

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak Szabó-Gyurján Valériának és az FAG Magyarország Ipari Kft.-nek a gyűrűk megmunkálásáért, valamint Kovács Árpádnak a SEM-felvételekért. A kutatómunka a Miskolci Egyetem stratégiai kutatási területén működő Alkalmazott Anyagtudomány és Nanotechnológia Kiválósági Központ keretében valósult meg.

Irodalom

- [1] Heat treating ASM Handbook Vol. 4, ASM International 1991, USA pp. 606–607.
- [2] Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel, ASM International 2008, USA pp. 347.
- [3] A. D. Krawitz: Introduction to diffraction in materials science and engineering, John Wiley 2001, pp. 119–143., 278–318.
- [4] Cseh D., Mertinger V.: Maradó feszültség vizsgálatok ovális csapágy gyűrűkön, Anyagmérnöki Tudományok, 38/1. (2013), pp. 47–55.
- [5] J. Epp, H. Surm, T. Hirsch, F. Hoffmann: Residual stress relaxation during heating of bearing rings produced in two different manufacturing chains, Journal of Materials Processing Technology 211 (2011) pp. 637–643.
- [6] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, A. G. Olabi: Methods of measuring residual stresses in components, Materials and Design 35 (2012) pp. 572–588.
- [7] H. Bhadeshia: Steels for bearings, Progress in Materials Science 57 (2012) pp. 268–435.
- [8] Cseh D., Mertinger V., Benke M., Czibik Á.: Csapágygyűrű technológiai feszültségeinek vizsgálata, XXVI. Hőkezelő és anyagtudomány a gépgyártásban országos konferencia és szakkiallítás külföldi résztvevőkkel. (2014) pp 195–199.
- [9] P. J. Withers, H. Bhadeshia: Residual Stress Part1- Measurement techniques, Mat Sci and Technology, April 2001 Vol17 pp. 355–365.
- [10] Gray S.: Schajer Practical residual stress measurement methods, John Wiley 2013, pp. 140–161.

BAUERNHUBER ANDOR – MARKOVITS TAMÁS – TRIF LÁSZLÓ – BOCZ KATALIN
– CSANÁDY ANDRÁSÉ

Acél és PMMA adhéziója lézersugár hatására

A felhasznált műanyagok mennyiségének növekedése eszközeinkben szükségessé teszi a műanyagok hagyományos szerkezeti anyagokkal történő kötését, amelyekre megoldást jelenthet a lézersugaras fém-polimer kötés. A kötés erősségeért felelős kölcsönhatás, a műanyagban lejátszódó változások és azok hatása a kötés minőségére azonban javarészt még ismeretlen. A bemutatott vizsgálatok során a szerzők megvizsgálták az alkalmazott PMMA-műanyagban a kötés során bekövetkező változásokat, valamint a kötés erősségeért felelős adhézió különböző formáit. A kötések metszeti csiszolatait, illetve a szakított felületet pásztázó elektronmikroszkóppal, valamint Raman-spektroszkópiával vizsgálták, és meghatározták a fémfelületre jellemző jellegzetes hőmérséklet-eloszlást a folyamat közben. Vizsgálták továbbá a műanyagban létrejövő buborékok anyagát és hatását a kötés szilárdságára. Az eredmények alapján elmondható, hogy a legnagyobb szilárdságú kötés létrehozására a bemutatott jelenségek miatt a technológiai beállítások csak egy szűkebb tartománya alkalmas.

Bevezetés

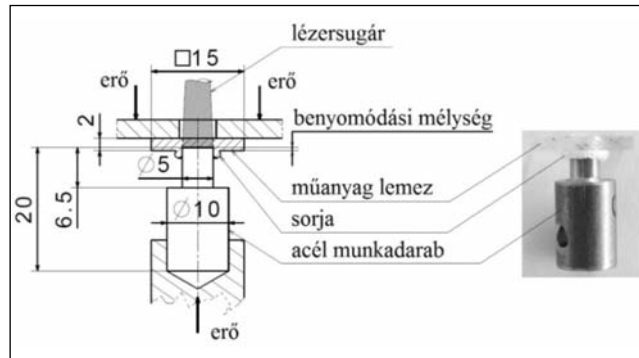
A különböző műanyagok termelése és alkalmazási lehetőségei egyre növekednek. A műanyagok felhasználásának bővülését elsősorban az anyagcsalád könnyű megmunkálhatóságával, kedvező sűrűség-szilárdság arányával és kémiai ellenálló képességével magyarázhatjuk. Van azonban a műanyagoknak olyan

fizikai jellemzői, amelyek a régóta használt szerkezeti anyagok, mint a fémek és a kerámiák jellemzőitől elmaradnak. Ilyen például a hőállóság és a szilárdság, amely miatt a műanyagok gyakran nem alkalmazhatók önállóan szerkezeti elemekként. Az elvárt tulajdonságok biztosítása érdekében szükséges lehet kötésük pl. a fémekkel [1]. Megfelelő kialakítás esetén az így létrehozott alkatrészek

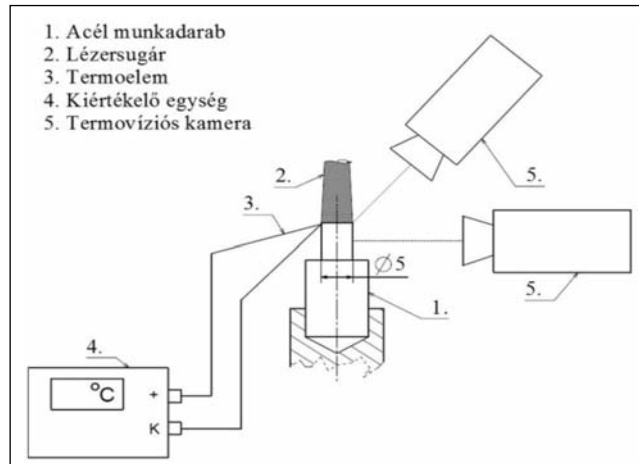
egyszerre hordozzák mindkét anyag előnyeit, vagyis a kis tömeget és a nagy szilárdságot. Különösen nagy jelentősége lehet az ilyen hibrid alkatrészeknek a járműgyártásban a környezetvédelem és a fenntarthatósági törekvések erősödése miatt. A műanyagok alkalmazásának növekedése kihívások elé állítja a kötéstechnológiák fejlesztőit is. A tömegtermelés olyan feltételeket támaszt, amelyek az eddig alkalmazott eljárásokkal csak nehezen teljesíthetők. Ilyen feltételek pl. a nagy ismétlési pontosság és kis méretszórás, vagy a rendkívül rövid ütemidő, a hozzáadott anyag vagy elem kezelési idejének csökkentése. A felsorolt elvárásoknak megfelelnek a lézersugaras eljárások, amelyek ezért igen gyorsan terjednek az iparban [2].

A lézersugaras kötéstechnológia egy új és ígéretes változata a fém és a lézeráteresztő polimer kötése, amellyel hozzáadott anyag nélkül válik lehetővé fémek és műanyagok közvetlen kötése. A kötést legtöbbször lemezek között, átlapolt geometriával készítik. Az eljárás során a

lézersugár a felső, lézertámasztó műanyagrétegen áthalad, majd az alul lévő fémbe elnyelődve annak felületét felhevíti. A lemezek között alkalmazott nyomóerő hatására a felhevített fém hőmennyisége egy részét átadja a műanyagnak, miközben az meglágyul. A folyamat során adhéziós kötés alakul ki. A kötés erő kialakulásában az adhézió különböző típusai játszanak szerepet, melyek együttesen felelősek a kötés erősségéért. Ilyen a kémiai és fizikai adhézió, amely első- és másodrendű kémiai kötések kialakulásával magyarázza az adhéziós erőt. A kialakuló kölcsönhatás lehet kovalens kötés, hidrogénhid és dipól-dipól kölcsönhatás, amelyek elsősorban a polimer poláros funkció csoportjai, és a fémfelület atomjai, vagy gyakrabban a fémfelületen található oxidréteg között alakulhatnak ki. Lehet azonban egy megnövekedett



■ 1. ábra. A kötés készítésének vázlata, a felhasznált acélcsap és műanyaglemez geometriája, valamint az elkészült kötés [6]



■ 2. ábra. A kötés készítése során végzett hőmérséklet és hőmérséklet-eloszlás mérőrendszerének vázlata

adhéziós erő okozója a hevítési folyamat következtében megnövekedett határfelületi energia is [3]. A kötés létrehozásában fontos szerepet játszik a mechanikai adhézió, amelyik során a meglágyult polimer kitölti a határfelületen a fémfelület pórusait és mikroüregeit, mikroszkopikus méretű alakzáró kapcsolatokat hozva ezzel létre. A felületek érintkezésében ezért fontos szerepet játszik a fémfelület morfológiai mikro- és még annál is kisebb léptékű szerkezete.

Egy több éve folyó hazai kutatás [4, 5, 6] a „lézertámasztó polimer–fém kötés” tulajdonságait befolyásoló jellemzőket és a kötés közben lejátszódó jelenségeket vizsgálta. A témával foglalkozó külföldi irodalom szerzői más fém–polimer párosokat vizsgáltak és az általuk vizsgált konkrét anyagokban lejátszódó változásokról és a kötés kialakulásának hátteréről csak kevés információt közölnek.

Jelen közlemény célja, hogy az általunk vizsgált acél–poli(metil-metak-

rilát) azaz PMMA-kötés szilárdságát adó jelenségeit anyagtudományi vizsgálatok segítségével is jobban megismerjük. Ehhez azonban röviden ismertetni kell a kötési kísérleteket.

Kötési kísérletek

A kutatás során 5 mm átmérőjű acélcsap és különböző vastagságú PMMA-lemez kötését készítettük el LASAG SLS 200 típusú impulzusüzemű Nd:YAG lézer segítségével. A kötés kialakításának körülményeit az 1. ábra mutatja be. A lézernyaláb foltátmérője 5 mm volt, amely egybeesett az acélcsap homlokfelületének méretével. A csap és a lemez között alkalmazott nyomóerő hatására a csap a lemezbe nyomódik, majd a lehűlés után kialakul a kötés. A folyamat mindössze néhány másodpercig tart. A sikeres kötéshez alkalmazott átlagos lézerteljesítmény 200 W, az impulzusenergia 2 J, az impulzusfrekvencia 100 Hz, a hevítési idő 4 s, a nyomóerő 3,2 N, a csapok átlagos felületi érdessége $R_a = 0,6-1,4 \mu\text{m}$ volt, a lézernyaláb módusa TEM00 típusú. A kísérletek során a lézerfej védelme érdekében 5 l/perc mennyiségű argon védőgázt használtunk.

A kísérletekhez „Acriplex XP” típusú, 2 mm vastag poli(metil-metakrilát)-lemezt, és S235 jelű, ötvözetlen szerkezeti acélt használtunk. Az acél hidegen húzott köracél, enyhén

Bauernhuber Andor a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Közlekedésmérnöki karán végzett 2010-ben gépészmérnök szakon, járműgyártás és javítás szakirányon. Jelenleg a BME Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék tanársegédje, ahol az oktatási feladatok mellett lézertámasztó fém–polimer kötés készítésének kutatásával foglalkozik.

Trif László a kolozsvári Babes–Bolyai Tudományegyetem, Kémia és Vegyészmérnöki Karán végzett 2004-ben vegyész szakon. Azóta az MTA Kémiai Kutatóközpontban, majd 2012-től annak jogutódjában, az MTA Természettudományi Kutatóközpont, Anyag és Környezetkémiai Intézetében dolgozik kutatóként. Szakterülete a különböző termoelektrokémiai vizsgálatok (TG-DTA/DSC), valamint a tömegspektrometriás fejlődő gáz analízis (MS-EGA), a különböző mérnöki kerámiák.

Bocz Katalin a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Vegyészmérnöki és Biomérnöki Karán 2011-ben

szerezett okleveles környezetmérnök MSc-diplomát. 2015. januárban abszolutóriumot szerzett az Oláh György Doktori Iskolában, azóta tudományos segédmunkatársként dolgozik a BME Szerves Kémia és Technológia Tanszéken, ahol fő kutatási területe az összetett polimer rendszerek fejlesztése és vizsgálata.

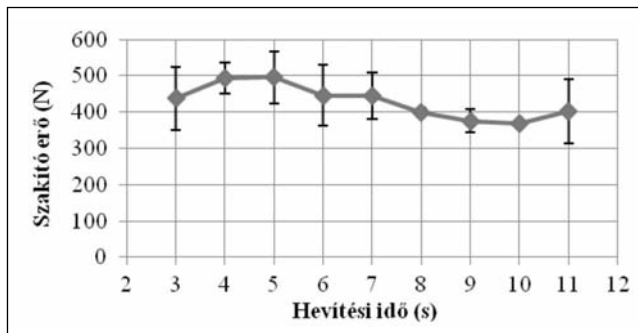
Markovits Tamás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) Közlekedésmérnöki Karán végzett 1999-ben gépészmérnök szakon, járműgyártás és javítás szakirányon. Jelenleg a BME Gépjárművek és Járműgyártás Tanszék egyetemi docense, ahol járművek anyagai és gyártástechnológiai területén végez oktatói és kutatói tevékenységet. Szűkebb szakterülete a lézertámasztó anyagmegmunkálás.

Csanády Andrásné, az MTA doktora életrajza megjelent a Kohászati Lapok, 148. évfolyam, 1. szám (2015) 20. oldalán. A témához kapcsolódó OTKA 109436 K pályázat közreműködője.

texturált, 10–30 µm-es ferrit és kisebb részben perlit szövetelemekből épül fel.

A kötés készítése során tapasztalt jelenségek magyarázatára hőmérséklet-mérést végeztünk. Mértük a csapok éle mellett kialakuló hőmérsékletet a műanyag felhasználása nélkül, valamint a kötés közben, és rögzítettük a felületen kialakuló hőmérséklet-eloszlást is. A hőmérsékletet K-típusú termoelem felhegesztésével, míg a hőmérséklet-eloszlást FLIR A325sc típusú termovíziós kamerával rögzítettük, a 2. ábrának megfelelő módon.

A kutatás előző fázisaiban [4, 5, 6] vizsgálat tárgyát képezte: a hevítési idő, a nyomóerő, a lézerteljesítmény és a különböző lézerimpulzus-beállítások, a csap felületi érdességének és a csap geometriájának hatása a kialakuló kötés benyomódására és szilárdságára. A kötés 200 W lézerteljesítmény, 2 mm vastag PMMA-lemez és 3,2 N nyomóerő esetén 3–7 s hevítési idő beállításával készíthető el. 3 s-nál rövidebb hevítéskor a műanyag nem lágyul meg, és nem jön létre a kötés, 7 s-nál hosszabb hevítés esetén pedig a csap a nyomóerő hatására átlukasztja a lemezt. A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a vizsgált körülmények között a hevítési idő, a nyomóerő és a felületi érdesség növelése egyaránt nagyobbítja a szakítóerőt és a csap benyomódási mélységét is a műanyaglemezbe; a 2 mm vastag lemezekkel elért legnagyobb szakítóerő 400 N [5]. A lézerteljesítmény emelésével szintén növelhető a benyomódás és a szakítóerő [6].



■ 3. ábra. A kötés szilárdságának változása a hevítési idő függvényében [4]

Alakzáró geometriájú csappal a kötések szakítóereje igen hatékonyan fokozható: 5 mm vastag lemezek alkalmazásával akár 900 N szakítóerővel rendelkező kötés is készíthető [7]. A kötés készítése során azonban gázbuborékok jelennek meg az acél felülete mentén a műanyagban. A gázbuborékokat más szerzők is észlelték, de szerepüket a kötésekben nem elemezték [8, 9].

A gázbuborékokkal kapcsolatos megfigyelések és újabb vizsgálatok

A vizsgálatok során hamarosan világossá vált, hogy a gázbuborékoknak fontos, de ellentmondásos szerepe van a kötésszilárdság kialakításában, ezért a továbbiakban kitértem a figyelmet szenteltünk a gázbuborékoknak. Míg a buborékok egyrészt ronthatják a szilárdságot, hiszen a terhelhető keresztmetszetet csökkentik, és a szakítás során a szakítás kiindulópontjaként viselkedhetnek, másrészt a legnagyobb kötésszilárdságot éppen egy bizonyos mennyiségű (területű) buborék keletkezése esetén lehetett elérni [4]. A buborékok területe a hevítési idő

növelésével nagyobbá válik, ezért a kötés szilárdságának optima van a hevítési idő függvényében, amelyet a 3. ábra mutat be. A műanyagban a határfelület mellett keletkező buborékok keresztmetszetben és felülről a 4. ábrán láthatók.

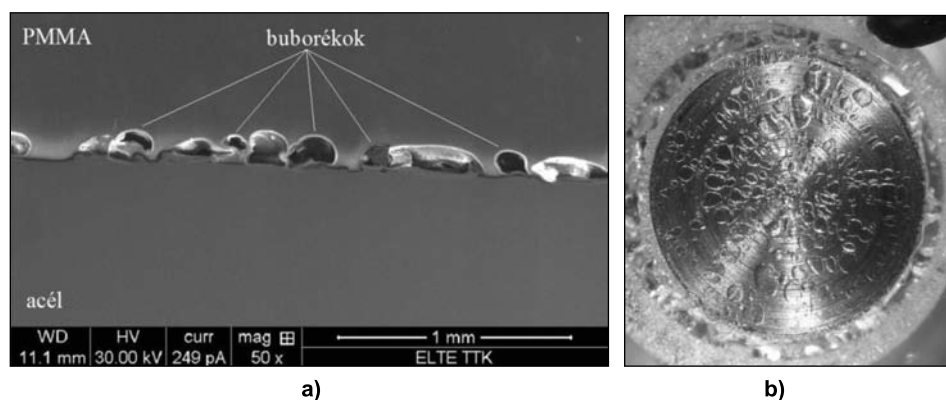
Nyilvánvaló, hogy a kötési folyamatban a meghatározó változások a műanyagban mennek végbe. A buborékok képződésére

a műanyag bomlása adhat magyarázatot. Az irodalomban igen sok ismeret halmozódott fel elsősorban a különböző műanyagok égésével, ill. égésgátlásával kapcsolatosan. T. Kashiwagi japán kutató 1982-ben [10] figyelte meg optikai mikroszkóppal, hogy sugárzó hő hatására buborékok lépnek fel a PMMA-ban, majd a későbbiekben már modellezni is próbálta a bomlási folyamatokat [11]. A bomlási folyamatok legkézenfekvőbb vizsgálati módszerei a különböző termikus mérések, ezért az ipari minőségű PMMA alapanyagunkat mi is megvizsgáltuk. Az irodalom szerint [12] a PMMA előállítás technológiája befolyásolhatja az anyag termikus stabilitását.

1. A termikus vizsgálatok célja elsősorban a buborékok kialakulási folyamatának és az adhézió kialakításában betöltött szerepének tisztázása volt. Ámbár a lézersugár hatására bekövetkező felmelegedés sokkal gyorsabb, mint amit egy hagyományos termoanalitikai berendezésben modellezhetünk, de a buborékokban képződő reakciótermék(ek) ezúton is elemezhető(k).

A buborékképződés vizsgálatára SETARAM LabsysEvo típusú termoanalitikai műszer segítségével TGA-méréseket végeztünk, illetve Pfeiffer Vacuum OmniStarTM típusú gázanalizátor segítségével vizsgáltuk a felszabaduló gázok kémiai összetételét, a bomlástermékek beazonosítása céljából. A hevítés sebessége 15 °C/perc volt, inert gáz atmoszférában.

A PMMA-por bomlása során a termograviméterben szinte kizárólag metil-metakrilát (MMA)



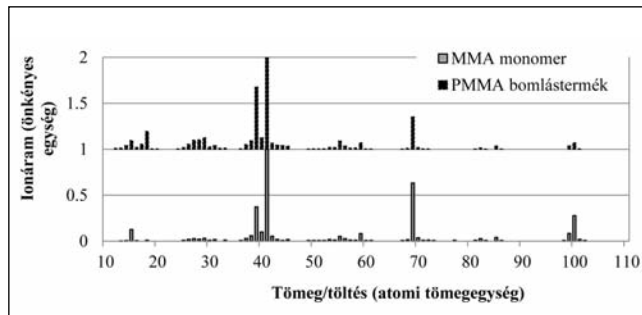
■ 4. ábra. A hibrid kötés keresztmetszetéről FEI Quanta 3D készülékkel készített pásztázó elektronmikroszkópos, szekunder elektron felvétel (a), és a buborékokról a műanyaglemezén keresztül készített sztereomikroszkópos felvétel (b)

monomer keletkezett, amit a tömegspektrum segítségével azonosítottunk. A bomlástermékek tömegspektrumát és az MMA-monomer referencia tömegspektrumát az 5. ábra mutatja be. A monomer forráspontja a polimer bomlási hőmérsékleténél alacsonyabb, 101 °C [13], ezért a bomlás során közvetlenül gáz keletkezik. A gáz apró buborékokat alkot a műanyagban a fémfelület közelében, mivel a polimer hőmérséklete itt a legnagyobb [13]. A monomer diffúziója a PMMA-olvadékban igen lassú, ezért csak a felület közelében képződött buborékokba jut el [14]. A buborékok mozgása is fékezett, mert a polimer viszkozitása nagy, azonban a viszkozitás szintén csökken, mert a bomlásban lévő felület közeli polimer molekulatömege lecsökken.

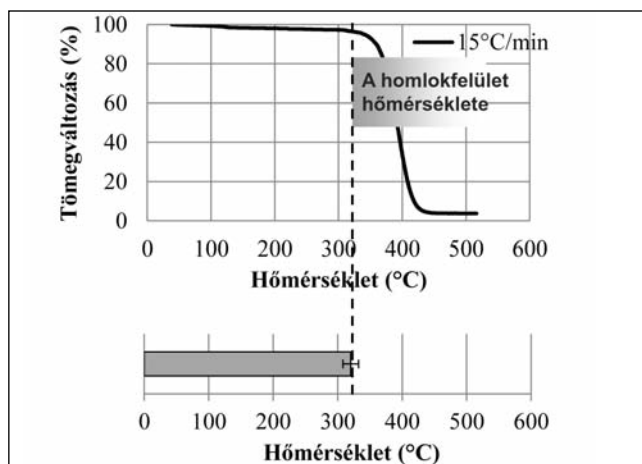
A hőmérsékletmérések eredményei alapján elmondható, hogy az acélcsap hőmérséklete az él mellett megközelíti vagy meg is haladja a kísérletekhez használt PMMA bomlási hőmérsékletét az 6. ábrának megfelelően.

A jelenséget erősíti a homlokfelület felett tapasztalható hőmérséklet-eloszlás: az eloszlás jellege olyan, hogy a hőmérséklet a sugár mentén az éltől a középpontig monoton nő, és a középpontban éri el maximumát, ahogyan azt a 7. ábra mutatja. Az eloszlás oka a lézersugár teljesítményének Gauss-eloszlása. Az elmondottakból következik, hogy a homlokfelület felett létrejövő hőmérséklet az él hőmérsékleténél nagyobb, a bomlás pedig intenzívebb.

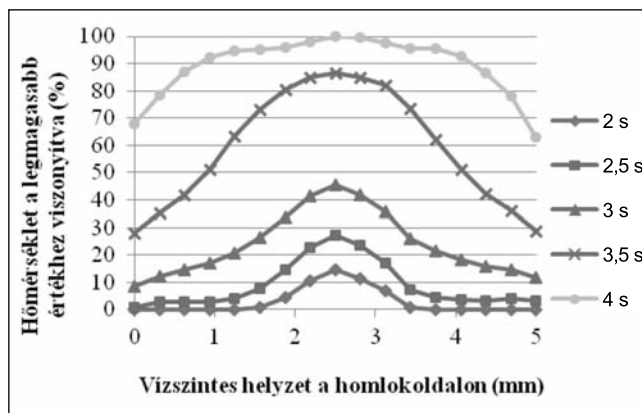
A buborékok eloszlásának, méretének és alakjának összefüggése a szakítóerővel azt mutatja, hogy a legnagyobb kötésszilárdságot egy bizonyos mértékű buborékképződés biztosítja.



■ 5. ábra. A kísérletekhez használt elbomlott polimer és az MMA-monomer referencia tömegspektruma



■ 6. ábra. A kötés készítése során kialakuló hőmérséklet és a műanyag bomlási hőmérsékletének (TG) viszonya



■ 7. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a homlokfelületen különböző hevítési idők esetén

2. A legnagyobb kötési szilárdságot mutató minta szakadási helyének vizsgálata

A szakítás után a fémcsapon maradt maradványokat JEOL JSM 6380LA típusú pásztázó elektronmikroszkóppal (SEM) szekunder elektron üzemmódban 15 kV-tal vizsgáltuk. A nagyobb polimerdarabok tulajdonságait, ill. a csap felületén található műanyag szerkezetét Raman-spektrométer

segítségével hasonlítottuk össze. A Raman-spektrum készítésekor LabRam (HORIBA Jobin Yvon) típusú berendezést használtunk. A vizsgálat során a gerjesztő lézer hullámhossza 532 nm, az objektív nagyítása 10-szeres, a kapott spektrum tartománya 250-3400 1/cm volt. A mérések során 1800 1/cm-es monokromátor szűrőt alkalmaztunk, a kapott spektrumok 3 mérés átlagának eredményei, a szórt fotonok gyűjtésének ideje 10 s és 20 s közt volt.

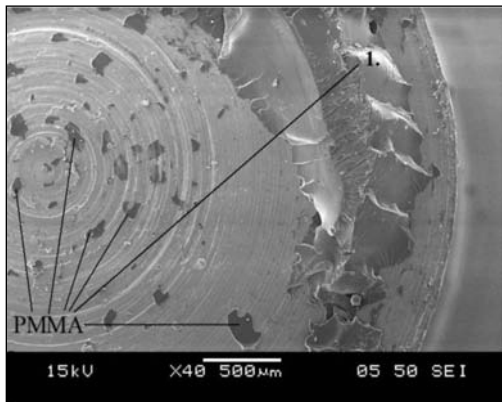
A szakítás után az acél felületén szinte minden esetben található kisebb-nagyobb polimerdarabokat, amelyekre a 8. ábra mutat példát.

Sok esetben nagy, szabad szemmel is jól látható darabok maradnak a felületen, azonban ezen kívül egy vékony, csak pásztázó elektronmikroszkóp segítségével észlelhető hártya is marad az acélon (9. ábra).

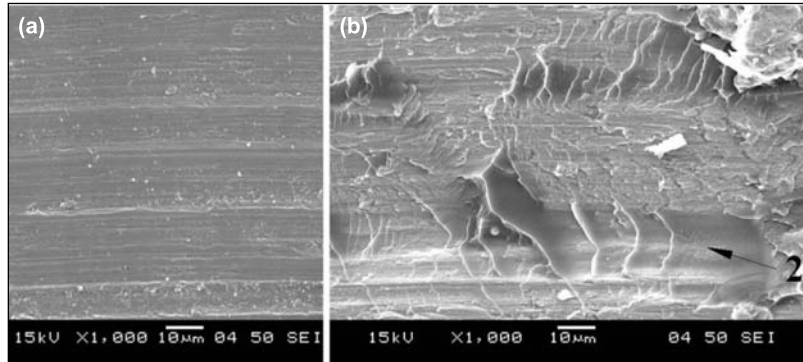
A műanyag a szakítás közben, mint az ábrán látható, nem a határfelületen, hanem a polimer alapanyagban szakadt, ami jó adhéziós kötése erősséget jelent.

A felületen SEM-mel észlelt vékony réteg is valóban PMMA, ezt a Raman-spektrumok is igazolják. A Raman-spektrumokat a 10. ábra mutatja be. A 8. ábrán 1-es számmal a szabad szemmel látható műanyag részecske Raman-spektroszkópos mérésének helyét jelöltük.

Irodalmi források szerint az adhézió létrehozásában szerepet játszhatnak a fémfelület oxidjai is, ha vannak ilyenek a felületen, amelyekkel a polimer funkciócsoportjai kölcsönhatásba léphetnek. A kölcsönhatáshoz szintén szükséges az anyagok szoros, atomi szintű kapcsolata a határfelületen. A kísérletekben használt esztergált acélminta felülete nem ideális felület, de érdemleges mennyiségű oxiddal nem kell számolnunk.



■ 8. ábra. SEM-felvétel az acél felületéről a szakítás után

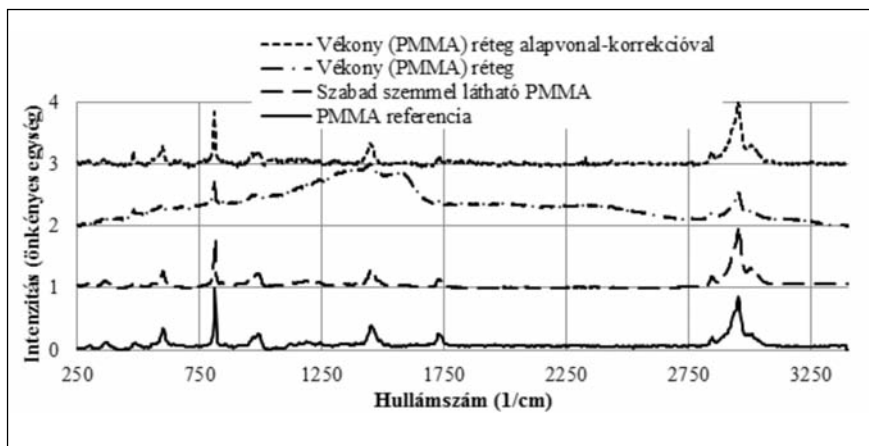


■ 9. ábra. Az acél felületének SEM-felvétele a kötés előtt (a) az acél felületére tapadt vékony műanyagréteg a szakítás után (b). A (b) ábrán a nyílal a vékony rétegen végzett Raman-spektroszkópos mérés (10. ábra, 3-as és 4-es spektrum) helyét jelöltük

3. A kötések keresztmetszetének tanulmányozása, a „mechanikai adhézió”

A keresztmetszeti mintákat csiszolással és polírozással készítettük (nem ionmaratással), ezért csak részben adnak hiteles képet a határfelületről. A polírozás során ugyanis a határfelület megsérülhet, sőt a polírozó anyag is megjelenhet a hézagokban. Ilyen mintán mutattuk be a FEI Quanta 3D készülékkel készített felvételen (4a ábra) a jellegzetes buborékokat is. A keresztmetszeti mintákat Olympus SZX7 sztereomikroszkóp, sztereo-, Nikon L-IM 0640329 típusú fénymikroszkóp és FEI Quanta 3D típusú pásztázó elektronmikroszkóp segítségével 30 kV-on, szekunder és visszaszórt elektron üzemmódban tanulmányoztuk különböző nagyításokat alkalmazva.

A fizikai és kémiai adhézió kivül a kötésben fontos szerepet játszik a mechanikai adhézió is, aminek feltétele, hogy a két komponens szoros érintkezésbe kerüljön. A fémcsap esztergálással készült, ezért a felület a megmunkálásra jellemző barázdált-ság nyomait hordozza. Az esztergálás során különböző felületi egyenetlenségek és mikroüregek keletkeznek. A kötés során megolvadó műanyag az egyenetlenségeket és üregeket kitölti, a 11. ábrán bemutatott kis és nagyobb nagyítású (a, b) metszeti képeknek megfelelően. A képen látható esetben a műanyag az igen nagy, közel 0,1 mm mély barázdákat is betölti. Az acél és a PMMA határfelületének keresztmetszetét egy buborékmentes területen pásztázó elektronmikroszkóppal nagy nagyítással vizsgálva látható, hogy szoros a kap-



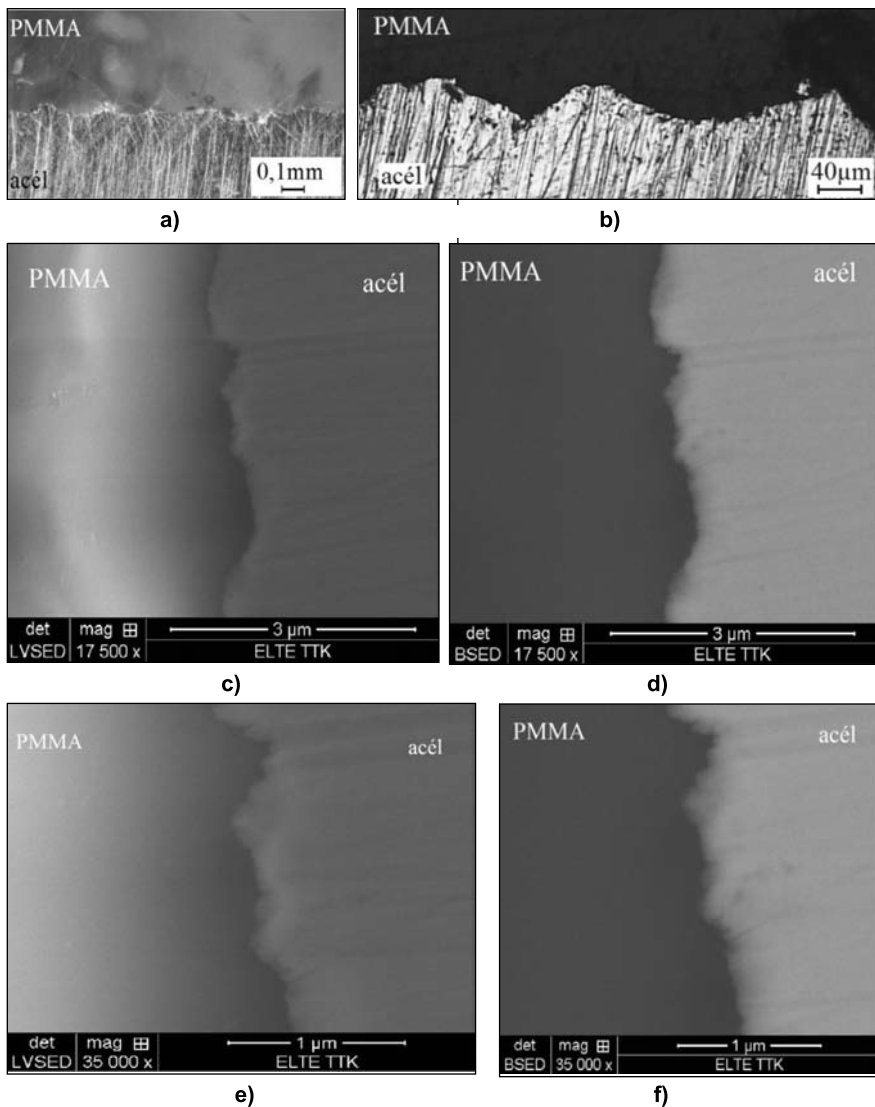
■ 10. ábra. Raman-spektrumok a minták különböző helyeiről

csolat a két anyag közt. A fém felület nagyobb egyenetlenségein belül µm-nél kisebb egyenetlenségekkel leírható finom struktúra (c, e) is megfigyelhető. A felületen az esztergálás hatására kialakuló szerkezet nagyobb fajlagos felületet eredményez, ami az adhézió egyéb formáinak hatását is erősítheti. Az érdesség növelésével ezért a kötés szilárdsága hatékonyan javítható. Az esztergálással készített felület hátránya azonban, hogy az így kapott mintafelszín meglehetősen alkalmatlan a mélységfüggő felületanalitikai vizsgálatok készítéséhez.

A hibrid alkatrész jó kötési szilárdságának feltételeihez további tényezővel járul hozzá a kötés „geometriája”, (pl. a csap alakja, a benyomódás következtében a csap műanyaggal bevonódó oldalainak szerepe stb.). Ezek tárgyalására nem térünk ki, ezek azonban az adhézió változatait és a buborékokkal kapcsolatosan elmondottakat nem cáfolják és azokkal nem állnak ellentétben.

Összefoglalás

Az esztergált acélcsap és poli(metilmetakrilát) PMMA-lemez között lézersugárral létrehozott kötés megvalósítása során vizsgáltuk a kötészilárdság kialakulását és azon belül különösen a polimerben képződő buborékok szerepét az adhézióban. Megállapítottuk, hogy a PMMA meglágyult állapotban jól nedvesíti az acél felületét, és mind mikro-, mind az annál kisebb léptékben is biztosítja a mechanikai adhézióhoz szükséges érintkezés feltételeit. Mivel a felhevülés mértékétől függő optimális buborékterület meghaladását követően a polimerben a határréteg feletti műanyag tartomány meggyengül, ez lerontja a kötészilárdságot. Ezért a technológiai beállításoknak csak egy szűkebb tartománya alkalmas a maximális kötőerő és a megfelelő buborékterület beállításához. Az alkatrészgyártás további fejlesztése során megfontolandó lehet az acél fémcsap lézeres előkezelése, durvítása.



■ 11. ábra. Sztereomikroszkóppal (a), fénymikroszkóppal (b) és pásztázó elektronmikroszkópban szekunder elektron üzemmóddal (c, e) és visszaszórt elektron üzemmóddal készített felvételek (d, f) a fém-műanyag határfelület egy-egy részletéről

Köszönet

Köszönettel tartozunk Takács János professzornak a kutatás támogatójának, és az ELTE TTK Központi Kutató és Kutató Műszer Centrumában Havancsák Károlynak az elektronmikroszkópos vizsgálatok, továbbá a BME Vegyészmérnöki és Biomérnöki Kar Kémia Technológia Tanszékén Marosi György professzornak a Raman-vizsgálatok lehetőségéért. A munka az OTKA 109436 K pályázatának támogatásával készült.

Irodalom

[1] J. Holtkamp, A. Roesner, A. Gillner: Advances in hybrid laser joining. International Journal of Advanced

Manufacturing Technology, Vol. 47, 2010, pp. 923–930.

- [2] A. Cenigaonandia, F. Liébana, A. Lamikiz, Z. Echehoven: Novel strategies for laser joining of polyamide and AISI 304. Physics Procedia, Vol. 39, 2012, pp. 92–99.
- [3] L. H. Lee: Fundamentals of Adhesion, Ch. 16: Metal-Polymer adhesion, pp. 50–60, 1991 Springer Science & Business Media.
- [4] A. Bauernhuber, T. Markovits: Investigating the joining of PMMA plastic to steel by Nd:YAG laser. Materialovė Inzinerstvo-Materials Engineering, Vol. 19 (4), 2012, pp. 164–174.
- [5] A. Bauernhuber, T. Markovits: Hybrid joining of steel and plastic

materials by laser beam. Transport, Vol. 28, Issue 3, 2013, pp. 1–6.

- [6] A. Bauernhuber, T. Markovits: Laser assisted joining of metal pins and thin plastic sheets. Physics Procedia, Vol. 39, 2014, pp. 108–116.
- [7] T. Markovits, A. Bauernhuber, M. Géczy: Investigating the shape locking phenomenon in case of LAMP joining technology. Physics Procedia, Vol. 39, 2014, pp. 100–107.
- [8] S. Katayama, Y. Kawahito: Laser direct joining of metal and plastic. Scripta Materialia, Vol. 59, 2008, pp. 1247–1250.
- [9] 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.
- [10] T. Kashiwagi, T. J. Ohlemiller: A study of oxygen effects on non-flaming transient gasification of PMMA and PE during thermal irradiation, 19th Int. Symp. on Combustion, The Combustion Institute, 1982, pp. 815–823.
- [11] T. Kashiwagi, A. Inabi, A. Hamius: Behaviour of Primary radicals during thermal Degradation of Poly (Methyl Methacrylate), Polymer Degradation and Stability, 26 (1989) 161–184.
- [12] Ch. Cao, Z. Tan, S. Sun, Z. Liu, H. Zhang: Enhancing the thermal stability of poly (methyl methacrylate) by removing the chains with weak links in a continuous polymerization, Polymer Degradation and Stability, Vol. 96, 2011, pp. 2209–2214.
- [13] S. M. Dakka: TG/MS of Poly-(Methyl Methacrylate). The effect of heating rate on the rate of production of evolved gases. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 75, 2004, pp. 765–772.
- [14] F. Pallikari, G. Chondrokoukis, M. Rebelakis, Y. Kotsalas: Raman spectroscopy: A technique for estimating extent of polymerization in PMMA. Material Research Innovations, Vol. 4, Issue 2–3, 2001, pp. 89–92.