



# A ragasztóanyag rétegvastagsága hatásának vizsgálata fém és kompozit közötti kötésekben

## Investigation of the Effect of Layer Thickness of Adhesive Material on Metal to Composite Joints

Borhy Levente,<sup>1,a</sup> Szebényi Gábor<sup>1,2,b</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, Budapest, Magyarország

<sup>2</sup> MTA-BME Lendület Könnyűszerkezetes Polimer Kompozitok Kutatócsoport, Budapest, Magyarország

<sup>a</sup> [borhy.levente@edu.bme.hu](mailto:borhy.levente@edu.bme.hu)

<sup>b</sup> [szebenyi@pt.bme.hu](mailto:szebenyi@pt.bme.hu)

### Abstract

In this research, fiberglass-reinforced epoxy composite plates and additively manufactured titanium inserts are adhesively bonded. The samples are investigated by tensile and shear bond test methods. After the mechanical tests, topographical evaluations are conducted over the failure surface areas. A 3D profiling method for the inspection of bonded joints has been developed to quantify and compare failure types. It was found that varying the thickness of the adhesive has a significant effect on the load-carrying capacity of the structure under normal direction loading, whereas under shear loading the effect is modest. The research methodology used allows for the qualification and comparison of further bonded structures.

**Keywords:** *adhesive bonding, metal-composite joint, tensile bond test, shear bond test, topographical examination.*

### Összefoglalás

A kutatás során üvegszál-erősítésű, epoxigyanta-mátrixú kompozitlemezek és additívan gyártott titáninserterek között hoztunk létre ragasztott kötési kapcsolatot. A mintákat normális és nyíró irányú kötésvizsgálatoknak vetettük alá. A mechanikai tesztek követően a minták töretfelületeit topográfiai mérőgép segítségével vizsgáltuk. Ragasztott kötések 3D profilmérőgéppel való vizsgálati módszerét dolgoztuk ki, amellyel számszerűen jellemezhetővé és összehasonlíthatóvá váltak a tönkremeneteli típusok. Megállapítottuk, hogy a ragasztóanyag vastagságának változtatása jelentősen befolyásolja a szerkezet teherbírását normális irányú terhelés esetében, ezzel szemben nyíró terhelésnél a hatás kismértékű. A felhasznált kutatási módszertan segítségével további ragasztott szerkezetek minősítése és összehasonlítása lehetséges.

**Kulcsszavak:** *ragasztás, fém és kompozit kötése, kötésvizsgálat, topográfiai vizsgálat.*

## 1. Bevezetés

A ragasztóanyagok jelentősége a modern iparban rohamosan növekszik, nem kivétel ez alól a nagy terhelésnek kitett szerkezetek gyártása. Az autó-, építő- és az elektronikai ipar egyaránt előszeretettel alkalmazza a ragasztási eljárásokat az elmúlt években [1].

A szerkezeti ragasztóanyagok használatára akkor kerül sor, amikor a ragasztott szerkezeti anyagok nagy terhelésnek vannak kitéve. Ezek a ragasztóanyagok kifejezetten jól alkalmazhatók összetett szerkezetek kialakításához, köszönhetően az olyan előnyös tulajdonságainak, mint a tervezési rugalmasság, egyszerű gyártás és a kiemelkedő, tömegre fajlagosított teherbírás. Más-

felől viszont, a ragasztott kötések teherviselő képessége korlátozott, és számos paraméter szerepet játszik az ilyen módon gyártott szerkezetek élettartamában [2].

Következésképpen a ragasztással összekötött szerkezetek különböző gyártási paramétereinek, mint például a ragasztóanyag vastagsága hatásának vizsgálatával szükséges foglalkozni.

### 1.1. A ragasztott kötések tönkremeneteli módjai

A ragasztás olyan jelenség, amikor két különböző test összeerősítését hozzuk létre ragasztó segítségével oly módon, hogy a két alkatrész között terhelésátadás történik a kötés tönkremeneteléig. A ragasztóanyag adhéziós kötési folyamat során összeköti a szerkezeti anyagokat (1. ábra) [3].

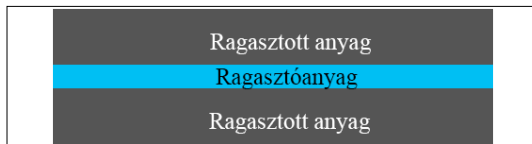
Három különböző típusú tönkremeneteli módot különböztethetünk meg a ragasztással létrehozott szerkezetek vizsgálata során. Adhéziós hiba (2a. ábra) során a tönkremenetel a ragasztóanyag és valamely ragasztott alkatrész közötti elválás miatt következik be. Kohéziós hiba során a tönkremenetel végbemehet a ragasztóanyagban, miközben a ragasztott szerkezet mindkét felén megmarad a ragasztóanyag (2b. ábra), vagy valamely ragasztott anyagban (2c. ábra) [4, 5]. Sok esetben e hibamódok valamilyen kombinációja jelenik meg a valós tönkremenetek során, így az részben adhéziós és részben kohéziós lesz [6].

### 1.2. Vizsgálati módszer

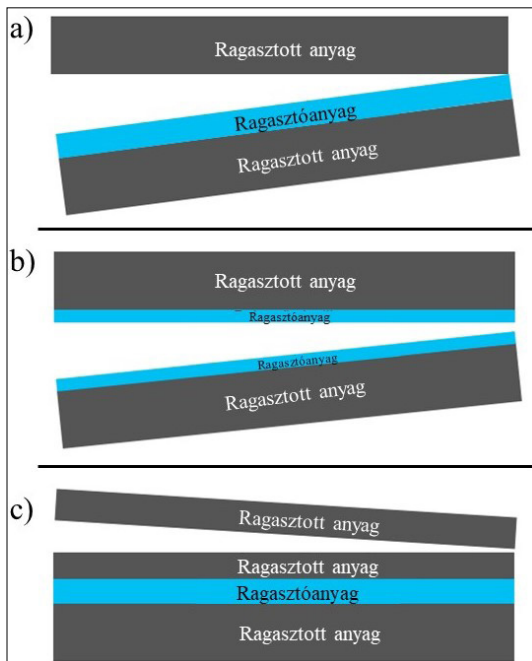
A leggyakrabban alkalmazott módszerek a ragasztott kötések szilárdságának minősítésére az olyan roncsolásos mechanikai vizsgálatok, mint a normális és a nyíró irányú kötésszilárdság-vizsgálat [7]. Ezek a mérési módszerek alkalmasak a ragasztott szerkezetek viselkedésének és teherviselő képességének meghatározására [8, 9].

Az adhéziós kötések minősége nem határozható meg kizárólag roncsolásos vizsgálatokkal, a szerkezet számos tulajdonsága kizárólag topográfiai vizsgálatok során határozható meg. Ennek oka, hogy számos esetben a kohéziós és adhéziós tönkremeneteli típusok valamilyen kombinációja valósul meg, és ezek arányából lehet következtetni a kötés és a teljes struktúra minőségére [10, 11].

A kutatás során normális irányú és nyíró kötés-terhelési vizsgálatokat végeztünk ragasztóanyaggal kötött, többféle anyagú hibrid szerkezeteken, majd a töretfelületeket felületi topográfiai leképezésnek vetettük alá. A gyártó kizárólag nyírásra terhelte kötés esetében adta meg a ragasztóanyag optimális rétegvastagságát (0,05–0,1 mm), így cé-



1. ábra. Ragasztott kötés sematikus ábrája



2. ábra. Ragasztott kötések tipikus tönkremeneteli módjai: (a) adhéziós tönkremenetel, (b) kohéziós tönkremenetel a ragasztóban, (c) kohéziós tönkremenetel a ragasztott anyagban

lünk ennek megfelelőségét megállapítani normális irányú terhelés esetére is [12].

## 2. Anyagok és módszerek

### 2.1. Anyagok

A kompozitlemezek gyártásához EPIKOTE™ Resin MGS LR 235 és EPIKURE™ MGS LH 235 két-komponensű (100:35), közepes viszkozitású gyan-tarendszert mátrixanyagként, míg erősítőanyagként üvegszál szövetet alkalmaztunk.

20 µm-es szemcseméretű EOS Titanium Ti64 (Ti6Al4V) anyagot használtunk a titáninzertek gyártása során.

A két, imént említett anyag közötti ragasztott kötések létrehozása során a Huntsman Ltd. által gyártott Araldite™ 2011, kétkomponensű (100:80) epoxi ragasztórendszert használtuk.

## 2.2. A próbatetek elkészítése

### 2.2.1. A kompozitlemezek létrehozása

A kutatás során felhasznált kompozitlemezeket vákuuminfúziós módszerrel gyártottuk le. Minden esetben 4 darab egymásra helyezett, üvegszál-erősítésű szövetet [0,90] szövetiránnyal használtunk fel a lemez elkészítése során. Nagy figyelmet fordítottunk a megfelelő felületi minőségre és az egyenletes tulajdonságokra a lemez minden pontjában a későbbi mérések megismételhetősége érdekében. A lemezt a térhálósodást követően leszéleztük, majd 80×80 mm méretű, négyzet alakú lemezdarabokat vágunk belőle.

### 2.2.2. A titáninzertek additív gyártása

A titáninzertek additív gyártással, SLM (selective laser melting) módszerrel készültek. EOS M100 3D típusú, lézeres porágyolvasztási eljárással működő berendezéssel készített, 6 darab titáninzertet használtunk a kutatás során, melyeket azonos módon gyártottunk, 25 mm átmérőjű kör alakú alapfelülettel és 14 mm magassággal.

### 2.2.3. A ragasztott kötések létrehozása

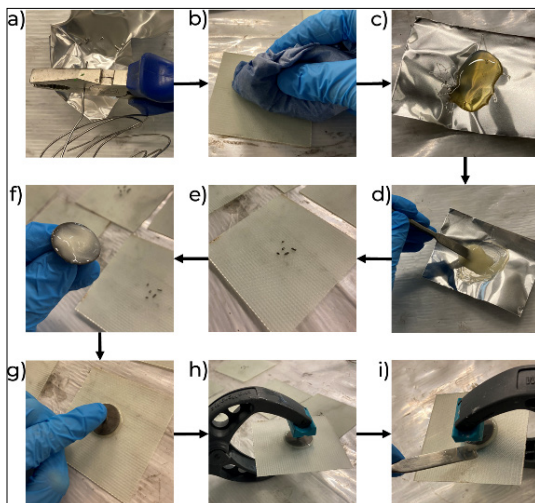
A kompozitlemezek és a titáninzertek közötti ragasztott kötés kialakítása során öt különböző ragasztóréteg-vastagságú mintát hoztunk létre. A ragasztó rétegvastagságának beállításához a kompozitlemezek és a titáninzertek közötti kötés kialakítása előtt a kompozitlemezek felületén meghatározott átmérőjű fémhuzalokat oszlatunk el.

Az első csoportban mint kontrollcsoportban nem használtunk fémhuzalt. Az ezt követő mérések során 0,18 mm, 0,23 mm, 0,43 mm és 1,30 mm átmérőjű fémhuzalokat használtunk, így kialakítva az 5 csoportot.

A mintaalkészítési lépései minden esetben azonosak voltak (3. ábra). Minden egyes mintát legalább 24 órán keresztül szobahőmérsékleten hagytuk térhálósodni.

## 2.3. Mérési módszerek

Az elkészített mintákon mechanikai és makroszerkezeti vizsgálatokat végeztünk. Elsőként, a ragasztóanyag térhálósodását követően, vagy normális irányú, vagy nyíró kötésvizsgálatoknak vetettük alá. Ezekhez a vizsgálatokhoz ugyanazt a 6 titáninzertet használtuk fel minden esetben, majd azok végeztével a ragasztóanyagot 550 °C-on leégettük a felületükről, így újra fel lehetett használni őket. A roncsolásos vizsgálatok után a kompozitlemezek töretfelületeit 3D profilmérőgép segítségével vizsgáltuk.



**3. ábra.** A ragasztott kötés létrehozásának lépései: (a) drót levágása, (b) felület tisztítása acetonnal, (c) ragasztó komponenseinek megfelelő kimérése, (d) ragasztó összekeverése, (e) drótok elosztatása, (f) ragasztó egyenletes elosztatása, (g) inzert lemezre helyezése, (h) összenyomás, (i) maradék ragasztó eltávolítása

### 2.3.1. Normális irányú kötésvizsgálat

A normális irányú kötésvizsgálatokat Zwick Z005 univerzális anyagvizsgáló berendezéssel végeztük el. A gépet ±5 kN-os mérőcellával szereltük fel, és a méréseket 2 mm/perc előterhelési sebességgel és 10 mm/perc keresztfej-elmozdulási sebességgel végeztük. A vizsgálat elvégzéséhez speciális befogóra volt szükség (4. ábra).

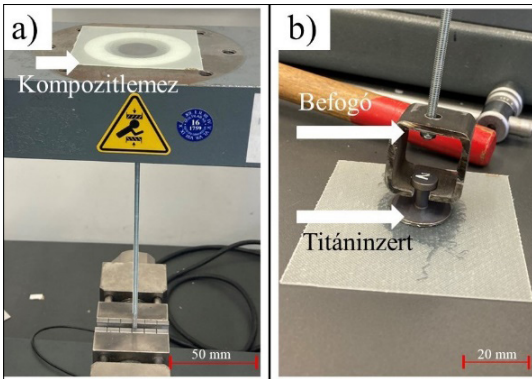
### 2.3.2. Nyíró kötésvizsgálat

A nyíró kötésvizsgálatokat Zwick Z250 univerzális anyagvizsgáló géppel végeztük ugyanazzal a sebességgel, mint a normális irányú kötésvizsgálat esetében. A készülék ±20 kN mérőcellával volt felszerelve. Ebben az esetben másik befogóra volt szükségünk a teszt elvégzése során (5. ábra).

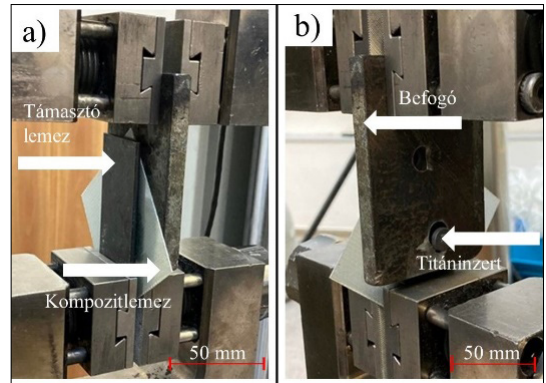
### 2.3.3. Felületi topográfiai vizsgálat

A topográfiai vizsgálatot Keyence VR-5200 optikai mérőberendezéssel végeztük el. A vizsgálat során kis nagyítást (12×) használtunk széles látómezővel. A készülék mérési pontossága ±2,5 μm, és 4 megapixeles, monokróm CMOS képfelvevő rendszerrel van felszerelve.

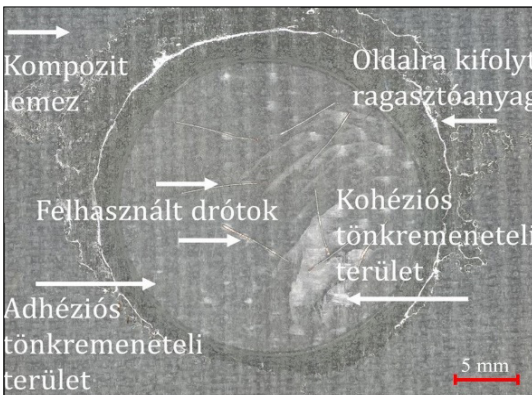
A lemez bázispontjainak meghatározása után az adhéziós és kohéziós tönkremeneteli területek arányát határoztuk meg mindegyik minta esetén, a mérőgép programjának segítségével. A kiértékelés



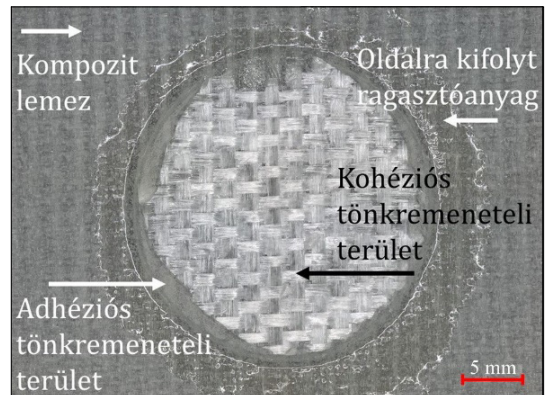
4. ábra. Normális irányú kötészvizsgálat: (a) speciális befogó, (b) vizsgálati elrendezés



5. ábra. Nyíró kötészvizsgálat: (a) hátulról (b) előlről



6. ábra. Adhéziós tönkremenetelre jellemző tönkremenetel felületi topográfiai felvétele



7. ábra. Kohéziós tönkremenetelre jellemző tönkremenetel felületi topográfiai felvétele

lés során a magasságkülönbségek alapján lehetett megkülönböztetni a tönkremeneteli típusokat.

### 3. Eredmények

A normális irányú kötészvizsgálatokat mind az öt, korábban említett ragasztóréteg-vastagságú csoporton elvégeztük. Az első (a kontroll-) csoport 5, míg az összes többi csoport 6 mintából állt, összesítve tehát 29 mintadarabon végeztük el a mérést.

Nyíró kötészvizsgálatot az első (kontroll-) és az ötödik (1,30 mm vastagságú fémhuzallal készített mintából álló) csoporton végeztünk. Mind a két csoport 6 db mintát tartalmazott, azonban az utóbb említett csoport első mintáját ki kellett vennünk a mérésből a mintaalkészítés során fellépő hiba miatt, így összesen 11 mintát vizsgáltunk ezzel a módszerrel.

A felülettopográfiai vizsgálatokat mind a 40 mintán elvégeztük az előbb említett mérések követően. A kapott adatok és a mérőgép képfel-

dolgozó szoftverének köszönhetően az adhéziós (6. ábra) és a kohéziós (7. ábra) tönkremenetel mutató területek aránya meghatározható volt.

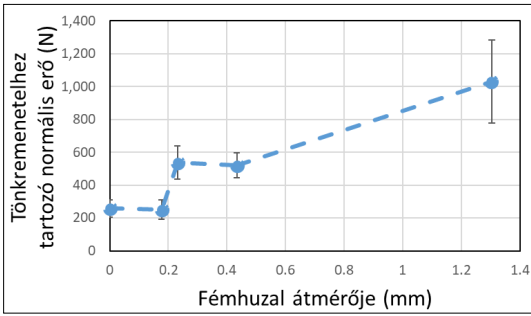
#### 3.1. A normális irányú kötészvizsgálat eredményei

A vizsgálat eredményei az alább ábrázolt diagramon figyelhetők meg, ahol a felhasznált fémhuzal függvényében látható a kötés tönkremeneteléhez szükséges maximális erő (8. ábra).

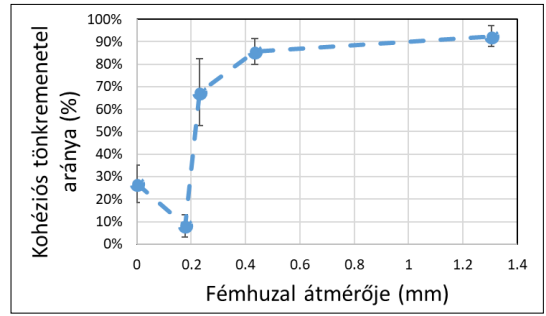
A vizsgálat végeztével a töretfelületek leképezését is elvégeztük a lemezmintákon. Ennek a vizsgálatnak az eredményei alább láthatóak, ahol a fémhuzal méretének függvényében ábrázoltuk a kohéziós tönkremenetel százalékát (9. ábra).

#### 3.2. A nyíró kötészvizsgálat eredményei

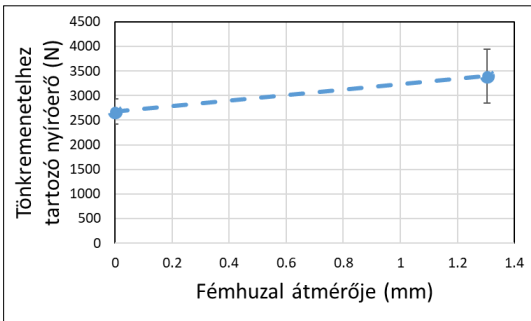
A 10. ábra a nyíró kötészvizsgálatok eredményét mutatja, az x tengelyen a huzal átmérője, az y tengelyen pedig a tönkremenetelhez tartozó nyíróerő látható.



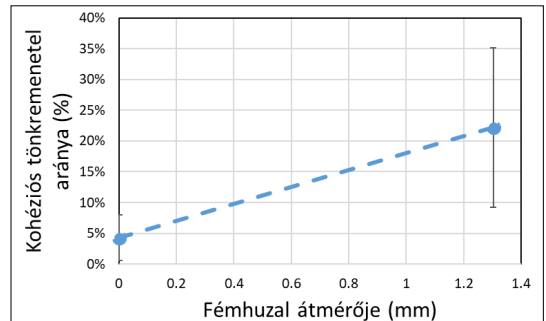
8. ábra. A normális irányú kötészvizsgálat eredményei



9. ábra. A normális irányú kötészvizsgálat utáni topográfiai vizsgálat eredményei



10. ábra. A nyíró kötészvizsgálat eredményei



11. ábra. A nyíró kötészvizsgálat utáni topográfiai vizsgálat eredményei

A szakítóvizsgálatokhoz hasonlóan a nyíró kötészvizsgálatok után valamennyi minta esetében elvégeztük az optikai mikroszkópos vizsgálatokat, és meghatároztuk a kohéziós tönkrementel százalékos értékét (11. ábra).

#### 4. Következtetések

A kutatás során összesen 40 mintadarabot gyártottunk és vizsgáltunk meg mechanikai és topográfiai vizsgálati módszerekkel. A kutatás eredménye alapot nyújthat a ragasztott szerkezetek további összehasonlító vizsgálataihoz. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszékén a ragasztott kötések 3D profilmérőgéppel való vizsgálati módszerét dolgoztuk ki, amellyel számszerűen jellemezhetővé és összehasonlíthatóvá váltak a tönkrementeli típusok, ezzel elősegítve a további kutatásokat ezen a területen.

A ragasztóréteg vastagságának változtatása jelentős hatással van a kötés tönkrementeléhez tartozó erő nagyságára. Megállapítható, hogy a terhelési iránytól nagymértékben függ a szerkezet teherbírása, valamint az egyes irányokban eltérő az optimális rétegvastagság.

Megfigyelhető, hogy a ragasztott, többanyagú hibrid szerkezeteket úgy kell megtervezni, hogy elsősorban nyíróterhelés érje a kötést, mivel az jelentősen nagyobb erőket képes elviselni.

A húzóvizsgálatokhoz képest a ragasztóréteg vastagsága nem befolyásolta olyan nagymértékben a kötés teherbírását nyírófeszültség esetén.

Látható, hogy a gyártó által ajánlott optimális rétegvastagság (0,05–0,1 mm) nem megfelelő normális irányú terhelés esetén, a ragasztó rétegvastagságának növelésével ennek az értéknek kb. 4-5-szörösére tudtuk növelni a kötés teherbírását.

A mechanikai és a vizuális vizsgálatok eredményei ugyanazt a tendenciát mutatják, és összehasonlíthatóak. Azok a minták, amelyeknél nagyobb kötési teherbírást mértünk, nagyobb kohéziós tönkrementeli területet mutattak a vizuális vizsgálatok során, amelynek oka lehet a nagyobb méretű, szilárd kötést biztosító anyagréteg aránya a kötési felületen.

Tekintve, hogy az általunk vizsgált szerkezetekre nem a tisztán nyíró, amely kedvező lenne a kötés szempontjából, hanem az összetett terhelési mód jellemző, így kifejezetten nagy jelentősége van a különböző irányú terhelések vizsgálatának,

amely kiinduló alapja lehet a kutatásunk. Az általunk alkalmazott mérési módszertannal optimalizálni lehet a ragasztott szerkezetek összetett terheléssel szembeni ellenállását.

Összefoglalva megállapítható, hogy ez a kutatás kiindulópontja lehet a ragasztott szerkezetek további vizsgálatának, valamint igazoltuk a ragasztóanyag rétegvastagságának jelentőségét az összetett ragasztott szerkezetek gyártása során.

### Köszönetnyilvánítás

A publikáció az Innovációs és Technológiai Minisztérium NTP-SZKOLL-22-0080 kódszámú Nemzeti Tehetség Program pályázatának támogatásával valósult meg. A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA FK 142540, 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139, 2022-2.1.1-NL-2022-00012 pályázataival támogatásával valósult meg.

### Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Adams R. D.: *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2. ed. Woodhead Publishing, Cambridge, 2021. 3–4.
- [2] Pethrick R. A.: *Design and ageing of adhesives for structural adhesive bonding-A review*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl., 229. (2015) 349–379.  
<https://doi.org/10.1177/1464420714522981>.
- [3] Baldan A.: *Adhesion phenomena in bonded joints*. Int. J. Adhes. Adhes., 38. (2012) 95–116.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2012.04.007>.
- [4] Banea M. D., Da Silva L. F. M., Campilho R. D. S. G.: *The effect of adhesive thickness on the mechanical behavior of a structural polyurethane adhesive*. J. Adhes., 91. (2014) 331–346.  
<https://doi.org/10.1080/00218464.2014.903802>.
- [5] Seong M. S., Kim T. H., Nguyen K. H., Kweon J. H., Choi J. H.: *A parametric study on the failure of bonded single-lap joints of carbon composite and aluminum*. Compos. Struct., 86. (2008) 135–145.  
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.03.026>.
- [6] Davis M. J., McGregor A.: *Assessing adhesive bond failures: mixed-mode bond failures explained*. ISASI Aust. Saf. Semin. Canberra, (2010) 1–13.
- [7] Valenza A., Fiore V., Fratini L.: *Mechanical behaviour and failure modes of metal to composite adhesive joints for nautical applications*. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 53. (2011) 593–600.  
<https://doi.org/10.1007/s00170-010-2866-1>.
- [8] Banea M. D., Da Silva L. F. M.: *The effect of temperature on the mechanical properties of adhesives for the automotive industry*. Proc. Inst. Mech. Eng. Part. L. J. Mater. Des. Appl., 224. (2010) 51–62.  
<https://doi.org/10.1243/14644207JMDA283>.
- [9] Li J., Yan Y., Zhang T., Liang Z.: *Experimental study of adhesively bonded CFRP joints subjected to tensile loads*. Int. J. Adhes. Adhes., 57. (2015) 95–104.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2014.11.001>.
- [10] Marshall S. J., Bayne S. C., Baier R., Tomsia A. P., Marshall G. W.: *A review of adhesion science*. Dent. Mater., 26. (2010) 11–16.  
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.11.157>.
- [11] Saraç İ., Adin H., Temiz Ş.: *Experimental determination of the static and fatigue strength of the adhesive joints bonded by epoxy adhesive including different particles*. Compos. Part. B. Eng., 155. (2018) 92–103.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.006>.
- [12] Huntsman Advanced Materials GmbH Switzerland, Araldite® 2011 *Structural Adhesives technical data sheet*. 2014. <https://docs.rs-online.com/afb0/0900766b81331047.pdf> (letöltve: 2023. július 4.)