteti. Fokozható ugyanakkor a kötési erő a kötéshez használt műanyag lemez vastagságának növelésével is, amely nagyobb merevsége

miatt mérsékeli a szakításkor jelentkező, kötést gyengítő deformációt. A kötés erejét legnagyobb mértékben a különböző alakzáró geometriájú acélsapok alkalmazásával sikerült elérni, amelyek lehetővé teszik, hogy a műanyaglemez szilárdságát jobban kihasználjuk, és ez által a kötés erejét több mint kétszeresére növeljük. A lemezvastagság és az alakzáró csapegeometriák kötési erőre gyakorolt hatása a 11. ábrán látható.



10. ábra. A felületi érdesség hatása a benyomódási mélységre (a) és a kötési erőre (b)



11. ábra. Kötési erők a különböző lemezvastagságok (a) és alakzáró csapegeometriák (b) esetén

A lézerrel készült kötéseket a fémek és műanyagok kötésére leggyakrabban használt ragasztással is összehasonlítottam. Az általam vizsgált kötésgeometria, anyagok és ragasztók esetén az eredmények azt mutatják, hogy a lézeres kötéssel a ragasztott kötés szilárdságához hasonló értékű, vagy az annál erősebb kötések készíthetőek. Ha ehhez a lézer által nyújtott további előnyöket – gyorsaság, hozzáadott anyag hiánya, jó szabályozhatóság – is hozzávesszük, egy olyan technológiát kapunk, amely a jövőben a jelenleg alkalmazott kötési eljárások erős vetélytársa lehet a jövőben.

## 6. Új tudományos eredmények összefoglalása tézisekben

1. Kidolgoztam egy olyan, a polimerek lézersugár áteresztésének mérésére alkalmas módszert, amellyel a lézeráteresztő fém-polimer kötés létrehozásánál alkalmazott körülmények között a polimerek áteresztése és az áteresztés időbeni változása meghatározható, különböző lézersugár hullámhossz, teljesítménysűrűség, hatásidő-tartomány, üzemmód, impulzus beállítások, polimer típusok, vastagságok és adalékok esetén.

A módszer kivitelezése során a kiválasztott jellemzőkkel rendelkező lézersugár teljesítményét mérjük termoelektromos elvű teljesítménymérő műszerrel, defókusz helyzetben. A besugárzás előtt mért teljesítmény érték állandósulása után a műanyaglemezt a meghatározott nyaláb átmérőnél, rövid idő alatt a sugár útjába juttatjuk, és rögzítjük a teljesítmény változását a besugárzási idő függvényében.

Amennyiben a teljesítmény értéke a besugárzás alatt újra állandósul, akkor az adatok kiértékelése során az áteresztés a besugárzás előtti és alatti állandósult teljesítmények hányadosaként számítható. Ettől eltérő esetekben a lemez sugár útjába való juttatása előtti állandósult teljesítményérték és a mérő eszköz tehetetlenségétől függő szabad lehűléskor kapott értékek közötti arányosítással becsülhető. [S1, S6, S8].

2. Lézeráteresztő fém-polimer kötés létrehozásánál alkalmazott poli(metilmetakrilát) és polipropilén műanyagok, 3 - 10 s-os besugárzási időtartományú, villanólámpás gerjesztésű, Nd:YAG lézersugaras áteresztésmérésével meghatároztam, hogy:

- a. a műanyagok lézeráteresztésének időbeni változása alapján 3 esetet különböztethetünk meg [S6, S8]:

- i. a lézeráteresztés nem változik;
- ii. a lézeráteresztés az első szakaszban állandó, majd a második szakaszban monoton csökken;
- iii. a lézeráteresztés a teljes besugárzási időtartományban monoton csökken.

- b. rögzített lézerimpulzus-kicsatolás esetén megállapítható egy olyan kritikus átlagteljesítmény-sűrűség, illetve rögzített átlagteljesítmény-sűrűség és impulzus idő esetén megállapítható egy olyan kritikus impulzusteljesítmény-sűrűség, amely érték alatt a lézeráteresztés a besugárzás során időben állandó, és amely felett az áteresztés csökken. Az átlag vagy az impulzusteljesítmény-sűrűség további növelése az áteresztés nagyobb értékű csökkenését eredményezi [S1, S6, S8].

A jelenség magyarázata, hogy az átlagteljesítmény-sűrűség és az impulzusteljesítmény-sűrűség növelése is növeli az adott idő alatt területegységre bevitt hőmennyiséget, ami a lézerfolt alatti térfogatban feltorlódik. A feltorló hő a műanyagot degradálja, amely gázbuborék-



képződéssel és a műanyag áteresztésének csökkenésével jár. A fenti 3 eset a degradáció kezdetének időpontja alapján különböztethető meg [S1, S4, S6, S8].

3. Mérések segítségével meghatároztam a 2 - 5 mm vastag poli(metilmetakrilát) lemez, az 5 mm átmérőjű hengeres S235 acélcsap és a csap homlokfelületével koncentrikusan, azonos átmérőben elhelyezett villanólámpás gerjesztésű, Nd:YAG lézerfolttal létrehozott lézeráteresztő, penetrációs kötés készítésekor, hogy a fémcsap műanyagba történő benyomódása a csapfelületi érdesség ( $R_z = 5 - 50 \mu\text{m}$ ), az átlagteljesítmény (120 - 200 W), a hevítési idő (4 - 11 s) és a csap illetve a lemez közt rugóval létrehozott nyomóerő (3,2 - 9,2 N) kezdeti értékének külön-külön növekedésével a vizsgált tartományokban monoton növekszik, mert az átlagteljesítmény és a hevítési idő növelése, valamint a csap érdességének növelésével elért nagyobb lézersugár-elnyelődés mind a csap hőmérsékletének emelkedését okozzák. A hőmérsékletnövekedés a polimer viszkozitásának csökkenését, és ez által nagyobb benyomódást eredményez. A nyomóerő kezdeti értékének növelésével adott műanyag viszkozitás mellett a csap mélyebbre képes benyomódni [S1, S7, S9, S10, S11, S13].
4. Mérések segítségével meghatároztam a 2 - 5 mm vastag poli(metilmetakrilát) lemez, az 5 mm átmérőjű hengeres S235 acélcsap és a csap homlokfelületével koncentrikusan, azonos átmérőben elhelyezett villanólámpás gerjesztésű, Nd:YAG lézer folttal létrehozott lézeráteresztő, penetrációs kötés készítésekor a csap műanyaglemezből történő kiszakításakor mérhető kötési erővel kapcsolatban, hogy:
  - a. a hevítési idő (4 - 11 s) és az átlagteljesítmény (120 - 200 W) külön-külön növelésével a kötési erő kezdetben nő, mivel a hevítési idő és az átlagteljesítmény növelése nagyobb benyomódást, nagyobb kapcsolódási felületet és egyben intenzívebb gázbuborék-képződést is eredményez. A kötési erő mindaddig növekszik, amíg a buborékképződés a csap homlokfelületének szerepét nem csökkenti olyan mértékben, hogy azt a palástfelület a növekvő szerepe már nem tudja kompenzálni [S7, S11, S12].
  - b. csap illetve a lemez közt rugóval létrehozott nyomóerő (3,2 - 9,2 N) kezdeti értékének növelésével a buborékképződés mértéke csökkenthető, és a kötési erő növelhető, mert a nyomás növekedése a műanyag intenzív bomlásának hőfoktartományát felfelé tolja el [S1, S2, S7, S10, S11, S13].
  - c. az acélcsap felületi érdességének ( $R_z = 5 - 50 \mu\text{m}$ ) és a műanyaglemez vastagságának (2 - 5 mm) növelése a szakítóerőt egyaránt növeli. A csap érdességének növelésével azonos benyomódás esetén nő a mechanikai adhézió szerepe, amit a

homlokfelület növekvő érdessége által okozott nagyobb benyomódás tovább növel. A lemezvastagság növelésével a lemez merevsége megnő, ami a szakítás során fellépő hajlításból adódó deformációt és többletterhelést csökkenti [S7, S9, S10, S11, S13].

5. Mérések segítségével meghatároztam a 2 - 5 mm vastag poli(metil-metakrilát) lemez, az 5 mm átmérőjű hengeres S235 acélcsap és a csap homlokfelületével koncentrikusan, azonos átmérőben elhelyezett villanólámpás gerjesztésű, Nd:YAG lézerfolttal létrehozott lézéráteresztő, penetrációs kötés készítésekor, hogy a fémcsap műanyagba történő benyomódása és a csap műanyaglemezről történő kiszakításakor mérhető kötési erő függ a lézerimpulzusok jellemzőitől. Állandó 200 W átlagteljesítmény, 4 s hevítési idő, 3,2 N nyomóerő és 1  $\mu\text{m}$  átlagos felületi érdesség esetén
  - a. adott impulzus-teljesítmény mellett, az impulzusidő növelésével meghatározható olyan kritikus impulzusenergia-érték, amely felett a benyomódás és ezért a kötési erő is csökken, mert a nagyobb impulzusenergiák esetén a csaphőmérséklet kisebb, a viszkozitás pedig nagyobb [S11].
  - b. meghatározható olyan impulzusenergia-érték, amely mellett az impulzus teljesítménytől független a benyomódás és a kötési erő mértéke [S11].
6. Mérések segítségével kimutattam a 2 - 5 mm vastag poli(metil-metakrilát) lemez, az 5 mm átmérőjű hengeres S235 acélcsap és a csap homlokfelületével koncentrikusan, azonos átmérőben elhelyezett villanólámpás gerjesztésű, Nd:YAG lézerfolttal létrehozott lézéráteresztő, penetrációs kötés készítésekor, hogy a kötési erő célszerűen megválasztott makrogeometriával a hengeres geometriához képest megkétszerezhető. Ennek egyik oka, hogy a hengeres geometriára jellemző palástfelületi mechanikus adhézióval szemben a makroszkópikus alakzárás dominál. A jelenség másik oka, hogy az alakzárás miatt megváltoznak a műanyag lemez terhelési viszonyai, így a lemez vastagság-növekedéséből adódó szilárdsága jobban kihasználhatóvá válik [S12].
7. Kimutattam, hogy poli(metil-metakrilát) lemez és S235 acélcsap között impulzusüzemű Nd:YAG lézerrel készíthető olyan lézéráteresztő, penetrációs kötés, amelynek kötési ereje az azonos geometriájú Loctite 454 és Loctite 496 ragasztóval készült kötések kötési erejével közel megegyezik. Ennek oka, hogy a lézeres eljárás esetén a homlok- és palástfelületen együttesen kialakuló adhézió a ragasztáskor kialakuló adhézióval egyenlő mértékű. A lézersugaras kötés ezért olyan alternatív kötéstechnológiát jelent a ragasztással szemben, ami nem teszi szükségessé segédanyag alkalmazását [S1, S3].

## 7. Irodalmi hivatkozások

- [1] Jens Holtkamp, Andreas Roesner, Arnold Gillner: Advances in hybrid laser joining. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 47, 2010, pp. 923–930.
- [2] Negin Amanat, Natalie L. James, David R. McKenzie: Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices. *Medical Engineering & Physics*, Vol. 32, 2010, pp. 690–699
- [3] A. Fortunato, G. Cuccolini, A. Ascari, L. Orazi, G. Campana, G. Tani: Hybrid metal-plastic joining by means of laser. *International Journal of Material Forming*, 2010, Vol. 3 Suppl. 1, pp. 1131–1134
- [4] S. T. Amancio-Filho, J. F. dos Santos: Joining of Polymers and Polymer–Metal Hybrid Structures: Recent Developments and Trends. *POLYMER Engineering and Science*, 2009, pp. 1461 – 1476
- [5] Kawahito Yousuke, Katayama Seiji: Innovation of laser direct joining between metal and plastic. *Transactions of JWRI*, Vol.39, 2010, No. 2, pp. 50
- [6] C. Ageorges, L. Ye, M. Hou: Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. *Composites: Part A - Applied science and Manufacturing*, Vol. 32, 2001, pp. 839-857
- [7] Carl Magnus: Feasibility study of metal to polymer hybrid joining. Thesis for the Degree of Master of Science in Technology, 2012
- [8] T. Sultana, G. L. Georgiev, R. J. Baird, G. W. Auner, G. Newaz R. Patwa, H. J. Herfurth: Study of two different thin film coating methods in transmission laser micro-joining of thin Ti-film coated glass and polyimide for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 2, 2009, pp. 237-242
- [9] Andreas Roesner, Sven Scheik, Alexander Olowinsky, Arnold Gillner, Uwe Reisgen, Markus Schleser: Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids. *Physics Procedia* Vol. 12, 2011, pp. 373–380
- [10] Andrei Boglea, Alexander Olowinsky, Arnold Gillner: Extending the Limits of Laser Polymer Welding using Advanced Irradiation Strategies. *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering* Vol. 5, No. 2, 2010, pp. 138-144
- [11] V. A. Kagan, R. G. Bray, W. P. Kuhn: Laser Transmission Welding of Semi-Crystalline Thermoplastics - Part I: Optical Characterization of Nylon Based Plastics. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 21, No.12, 2002, pp. 1101-1122
- [12] P. van Engen, F. Lupp, L. Bolognese, M.Hempel, B. Palfelt, F. Bachmann, U.Russek, J. Campbell, R. Korbee, K. Grim: New advances in polymer laser welding. <http://cordis.europa.eu/brite-euram/src/pubs.htm>, 2012.11.8.
- [13] Y. Farazila, M. Fadzil, M. Hamdi: A brief review: laser joining of polymer-metal structures. *ASEAN Engineering Journal*, Vol. 2, No. 2, 2012, pp. 5-12
- [14] Grigor L. Georgiev, Ronald J. Baird, Erik F. McCullen, Golam Newaz, Gregory Auner, Rahul Patwa, Hans Herfurth: Chemical bond formation during laser bonding of Teflon1 FEP and titanium. *Applied Surface Science*, Vol. 255, 2009, pp. 7078–7083

- [15] Taslema Sultana, Golam Newaz, Grigor L. Georgiev, Ronald J. Baird, Gregory W. Auner, Rahul Patwa, Hans J. Herfurth: A study of titanium thin films in transmission laser micro-joining of titanium-coated glass to polyimide. *Thin Solid Films*, Vol. 518, 2010, pp. 2632–2636
- [16] Markovits Tamás: Alumínium ötvözetek CO<sub>2</sub> lézeres forrasztása. Doktori értekezés a PhD fokozat megszerzésére. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2004.
- [17] Seiji Katayama, Yousuke Kawahito: Laser direct joining of metal and plastic. *Scripta Materialia*, Vol. 59, 2008, pp. 1247–1250
- [18] K. W. Jung, Y. Kawahito, M. Takahashi, S. Katayama: Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *Materials and Design*, Vol. 47, 2013, pp. 179–188
- [19] W. Tillmann, A. Elrefaey, L. Wojarski: Toward process optimization in laser welding of metal to polymer. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 41, Issue 10, 2010, pp. 879–883
- [20] Christian Lamberti, Tobias Solchenbach, Peter Plapper, Wulff Possart: laser assisted joining of hybrid polyamide-aluminum structures. *Physics Procedia*, Vol. 56, 2014, pp. 845 – 853
- [21] Klaus Schrickler, Martin Stambke, Jean Pierre Bergmann, Kevin Bräutigam, Philipp Henckell: macroscopic surface structures for polymer-metal hybrid joints manufactured by laser based thermal joining. *Physics Procedia*, Vol. 56, 2014, pp. 782-790
- [22] Dustin Flock: Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften, 2011
- [23] Philipp Amend, Christian Mohr, Stephan Roth: experimental investigations of thermal joining of polyamide aluminum hybrids using a combination of mono- and polychromatic radiation. *Physics Procedia*, Vol. 56, 2014, pp. 824-834
- [24] Alexander N. Fuchs, Franz X. Wirth, Philipp Rinck, Michael F. Zaeh: Laser-generated macroscopic and microscopic surface structures for the joining of aluminum and thermoplastics using friction press joining. *Physics Procedia*, Vol. 56, 2014, pp. 801 – 810

## 8. Saját közlemények

- [S1] Bauernhuber Andor, Markovits Tamás, Takács János: Lézerátteresztő fém-polimer kötés kialakításának vizsgálata. Gépgyártás, LV. évfolyam, 1. szám, 2015, 56-62 oldal, ISSN: 1587-4648
- [S2] Andor Bauernhuber, Tamás Markovits: Investigating thermal interactions in the case of laser assisted joining of PMMA plastic and steel. Physics Procedia, Vol. 56, 2014, pp. 811-817, ISSN: 1875-3892
- [S3] Tamás Markovits, Andor Bauernhuber: Comparing adhesive bonding and LAMP joining technology in case of hybrid material combination. Physics Procedia, Vol. 56, 2014, pp. 818-823, ISSN: 1875-3892
- [S4] Tamás Markovits, Andor Bauernhuber: Analysing the thermal characteristics of LAMP joining. Production Engineering Archives, Vol. 3 No. 2, 2014, pp 14-17, ISSN: 2353-7779
- [S5] Andor Bauernhuber, Tamás Markovits: Thermal analysis of laser transmission joining process applying PMMA plastic and steel. Stanislaw Borkowski, Robert Ulewicz: Analysis of technology in various industries, Oficyna Wydawnicza Stowarzyszenia Menederów Jakosci i Produkcji, 2014, pp. 17-26. ISBN: 978-83-63978-11-2
- [S6] Tamás Markovits, Andor Bauernhuber, Patrik Mikula: Study on the transparency of polymer materials in case of Nd:YAG laser radiation. Periodica Polytechnica: Transportation Engineering, Vol. 41, 2014, pp. 149-154, ISSN: 1587-3811
- [S7] Bauernhuber Andor, Markovits Tamás: Lézersugaras fém-polimer hibrid kötés, mint új lehetőség a kötéstechikában. GÉP, LXIV. évfolyam, 3. szám, 2013, 7-11 oldal, ISSN: 0016-8572
- [S8] Andor Bauernhuber, Tamás Markovits, Patrik Mikula: Laser polymer interaction in case of Nd:YAG laser beam source. Takács János, Vehovszky Balázs: 30th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry, BME Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék, Budapest, 2013, pp. 17-24. ISBN: 978-963-313-079-7

- [S9] Andor Bauernhuber, Tamás Markovits: Hybrid joining of steel and plastic materials by laser beam. *Transport*, Vol. 29, Issue 2, 2014, pp. 217-222, ISSN 1648-3480  
IF: 0,529
- [S10] Markovits Tamás, Bauernhuber Andor: Lézersugaras fém-polimer hibrid kötés. *A Jövő Járműve*, Vol. 2013/01-02, 2013, 63-67 oldal, ISSN: 1788-2699
- [S11] Andor Bauernhuber, Tamás Markovits: Laser assisted joining of metal pins and thin plastic sheets. *Physics Procedia*, Vol. 39, 2014, pp. 108-116, ISSN: 1875-3892
- [S12] Tamás Markovits, Andor Bauernhuber, Márton Géczy: Investigating the shape locking phenomenon in case of LAMP joining technology. *Physics Procedia*, Vol. 39, 2014, pp. 100-107, ISSN: 1875-3892  
1 citation:  
X. Tan, J.Zhang, J. Shan, S. Yang, J. Ren: Characteristics and formation mechanism of porosities in CFRP during laser joining of CFRP and steel. *Composites Part B: Engineering*, Vol. 70, 2015, pp. 35-43
- [S13] Andor Bauernhuber, Tamás Markovits: Investigating the joining of PMMA plastic to steel by Nd:YAG laser. *Materialové Inžinierstvo-Materials Engineering*, Vol. 19 (4), 2012, pp. 164-174, ISSN: 1338-6174