

# LÉZERSUGARAS FÉM-POLIMER HIBRID KÖTÉS, MINT ÚJ LEHETŐSÉG A KÖTÉSTECHNIKÁBAN

## NEW OPPORTUNITY IN JOINING TECHNOLOGY: THE LASER ASSISTED METAL-PLASTIC HYBRID JOINING

Bauernhuber Andor, \*Markovits Tamás \*\*

### ABSTRACT

*The increase in the amount of plastics in our devices requires their joining with the henceforward essential metals. Thus, low-weight hybrid parts can be manufactured, which can simultaneously combine the benefits of different materials. In the course of this study, the authors joined PMMA plastic and steel in a pin to plate geometry by pulsed Nd:YAG laser. Tensile tests were carried out to investigate the effects of heating time, the laser settings, the surface roughness and the clamping force on the joining strength. Experimental results showed that the joining is feasible and using adequate settings the strength can be maximised.*

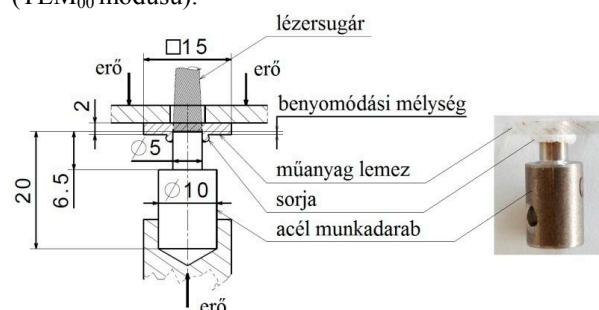
### 1. BEVEZETÉS

Az utóbbi évtizedben a tervezés és gyártás területén új szempontok kerültek előtérbe, mint a fenntarthatóság, környezetvédelem, és az ezekkel összefüggő tömegcsökkentés. Az említett elveknek az újabb konstrukciós megoldások mellett új, kis sűrűségű anyagok felhasználásával tudunk eleget tenni. Innen fakad a műanyagok bővülő alkalmazása, hiszen a tömegre vetített nagy szilárdság, a jó alakíthatóság, a kémiai ellenálló képesség és a jó elektromos- és hőszigetelő képesség olyan tulajdonságok, amelyekkel a műanyagok eleget tesznek az új elvárásoknak [1]. Mindemellett továbbra sem tudjuk nélkülözni a fémeket a szerkezeteink többségéből, ezért egyre gyakrabban kell műanyag és fém alkatrészek kötéséről gondoskodni. Így olyan alkatrészek készíthetők, ahol mindkét szerkezeti anyag előnyei egyidejűleg kerülhetnek előtérbe. Fémek és műanyagok kötésére számos megoldás fejlődött ki, de valamennyinek vannak hátrányai [2, 3]. Így pl. a mechanikai kötőelemek alkalmazása káros feszültségcsúcsot okozhat és nehezen automatizálható, míg a ragasztás adott esetben a ragasztó kikeményedése miatt lassú folyamat, a kötés hőállósága általában alacsony és a kipárolgó oldószerek veszélyesek lehetnek az egészségre is [4].

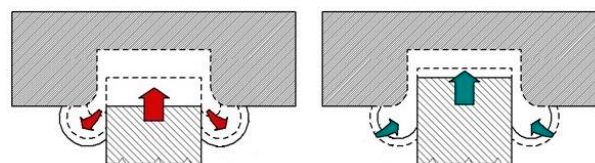
Kutatásunk célja egy olyan új, lézersugaras hibrid kötéstechnológia kifejlesztése, ami a már létező technológiáknak versenytársa lehet, és kiküszöböli azok hátrányait. Cikkünkben bemutatjuk az új kötést és megvizsgáljuk a kötés létrejöttét és minőségét befolyásoló tényezőket, így pl. a hevítési idő, összeszorító erő, lézerteljesítmény és a felületi érdesség hatását.

### 2. KÍSÉRLETEK

A kutatás során acélsapokat kötöttünk össze műanyag lemezzel. Az acél anyag S235-ös szerkezeti acél, míg a műanyag poli(metil-metakrilát), vagyis plexi volt (Acriplex PMMA-XT). Az acélsap és a PMMA lemez geometriája, a kötés és a kísérleti összeállítás vázlatja, valamint a kész kötés és az 1. ábrán látható. Az acélsap átmérője 5 mm, a PMMA lemez vastagsága 2 mm, ill. 5 mm. Az alkalmazott lézersugár-forrás LASAG SLS 200 típusú impulzusüzemű Nd:YAG szilárdtest lézer, a teljesítmény-eloszlás Gauss jellegű (TEM<sub>00</sub> módusú).



1. ábra. Kísérleti összeállítás és a kész kötés



2. ábra. A kötés kialakulása és a sorjaképződés

A mintát a műanyaglemez felől sugároztuk be a lézersugárral. A műanyag a lézersugár hullámhosszán 90%-os áteresztőképességgel rendelkezik, ezért a

\* Tanársegéd, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék  
e-mail: [bauernhuber@kgtt.bme.hu](mailto:bauernhuber@kgtt.bme.hu)

\*\* Egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék

sugárzás a műanyagon áthaladva a fém felületén nyelődik el, és közvetlenül a fémot hevíti [5]. Az acél hevülése során a hő egy részét átadja a PMMA anyagnak, így a műanyagot közvetve hevítjük. A műanyag a hőmérséklet növekedésével lágyul és viszkózusan folyós állapotba kerül, ezért az acélcsap az alkalmazott nyomóerő miatt a műanyagba süllyed. 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, ami mindössze néhány másodpercet vesz igénybe, létrejön a kötés. A kötés kialakulásának lépéseit és a sorjaképződést a 2. ábra szemlélteti. A kísérletek során alapesetben használt beállítások: a nyomóerő értéke 3,2 N, az átlagos felületi érdesség  $0,5 \div 1,5 \mu\text{m}$ , a lézeres beállítások értékei pedig a következők voltak:  $f=100 \text{ Hz}$ ,  $t_p=0,5 \text{ ms}$ ,  $E_p=2 \text{ J}$ , ahol  $f$  az impulzusfrekvencia,  $t_p$  az impulzusidő és  $E_p$  az impulzusenergia.

A hevítési idő hatásának vizsgálatok a hevítési időt  $t_h=2 \text{ s}$  és  $t_h=11 \text{ s}$  közt módosítottuk.

A nyomóerő hatásának vizsgálatok az alkalmazott erőértékek  $F_{ny}=3,2 \text{ N}$ ,  $6 \text{ N}$ ,  $9,2 \text{ N}$  voltak.

A lemeztvastagság hatását  $2 \text{ mm}$ ,  $3 \text{ mm}$ ,  $4 \text{ mm}$  és  $5 \text{ mm}$  vastag PMMA lemezek alkalmazásával vizsgáltuk.

A lézerteljesítmény hatásának vizsgálatok az átlagteljesítményt a frekvenciaérték módosításával szabályoztuk, a frekvencia  $60 \text{ Hz}$  és  $100 \text{ Hz}$ , a teljesítmény  $P_a=120 \text{ W}$  és  $P_a=200 \text{ W}$  közt változott, a hevítési idő  $t_h=4 \text{ s}$  volt.

A felületi érdesség hatásának vizsgálatok az érdesség értékét  $R_a=0,5 \mu\text{m}$  és  $R_a=10 \mu\text{m}$  közt változtattuk, a hevítési idő  $t_h=6 \text{ s}$  volt.

Minden esetben  $4,75 \text{ l/perc}$  mennyiségű argon védőgázt használtunk.

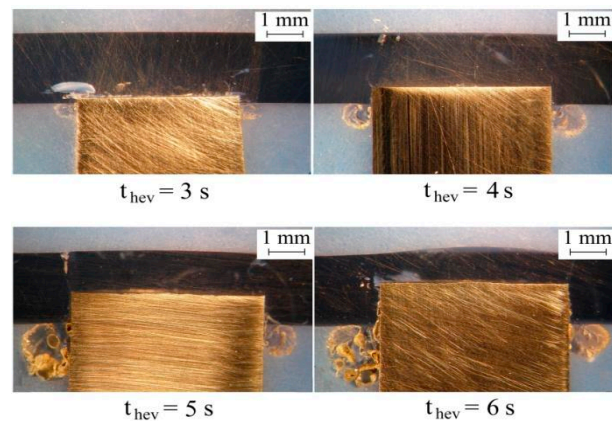
A kötőerő meghatározásához a mintákat elszakítottuk, az acélcsapot kitéptük a műanyaglemezről. A kötésiértékesítés és a szakítás közt  $24 \text{ óra}$  telt el.

### 3. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

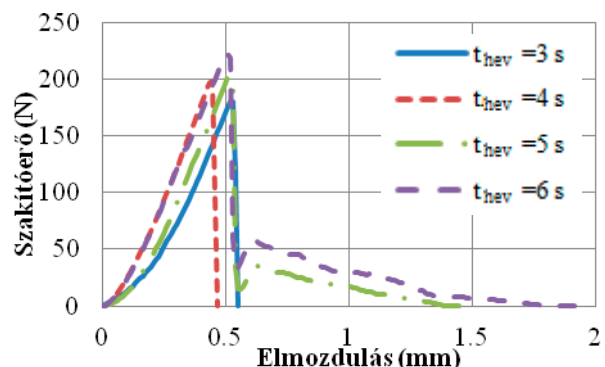
#### 3.1. A hevítési idő, a nyomóerő és a lemeztvastagság hatása

Elsőként a hevítési idő és a nyomóerő hatását vizsgáltuk a benyomódásra és a szakítóerőre. A különböző lemeztvastagságoknál alkalmazott hevítési idő minimális értéke általában  $t_h=3 \text{ s}$ , mert ennél rövidebb ideig történő hevítéskor a műanyag nem éri el a lágyuláshoz szükséges hőmérsékletet, míg az időmaximum a lemezt vastagságától függ: a felső határ, aminél a nyomóerő hatására a csap a lemezt még éppen nem lyukasztja át. Ez  $2 \text{ mm}$ -es lemeznél  $t_h=7 \text{ s}$ , míg  $5 \text{ mm}$ -es lemeznél  $t_h=11 \text{ s}$ . Megfelelő hevítési idő megválasztásával elérhető, hogy a PMMA lemez felszíne nem deformálódik, így olyan kötés hozható létre, ahol a felület nem sérül, és nem is változtatja meg alakját. A 3. ábrán a kötések metszeteit, a 4. ábrán a

kötések szakítódiagramjait mutatjuk be. Látható a benyomódás változásából adódó eltérés a szakítódiagramokban. Rövid hevítési idők esetén ( $t_h=3 \div 4 \text{ s}$ ) az erő a maximum elérése után azonnal a 0 értékre esik vissza. Ebben az esetben csak a csap homlokfelülete vesz részt a kötésben. Ezzel szemben a hosszabb hevítési idők esetén ( $t_h=4 \div 7 \text{ s}$ ) a csap palástfelületének szerepe megnövekszik. Ekkor szakításkor az erő nem esik azonnal nullára, hanem van egy második, kisebb maximumérték is, amely valószínűleg a műanyag zsugorodásából és a felületen található érdességi csúcsok alakzárásából adódik. Ebben az esetben az erő fokozatosan csökken, ahogy a csapot az általa létrehozott üregből kihúzzuk, végül 0 értékre csökken.



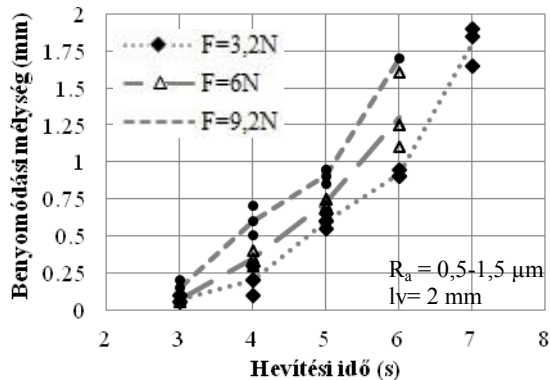
3. ábra. A kötések keresztmetszete különböző hevítési idők esetén,  $2 \text{ mm}$  vastag lemez esetén



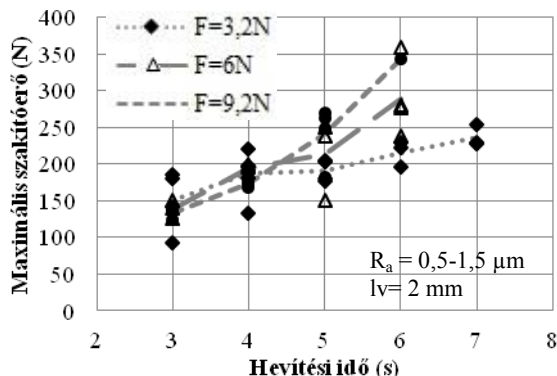
4. ábra. Eltérő hevítési idővel készült kötések szakítódiagramjai

Az 5. és 6. ábrán a hevítési idő és a nyomóerő hatását láthatjuk a benyomódásra és a maximális szakítóerőre. Ahogy azt a keresztmetszeti képekből is láthattuk, a növekvő hevítési idővel a benyomódás is nő, méghozzá gyorsuló ütemben (5. ábra). A várakozásoknak megfelelően a nagyobb nyomóerő azonos hevítési idő esetén nagyobb benyomódást hoz létre, azonban ezekben az esetekben  $t_h=7 \text{ s}$  hevítési idő alkalmazásakor a műanyag már átszakad. A maximális szakítóerő szintén növekszik a hevítési idő növelésével, de nem a benyomódással egyenesen arányosan. Látható, hogy  $F_{ny}=3,2 \text{ N}$  esetén a benyomódás a hevítési idővel gyorsuló ütemben nő, míg a maximális szakítóerő értéke

nő ugyan, de inkább degresszív módon. Feltűnő különbség továbbá, hogy a különböző nyomóerők az eltérő benyomódás ellenére is csak  $t_h=5$  s és ennél magasabb hevítési idők esetén okoznak eltérést a maximális szakítóerőben. Elmondható tehát, hogy a benyomódás és a szakítóerő egymással nem egyenesen arányos érték.

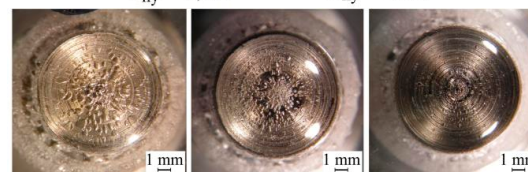
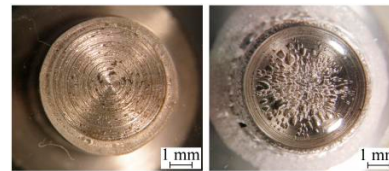


5. ábra. A hevítési idő és a nyomóerő hatása a benyomódásra



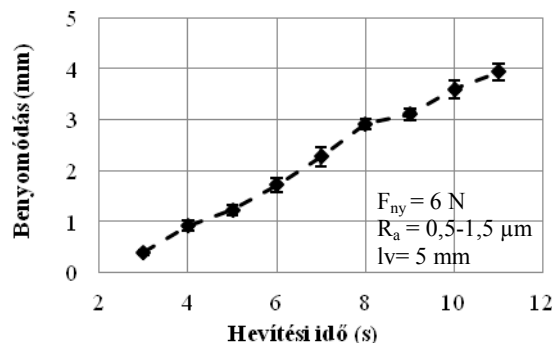
6. ábra. A hevítési idő és a nyomóerő hatása a maximális szakítóerőre

A leírt különbségek a kötést kísérő buborékképződéssel magyarázhatóak. Amikor a műanyag felhevül, a fém felületénél található anyagrézben buborékok jönnek létre, melyek száma és mérete azonos nyomóerő esetén a hevítési idő értékével nő, ill. azonos hevítési idő esetén a nyomóerő növekedésével csökken. A buborékok kialakulását a műanyag összetevőinek bomlása okozhatja a hevítés, ill. a lokális túlhevülés során, de a pontos okok még nem ismertek [6]. A leírt buborékok a két anyag határán anyagfolytonossági hibát jelentenek, és a kötést gyengítik. Ennek köszönhető, hogy nagyobb benyomódás esetén a szakítóerő kisebb, mint várnánk, hiszen a hosszabb hevítési idő alatt több és nagyobb méretű buborék fejlődik. A nyomóerőnek is csak akkor nő meg a szerepe, amikor a buborékképződés már intenzív, és azt a nyomóerő hatékonyan tudja csökkenteni, növelve ezzel a szakítóerőt. A hevítési idő és a nyomóerő hatását a buborékképződésre a 7. ábra mutatja be.

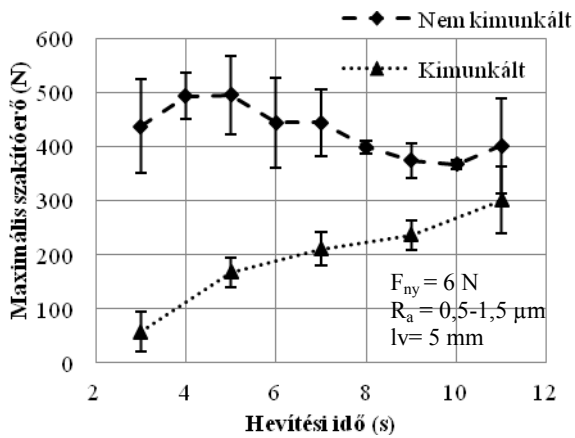


7. ábra. A hevítési idő valamint a nyomóerő hatása a buborékképződésre

A buborékok kötést gyengítő hatását a nagyobb benyomódás és az ebből adódó nagyobb kötési felület csak egy ideig tudja kompenzálni, így adott hevítési idő után a benyomódás hiába nő, a kötés szilárdsága csökken, a szakítóerő diagramjában egy maximum jelentkezik. A maximumot 2 mm-es lemezek esetén nem lehet kimutatni, mert a lemez már az optimumot jelentő hevítési idő előtt átszakad. Jól kimutatható viszont 5 mm vastag PMMA lemezek esetén, ahol a lemez nagy hevítési idők mellett ( $t_h=11$  s) sem szakad át. A 8. ábra a benyomódást, míg a 9. ábra a szakítóerőt adja meg a hevítési idő függvényében 5 mm lemezvastagság és  $F_{ny}=6$  N nyomóerő esetén. A  $t_h=3$  s, 5 s, 7 s, 9 s és 11 s hevítési idő mellett készült minták közül 3-3 darabon a csap homlokfelülete feletti anyagrészt kimunkáltuk a műanyaglemezről, hogy a palást- és homlokfelület szerepét a kötésben szét tudjuk választani. Ekkor a kötésben csak a csap palástfelülete vett részt. A szakítás utáni eredményekből látható, hogy a buborékok gyengítő hatása elsősorban a homlokfelületen jelentkezik, mert a kimunkált minták esetén a szakítóerő monoton nő, míg a nem kimunkált minták esetén  $t_h=5$  s hevítési időt meghaladva csökkenni kezd. A növekvő szakítóerő a kimunkált minták esetén a palástfelület és a műanyag közt kialakuló kapcsolódási felület növekedésével magyarázható.

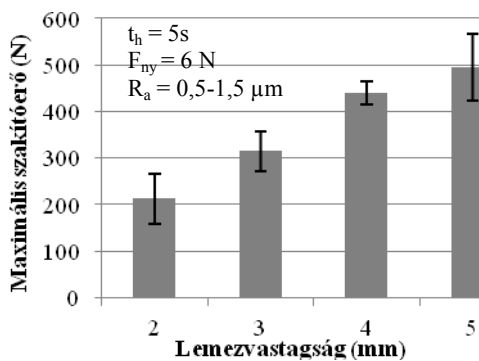


8. ábra. Benyomódás a hevítési idő függvényében, 5 mm vastag PMMA lemez esetén



9. ábra. A szakítóerő alakulása a hevítési idő függvényében, 5 mm vastag PMMA lemez, ill. homlokfelület felett kimunkált, és nem kimunkált, teljes minták esetén

Ha a 6. ábrán és a 9. ábrán megadott szakítóerő értékeit összehasonlítjuk  $F_{ny}=6$  N nyomóerő és tetszőleges hevítési idő mellett, megfigyelhető, hogy nagyobb lemeztvastagság alkalmazásával a szakítóerő növekszik. A jelenség magyarázata, hogy a műanyaglemez merevsége megnő, ha vastagsága nagyobb, ami a szakítás során nagyobb szilárdságot biztosít. A 10. ábrán azonos,  $t_h = 5$  s hevítési idő és  $F_{ny}=6$  N nyomóerő mellett, de eltérő vastagságú műanyaglemezzel készült kötések szakítóerő-átlagai láthatók, ahol jól megfigyelhető a nagyobb lemeztvastagság kötészilárdság növelő hatása.

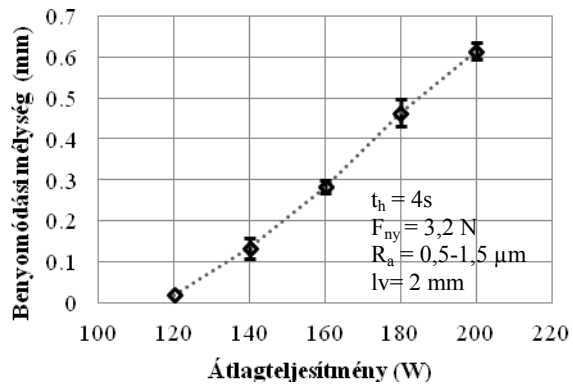


10. ábra A lemeztvastagság hatása a szakítóerőre

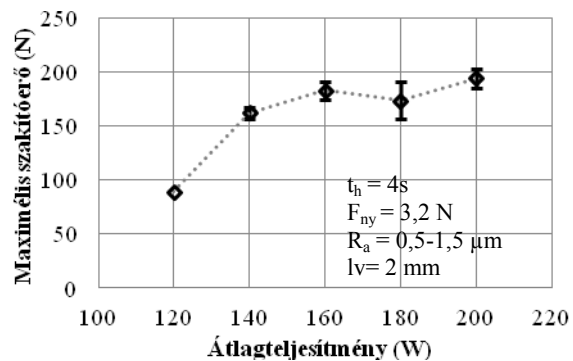
### 3.2. A lézerteljesítmény hatása

A 11. és a 12. ábrán az átlagos lézerteljesítmény hatását látjuk a benyomódásra és a maximális szakítóerőre, 2 mm vastag PMMA lemez és  $t_h=4$  s hevítési idő esetén. A teljesítményt az impulzuszakítás frekvencia változtatásával szabályoztuk, míg az impulzusteljesítmény, az impulzusidő, és így az impulzusenergia is állandó maradt. Hasonló tendenciát figyelhetünk meg, mint a hevítési idő hatásának vizsgálata esetén: a növekvő átlagteljesítmény a

benyomódást és a szakítóerőt is növeli, a benyomódást közel egyenesen arányosan, míg a szakítóerőt csökkenő meredekséggel. Az eltérés magyarázata itt is a buborékokban keresendő: hiába hoz létre a nagyobb teljesítmény nagyobb benyomódást és növekvő kapcsolódási felületet, mert a növekvő hőmérséklet által okozott egyre intenzívebb buborékképződés a benyomódás hatását tompítja, lerontja.



11. ábra. Az átlagos lézerteljesítmény hatása a benyomódásra

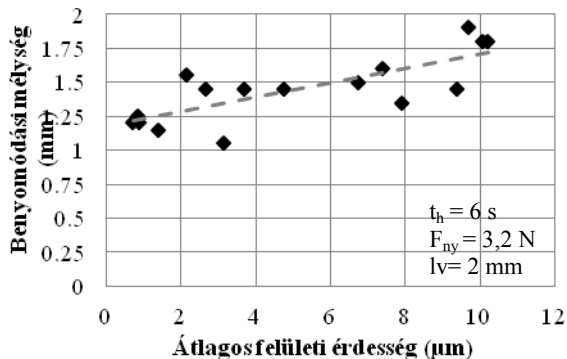


12. ábra. Az átlagos lézerteljesítmény hatása a legnagyobb szakítóerőre

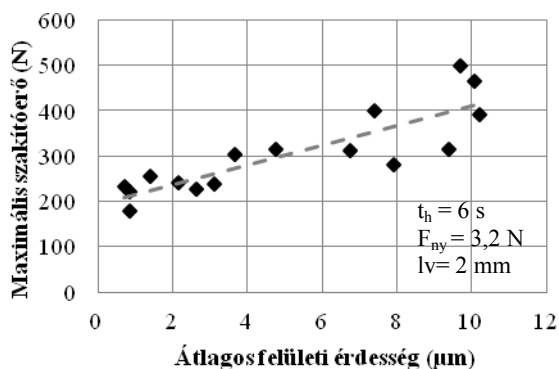
### 3.3. Az érdesség hatása

A 13. ábrán a felületi érdesség hatását mutatjuk be a benyomódásra és a 14. ábrán pedig a maximális szakítóerőre. A hevítési idő  $t_h=6$  s volt, hogy megfelelően mély benyomódást érzünk el, és a palástfelület is részt tudjon venni a kötésben. Látható, hogy a felületi érdesség növelésével nő a benyomódás és a szakítóerő is; a szakítóerő értéke  $R_a=1$   $\mu\text{m}$  helyett  $R_a=10$   $\mu\text{m}$  érdesség alkalmazása esetén 200 N-ról 400 N-ra, a kétszeresére nőtt. A növekvő benyomódás oka, hogy a nagyobb érdességű homlokfelület a lézerteljesítmény jobban hatásként nyeli el, így azonos hevítési idő esetén is jobban felhevül az acél és nő a benyomódás. A növekvő szakítóerő oka egyrészt a nagyobb benyomódásból adódó nagyobb kontaktfelület, másrészt pedig a mélyebb barázdák a palástfelületen. A

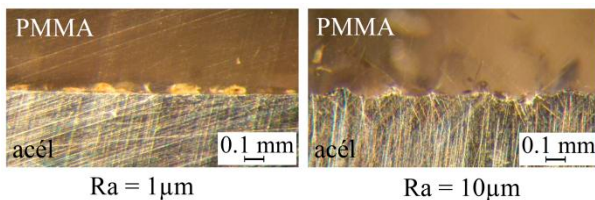
meglágyult műanyag felveszi a fémcsap alakját, az érdességi csúcsokat körbefolyja, így alakzárás jön létre a palástfelületen. Minél nagyobb az érdesség, vagyis a csúcsok mérete, annál erősebb az alakzáró hatás. A kötések metszetét  $Ra=1\ \mu\text{m}$  és  $Ra=10\ \mu\text{m}$  érdesség esetén a 15. ábra mutatja be.



13. ábra. Az átlagos érdesség hatása a benyomódásra



14. ábra. Az átlagos érdesség hatása a szakítóerőre



15. ábra. A kötések keresztmetszete eltérő érdességek mellett

#### 4. ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkben bemutatásra kerültek a főbb tényezők hatásai a kötés jellemzőire, úgy mint a benyomódás és a maximális szakítóerő, és leírtuk a kötést kísérő buborékosodás jelenségét, és annak hatását a kötés szilárdságára. Az eredményeinkből az alábbi következtetések vonhatók le:

- A lézerrel segített kötés acél és PMMA műanyag között létrehozható;
- A hevítési idő és az átlagteljesítmény növelésével a benyomódás és a maximális szakítóerő növelhető, de csak egy adott értékig,

további hevítési időnövelés a szakítóerőt csökkenti;

- A kötés létrejötte során buborékképződés figyelhető meg, melynek intenzitása a hevítési idő és az átlagteljesítmény növelésével nő. A buborékok anyaghibaként gyengítik a létrejött kötést, de a buborékok mennyisége az alkalmazott nyomóerő növelésével csökkenthető. A buborékok kötésgyengítő hatása elsősorban a csap homlokfelületén jelentkezik;
- A lemezzvastagság növelésével a kötés szilárdsága növelhető, mert a lemez merevsége megnő;
- A lézerteljesítmény hatása a hevítési idő hatásához hasonló: a teljesítmény növelésével a benyomódás és a szakítóerő is nő, de a kötésszilárdságot a fokozódó buborékképződés lerontja;
- A szakítóerő a felületi érdesség növelésével hatékonyan javítható, a javuló lézersugár-elnyelő képességgel és az érdességi csúcsok miatt kialakuló alakzárással magyarázható.

#### 5. IRODALOM

- [1] Jens HOLTkamp, Andreas ROESNER, Arnold GILLNER: *Advances in hybrid laser joining*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2010) 47: 923–930
- [2] Andreas ROESNER, Sven SCHEIK, Alexander OLOWINSKY, Arnold GILLNER, Uwe REISGEN, Markus SCHLESER: *Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids*, Physics Procedia 12 (2011) 373–380
- [3] Tamás MARKOVITS, Andor BAUERNHUBER, Márton GÉCZY: *Investigating the shape locking phenomenon in case of LAMP joining technology*, Physics Procedia 39 (2012) 100 – 107
- [4] A. FORTUNATO, G. CUCCOLINI, A. ASCARI, L. ORAZI, G. CAMPANA, G. TANI: *Hybrid metal-plastic joining by means of laser*, International Journal of Mater Forming (2010), Vol. 3 Suppl 1:1131 – 1134, Springer-Verlag France 2010
- [5] G. W. EHRENSTEIN: *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*, Karl Hanser Verlag, München, 2004
- [6] Seiji KATAYAMA, Yousuke KAWAHITO: *Laser direct joining of metal and plastic*, Scripta Materialia 59 (2008) 1247–125