

TUDOMÁNY, MODERN VILÁG
ÉS FUNDAMENTUMOK

ACTA PERIODICA



EDUTUS
EGYETEM

XIX. KÖTET

Edutus Egyetem
2800 Tatabánya, Stúdium tér 1.

Főszerkesztő:
Némethné Dr. Gál Andrea

Felelős szerkesztő:
Forrai Márta

Szerkesztette:
Vigh László PhD

MINDEN JOG FENNTARTVA

A mű egészének, vagy bármely részének másolása, sokszorosítása,
valamint információszolgáltató rendszerben történő tárolása
és továbbítása csak a kiadó engedélyével megengedett

Lektorált

ACTA PERIODICA 19. KÖTET

EDUTUS EGYETEM KIADÁSA

www.edutus.hu

ISSN 2063-501X

2020. február

Tartalomjegyzék

NYOMTATOTT POLIMEREK ANYAGJELLEMZŐI: STATIKUS HATÁRÁLLAPOTTÓL A KIFÁRADÁSI JELLEMZŐKIG BORBÁS LAJOS PhD – FICZERE PÉTER PhD	4
E-MOBILTÁS: MÁSKÉNT SZOLÁR MOBILITÁSI BESZÁMOLÓ A NAPCSIGA KÉT ESZTENDEJÉRŐL DÓRY ISTVÁN PhD	20
BUENOS AIRES, A TANGÓ VÁROSA - IDEGENVEZETŐI SZEMMEL DR. KESZTHELYI CSABA	41
FUVAROZÓI KIVÁLASZTÁS RENDSZERLOGISZTIKAI MODELLJE LÁNYI MÁRTON	49
OKTATÁS MÓDSZERTANI KIHÍVÁSOK ÉS KORSZERŰ HAZAI, KÜLFÖLDI MEGOLDÁSOK A FELSŐOKTATÁSBAN – EGY HAZAI REGIONÁLIS INTÉZMÉNY PÉLDÁJA DR. PEREDY ZOLTÁN	59
AZ ACÉL-POLIMER KÖTÉS AZ ALAGÚT VÉGÉN EREDMÉNYEK A FÉM-POLIMER HIBRID SZERKEZETEK LÉZERSUGARAS KÖTÉSTECHNOLÓGIÁJÁNAK KUTATÁSÁBAN TEMESI TAMÁS – MOLNÁR LÁSZLÓ – CSISZÉR TAMÁS PhD	86
NAPKOLLEKTOROS RENDSZEREK ENERGIAHOZAMÁT BEFOLYÁSOLÓ PARAMÉTEREK VIZSGÁLATA VARGA ZOLTÁN	99

**AZ ACÉL-POLIMER KÖTÉS AZ ALAGÚT VÉGÉN
EREDMÉNYEK A FÉM-POLIMER HIBRID SZERKEZETEK LÉZERSUGARAS
KÖTÉSTECHNOLÓGIÁJÁNAK KUTATÁSÁBAN**

**THE STEEL-POLYMER JOINT AT THE END OF THE TUNNEL – RESULTS OF RESEARCH IN THE
JOINING OF METAL-POLYMER HYBRID STRUCTURES WITH A LASER BEAM**

TEMESI TAMÁS, PhD hallgató

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Polimertechnika Tanszék

temesit@pt.bme.hu

MOLNÁR LÁSZLÓ, mérnökstanár

EDUTUS Egyetem

molnar.laszlo@edutus.hu

CSISZÉR TAMÁS PhD, adjunktus

Óbudai Egyetem, Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar

csiszer.tamas@rkk.uni-obuda.hu

Absztrakt

Jelen cikkünkben röviden bemutatjuk a lézersugaras hegesztési technológia alkalmazhatóságát fém és polimer anyagok közötti kötések kialakítására. Kapcsolódó kísérleteinkben $2^2 \times 3^2$ teljes faktoriális típusú kísérletterv alapján szerkezeti acél és erősítetlen, valamint cellulózzsálakkal erősített poli(metil-metakrilát) (PMMA) anyagok között hoztunk létre átlapolt kötések lézersugaras hegesztéssel, amelyeket nyomóvizsgálatok segítségével minősítettünk. Optikai mikroszkópos vizsgálatokkal meghatároztuk a kötésben részt vevő felületek nagyságát, ezek alapján meghatároztuk a kötések nyomószilárdságát, valamint statisztikai kiértékelési módszerek segítségével a szilárdságot szignifikánsan befolyásoló folyamatparamétereket és azok ideális értékeit is.

Abstract

In this article, we briefly summarize the applicability of laser welding in joining metal and polymer materials. In relevant experiments using a $2^2 \times 3^2$ full factorial-type design of experiment, we manufactured overlapped joints between stainless steel and unreinforced, as well as cellulose fibre-reinforced poly(methyl methacrylate) (PMMA) specimens with laser welding. We quantified the mechanical properties of these specimens with compression tests and also used an optical microscope to quantify the size of the joining surfaces. Thus, by using statistical evaluation methods, we were able to determine the compressive strength of the joints as well as the process parameters (and their ideal values) that significantly influenced joint strength using statistical evaluation methods.

1. Lézersugaras hegesztés és alkalmazhatósága fém-polimer kötések létrehozására

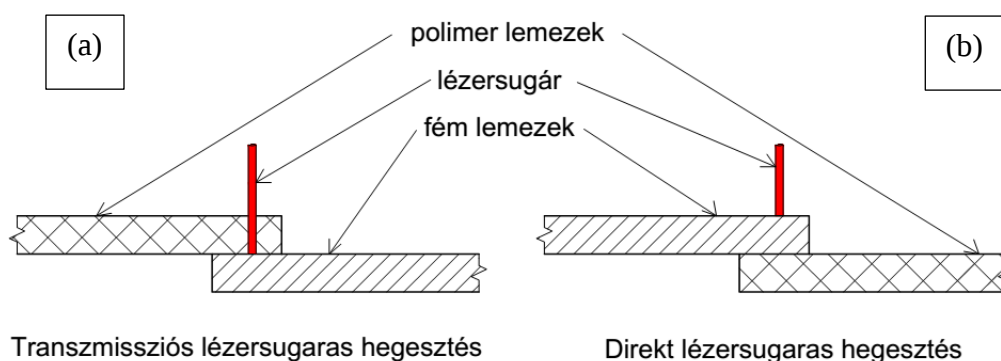
A járműipar egyik fontos célja a költségcsökkentés, mind a gyártási folyamatok, mind a jármű használata során. Erre az egyik legegyszerűbb módszer a kis sűrűségű anyagok, például polimerek és polimer kompozitok használata, amelyekkel a jármű életciklusa során üzemanyag-megtakarítás érhető el, továbbá a kibocsátott környezetkárosító anyagok mennyisége is csökkenthető [1, 2].

A polimer anyagból készült alkatrészek fémből készült szerkezetekhez (pl. vázelemekhez) történő hozzákapcsolásának módjai és technológiái az elmúlt években kerültek a kutatások fókuszpontjába. Kiemelt figyelem övezi azon technológiákat, amelyekkel közvetítő anyag (pl. ragasztóanyag vagy standard kötőelemek) felhasználása nélkül, akár tömegtermelés keretein belül (kis ciklusidővel, automatizált módon) lehetséges fém és polimer anyagok között kötések kialakítása. A műanyagok összekötésére jelenleg is elterjedten alkalmazott hegesztési eljárások (dörzs-, ultrahang-, illetve lézersugaras hegesztés) ilyen célra is alkalmazhatók, amit számos publikáció is bizonyít [1, 3-7]. Ezen technológiák közül is kiemelkedik a lézersugaras hegesztés, mivel jól automatizálható és érintésmentes, segítségével akár több anyagréteg egyidejű, tömör, feszültségmentes összekötése is megvalósítható, továbbá a kötési folyamat során hőfejlődés csak a varrat közvetlen közelében történik, ezáltal a hegesztett anyagok nagymértékű termikus degradációja is elkerülhető. A lézerhegesztési technológia hátrányai közé tartozik, hogy a berendezés drága és üzemeltetése során szigorúan be kell tartani a hatályos biztonsági intézkedéseket (személyi védelem, védőszemüveg használata). A lézersugaras hegesztés csak akkor alkalmazható alkatrészek összekötésére, ha azok közül valamelyik anyag a lézersugárzást képes elnyelni és az alkatrészek megfelelő egymáshoz rögzítése (összenyomása) a teljes folyamat során fenntartható [8].

Fém és polimer közötti kötések lézersugaras hegesztéssel (Laser-Assisted Metal-Polymer, vagy LAMP technológiával) történő létrehozása során a kötési folyamat paraméterei mellett a kötészilárdságra jelentős hatással van a fém alkatrész felületi előkészítése [7], valamint a fém és polimer összeférhetőségének mértéke is, hiszen a műanyagok és a fémek jelentős mértékben különböznek egymástól mind fizikai, mind kémiai szerkezetüket tekintve. Emiatt a létrehozott kötés az esetek túlnyomó többségében adhéziós, a megömlesztett állapotba hozott polimer és a fém felületi rétege között létrejövő másodlagos kötéseken alapul [8, 9]. A létrehozott kötés teherbírását jelentős mértékben befolyásolja továbbá a polimer láncainak szerkezete, konformációja, kapcsolatrendszere [10], valamint a polimerben visszamaradt monomer-maradékok és segédanyagok típusa és mennyisége [11]. A megfelelő folyamatparaméterek

alkalmazásával azonban az adhéziós kapcsolat a fém és polimer anyagok között akár erősebb lehet a polimer anyag kohéziójánál is [12].

Fém és polimer anyagok között lézersugaras hegesztéssel kétféle módon hozható létre kötés: ún. transzmissziós hegesztéssel, valamint ún. direkt lézersugaras hegesztéssel (1. ábra) [8, 13]. A transzmissziós hegesztési (közvetett ráolvasztási) eljárás lényege, hogy a polimer komponens a lézersugárzás szempontjából „átlátszó”, vagyis a jellemzően közeli infravörös sugárzás tartományába (800-1500 nm) eső lézersugarak energiájának nagy részét (elhajlás nélkül vagy szóródás útján) átterjeszti. Amennyiben egy ilyen „átlátszó” polimer test alá fém alkatrészt helyezünk el, a lézersugárzás a fém alkatrészben nyelődik el, alakul hővé. A keletkezett hő hővezetéssel és hőátadással jut el a polimer alkatrészhez, amely megömlesztett állapotba kerül, ráolvad a fém alkatrész felületére, befolyik a fém felületén található felületi struktúrákba (emiat van kiemelt szerepe a fémek felületi előkészítésének fém-polimer kötések létrehozása esetén) [8, 9, 11, 13].



1. ábra Transzmissziós lézersugaras hegesztési (a), illetve direkt lézersugaras hegesztési (b) módszerek sematikus ábrája

Az ún. direkt lézersugaras hegesztést akkor érdemes fém-polimer kötés létrehozása során alkalmazni, ha a polimer anyag a lézersugárzás szempontjából nem, vagy csak kis mértékben átlátszó (pl. töltő-, színező-, adalék-, vagy erősítőanyagok alkalmazása, vagy a polimer szerkezeti felépítése miatt), illetve ha az anyag degradációra hajlamos (a lézersugárzásra érzékeny). Direkt lézersugaras hegesztés során a lézersugárzás közvetlenül a fém alkatrésszel érintkezik, a polimer anyaggal nem lép kölcsönhatásba [8, 9, 11, 13].

Kutatásunk tárgya biobázisú társító anyaggal erősített műanyag (cellulóz szálakkal töltött PMMA) és szerkezeti acél lézersugaras technológiával történő összekötése és a kötések mechanikai vizsgálata. Korábbi kutatásunk során már azonosítottuk azokat a technológiai

paramétereket, amelyek jelentős hatással voltak a kötés megfelelőségére. Jelen publikációban bemutatjuk kísérleti terveinket, a kötések létrehozása, valamint vizsgálata során alkalmazott módszereket, a technológiai paraméterek optimális értékeit, valamint a kötések mechanikai vizsgálata során elért eredményeket.

2. Alkalmazott anyagok, berendezések és módszerek

Kísérleteink során szerkezeti acél és kétféle típusú poli(metil-metakrilát) (PMMA) anyag között hoztunk létre átlapolt kötések lézersugaras hegesztési technológia alkalmazásával. Célunk volt emellett, hogy megvizsgáljuk biobázisú erősítőanyag (cellulózszálak) hatását a kötések létrehozhatóságára és mechanikai, valamint optikai tulajdonságaira, ezért mindkét PMMA alapanyagból készítettünk 1 tömegszázalék cellulózszállal erősített próbatesteket is. Az 1 tömegszázalékos értéket előkísérleti eredményeink ([9]) alapján határoztuk meg. Az alkalmazott anyagok legfontosabb paramétereit az alábbiakban foglaljuk össze.

Fém próbatestek: A kötés létrehozásához felhasznált acél próbatestek S235JR típusú, 0,8 mm vastag szerkezeti acéllemezből kerültek kivágásra lézersugaras technológiával. A próbatestek hossza 30 mm, szélessége 10 mm volt.

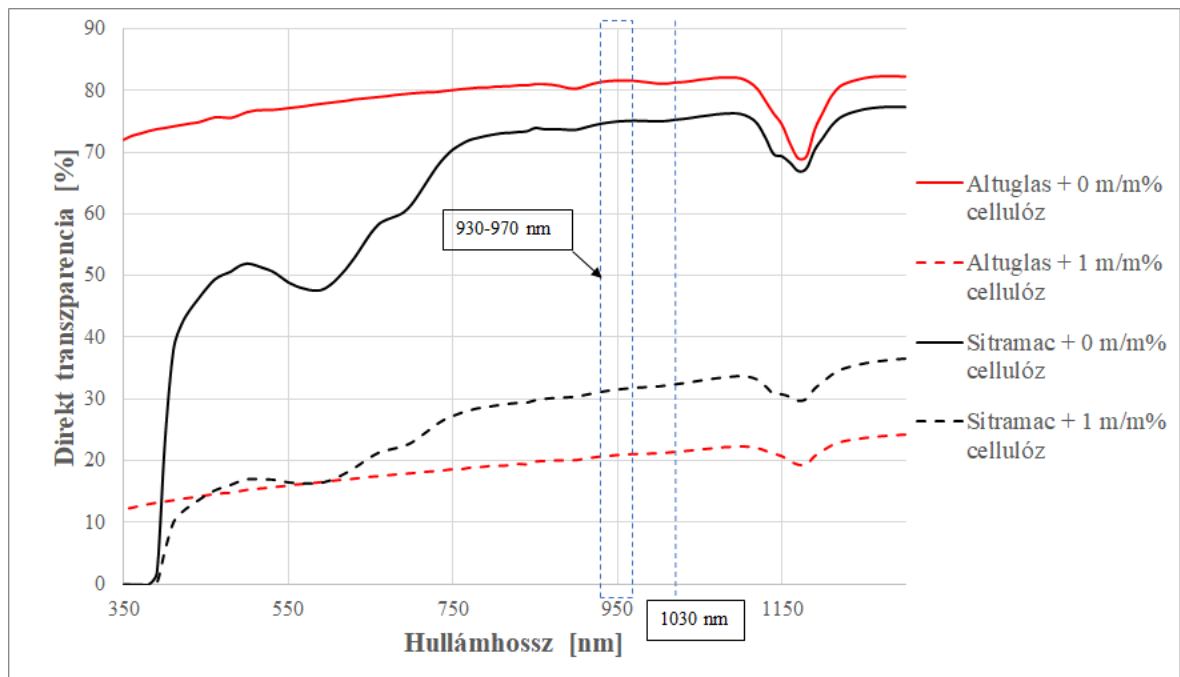
Polimer próbatestek: Előkísérleteink alapján kétféle PMMA (Sitraplas Sitramac, illetve Resinex Altuglas VS-UVT) alapanyagból, kompaundálással és fröccsöntéssel (mindkét technológiai lépés alkalmazása előtt a polimer anyagot 80°C-on, 8 órán keresztül szárítottuk) készítettünk 80x80x2 mm befoglaló méretű, ún. lapka próbatesteket kísérleteinkhez. Ezekből lézersugaras technológiával 80x10x2 mm befoglaló méretű próbatesteket vágunk ki a kötések létrehozásához.

Erősítőanyag: Kísérleteinkhez kompaundálással, majd fröccsöntéssel előállítottunk 1 tömegszázalék cellulózszállal erősített polimer kompozit próbatesteket is. Ezekhez a J. Rettenmeier & Söhne GmbH Arbocel B600 típusú termékét használtuk fel. A kompaundálás előtt a cellulózszálakat a gyártó előírásának megfelelően 8 órán át 80 °C-ra felfűtött szárítószekrényben szárítottuk ki.

Az átlapolt kötések létrehozásához kétféle lézersugaras hegesztési módszert (ún. transzmissziós lézersugaras hegesztés, valamint ún. direkt lézersugaras hegesztést, 1. ábra), valamint kétféle lézersugaras hegesztőberendezést használtunk. A kötések létrehozása előtt mind az acél, mind a polimer próbatestek felületét metanolba áztatott kendővel töröltük át. A transzmissziós lézersugaras hegesztés során a polimer próbatestet az acél próbatest tetejére

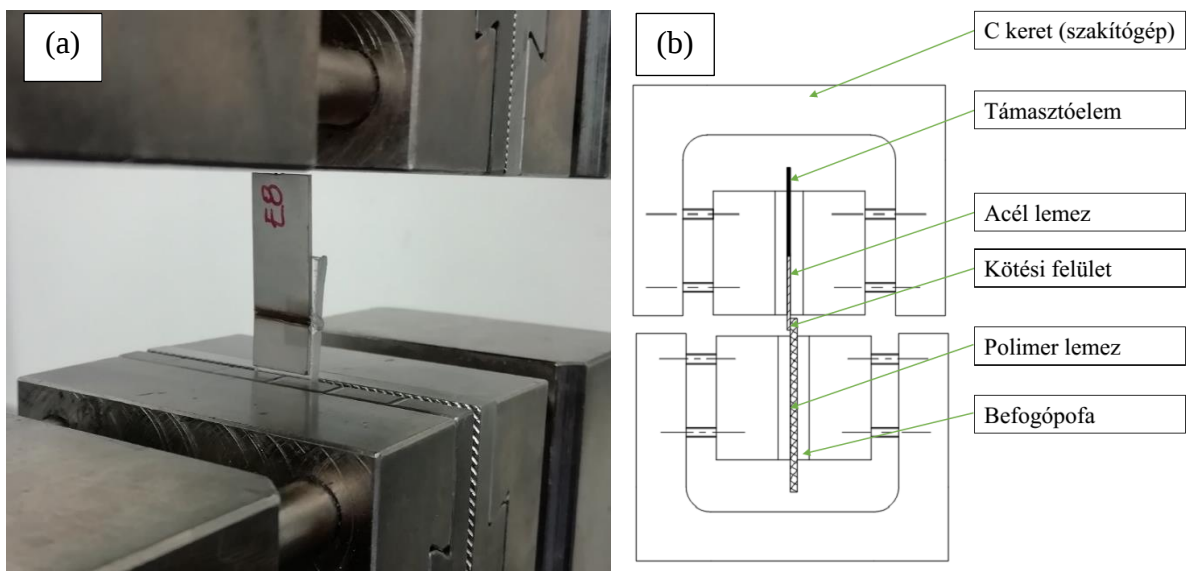
helyeztük, majd megfelelően összeszorítottuk őket. A transzmissziós hegesztéseket egy 150 W maximális teljesítményű, Trumpf TruDiode 151 típusú diódalézeren végeztük el. A direkt lézersugaras hegesztések során a polimer próbatestek tetejére helyeztük az acél próbatesteket, majd megfelelően összeszorítottuk őket. A direkt lézersugaras hegesztés esetén a lézersugár közvetlenül az acél próbatesttel kerül kapcsolatba, a polimer próbatesten nem halad át. Ezeket a kötéseket egy Trump TruLaser Cell 7020 CNC cellában elhelyezett, 4000 W maximális teljesítményű, Trumpf TruDisk 4001 típusú Yb:YAG szilárdtestlézer felhasználásával hoztuk létre. A kötéseket vonalmenti hegesztéssel hoztuk létre úgy, hogy a lézersugár háromszor, ugyanazon vonal mentén végighaladva sugározta be a próbatesteket. A hegesztési sebességet mindkét módszer esetén 1 m/perc értékre állítottuk be, hogy az elkészített kötések a lehető legnagyobb mértékben összehasonlíthatók legyenek.

Az elkészített, erősítetlen, valamint 1 tömegszázalék cellulózzal erősített próbatestek átlátszóságát (a besugárzó fény hullámhosszától függő transzparenciáját) egy Perkin-Elmer Lambda 1050 típusú spektrofotométer segítségével határoztuk meg (2. ábra). A vizsgálati eredmények alapján kijelenthető, hogy már 1 tömegszázalék cellulózzal bekeverésével is jelentősen romlik a polimer próbatestek átlátszósága (kb. 80%-ról kb. 25%-ra). Ez a transzmissziós hegesztés során jelentős problémákat okoz: a kevésbé átlátszó próbatestek a lézersugárzás energiájának nagyobb részét nyelik el, ami a polimer anyag degradációját okozhatja, valamint a kötés kialakulását is megakadályozhatja. Ennek figyelembevételével a transzmissziós hegesztési kísérleteket kisebb lézersugár-teljesítmény értékek beállításával végeztük el (lásd 2.1. fejezet), amellyel egyben a tartós, szilárd kötés létrehozásához szükséges minimális lézersugárzás teljesítmény értékét is meg tudtuk határozni.

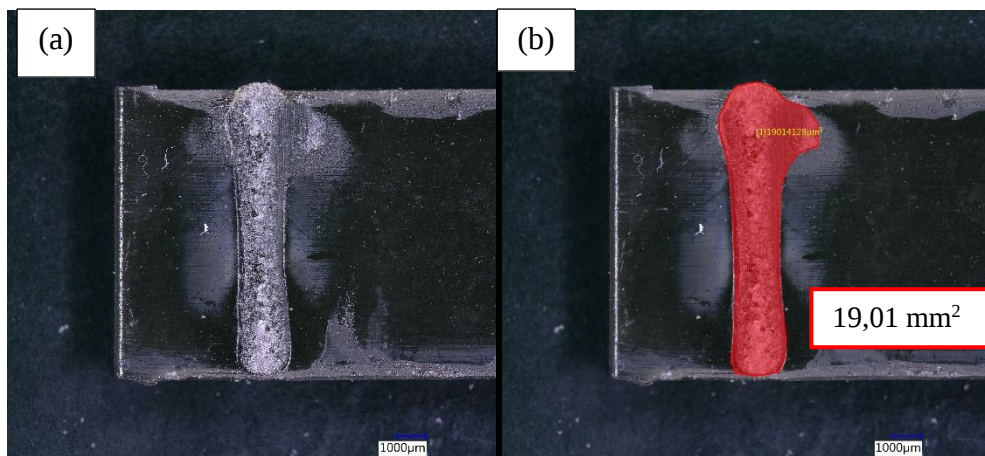


2. ábra A felhasznált erősítetlen és cellulózzal erősített PMMA alapanyagok átlátszósága a megvilágító fény hullámhosszának függvényében, és az alkalmazott lézerek hullámhosszai

Az elkészített kötéseket egy Zwick Z005 típusú univerzális szakítógépen nyomóterheléssel (nyíróvizsgálatokkal) minősítettük (3. ábra). Mivel előkísérleteink alapján az acél-PMMA kötések ridegen viselkednek, ezért a vizsgálati sebességet 1 mm/perc értékre állítottuk be. A kötéseket tönkremenetelig terheltük, majd a polimer próbatestek kötésben részt vett felületéről Keyence VHX-5000 típusú optikai mikroszkóp segítségével fényképeket készítettünk, valamint az optikai mikroszkóp szoftverével számszerűsítettük a kötésben részt vett felületek nagyságát is (egy példa a 4. ábrán látható).



3. ábra Kötések nyomóvizsgálata: a próbatest befogása (a), valamint a befogás elrendezéséről készített nem méretarányos oldalnézeti magyarázó ábra (b)



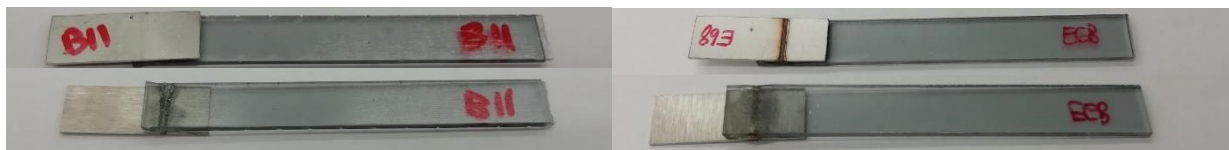
4. ábra Optikai mikroszkópi kép egy PMMA próbatest kötési felületéről a kötés tönkremenetele után (a), valamint a kötési felület nagyságának meghatározása az optikai mikroszkóp szoftverének segítségével (b)

2.1. Kísérleti terv

Kísérleteinket $2^2 \times 3^2$ teljes faktoriális típusú kísérletterv alapján végeztük el. Előkísérleteink alapján a kötések mechanikai tulajdonságait az alkalmazott módszeren (transzmissziós vagy direkt lézersugaras hegesztés) kívül a polimer típusa, az erősítőszál-tartalom, valamint a lézersugárzás teljesítménye befolyásolja. Kísérleti úton meghatároztuk ezen folyamatparaméterek felhasználásával kialakítható technológiai ablakot, valamint a létrehozott kötések szubjektív vizsgálata (szilárdság, esztétika) alapján ideálisnak tűnő folyamatparaméter-értékeket (1. táblázat). Paraméterkombinációként 10-10 acél-polimer kötést hoztunk létre (5. ábra).

	Paraméter értéke		
Lézersugárzás teljesítménye [W]			
Transzmissziós hegesztés (C3)	110	130	150
Direkt hegesztés (C2)	210	230	250
Polimer anyag	Sitramac		Altuglas VS-UVT
Erősítőanyag tömegszázalékos mennyisége	0		1

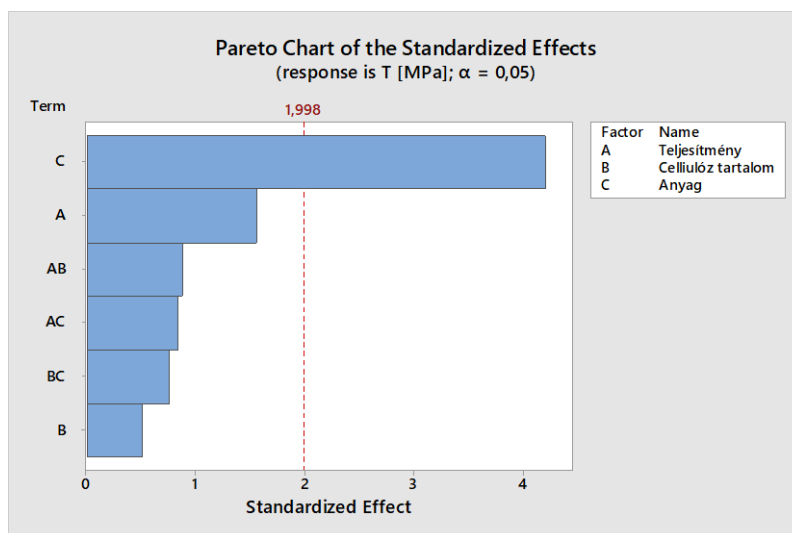
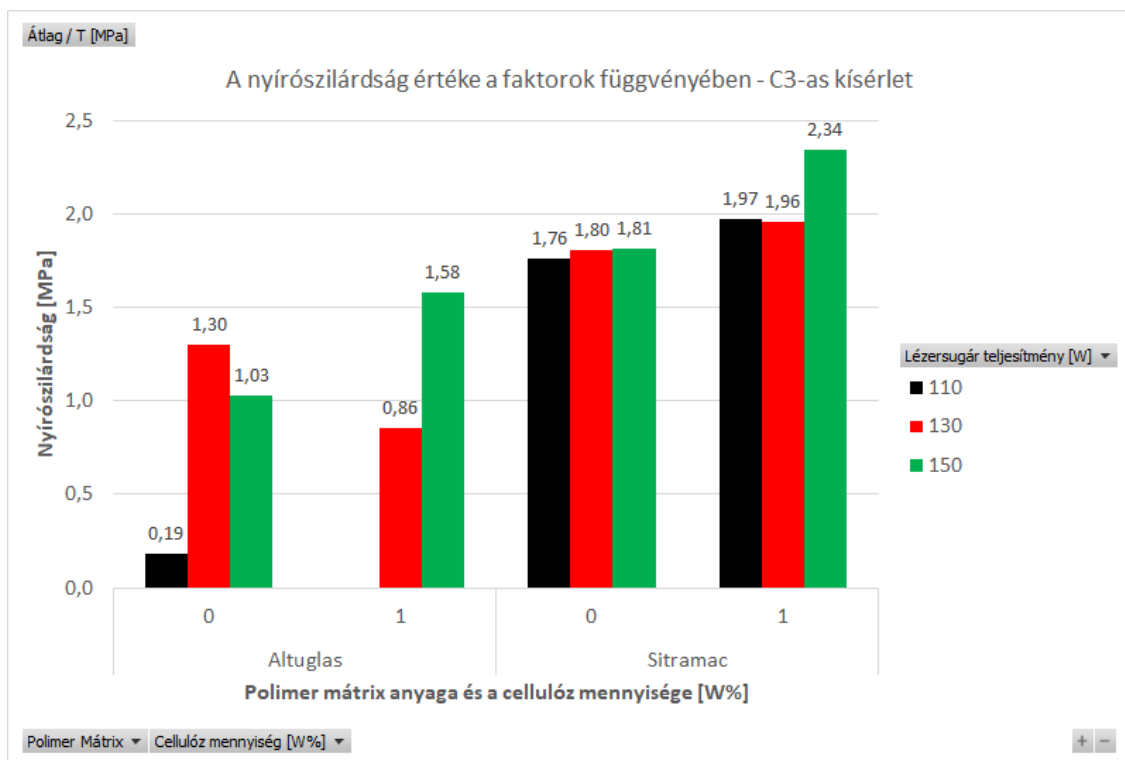
1. táblázat Acél-PMMA kötések lézersugaras hegesztéssel történő létrehozása során alkalmazott (folyamat)paraméter-értékek



5. ábra Acél és erősítetlen Sitramac PMMA között transzmissziós lézersugaras hegesztéssel (bal oldalon), valamint direkt lézersugaras hegesztéssel (jobb oldalon) létrehozott kötések

3. Kísérleti eredmények, konklúziók

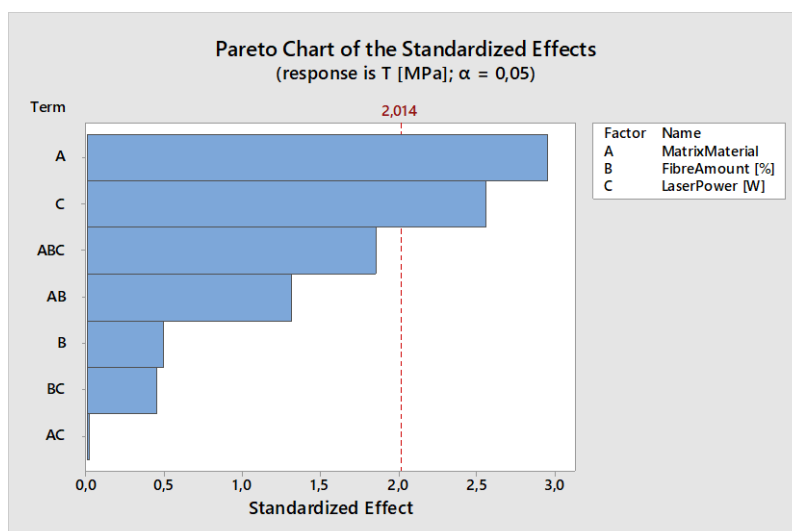
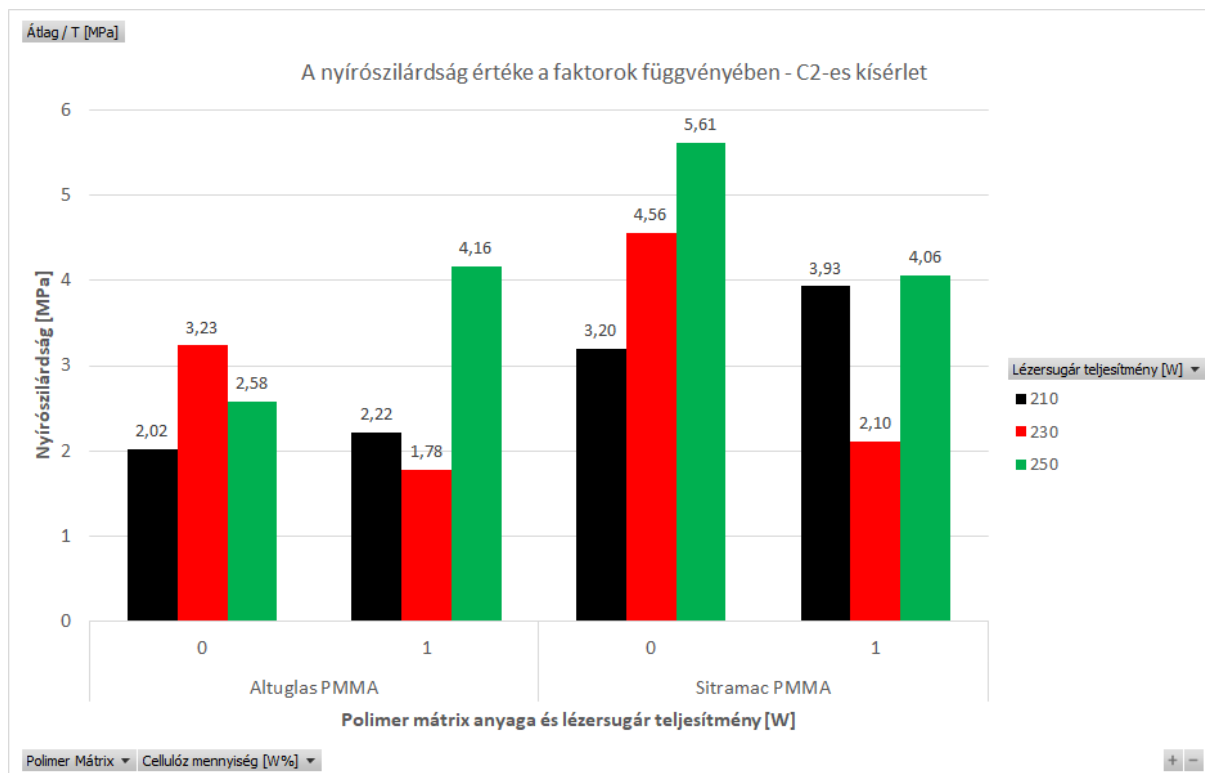
A transzmissziós lézersugaras hegesztéssel létrehozott kötések („C3-as kísérlet”) nyomóvizsgálati eredményeinek kiértékelése során megfigyeltük, hogy a lézersugárzás teljesítményének növelésével kis mértékben nőtt a kialakított kötések átlagos nyírószilárdsága (6. ábra). A mérési eredmények statisztikai kiértékelése (ANOVA) alapján 95 százalékos szignifikancia szinten nem jelenthető ki, hogy a kötés szilárdságára a polimer anyag típusán kívül bármely más paraméter vagy paraméterkombináció (így a lézerteljesítmény vagy a cellulózsál erősítőanyag mennyisége) szignifikáns hatással van. Méréseink alapján transzmissziós hegesztési módszer esetén a Sitramac anyag és 150 W lézerteljesítmény használata javasolt, annak ellenére, hogy a transzparenciavizsgálatok során rendre a Sitramac anyag bizonyult kevésbé átlátszónak, ezáltal transzmissziós hegesztési szempontból (látszólag) rosszabb választásnak.



6. ábra Transzmissziós hegesztéssel előállított acél-PMMA kötések nyírószilárdsági értékei (fent) és a nyírószilárdságra szignifikáns hatással lévő paraméterek meghatározásához felhasznált Pareto-diagram (lent)

A direkt lézersugaras hegesztési technológiával készített kötések („C2-es kísérlet”) vizsgálati eredményeinek kiértékelése során még az előző esethez hasonló trend sem mutatkozott: a lézersugárzás teljesítményének növelése nem minden esetben okozta a kötésszilárdság értékének monoton növekedését (7. ábra). A mérési eredmények statisztikai kiértékelése (ANOVA) alapján 95 százalékos szignifikancia szinten nem jelenthető ki, hogy a lézersugárzás teljesítményén és a polimer anyag típusán kívül egyéb paraméter vagy paraméter kombináció szignifikáns hatással volt a kötés nyírószilárdságára. Ez esetben szintén azt a

következtetést vonhatjuk le, hogy a legnagyobb kötésszilárdság eléréséhez a lehető legnagyobb teljesítménnyel (250 W) és a Sitramac anyag felhasználásával érdemes dolgozni.



7. ábra Direkt lézersugaras hegesztéssel előállított acél-PMMA kötések nyírószilárdsági értékei (fent) és a nyírószilárdságra szignifikáns hatással lévő paraméterek meghatározásához felhasznált Pareto-diagram (lent)

4. Összegzés

Méréseink alapján acél-PMMA kötés létrehozható lézersugaras hegesztéssel, mind transzmissziós, mind direkt lézersugaras hegesztési módszerrel, már akár 130 W lézerteljesítménnyel is, azonban kísérleteink alapján a 250 W lézerteljesítménnyel és direkt lézersugaras hegesztéssel készített próbatestek nyírószilárdsága volt a legnagyobb. A cellulózsálak már 1 tömegszázalék mennyiségben adagolva is jelentősen rontják a polimer anyag transzparenciáját, miközben nem befolyásolják szignifikánsan a kötések szilárdságát egyik hegesztési módszer és alapanyag esetén sem. A létrehozott kötések rideg viselkedést mutattak, valamint a direkt lézersugaras hegesztés során a lézersugár nyomot hagyott a fém felületén, amely esztétikai problémákat okozhat.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás az EFOP 3.6.1-16-2016-00009: „Lézertechnológiai és energetikai alapkutatás megvalósítása az Edutus Főiskolán, tudástranszfer, továbbá a vállalati kapcsolatok és a társadalmi szerepvállalás erősítését célzó tevékenységekkel kiegészítve” c. projekt támogatásával valósult meg. A szerzők köszönik az Edutus Egyetem munkatársainak a lézersugaras hegesztéssel történő kötések kialakítása, valamint Beleznai Szabolcs adjunktusnak a transzparenciavizsgálatok során nyújtott segítségét.

Felhasznált irodalom

- [1] Hirsch J.: Recent development in aluminium for automotive applications. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, **24**, 1995-2002 (2014).
- [2] Zhou J., Wan X., Li Y.: Advanced aluminium products and manufacturing technologies applied on vehicles presented at the eurocarbody conference. Materials Today: Proceedings, **2**, 5015-5022 (2015).
- [3] Jung K.-W., Kawahito Y., Takahashi M., Katayama S.: Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. Materials & Design, **47**, 179-188 (2013).
- [4] Jung K.-W., Kawahito Y., Takahashi M., Katayama S.: Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to aluminum alloy. Journal of Laser Applications, **25**, 032003 (2013).
- [5] Farazila Y., Miyashita Y., Hua W., Mutoh Y., Otsuka Y.: Yag laser spot welding of pet and metallic materials. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, **6**, 69-74 (2011).
- [6] Borrisutthekul R., Saengsai A., Mitsomwang P.: Dissimilar materials laser welding between stainless steel 304 and thermoplastics. Key Engineering Materials, **719**, 142-148 (2016).
- [7] Rodríguez-Vidal E., Sanz C., Lambarri J., Renard J., Gantchenko V.: Laser joining of different polymer-metal configurations: Analysis of mechanical performance and failure mechanisms. Physics Procedia, **83**, 1110-1117 (2016).
- [8] Amancio-Filho S. T., Blaga L.: Joining of polymer-metal hybrid structures - principles and applications. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, United States of America (2018).
- [9] Csiszér Tamás, Molnár László, Temesi Tamás: A (monokromatikus) fény az alagút végén. Részeredmények a fém-polimer hibrid szerkezetek lézersugaras kötéstechológiájában. Acta Periodica, 15. kötet; Felkészülés az új évtizedre: a technológia és a gazdaság új kihívásai, p. 75-85 (2018).
- [10] Cheon J. et al.: Relation of joint strength and polymer molecular structure in laser assisted metal and polymer joining. Science and Technology of Welding and Joining, Volume 19, Issue 8. 2014, pages 631-637.
- [11] Buza G. et.al: Műanyagok és fémek lézer hatására történő közvetlen összekapcsolásának (direct joining) lehetőségei az autóiparban. Gépgyártás, LV. Évfolyam, 2015.1. szám.
- [12] Rauschenberger J. et al.: Laser hybrid joining of plastic and metal components for lightweight components. From Conference Volume 9356 High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics, and Applications IV Friedhelm Dorsch. San Francisco, California, United States | February 07, 2015.
- [13] Temesi Tamás, Kiss Zoltán, Csiszér Tamás: Korszerű technológiák fém és polimer anyagok közötti kötések kialakítására. Acta Periodica, 15. kötet; Felkészülés az új évtizedre: a technológia és a gazdaság új kihívásai, p. 115-125 (2018).