

Korszerű technológiák fém és polimer anyagok közötti kötések kialakítására

Temesi Tamás¹, Dr. Kiss Zoltán², Dr. Csiszer Tamás^{3,4}

¹ Doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest; temesit@pt.bme.hu

² Adjunktus, Doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest; kiss@pt.bme.hu

³ Adjunktus, Óbudai Egyetem, Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar, Médiatechnológiai és Könnyűipari Intézet, Budapest; csiszer.tamas@rkk.uni-obuda.hu

⁴ Főiskolai docens, Edutus Egyetem, Műszaki Intézet, Tatabánya; csiszer.tamas@edutus.hu

Összefoglaló

Jelen cikk az elmúlt években a tudományos kutatások fókuszpontjába került fém-polimer hibridkötésekről eddig kiadott publikációkat, a hibridkötések létrehozásához alkalmazott legmodernebb technológiákat, a kutatások alapján eddig elért eredményeket foglalja össze. Cikkünkben bemutatunk egy lehetséges módszert a technológiák csoportosítására, majd a lézersugaras hegesztéssel végzett kutatásokban alkalmazott fém és polimer anyagok és felületelőkészítési módszerek, valamint a kötések vizsgálati módszereinek rövid összefoglalása után az ultrahangos hegesztési, valamint az ún. U-LAMP technológiát és ezek alkalmazhatóságát is elemezzük. Végül az irodalomkutatás rövid kritikai elemzésében feltárjuk a fém-polimer hibridkötések létrehozása és vizsgálata során felfedezett legfontosabb hiányosságokat és a tudományterület jövőbeli trendjeit.

Abstract

In this article, we summarize the state-of-the-art in the field of metal-polymer hybrid joining, including published articles and results, and modern joining technologies that can be used to produce hybrid joints. Firstly, we present a possible method of categorization of joining technologies, then we analyse in detail the materials (both metals and polymers), the surface treatment and joint examination methods used in the case of laser-welded hybrid joints. Furthermore, we briefly summarize the ultrasonic welding and U-LAMP methods that can also be used to produce hybrid joints. Lastly, in the critical analysis of the literature research, we present the most important deficiencies found and the future trends of producing and evaluating metal-polymer hybrid joints.

Bevezetés

A járműipar jelenének egyik legfontosabb feladata és célja a költségcsökkentés, mind a gyártási folyamatok, mind a jármű életciklusa, használata során. Az egyik legegyszerűbb módszer a költségcsökkentésre az újszerű, fémekhez képest kisebb sűrűségű anyagok, például polimerek és polimer kompozitok használata. Ezek feldolgozása kisebb energiabefektetéssel is megvalósítható, valamint kisebb sűrűségük, ezáltal kisebb tömegük miatt a jármű életciklusa során üzemanyag-megtakarítás érhető el, továbbá a jármű által kibocsátott környezetkárosító anyagok mennyisége is csökkenthető. Azonban nem minden szerkezeti elem cserélhető le a gépjárművekben polimerből készült alkatrészekre, hiszen ezek mechanikai tulajdonságai még elmaradnak a vázanyagokként jelenleg felhasznált acél és alumínium ötvözetek hasonló értékeitől. A kisebb terhelésnek kitett elemek azonban készülhetnek polimer anyagok felhasználásával, ezek szerkezeti és vázelemekhez történő hozzákapcsolásának, hozzákötésének módjai és technológiái az elmúlt években kerültek a tudományos kutatások fókuszpontjába.

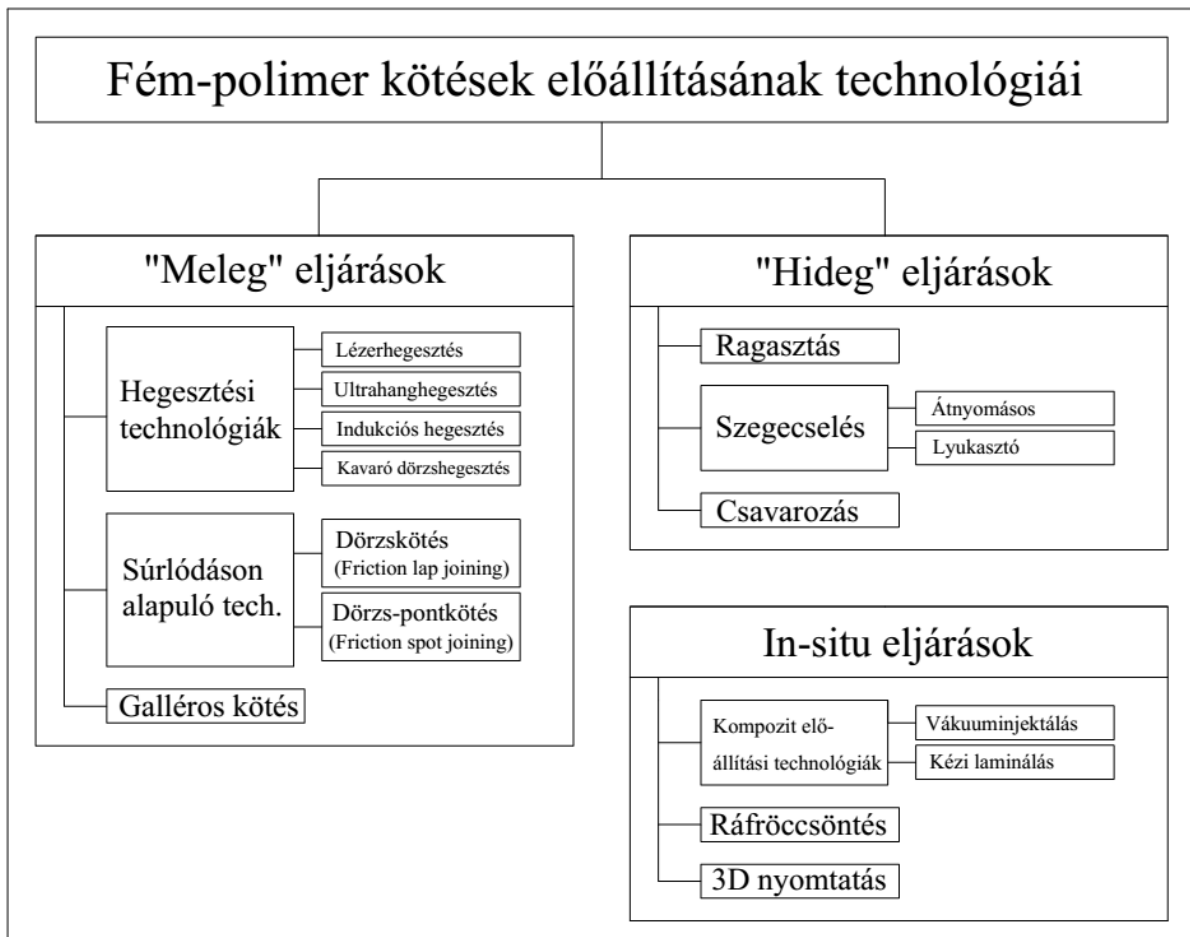
A polimer szerkezeti anyagok térhódításával együtt szükségessé vált a gyors, megbízható és termelékeny polimer kötési technológiák megjelenése is. Az egyre bonyolultabb termékek gyártásához a különböző új kötési lehetőségek kifejlesztése elkerülhetetlen és szükséges követelmény. A nemzetközi szakirodalom egyre nagyobb figyelmet fordít a fém és polimer szerkezeti anyagok összekapcsolására közvetítő anyag, azaz ragasztóanyag felhasználása nélkül. Az elmúlt években EU-s pályázati kiírásokban is megjelent az a kutatási terület, amiben fémek és polimerek között hoznak létre kötést kis ciklusidejű, jól automatizálható műanyaghegesztő eljárásokkal (pl.: dörzs-, lézersugaras-, vagy ultrahanghegesztéssel). Mindegyik eljárásban a polimer anyagot melegítik fel annyira, hogy az képes legyen hozzákötni a fém felületéhez. Az eljárások 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 gyártástechnológiák változását hozhatja el.

Jelen publikációban a fém-polimer kötések létrehozására alkalmas legmodernebb technológiákat, egy lehetséges csoportosítási módszerüket, valamint a kutatók által eddig elért legfontosabb eredményeket, paramétereket, a legfontosabb következtetéseket mutatjuk be.

A technológiák csoportosítása

Ebben a fejezetben a fém-polimer anyagpárok között kialakítható hibridkötésekhez felhasználható technológiákat csoportosítottuk (1. ábra). Ennek alapja a kötés létrehozásakor az összekötendő anyagokba bevitt, vagy a technológiából adódóan azokban keletkező-felszabaduló hőenergia mennyisége: léteznek olyan technológiák, amelyeknél a kötés létrehozásakor bevitt vagy keletkező hő mennyisége elegendő a polimer alkatrészek legalább lokális, részleges vagy teljes megömléséhez, viszkozitásának jelentős csökkentéséhez, illetve akár a kötési zóna környezetében található polimer anyag mikroszerkezetének megváltoztatásához is (jelen felosztásban „meleg technológiák”-nak nevezve). Léteznek továbbá olyan technológiák is, amelyeknél a technológiából adódóan keletkezett vagy bevitt hő mennyisége nem elegendő a polimer alkatrész megömléséhez („hideg eljárások”, az

irodalomban hívják ezeket még „szilárd állapotú / solid state” technológiáknak is). Az in-situ technológiák közé azokat a polimerfeldolgozási technológiákat soroltuk be, amelyeknél a megfelelően előkészített fém alkatrész felületére a feldolgozóberendezésen egy munkaciklus alatt hozható létre a polimer termék. Az alfejezeteken belül az egyes technológiákat az adott témáról gyűjtött szakirodalmi források mennyisége alapján állítottuk sorrendbe.



1. ábra – Fém-polimer kötések előállítási technológiáinak egy lehetséges csoportosítási módja

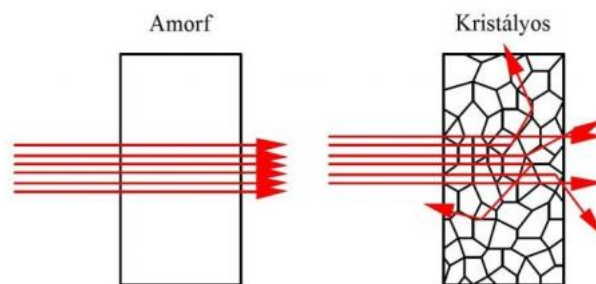
Lézersugaras hegesztés

A fém-polimer kötések létrehozásáról szóló tudományos publikációkat az alkalmazott technológia szerint, az 1. ábrának megfelelő módon soroltuk alcsoportokba. Ennek alapján a legtöbbet kutatott technológia fém-polimer kötések létrehozására a lézersugaras hegesztés volt.

A lézersugaras hegesztést igen elterjedten alkalmazzák ipari körülmények között polimer termékek egyesítésére, mivel igen pontos, jól automatizálható technológia [1]. Alkalmazzák többek között az autóiiparban erősítetlen termoplasztikus anyagok és akár szénszállal erősített, hőre nem lágyuló mátrixú kompozitok hegesztésére [2, 3], orvostechikai eszközök gyártása

során, mivel hermetikusan záró varratok készíthetők lézerhegesztéssel [2, 4-6], csomagolóipari termékek előállításánál [7, 8], az elektronikai iparban [2, 9], és még sok más helyen.

Lézersugaras hegesztés esetén az egyik legfontosabb paraméter a hegesztett anyag szerkezeti felépítése: kristályos rendezettséget mutató területeken (főleg a 10÷100 nm nagyságrendbe eső lamellák, valamint ezek 10÷néhány száz μm mérettartományba eső, szferolitos aggregátumai esetén) a lézersugárzás szóródást szenved, a sugárzás koherenciája és intenzitása csökken az anyag történő áthaladás során (2. ábra) [2, 10].



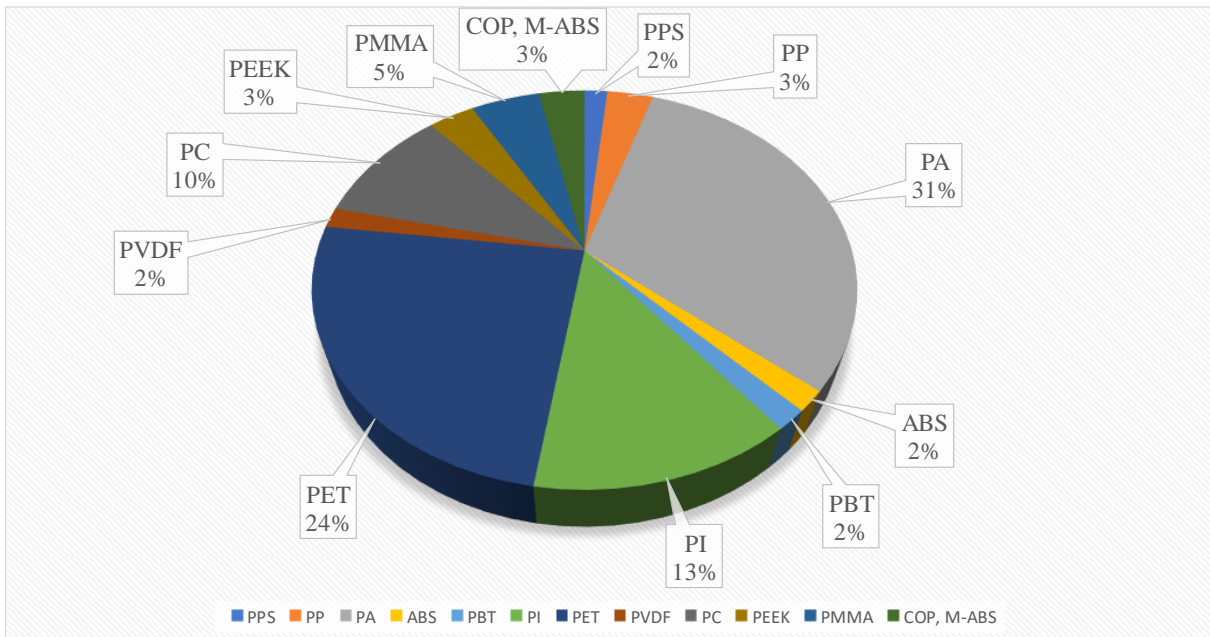
2. ábra – A lézersugárzás szóródásának idealizált modellje különböző szerkezeti felépítésű polimer anyagok esetén [10]

A hegesztett kötés minőségét emellett jelentősen befolyásolják még a hegesztett anyag optikai tulajdonságai, amelyet a makromolekulákat alkotó láncok felépítése mellett a láncokon belüli, illetve a láncok közötti kötések típusa határoz meg. Az optikai tulajdonságok (reflexiók és transzmissziós tényezők) mérésével, spektrofotométer segítségével határozhatók meg, ezekből számítható az anyag abszorpciós tényezője, ami az anyagban elnyelődött sugárzás mennyiségének mérőszáma. Ezen hatásokból következik az is, hogy a különböző szerkezeti felépítésű polimerek különbözőképpen reagálnak ugyanarra az energiagerjesztésre [1].

A polimer anyag lézersugárzás szempontjából vett áteresztőképessége határozza meg (leginkább) azt is, hogy az átlapolt elrendezésben elhelyezett alkatrészek esetén transzmissziós hegesztéssel vagy a fém alkatrész direkt lézersugaras meglövésével hozható létre a kötés. A lézersugárzás hullámhosszán megfelelő mértékben áteresztő polimer alkatrész esetén a kötés transzmissziós hegesztéssel létrehozható, ekkor a lézersugárzás először a polimer anyagon hatol át, majd a fém alkatrészben elnyelődve felhevíti azt. A fém alkatrész ezután átadja a keletkezett hő egy részét a polimer anyagnak, amelyben anyagszerkezeti változások indulnak meg, viszkozitása lecsökken, jobban nedvesíti a fém alkatrész felületét, ahol adhéziós kötés, valamint a fém alkatrész felületi egyenetlenségeiben alátmetszések jönnek létre. Amennyiben a polimer anyag a lézersugárzás hullámhosszán nem átlátszó vagy csak kis mértékben áteresztő (például anyagszerkezeti okok, vagy szálal erősítőanyag alkalmazása miatt), akkor a degradáció elkerülése végett a fém alkatrész direkt meglövésével hozható létre kötés a két anyag között [11].

Felhasznált anyagok

Fém-polimer kötések lézersugaras hegesztéssel történő létrehozásához körülbelül egyenlő arányban használtak a kutatók acél és alumínium ötvözeteket, valamint néhány publikációban különböző titánium ötvözeteket is. Polimer anyagok esetén jóval nagyobb volt a szórás: legtöbbször poliamidot, PET-et és poliimidet használtak, de megtalálhatók tömeg- (PP) és műszaki műanyagok (ABS, PEEK) is a listában (lásd 3. ábra).



3. ábra – A lézersugaras hegesztéssel létrehozott fém-polimer kötésekhez felhasznált polimer anyagok százalékos megoszlása (egészre kerekített értékek)

Felületek tisztítása és előkészítése

A fém alkatrészek felületeinek tisztítása (egyszerű zsírtalanítással vagy komplexebb módszerekkel) minden esetben jelentősen befolyásolta a kialakított fém-polimer kötések szilárdságát. Egyes publikációkban a fém alkatrészek felületén különböző technológiákkal (például elektrokémiai maratással [12], impulzus üzemű lézerberendezéssel történő felületelőkészítéssel [13, 14], olvadék állapotba hozott fémötvözetek lézeres szinterezésén [15] vagy porlasztásán és megszilárdításán (Surfi-Sculpt [16]) alapuló technológiával) felületi vagy geometriai alakjelöltségek hoztak létre. A kutatók célja legtöbbször az alakjelöltségek paramétereinek (például felületi érdesség, alak, magasság, stb.) kötészilárdságra vonatkoztatott hatásának meghatározása volt. Méréseik alapján a felületi struktúrákba fém-polimer kötés létrehozásakor a fém alkatrész felületét nedvesítő polimer anyag jobban bele tud „kaszódni”, ebből következőleg az alámetszések számának és nagyságának növekedése miatt a kötészilárdság értéke is növekedett.

Felhasznált lézersugaras berendezések

A kutatások során körülbelül ugyanolyan arányban használták a három iparban legelterjedtebb szilárdtest lézerforrás alapú hegesztőberendezést kötések létrehozására: diódalézert, szállézert és Nd:YAG lézert (például az alábbi forrásokban: [17-20]).

Mechanikai és optikai vizsgálatok

Az elkészült fém-polimer kötések legnagyobb hányadát egyszerű kvázistatikus mechanikai vizsgálatokkal (szakító-nyíró igénybevétellel) terhelték és minősítették. Néhány publikációban a kötési zónát optikai módszerekkel is vizsgálták, például pásztázó elektronmikroszkópiával megvizsgálták a kötési felületen kialakult alámetszések nagyságát, minősítették a polimer anyag nedvesítőképességét az alapján, hogy mennyire töltötte ki a fém alkatrész felületi érdességi árkait [21]. Egyes publikációkban a pásztázó elektronmikroszkóphoz kapcsolt EDS (elektrondiszperzív spektrométer) segítségével meghatározták a kötési zónában egy keresztmetszetében található atomok tömegszázalékos mennyiségét, majd ebből vontak le következtetéseket a felületen végbemenő kémiai változásokról [22, 23]. Néhány esetben XPS (röntgen fotoelektron spektrométer) berendezés segítségével feltérképezték a kötési felületen található molekulákat és vegyületeket, majd következtetéseket vontak le a mért kötésszilárdság és a felületen jelenlévő molekulák kapcsolatáról [24, 25].

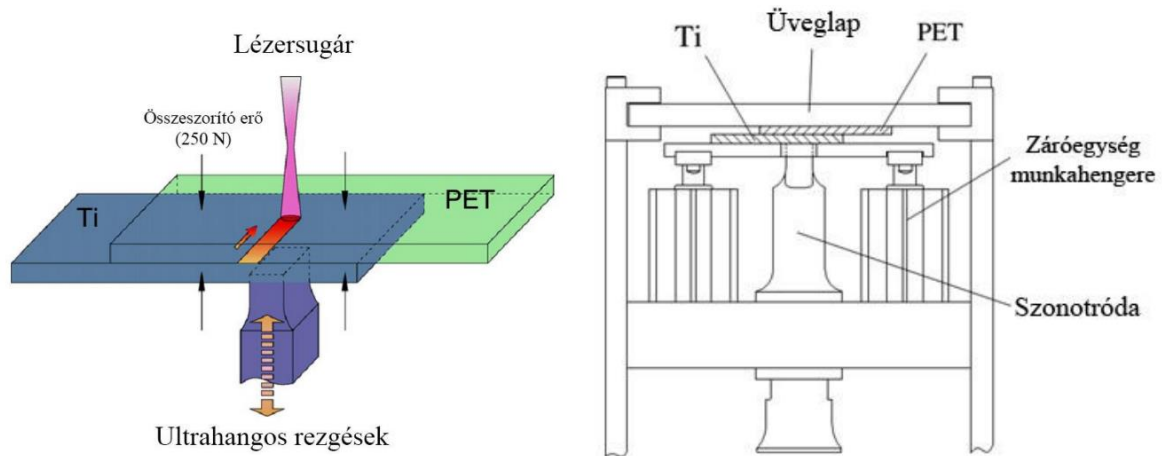
Ultrahanghegesztés

Az ultrahanghegesztést, amely polimer alkatrészek egyesítésére az egyik legelterjedtebben alkalmazott kötési technológia (jó automatizálhatósága és a kötések jó reprodukálhatósága miatt [1]), a fém-polimer kötések esetén viszonylag ritkán használják, mivel a kötés létrehozásához a berendezés egyik alapvető szerkezeti elemét, az ún. szonotródát, valamint az alkatrészeket a hegesztési folyamat során egymáshoz szorító befogókészüléket is módosítani kell, annak érdekében hogy a fémből készült szonotróda, a hegesztendő alkatrész és/vagy a szintén fémből készült, próbatesteket leszorító készülék összehegedése a kötés létrehozása során elkerülhető legyen. Ez a módosított szonotróda az ultrahanghegesztő berendezések egyébként is jelentős bekerülési költségét tovább növeli, emiatt eddig kevés olyan publikáció született, amely az ultrahanghegesztési technológiával létrehozott fém-polimer kötésekről szól [26, 27].

Ultrahanggal segített lézersugaras hegesztés (U-LAMP)

Az egyik legtöbb lehetőséggel kecsegtető, de még szabadalmi védeltséget élvező kötési technológia a lézersugaras és az ultrahangos hegesztések kombinációjából kifejlesztett ultrahanggal segített lézersugaras hegesztés. Ez a technológia a két szülőtechnológia előnyeit egyesíti (a hegesztési folyamat gyors, jól automatizálható), míg a gyengeségeiket kis mértékben csökkenti (javuló kötésszilárdság, bővebb skáláról választható anyagok) azáltal, hogy a lézersugaras hegesztés során a polimer anyagban keletkező buborékok számát és nagyságát a folyamat közben fellépő ultrahangos rezgések anyagot homogenizáló hatásának segítségével

csökkenti. Így olyan, a lézersugárzásra érzékenyebb anyagok is feldolgozhatóvá tehetők ezzel a hibrid eljárással, amelyeket transzmissziós lézerhegesztéssel egyébiránt nem lehetne hegeszteni [28-30].



4. ábra – Az ultrahanggal segített lézersugaras hegesztési technológiát bemutató (balra), valamint a kötés létrehozásakor felhasznált befogókészüléket bemutató sematikus ábra (jobbra) [29]

Az irodalomkutatás összefoglalása és kritikája, konklúziók

Az általunk feldolgozott, fém-polimer kötések létrehozásáról szóló irodalmi források, publikációk nagy része egy-egy fém-polimer anyagpárra fókuszálva, egy kötési technológia alkalmazásával létrehozott hibridkötések vizsgálatának eredményeit mutatta be. A kutatók legtöbbször csak néhány technológiai paraméter kötésszilárdságra vonatkozó hatását mutatták be anélkül, hogy a polimer anyagok jellemző tulajdonságait (molekuláris és kristályos szerkezet, molekulatömeg, stb.) figyelembe vették volna. Sok esetben (a publikációk több mint felében) az alkalmazott polimer anyagcsalád általános megnevezésén kívül semmilyen egyéb információt nem közöltek a kutatók, nem magyarázták miért vagy mitől lehet jó a kialakított kötés minősége, szilárdsága. Nagyon ritkán vizsgálták mi történhet a kötési felületen és a polimer anyagban a kötés létrehozásakor (úgy mint például kristályos részarány módosulása, felületi oxid- és egyéb vegyületrétegek összetételének és vastagságának megváltozása, stb.). A kialakított kötések legtöbbször mindössze kvázi-statisztikus mechanikai vizsgálatokkal minősítették, ettől csak a legfrissebb publikációkban látszik eltérés (pl. fárasztóvizsgálatok). A fém-polimer kötéseknek az ipari felhasználhatóság és a szerkezeti beépíthetőség szempontjából kiemelten fontos dinamikus és csillapítási tulajdonságait egy publikációban sem vizsgálták eddig, ennek hiánya pedig a fém-polimer hibridkötések ipari elterjedését nagyban gátolja.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást a Széchenyi 2020 pályázat keretein belül megvalósítás alatt lévő EFOP 3.6.1-16-2016-00009 számú, „Lézertechnológiai és energetikai alapkutatás megvalósítása az Edutus Főiskolán, tudástranzfer, továbbá a vállalati kapcsolatok és a társadalmi szerepvállalás

erősítését célzó tevékenységekkel kiegészítve” című projektje támogatta. A szerzők köszönik a támogatást.

Hivatkozásjegyzék

- [1] Troughton M. J.: Handbook of plastics joining a practical guide, 2nd edition. William Andrew Inc., Norwich, NY, United States of America (2008).
- [2] Rolf K.: Laser welding of plastics materials. Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, Weinheim, Germany, (2012).
- [3] Sieben M., Brunnecker F.: Laser-hybrid welding, an innovative technology to join automotive body parts. *Physics Procedia*, **5**, 61-68 (2010).
- [4] Xie J.: Laser hermetic welding of implantable medical devices. in 'Joining and assembly of medical materials and devices' (eds.: Vol 211-235 (2013).
- [5] Amanat N., Chaminade C., Grace J., *et al.*: Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry. *Materials & Design*, **31**, 4823-4830 (2010).
- [6] Gough Z., Chaminade C., Barclay-Monteith P., *et al.*: Laser fabrication of electrical feedthroughs in polymer encapsulations for active implantable medical devices. *Med Eng Phys*, **42**, 105-110 (2017).
- [7] Pagano N., Campana G., Fiorini M., *et al.*: Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films for applications in the food-packaging industry. *Optics & Laser Technology*, **91**, 80-84 (2017).
- [8] Brown N., Kerr D., Parkin R. M., *et al.*: Non-contact laser sealing of thin polyester food packaging films. *Optics and Lasers in Engineering*, **50**, 1466-1473 (2012).
- [9] Nasim H., Jamil Y.: Diode lasers: From laboratory to industry. *Optics & Laser Technology*, **56**, 211-222 (2014).
- [10] Friedrich G. Bachmann, Russek U. A.: Laser welding of polymer using high power diode lasers. in 'Laser Processing of Advanced Materials and Laser Microtechnologies. Vol 5121, (2003).
- [11] Amancio-Filho S. T., Blaga L.: Joining of polymer-metal hybrid structures - principles and applications. John Wiley & Sons, Inc., Hobokon, New Jersey, United States of America (2018).
- [12] Yusof F., Yukio M., Yoshiharu M., *et al.*: Effect of anodizing on pulsed nd:Yag laser joining of polyethylene terephthalate (pet) and aluminium alloy (a5052). *Materials & Design*, **37**, 410-415 (2012).
- [13] van der Straeten K., Burkhardt I., Olowinsky A., *et al.*: Laser-induced self-organizing microstructures on steel for joining with polymers. *Physics Procedia*, **83**, 1137-1144 (2016).
- [14] Zhang Z., Shan J.-G., Tan X.-H., *et al.*: Effect of anodizing pretreatment on laser joining cfrp to aluminum alloy a6061. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **70**, 142-151 (2016).
- [15] Rauschenberger J., Cenigaonaindia A., Keseberg J., *et al.*: Laser hybrid joining of plastic and metal components for lightweight components. *High-Power Laser Materials Processing: Lasers, Beam Delivery, Diagnostics and Applications IV., Proceedings of SPIE Vol. 9356*.
- [16] Zhang Z., Shan J., Tan X., *et al.*: Improvement of the laser joining of cfrp and aluminum via laser pre-treatment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **90**, 3465-3472 (2016).
- [17] Stambke M., Schricker K., Bergmann J. P., *et al.*: Laser-based joining of metal-thermoplastic tailored welded blanks. *Welding in the World*, **61**, 563-573 (2017).

- [18] Lambiase F., Genna S.: Experimental analysis of laser assisted joining of al-mg aluminium alloy with polyetheretherketone (peek). *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **84**, 265-274 (2018).
- [19] Jiao J., Wang Q., Wang F., *et al.*: Numerical and experimental investigation on joining cfrtp and stainless steel using fiber lasers. *Journal of Materials Processing Technology*, **240**, 362-369 (2017).
- [20] Huang Y. G., X.; Song, Y.; Zhang, N.; Ma, N.: Visual inspection of pulsed ndyag laser welding of pmma and stainless steel 304. (2017).
- [21] Wahba M., Kawahito Y., Katayama S.: Laser direct joining of az91d thixomolded mg alloy and amorphous polyethylene terephthalate. *Journal of Materials Processing Technology*, **211**, 1166-1174 (2011).
- [22] Jung K. W., Kawahito Y., Takahashi M., *et al.*: Laser direct joining of carbon fiber reinforced plastic to zinc-coated steel. *Materials & Design*, **47**, 179-188 (2013).
- [23] Jung D.-J., Cheon J., Na S.-J.: Effect of surface pre-oxidation on laser assisted joining of acrylonitrile butadiene styrene (abs) and zinc-coated steel. *Materials & Design*, **99**, 1-9 (2016).
- [24] Arai S., Kawahito Y., Katayama S.: Effect of surface modification on laser direct joining of cyclic olefin polymer and stainless steel. *Materials & Design*, **59**, 448-453 (2014).
- [25] Huang C., Wang X., Wu Y. W., *et al.*: Experimental study of laser direct joining of metal and carbon fiber reinforced nylon. *Key Engineering Materials*, **620**, 42-48 (2014).
- [26] Yeh R.-Y., Hsu R.-Q.: Development of ultrasonic direct joining of thermoplastic to laser structured metal. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, **65**, 28-32 (2016).
- [27] Feistauer E. E., Guimarães R. P. M., Ebel T., *et al.*: Ultrasonic joining: A novel direct-assembly technique for metal-composite hybrid structures. *Materials Letters*, **170**, 1-4 (2016).
- [28] Chen Y. J., Yue T. M., Guo Z. N.: A new laser joining technology for direct-bonding of metals and plastics. *Materials & Design*, **110**, 775-781 (2016).
- [29] Chen Y. J., Yue T. M., Guo Z. N.: Laser joining of metals to plastics with ultrasonic vibration. *Journal of Materials Processing Technology*, **249**, 441-451 (2017).
- [30] Chen Y. J., Yue T. M., Guo Z. N.: Fatigue behaviour of titanium/pet joints formed by ultrasound-aided laser welding. *Journal of Manufacturing Processes*, **31**, 356-363 (2018).