

KÖTÉSI SZILÁRDSÁG VIZSGÁLATA POLIMER KOMPOZITOK ÉS 3D-NYOMTATOTT FÉM KÖTŐELEMEN ESETÉN

EXAMINATION OF BOND STRENGTH IN THE CASE OF POLYMER COMPOSITES AND 3D PRINTED METAL FASTENERS

Dr. Markovits Tamás^{*}, Dr. Varga Ferenc László^{**}, Dr. Szabó Gábor^{***}, Fehér Bálint^{****}

ABSTRACT

With the spread of the use of polymer composite parts, bonding technologies are becoming increasingly important. In this research, in the case of the most used gluing technology for metal parts and composite flat plates, we investigated how the bond strength can be increased for fasteners made with 3D printing. We developed different structural changes, taking advantage of additive manufacturing because geometric designs can be created more freely. Based on the presented results, it can be seen what effect the binding advance has on the developed construction, and which constructions provide the possibility of increasing it.

1. BEVEZETÉS

A polimer kompozit alkatrészek szerkezeti elemekként való felhasználása lehetőséget nyújt nagy szilárdságú, kis tömegű alkatrészek gyártására. Ez elengedhetetlen azoknál a járműveknél, ahol az alkatrészek tömege is jelentősen befolyásolja az energiafogyasztás mértékét. Ilyen járművek például a légi közlekedésben használt pilóta nélküli légi járművek (drónok), amelyeknél a mozgatandó tömeg csökkentése növeli a mozgatható hasznos teher tömegét [2]. A polimer kompozitok gyártására többféle technológia létezik. A gyanta injektálási technológia (RTM: Resin Transfer Molding) az egyik legelterjedtebb. A polimer kompozit szerkezeteket vékony héjszerkezetként gyártják, de sok esetben más alkatrészeket is hozzájuk kell rögzíteni. A rögzítéshez különböző technológiákat alkalmaznak, attól függően, hogy úgynevezett betéteket rögzítenek-e a kompozit felületéhez, vagy az egész kompozit anyagból készül. Gyakran használnak úgynevezett „BigHead” beépíthető vagy ragasztható talpas kötőelemeket is a felületi rögzítéshez [4]. Ezek a speciális kötőelemek vagy betétek hagyományos vagy új módszerekkel, például additív gyártással, 3D nyomtatással is készülhetnek.

A hagyományos szubtraktív technológiákhoz képest az additív gyártási folyamat egy másik koncepciót valósít meg az alkatrészek gyártásában. Ezzel az eljárással olyan új geometriák hozhatók létre, amelyek a hagyományos technológiákkal nem vagy nem költséghatékonyan valósíthatók meg [1]. A 3D-nyomtatás ezen előnye több helyen is kihasználható, például speciális térbeli vagy strukturális alakzatoknál [3], amelyek segítségével még a ragasztási megoldások is továbbfejleszthetők. Ezek a szerkezetek fémek és polimerek esetében egyaránt létrehozhatók. A fém talpas kötőelemek esetén létrehozott speciális struktúrák nagyobb ragasztási szilárdságot tesznek lehetővé [5]. A nyomtatott betét speciális kialakítású ragasztott illesztéseknél is előnyös lehet. Az előny abból adódhat, hogy a betét struktúrái hozzájárulhatnak a kötés szilárdságához, emellett a 3D nyomtatott felületek létrehozásakor könnyen kialakíthatók a kompozit formát követő felületek is. Az alábbiakban bemutatott kutatás ezeknek az előnyöknek a kiaknázására irányult.

A kutatás célja az volt, hogy a ragasztási technológia esetében a betét struktúrájának megváltoztatásával növelje a 3D nyomtatott fémbetétek és a polimer kompozit anyagok közötti kötési szilárdságot.

2. VIZSGÁLATOK

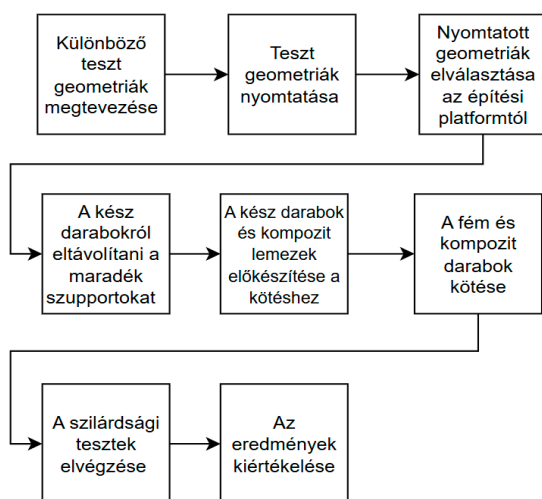
Az 1. ábrán a kutatási munka folyamatábrája látható, amely bemutatja az egymást követő főbb lépéseket. Különböző teszt geometriák megtervezése során jellemzően az alkatrész talp részének geometriája került módosításra, amely a ragasztott kötés szempontjából fontos. A teszt geometriák elemzése és értékelése során kiválasztásra kerültek azok, amelyek végül fém 3D nyomtatással elkészültek. A nyomtatás után szükséges utómunkálásokkal elkészültek a fém alkatrészek. A polimer kompozit alkatrészek és a fémalkatrészek összeragasztása és a szükséges várakozási idő után szakító vizsgálatok történtek, amelyeknek az eredményei kerültek kiértékelésre.

^{*} egyetemi docens, Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, BME

^{**} egyetemi adjunktus, Gépjárműtechnológia Tanszék, Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar, BME

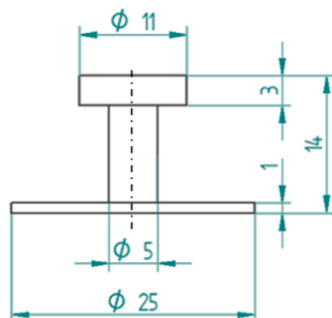
^{***} egyetemi docens, Polimertechnika Tanszék, Gépészmérnöki Kar, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

^{****} fejlesztőmérnök, Mould Tech Systems Kft, Fuvar utca 3, 8900, Zalaegerszeg.



1. ábra. Az elvégzett vizsgálatok lépései

A 2. ábra a talpas kötőelemek vagy más néven betétek alap geometriai méreteit mutatja. A talpas kötőelem kialakításánál cél volt, hogy a szakítóvizsgálatokhoz megfelelő befogással rendelkezzen, ezért a talpra merőleges hengeres szár egy nagyobb átmérővel rendelkező befogó geometriával végződik. A talp 25 milliméteres átmérője biztosítja a megfelelő méretű felületet a ragasztáshoz.



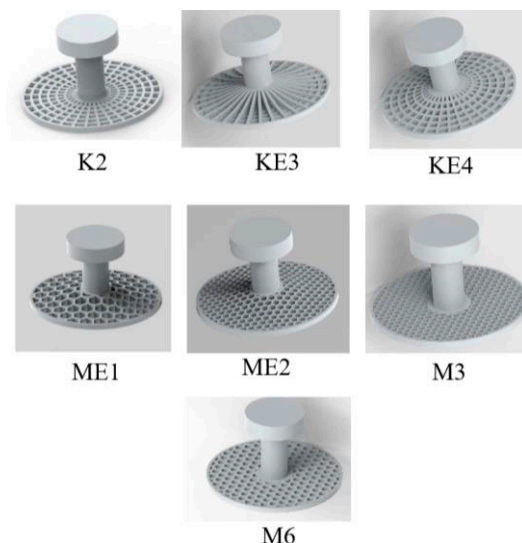
2. ábra. A talpas kötőelem alapvető geometriája

A talpas kötőelemek geometriájának tervezésekor csak a talprész kialakítását módosítottuk különböző térbeli struktúrákkal. A fém alkatrész szár részét úgy terveztük, hogy illeszkedjen a szakítóvizsgálat rögzítőrendszeréhez. Végül több mint 15 változat készült, amelyek közül a jelenlegi tanulmányban szereplő alkatrészeket a 3. ábra mutatja be. Méhsejt és koncentrikus mintázatból álló szerkezetek tervezése történt. A méhsejt és a koncentrikus minták modelljeinek több változata is elkészült. (A betétek megkülönböztetésére a következő jelölést használtuk: K: koncentrikus mintázat, M: méhsejt, E: megemelt talprész, a végén szereplő szám a verziószámot jelzi).

A fém 3D nyomtatási eljárás során szelektív lézeres olvasztás (SLM, Selective Laser Melting) eljárása került alkalmazásra, amelynél lézersugárral történik a porágyban a porszemcsék összeolvasztása, a lézeres pásztázás eredményeképpen.

A 3D nyomtatáshoz az EOS cég által forgalmazott Ti6Al4V port használtuk (EOS Titanium Ti64 9011-

0039). A szelektív lézeres olvasztáshoz EOS M100-as berendezést használtunk. A berendezés maximálisan 200 W lézerteljesítménnyel használható. Az építési rétegvastagság 20 mikrométer, a lézerfolt mérete pedig 40 mikrométer volt. A munkaterület hengeres volt, melynek átmérője 100 mm, magassága 95 mm.



3. ábra. A megtervezett különböző talp kialakítások és jelölésük

A felhasznált kompozit tulajdonságai: diszpergált fázis: 8 réteg 0/90 üvegszövet. Mátrix: AH12 (MR 3012) epoxi és MR3122 térhálósító. A kompozit lapok esetében a gyártási eljárás a gyanta injektálási technológia (RTM) volt. A kompozit lemezek 80 x 80 mm-es darabokra kerültek levágásra a szakítószilárdsági vizsgálatához. A vastagságuk 3 mm volt.

A ragasztáshoz Huntsman Araldite® 2011 ragasztót használtunk. Ez egy kétkomponensű epoxi ragasztó, amely számos anyag ragasztásához használható. Átlagos nyírószilárdságát 40 °C-on éri el, a kötési idő 16 óra. A kapott kötési szilárdság 23 °C-on 17-27 MPa között van. A teszt során a ragasztókomponensek 100:80 tömegarányban kerültek keverésre.

A Zwick Z020 szakító gép a BME Polimertechnika Tanszékén található. A gép maximális terhelése 20 kN. A kötések 24 órával a szobahőmérsékleten történő ragasztás után 10 mm/perc sebességgel kerültek elszakításra.

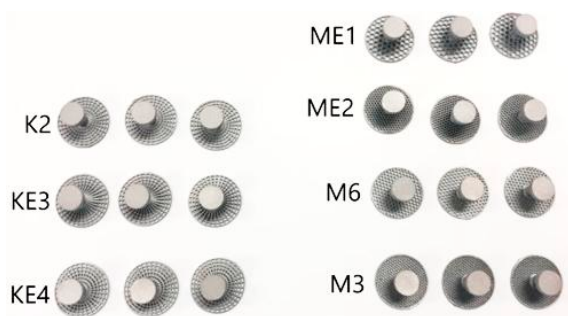
3. EREDMÉNYEK

A betétek tervezésének kiválasztása és a nyomtatás előkészítése után az alkatrészeket lézersugaras porágyas fém 3D nyomtató berendezéssel készítettük el és a kötőelemeket a 4. ábrán láthatjuk az építési platformon. A fotón megfigyelhető a kiválasztott nyomtatási orientáció is, amely lehetővé tette, hogy a ragasztásban résztvevő felületek támaszanyag nélkül kerülhessenek kinyomtatásra. Az egyes alkatrészek egymáshoz történő közel helyezésével az egy lépésben kinyomtatható alkatrészek száma növelhető volt.



4. ábra. A kinyomtatott modellek az építési platformon

A nyomtatás után az alkatrészek leválasztásra kerültek az építési platformról, majd a támaszanyagok eltávolítása történt meg. Az így elkészült alkatrészekre látható néhány példa az 5. ábrán. Itt már a hengeres talp forma is látható. Minden geometria típusból 3-3 alkatrész került kinyomtatásra és további vizsgálatra. Az eljárás során a felületre tapadt porszemcsék eltávolítása üveg szemcseszórással történt.



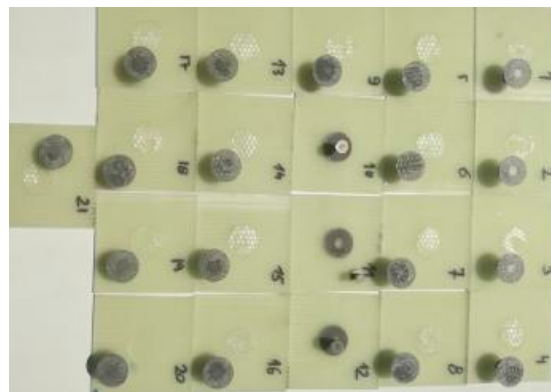
5. ábra. A kinyomtatott modellek az építési platformról való leválasztás után

Az azonos méretű kompozit lapok közepére helyezve történt fém kötőelemek felragasztása, hogy a szakítógéppel befogója szimmetrikusan elhelyezhető legyen a vizsgálatokhoz. A fém-polimer kompozit kötések ragasztás utáni állapotban láthatók, a 6. ábrán.



6. ábra. A fém-kompozit kötések a ragasztás után

A ragasztó anyaghoz tartozó kötési idő letelte után történt meg a kötések szakítása, amely utáni állapot figyelhető meg a 7. ábrán. A szakadás helye általában a ragasztóanyagban vagy a kompozit mátrix felső részén volt található. Több esetben a kompozit anyag felületén láthatóvá vált az üvegszálak szerkezete a mátrix gyanta anyag eltávolítása miatt. A fém alkatrész felületén ragasztómaradványok is voltak, de nem 100%-ban, ami azt jelenti, hogy még van lehetőség a fém oldalon lévő kötés megerősítésére.



7. ábra. A fém-kompozit ragasztott kötések a szakítás után

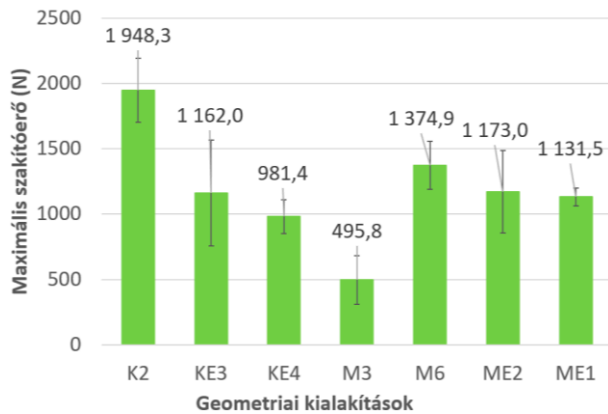
A 8. ábrán a különböző talprész geometria kialakítás esetén láthatóak a maximális szakító erő átlagok és szórások diagram formájában. A szakítás során a maximális szakító erőt használtuk a kötőerő jellemzésére. A szakítószilárdság a csatlakozó felületek összetettsége miatt nehezen lett volna meghatározható és nagy bizonytalanságot jelentett volna.

A diagramon megfigyelhető, hogy jelentős eltérések vannak a maximális szakítóerőben a különböző talp geometria kialakításától függően. A legnagyobb szakítóerőt a K2 kialakítás érte el, annak ellenére, hogy a legnagyobb ragasztási érintkezési felület nem ennél a változatnál volt. Az M3 kialakítás kivételével a többi darab átlagos szakítóereje 980 és 1370 N között volt. Korábbi kísérleteinkben már megmértük a struktúra nélküli talppal rendelkező kötőelemet, ahol az alkatrész geometriája úgy került kialakításra, ahogy a strukturált kötőelemek, azonban semmilyen struktúrát nem tartalmazott. Itt teljesen tömör homogén felület került ragasztásra, tehát az alakzárás nem játszott szerepet a kötési erőben. Ebben az esetben a mért maximális szakító erő átlaga 567,5 N volt.

Ez azt is jelenti, hogy a struktúra akár csökkentheti is a kötés szilárdságát a struktúra nélküli állapothoz képest. Ezzel együtt azonban a kiválasztott és megvizsgált struktúrák egy kivételével (M3) mind nagymértékben növelték a kötésesterősséget. Ez szakító erő változás 2-3 háromszoros növekedést is jelenthet. A legnagyobb szakító erőt biztosított talp kialakításnál 3,4 szoros növekedés volt tapasztalható a struktúra nélküli változathoz képest.

Megfigyelhető ugyanakkor a diagramokon, hogy a mért maximális szakítóerő értékek szórása az átlag értékekhez képest jelentős, ami a ragasztás bizonytalanságából is fakadhat.

Összességében tehát megállapítható, hogy az ilyen kötőelemek talp részének speciális kialakítása lehetőséget biztosít a ragasztott kötés szilárdságának növelésére.



8. ábra. A maximális szakítóerők átlag értékei különböző geometriai kialakítások esetén

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatási eredményekből a következő következtetések vonhatók le:

- A 3D fémnyomatás segítségével speciális struktúrák hozhatók létre a talpas kötőelemek esetében, amelyek mechanikai terhelés szempontjából is alkalmasak erősebb kötés létrehozására.
- A különböző struktúra kialakítások eltérő módon befolyásolják a kötési szilárdságot polimer kompozitokhoz való kötés esetén.
- Ahhoz, hogy a strukturált felület jobb kötési szilárdságot biztosítson a megfelelő struktúra típus alkalmazása szükséges.
- A különböző talp geometria kivitelek között akár háromszoros kötési erő eltérések is lehetnek
- A kutatásban bemutatott konstrukciók közül a legnagyobb kötési erőt a K2 kialakítás biztosította. A kötési szilárdság 3,4-szer nagyobb lett a strukturálatlan felülethez képest, és 40 %-kal több volt, mint a második helyen álló strukturális kialakításnál (M6).

5. SUMMARY

The following conclusions can be drawn from the results of the research work:

- 3D metal printing can be used to create special structures in the case of BigHead-type inserts, which are suitable for creating a stronger bond, even from the point of view of mechanical load
- Different structural designs affect bond strength differently when bonding to polymer composites.

• For the structured surface to provide better bond strength, it is necessary to use the appropriate structure type

• There can be up to threefold differences in bond strength between different geometry designs.

• Among the constructions presented in the research, the largest bonding forces were given by design K2. The bond strength increased by 3.4 times compared to the unstructured surface and 40 % more than the structural design (M6) in second place.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projektet a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIH) finanszírozza. A projekt címe: „Innovatív megoldásokon alapuló, többcélú, rögzített szárnyú drón fejlesztése és a szükséges kompetenciák megteremtése”. A pályázat azonosító száma: 2019-1.1.1-PIACI-KFI-2019-00139. A szerzők köszönetüket fejezik ki a pénzügyi támogatásért. A szerzők köszönetet mondanak Végh Ákosnak a kutatás megvalósításában végzett munkájáért.

7. IRODALOM

- [1] Mark Armstrong, Hamid Mehrabi, Nida Naveed (2022). An overview of modern metal additive manufacturing technology. Journal of Manufacturing Processes 84 pp. 1001–1029
- [2] Nick Tepylo, Anna Straubinger, Jeremy Laliberte (2022). Public perception of advanced aviation technologies: A review and roadmap to acceptance. Progress in Aerospace Sciences Volume 138, 1 April 2023, 100899
- [3] Guo Liu, Xiaofeng Zhang, Xuliang Chen, Yunhu He, Lizi Cheng, Mengke Huo, Jianan Yin, Fengqian Hao, Siyao Chen, Peiyu Wang, Shenghui Yi, Lei Wan, Zhengyi Mao, Zhou Chen, Xu Wang, Zhaowenbo Cao, Jian Lu (2021). Additive manufacturing of structural materials. Materials Science and Engineering: R: Reports Volume 145, July 2021, 100596
- [4] J. Schwenen, V. Sessner, J. Fleischer (2016). A new approach on integrating joining inserts for composite sandwich structures with foam cores. Procedia CIRP 44 (2016) 310–315
- [5] J. Gebhardt, J. Fleischer (2014). Experimental investigation and performance enhancement of inserts in composite parts. Procedia CIRP 23 (2014) 7–12