

SZERKEZETI ACÉL ÉS SZÁLERŐSÍTETT POLIMER ÖSSZEKÖTÉSE LÉZERSUGARAS TECHNOLÓGIÁVAL

LASER JOINING OF STRUCTURAL STEEL AND FIBER-REINFORCED POLYMER

Dr. Borbás Lajos*, Temesi Tamás**, Dr. Csiszér Tamás***

ABSTRACT

In this article, we briefly describe how joints can be formed between metals and polymers using laser beam joining technology, and we examine how the power of the laser beam used to create the bond, the amount of natural reinforcing fibre (cellulose fibre) added to the polymer and the type of polymer material affect the strength of the joints that can be formed.

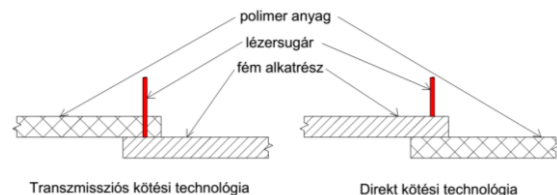
1. BEVEZETÉS

A mérnöki szerkezetek kialakításában, és kiemelten a járműiparban a teherviselő szerkezetek szilárdsági tulajdonságainak – úgy statikus, mint dinamikus terhelési körülmények közötti határállapot jellemzőinek – növelésével párhuzamosan fokozott igény mutatkozik a tömeg csökkentésére is. Egy lehetséges módszer ezek elérésére a lézersugaras kötési technológia alkalmazása, amellyel járulékos kötőelemek (pl. szegecs, csavar), valamint kötőanyagok (pl. ragasztó) alkalmazása nélkül állítható elő nagy szilárdságú kötés szerkezeti anyagok között. Tömegcsökkentés mellett elérhető a fémeknél kisebb sűrűségű anyagok, így például polimerek, és különösen az erősítőanyagot is tartalmazó, a fémötvözetek szilárdsági tulajdonságait megközelítő paraméterekkel bíró polimer kompozitok alkalmazásával is.

A lézersugaras kötési technológiával akár fémek és polimerek összekötésére is van lehetőség az ún. *Laser Assisted Metal-Polymer Joining Technology*, avagy *LAMP* módszerrel [1-3]. Ennek során a termoplasztikus polimer anyagot először megömlesztett állapotba hozzák, amely aztán a lehülése során a fém alkatrész felületére, és a felületen található árkokba befolyva dermed meg. Ezáltal alakkal és anyaggal (másodlagos

kölcsönhatásokon keresztül) záró, nagy szilárdságú kötés alakítható ki. Fontos azonban kiemelni, hogy a fémek és polimerek molekuláris felépítése a közvetlen kapcsolat (elegy, egybeolvasztás, hegesztett kötés) kialakítását nem teszi lehetővé [4].

A fém és polimer anyagok között kialakítható, ún. hibridkötés kialakítása során a lézersugár minden esetben a fém alkatrészben nyelődik el, amely így felmelegszik, majd a hőjét átadja a polimer anyagnak, amely megömlesztett állapotba kerül. A fém felmelegítéséhez használt lézersugár a kötési folyamat során akár áthaladhat a polimer anyagon is (ez az ún. transzmissziós kötési módszer, 1. ábra), amennyiben ezt a polimer optikai tulajdonságai (áteresztőképesség – „átlátszóság”, törésmutató) lehetővé teszik.



1. ábra. Fém – polimer lézersugaras egyesítésének elvi elrendezési lehetősége: transzmissziós és direkt kötési eljárás [4]

Alapvető ökölszabályként kijelenthető, hogy azok a polimerek, amelyek a szemünk számára (a látható fény tartományában) átlátszók, azok a lézersugaras kötés kialakításához leggyakrabban használt, 900-1064 nm hullámhosszú lézersugárzás számára is nagymértékben átlátszók, áteresztők. A polimerben haladó lézersugár viselkedését, veszteségét (törés, szóródás, elhajlás) azonban jelentősen befolyásolja a szerkezeti felépítése is, amelyet gyártástechnológiai

* Professor Emeritus, Edutus Egyetem, Műszaki Intézet

** PhD hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudomány Egyetem, Polimertechnika Tanszék

*** Egyetemi docens, Óbudai Egyetem, Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar, Médiatechnológiai és Könnyűipari Intézet

módszerek, valamint az erősítő- és adalékanyagok jelenléte és mennyisége is befolyásolhatnak. A transzmissziós módszer akkor alkalmazható jó hatásokkal, ha a polimer anyag nagymértékben átlátszó, azaz a lézersugár energiájának nagy részét veszteség nélkül átengedi [5].

A polimer anyagok mechanikai tulajdonságai befolyásolhatók (például megnövelhető a szakítószilárdság és a húzó rugalmassági modulus) szálal erősítőanyagok polimer mátrixanyaghoz történő adalékolásával. Ez elősegíti a polimer anyagok ipari alkalmazhatóságát, szerkezeti anyagként történő térhódítását is.

A bioalapú, megújuló erőforrásból származó erősítőanyagok használatával az elterjedten alkalmazott üveg- és kevlar-szálakhoz hasonló, vagy azonos mechanikai erősítőhatás érhető el. A bio-erősítőanyagok előállítása emellett kisebb energiabefektetéssel valósítható meg, emiatt kevésbé terheli a környezetet. Megfelelő polimer mátrixanyag (pl. politejsav (PLA)) használatával akár biológiailag teljes mértékben lebontható, hulladékmentes termékek is előállíthatók. Ennek jelentősége a termék életciklusának végén, újrahasznosításkor, vagy termelési láncba visszaforgatáskor jelenik meg.

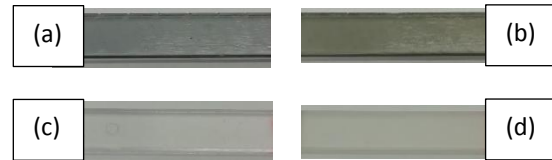
Az EFOP-3.6.1.-16-2016-00009 pályázat keretében kutatást végeztünk annak feltárására, hogy milyen teherbírású kötés alakítható ki szerkezeti acél és természetes szálakkal erősített polimer (polimetil-metakrilát, PMMA) között lézersugaras technológia alkalmazásával. Kísérleteink során megvizsgáltuk az ún. direkt lézersugaras technológia (a lézer közvetlenül a fém alkatrészt sugározza be), és az ún. transzmissziós kötési eljárás (a lézersugár először áthalad a polimer anyagon, majd elnyelődik a fém alkatrészben) hatását a kötések tulajdonságaira. Kísérleteinket teljes faktoriális kötési terv (DoE) alkalmazásával hajtottuk végre, az eredményeket statisztikai módszerrel értékeltük ki.

2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

2.1. Fém és polimer anyagok és vizsgálatuk

Kísérleteink során a kötések két típusú, a járműiparban is széles körben alkalmazott polimetil-metakrilát (PMMA) anyag és S235JR jelzésű szerkezeti acél között hoztuk létre lézersugaras technológiával. Az első kiválasztott PMMA az Altuglas International SAS vállalat AltuGlas VS-UVT típusú, a látható fény és a közeli infravörös frekvencia-tartományban nagymértékben átlátszó alapanyaga volt. Ehhez a Sitraplas GmbH Sitramac HW55-UV típusú,

PMMA-polisztirol (PMMA-PS) kopolimer blend alapanyagát választottunk referenciának, mivel ennek alapszíne kicsit sötétebb, de nagymértékben átlátszó volt, amíg mechanikai tulajdonságai közelítőleg megegyeztek az Altuglas alapanyagéval (2. ábra).



2. ábra – Sitramac PMMA alapanyag (a), 1 tömegszázalék cellulózszálat tartalmazó, Sitramac alapú kompozit (b), Altuglas PMMA alapanyag (c), 1 tömegszázalék cellulózszálat tartalmazó, Altuglas alapú kompozit (d)

Mindkét PMMA alapanyaghoz 1 tömegszázalék bioalapú erősítőanyagot, rövid cellulózszálat is adagoltunk. Ilyen mennyiségben a szálak erősítőhatása ugyan minimális, azonban meg kívántuk vizsgálni, hogy hatással vannak-e a cellulózszálok az acél-PMMA kötések kialakíthatóságára, valamint a létrejött kötések teherbírására.

A polimer próbatetek mindkét polimer anyag esetén töltés nélküli, valamint 1 tömegszázalék töltőanyag kivételben ikercsigás extruderen (LTE 26-44, Labtech Engineering Company Ltd., Thaiföld) történő kompaundálással, majd Arburg Allrounder 270S 400-170-típusú fröccsöntő berendezésen történő fröccsöntéssel készültek. Az elkészült, 2 mm vastagságú polimer lemezekből lézersugaras vágással 80×10 (hossz \times szélesség) mm-es próbateteket készítettünk. Az acél próbateteket 0,8 mm vastagságú acéllemez táblából, lézersugaras vágással alakítottuk ki, 30×10 mm-es méretben.

2.2. Kötések kialakítása lézersugaras technológiával

A 3.1. fejezetben bemutatott transzmissziós méréseink alapján mindkét PMMA alapanyag (erősítőanyaggal történő adalékos nélkül) nagy mértékben átlátszó az alkalmazott lézersugárzás hullámhosszán. Emiatt mindkét (transzmissziós és direkt) kötési módszerrel (1. ábra) végeztünk kísérleteket annak feltárására, hogy a kötési módszer milyen mértékben befolyásolja a kialakítható kötésszilárdságot.

Méréseink alapján a cellulózszákkal erősített PMMA transzmissziós tényezője 40 százaléknál kisebb. Erre alapozva az erősítő szálal tartalmazó próbatetek esetén azt a megoldást

választottuk, hogy a direkt kötési módszer használatával, az acél közvetlen besugárzásával hozzuk létre a kötéseket. Ebben a kötési elrendezésben a lézersugár-nyaláb nem haladt át a polimer (PMMA) anyagon, ezért el tudtuk kerülni a polimer anyag szerkezetének módosulását, degradációját (bomlását), így ez nem befolyásolta a kialakított kötések teherbírását.

A kötések átlapoló kivitelben, egyenes vonalmenti kötési pálya alkalmazásával, valamint kétféle elven működő lézersugaras berendezéssel (folyamatos működésű, valamint impulzus üzemű lézersugárforrás) alakítottuk ki. A folyamatos lézersugarat előállító berendezés egy Trumpf TruDiode 151 típusú lézersugárforrás (hullámhossz tartomány: 930-970 nm) volt, amellyel 110 W, 130 W, valamint 150 W teljesítményértékekkel hoztuk létre a kötéseket. A szakaszos üzemű lézerberendezés egy Trumpf TruDisk 4001 Yb:YAG disc laser volt (hullámhossz: 1030 nm), amelynek alkalmazásakor 210 W, 230 W, valamint 250 W teljesítmény értéket állítottunk be a kötés kialakításához.

Az egyes beállítási paraméterekkel három-három ismétléssel, minden esetben 1 m/s kötési sebességgel hoztuk létre a próbatesteket.

2.3. Kísérletterv és a próbatestek vizsgálata

A próbatestek számának megállapításához a teljes faktoros kísérlettervezés módszerét (Design of Experiment, DoE) alkalmaztuk. A próbatestek teherbírását – a kialakult varrat szilárdságát – célkészülékben vizsgáltuk, amelyben az összekötött próbatesteket nyomó-nyíróvizsgálattal terheltük (Zwick Z005 univerzális anyagvizsgáló berendezésen, 2 mm/perc sebességgel), így a kötések nyírószilárdságát (1) tudtuk meghatározni a maximális nyomóerő és a kötési felület (A) ismeretében.

$$\tau = F_{\max} / A \quad (1)$$

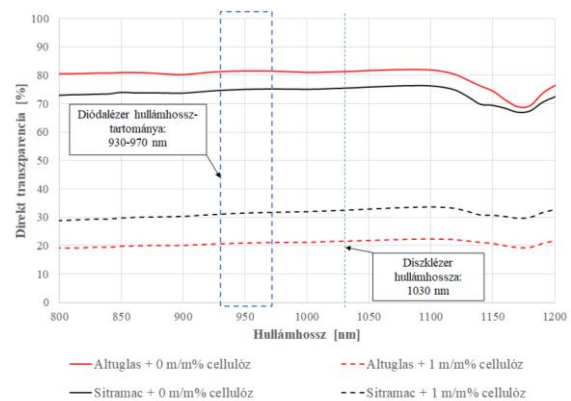
A létrehozott kötési felületek (A) méretét egy Keyence VHX-5000 típusú optikai mikroszkóp beépített szoftverével határoztuk meg.

3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

3.1. Transzmissziós mérések

Már a PMMA próbatestek gyártása megfigyeltük, hogy a cellulózsálak befolyásolják az alapanyag átlátszóságát, ezért vizsgálatainkat ún. transzmissziós mérésekkel kezdtük. Ezzel meg

tudtuk határozni, hogy a vizsgált alapanyag felületére beeső, adott hullámhosszú fényből mennyi jut át az alapanyagon. A 3. ábrán bemutatott diagramon látható, hogy a közeli infravörös frekvenciatartományban (a diagramon ez a 800 és 1200 nanométer közötti tartomány) mindkét PMMA alapanyag nagymértékben átlátszó, és még az alapvetően sötétszürke színű Sitramac PMMA anyag is átengedi a felületére beeső fény mintegy 75 százalékát. Ez alól kivételt képez az 1150 ± 50 nm frekvenciatartomány, ahol lecsökken az átlátszóság (a transzmissziós tényező), a PMMA szerkezeti felépítése miatt.



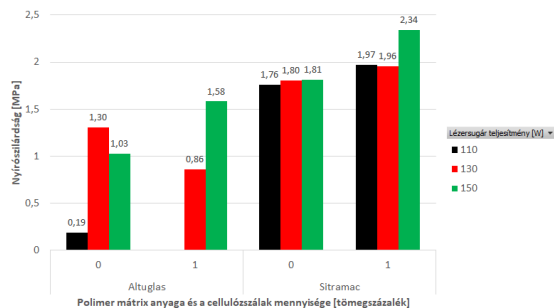
3. ábra. PMMA próbatestek (erősítősál nélküli és erősítősálas) fényáteresztő képessége

A 3. ábrán jól látható, hogy már 1 tömegszázalék cellulózsál adagolásával is igen jelentősen csökken mindkét PMMA anyag átlátszósága. A diagramba berajzoltuk azokat a hullámhossz tartományokat, amelyeken a kutatásunkban a kötések létrehozásához alkalmazott lézersugaras berendezések sugároznak (930-970 nanométer a diódlézer, 1030 nanométer az Nd:YAG diszklézer esetén).

3.2. A kötések teherbírásának vizsgálata

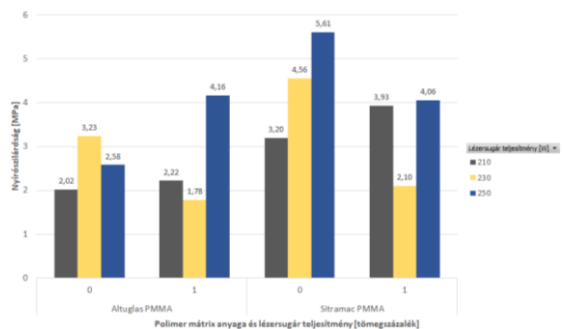
Vizsgálataink során elvégeztük mind az alapanyagok, mind a kötési paraméterek teljes faktorális ellenőrzését. A transzmissziós kötési módszerrel létrehozott próbatestek vizsgálata során arra a következtetésre jutottunk, hogy a kötések szilárdságára csak a polimer anyagnak van számottevő hatása: a transzmissziós vizsgálatok alapján kevésbé átlátszó Sitramac anyaggal tudtunk nagyobb szilárdságú kötések létrehozni (4. ábra). Véleményünk szerint ennek oka, hogy a Sitramac anyag (ami egy PMMA mellett polisztirol is tartalmazó kopolimer) nagyobb mértékű adhéziót (másodlagos kölcsönhatást) alakított ki az acél felületén található oxidréteggel. A

kötés létrehozása során alkalmazott lézerteljesítménynek, valamint az erősítőanyag mennyiségének statisztikai szempontból ki nem mutatható, minimális hatása volt a kötés szilárdságára: nagyobb lézerteljesítmény nagyobb kötészilárdsághoz vezetett.



4. ábra – Transzmissziós kötési módszerrel létrehozott acél-PMMA kötések szilárdsága a PMMA típusának, az erősítőanyag mennyiségének és a lézersugárzás teljesítményének függvényében

A direkt lézersugaras kötések vizsgálata alapján kijelenthető, hogy a nagyobb lézerteljesítmény ezen módszer esetén is nagyobb szilárdságú kötések kialakulásához vezetett, azonban az ANOVA vizsgálat alapján egyik vizsgált paraméter és paraméter-kombináció sem volt jelentős hatással a kötések szilárdságára (95 százalékos szignifikancia szint mellett) (5. ábra).



5. ábra. Direkt lézersugaras technológiával készített kötések szilárdsága az alkalmazott PMMA típusának, az erősítőanyag mennyiségének, valamint a lézersugárzás teljesítményének függvényében

4. KONKLÚZIÓK

Már 130 W lézerteljesítménnyel is létrehozható tartós kötés, azonban a 250 W lézerteljesítménnyel, direkt lézersugaras kötési eljárással készített próbatestek nyírószilárdságát mértük a legnagyobb értékűnek.

A cellulózsálak – mint erősítésként alkalmazott anyagok - már 1 tömegszázalék mennyiségben jelentősen rontják a kompozit átlátszóságát, amely a lézersugárforrás hatékonyságát alapvetően befolyásolja (a sugárnyaláb szóródást szenved, vagy akár elnyelődik az anyagban).

1 tömegszázalék cellulózsál nem befolyásolja szignifikánsan a kötések szilárdságának mértékét egyik hegesztési eljárás esetén sem.

A kötések rideg viselkedést mutattak, amely fontos szempont a tervezési eljárás során a határállapot jellemzők meghatározásakor (a megengedett deformációk, feszültségek szempontjából).

A direkt lézersugaras kötési technológia során a lézersugár nyomot hagyott a fém felületén, amelyre az esztétikai igények esetén figyelmet kell fordítani (látható területek esetén).

Nagy lézersugár teljesítmény (210-250 W) a transzmissziós hegesztés esetén a polimer anyag – esetünkben PMMA – jelentős degradációját okozta.

Méréseink alapján az acél-Sitramac PMMA párosítás biztosítja a nagyobb kötészilárdsági (nyírószilárdság) értékeket. Ez nagy valószínűséggel a Sitramac anyagösszetételével (polisztirollal kopolimerizált PMMA anyag) van összefüggésben.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Temesi T., Czigány T.: Integrated structures from dissimilar materials: the future belongs to aluminum-polymer joints. *Advanced Engineering Materials*, paper ID: 2000007, 2020. <https://doi.org/10.1002/adem.202000007>
- [2] 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.
- [3] Borrisutthekul R., Saengsai A., Mitsomwang P.: Dissimilar materials laser welding between stainless steel 304 and thermoplastics. *Key Engineering Materials*, 719, 142-148, 2016.
- [4] Temesi T., Kiss Z., Csiszér T.: Korszerű technológiák fém és polimer anyagok közötti kötések kialakítására. *Acta Periodica*, 15. kötet; Felkészülés az új évtizedre: a technológia és a gazdaság új kihívásai, 115-125, 2018.
- [5] Csiszér T., Temesi T., Borbás L., Molnár L.: Laser assisted joining of steel and cellulose fiber-reinforced PMMA. *Acta Polytechnica Hungarica*, 18(2), 237-253, 2021.