



Üvegszál-erősítésű, pultrudált műanyag profilok csavarkötésének roncsolásos vizsgálata

Tensile Testing of Bolted Joints in Pultruded Glass Fibre Reinforced Plastic Profiles

Szabó Valentin Endre,¹ Kun Krisztián²

¹ Neumann János Egyetem, GAMF Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország, szabo.valentin@nje.hu

² Neumann János Egyetem, GAMF Kar, Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék. Kecskemét, Magyarország,

Abstract

Machine manufacturing and the automotive industry are often faced with supply chain problems for the raw materials used in the largest proportion (steel and aluminium) and the resulting large price changes. One solution to the lack of raw materials could be the introduction of new materials. Glass-fibre-reinforced plastic (GRP) profiles produced by pultrusion can be suitable for replacing metallic materials in many applications. However, one of the reasons for their limited distribution is the lack of well-established joining processes. The aim of the research is to test the tensile strength of the bolted connection of GRP sheet materials of different thickness according to an experimental design. Based on the experimental results, bolted joint recommendations can be provided for the examined GRP sections.

Keywords: GRP, pultrusion, bolted joint, failure.

Összefoglalás

A gépgyártás és az autópálya gyakran szembesül a legnagyobb részarányban felhasznált nyersanyagok (acél és alumínium) ellátási láncának problémáival és ebből következő, nagymértékű árváltozással. A nyersanyag-hiány egyik megoldása az új anyagok bevezetése lehet. A pultrúziós eljárással előállított, üvegszál-erősítésű műanyag profilok (GRP) számos területen alkalmasak lehetnek a fémes anyagok kiváltására. Korlátozott elterjedésük egyik oka azonban a kiforrott kötéstechnológia hiánya. A kutatás célja kísérleti terv szerint eltérő vastagságú GFRP-lemezanyagok csavarozott kötésének szilárdsági vizsgálata szakítással. A kísérleti eredmények alapján csavarkötési ajánlások biztosíthatók a vizsgált GFRP-szelvényekhez.

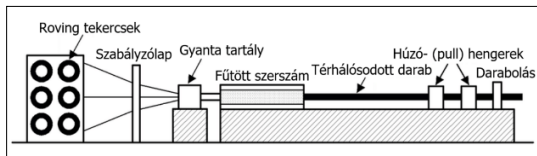
Kulcsszavak: GRP, pultrúzió, csavarkötés, tönkremenetel.

1. Bevezetés

A pultrúzió olyan gyártási eljárás, amely hosszú elrendezésű folytonos szálakkal erősített kompozit profilokat állít elő. Az erősítőszál leggyakrabban üveg- vagy szénuszál, bár léteznek természetes szálak erősítések is. A mátrixanyag általában poliészter- vagy epoxigyanta. A kompozit profilok mechanikai tulajdonságai az erősítőszálak térfogatarányától függ. A pultrúziós eljárás során az erősítőszálakat először műgyantafürdőbe húzzák. Ezután a szálakat és a gyantát irányít-

va vezetik egy fűtött formán (szerszám) keresztül, amelyet úgy terveztek, hogy létrehozza a kívánt alakot. A mátrixanyag a szerszámban fokozatosan térhálósodik. Az így kapott kompozit termék a szerszámból kilépve a kívánt hosszra darabolható. Az **1. ábra** a gyártási folyamatot szemlélteti.

A pultrudálásnak számos előnye van: egyedi keresztmetszetek, pontos méretek, nagy szilárdság/tömeg arány és testre szabott mechanikai tulajdonságok jellemzik. Ezenkívül az eljárás nagymértékben automatizált és nagy volumenű, költséghatékony gyártáshoz illeszthető [1].



1. ábra. A pultrúziós gyártási folyamat [1]

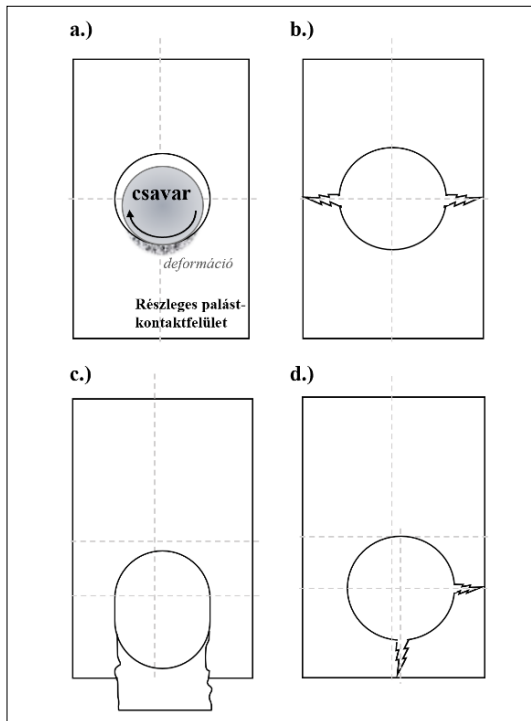
A pultrúzió lehetővé teszi olyan egyedi keresztmetszetű profilok költséghatékony előállítását, amelyek egyébként hagyományos anyagokkal nem vagy nehezen gyárthatók. Az eljárás egyre népszerűbbé vált az építőiparban, azonban a gyors elterjedésének egyetlen akadálya a kiforrott kötéstechológia hiánya.

Kétféle kötést alkalmaznak: a ragasztott és a csavarkötést. A profilgyártás során a formaadó szerszámot formaleválasztó folyadékkal kezelik, hogy elkerüljék a szerszámmal és az alapanyag közötti adhéziót. A formaleválasztó réteg a gyártás során a súrlódás következtében kopik, így a profilra kerül. A profilok felületén megjelenő formaleválasztó alacsony felületi energiát eredményez, ami nem kedvez a nagy szilárdságú ragasztott kötések kialakításához. A jelenség mérsékelhető a ragasztás előtti felületkezeléssel (tisztítással). Ipari mértékű felhasználásban a termelékenységet növelése érdekében előnyben részesítik az előkészületek nélküli kötést, ebből következően az üvegszál-erősítésű műanyag profilok általános felhasználásánál jellemzőbb a csavarozás [2, 3].

Az üvegszál-erősítésű műanyag (GPR) profilok mechanikai tulajdonságai szálirányban megközelítik a szerkezeti acélok teherbírását (terheléssel megegyező orientáció esetén), de a keresztirányú teherbírásuk nagyságrenddel kisebb lehet. Fúrás követően a csavarozáshoz kialakított furatok elszakítják a szálakat. Ennek következményeként a furatok pozíciójának és egymástól való távolságának hatását vizsgálni kell annak érdekében, hogy a húzó- és hajlítófeszültségekkel szembeni ellenállást számszerűsíteni lehessen. E tényezők alapvetően befolyásolják a tönkremenetel módját. Jelen kutatás célja a különböző vastagságú GPR-profilok csavarkötés-minőségének és meghibásodási módjainak vizsgálata [4, 5].

2. Csavarozott kötések meghibásodása GPR-profilokban

A vizsgálatokat megelőzően a szakirodalom áttekintése alapján összefoglaltuk a GPR-profilok csavarkötéseiben előforduló lehetséges hibákat. A lehetséges meghibásodási módokat a 2. ábra



2. ábra. A tönkremeneteli módok csavarozott GPR-lemezek esetén: a) csapágydeformáció b) tiszta húzás, c) nyírás, d) kiszakadás [4]

mutatja. A profilvizsgálat során többféle meghibásodástípus is előfordulhat, amelyeket elsősorban a furatok elhelyezése befolyásol.

A csavarkötéskor a csap-furat illesztés eredményezhet úgynevezett csapágy típusú deformációt, amely a palástfelületek (terheléstől bekövetkező) részleges érintkezésére vezethető vissza. Az illesztés a kötőelemek és a profilok eltérő hővezetéséből adódóan tovább változhat (1. ábra). Az alkalmazás hőmérsékleti viszonyai, valamint a kötőelem-anyag párosítás függvényében választott illesztéssel a hiba előfordulása mérsékelhető. A tiszta húzásos tönkremenetel akkor következik be, ha a furat átmérője és a kötőelem túl nagy az alapanyag szélességéhez képest, ami a lemezek keresztirányú repedését okozza, az alapanyag szakadásával. A nyírásos tönkremenetel a fő terhelési irányokban, a kötőelem által okozott furat határán következik be, akkor, amikor a furat sugáryai távolságnál közelebb van a profil széléhez, vagy a kötőelem átmérője túl kicsi. Ez utóbbi általában a kötőelem törésével jár. A kiszakadásos tönkremenetelt jellemzően az előző típusok együttese okozza, amikor lapos szelvényekben a furat pozíciója nem megfelelő [6, 7].

3. Kísérleti körülmények

Ebben a fejezetben ismertetjük a próbatestek geometriai kialakítását és a kísérlethez szükséges összeállítását. Ezen kívül bemutatjuk az összeállított kísérlettervet.

3.1. A próbatestek kialakítása, kísérlettervezés

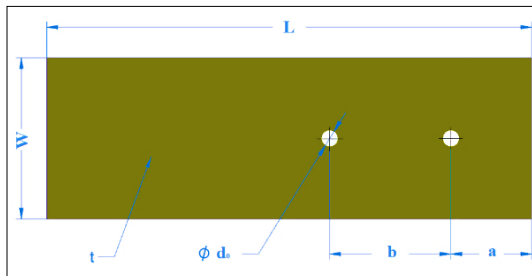
A szakítási kísérletek során az átlapolt GRP-lemezeket csavarkötéssel rögzítettük egymáshoz. Az **3. ábrán** a GRP-lemezek geometriai paramétere láthatók. A kísérletsorozat alatt a próbatestek hosszát (L) és szélességét (W) nem változtattuk. Változó paraméter volt az alapanyag vastagsága (t), a kötőelemek és a furat átmérője (d_0), a furatok közötti távolság (b) és az alapanyag szélétől mért távolság (a) [**6, 8, 9**].

A szakítóvizsgálat során biztosítani kellett az egytengelyű húzó igénybevételt, hogy a szakítógéppel kifejtett terhelőerő (F) a kötés középsíkján hasson. Ezt átlapolt kötések esetén, az alapanyaggal azonos vastagságú hézagoló alátéttel lehet biztosítani (**4. ábra**).

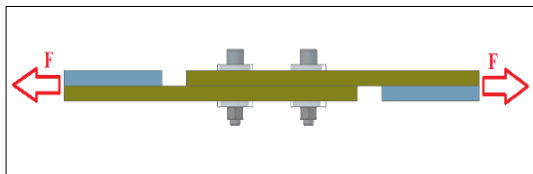
A kísérlethez szükséges kísérleti változókat a kutatási témához kapcsolódó aktuális nemzetközi szakirodalom áttekintése alapján határoztuk meg. A kísérletek összefoglalása az **1. táblázat**-ban látható [**6, 10**]. Kísérletsorunként három szakítópróbát végeztünk. A vizsgálatokhoz MSZ EN ISO 4014 szabványnak megfelelő 8.8-as szilárdsági osztályú csavarokat használtunk. A csavaranyák MSZ EN ISO 4034 szabványnak megfelelő 8-as szilárdsági osztályúak voltak. Alátétnek MSZ EN ISO 7094 szabvány szerinti lapos alátéteket használtunk. A GRP-profilok csavarkötését kedvezően befolyásolja a nagy felületű alátétek alkalmazása. Ez azzal magyarázható, hogy a nagy felület hatására a csavar meghúzása által kifejtett összeszorító erő eloszlik a felületen, ezáltal nem sérti meg a külső üvegszál fátyol szálszerkezetét, illetve nem okoz koncentrált feszültséget a belső szerkezetben. A csavarok meghúzási nyomatékát a szakirodalmi áttekintés alapján határoztuk meg. G. J. Turvey kutatásai során megfigyelte, hogy a kötés minőségét befolyásolja a csavarok meghúzási nyomatéka. Ezért a vizsgálatok során alkalmazott csavar meghúzási nyomatékot kézi erővel meghúzott állapotnak nevezte el, az értékeit az **1. táblázat** tartalmazza [**4, 6, 7**].

3.2. Az alapanyag mechanikai vizsgálata

Az átlapolt próbadarabok kötésének a szilárdságát INSTRON 5800R 4482 univerzális anyagvizsgáló gépen vizsgáltuk meg a vonatkozó szabvá-



3. ábra. A vizsgált GRP-lemezek geometriája



4. ábra. Szakítóvizsgálat elvégzéséhez alkalmas összeállítás

1. táblázat. A kísérletterv összefoglalása, a kísérleti állandók és változók meghatározása

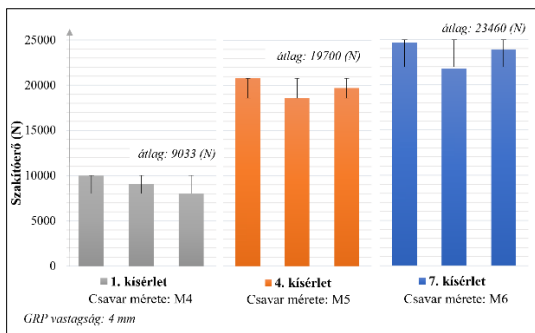
Kísérlet	Próbatest mérete			Furat mérete			Kötőelem	
	Vastagság t (mm)	Szélesség W (mm)	Hossz L (mm)	Alap távolsága a (mm)	Középtávolság b (mm)	Átmérő d_0 (mm)	Csavar méret	Meghúzási nyomaték (Nm)
1	t_1	4	500	25	37,5	4,1	M4	3
2	t_2	6						
3	t_3	10						
4	t_1	4	500	50	75	5,2	M5	6
5	t_2	6						
6	t_3	10						
7	t_1	4	500	100	150	6,4	M6	10
8	t_2	6						
9	t_3	10						

nyok szerint. Referenciamérésként elvégeztük az alapanyag szakítását is. Az alapanyagok szakítóvizsgálata során az alábbi eredményeket mértük: a 4 mm vastag GRP-lemez 50 kN, a 6 mm vastag 75 kN, a 10 mm vastag lemez 95 kN húzóerőnél szakadt el. A referenciaértékek alapján minősíthetjük a kötések jósági fokát, vagy egyszerű összehasonlító vizsgálatokat is végezhetünk.

3.3. Az átlapolat próbatestek mechanikai vizsgálata

A kísérletterv alapján, kísérletsoronként három szakítópróbát végeztünk. Az átlapolat kötéseket szakítópróbája elsősorban csapágy típusú tönkremenetelt okozott. A 6 mm-es és a 10 mm-es lemezvastagságok esetén gyengének bizonyultak a kötőelemek, ugyanis szinte azonos értékeket mértünk a kísérletek során. A tönkremeneteli módok is megegyeztek, minden esetben az alkalmazott kötőelemek nyíródtak el. A 10 mm-es lemezvastagság esetén a furat károsodása csak M6-os csavar alkalmazásakor jelentkezett, de alig észrevehetően. A 6 mm-es lemezvastagság esetén M6-os csavar alkalmazása érzékelhető furatdeformációt, tehát csapágy típusú tönkremenetelt okozott, de a szakítóerő a csavar elnyíródását igazolja, ugyanis szinte teljesen megegyezik a vastagabb lemez esetén mért értékkel. M5-ös és M4-es csavarok alkalmazása esetén egyértelműen a csavarok elnyíródását mértük.

A 4 mm-es lemezvastagság esetén eltérő eredményeket kaptunk. Ezek kísérletszáma az **1. táblázat** alapján az 1., 4. és 7. kísérlet. E kísérletsorok alkalmával minden esetben hármat mértünk, ezek eredményeit tartalmazza az **5. ábra**. Az ábrán látható az egyes kísérletsorok alatt mért szakítóerő-értékek, a mérések átlaga és szórása. Az ábra alapján kijelenthető, hogy az M4-es csavarhoz képest átlagban az M5-ös 218%-kal nagyobb, az M6-os pedig 260%-kal nagyobb terhelést képes elviselni. Az M5-ös csavarhoz képest az M6-os 119%-kal nagyobb terhelést volt képes elviselni. Ez az eredmény egybevág a szakirodalmi állítással, ami a csapágy típusú tönkremenetelhez kapcsolja a legnagyobb kötési szilárdságot. A 4 mm-es GRP-lemez esetén az M4-es csavar nyírási, az M5-ös és M6-os csavar vegyes, de egyre inkább csapágy típusú tönkremenetelt szenvedett.



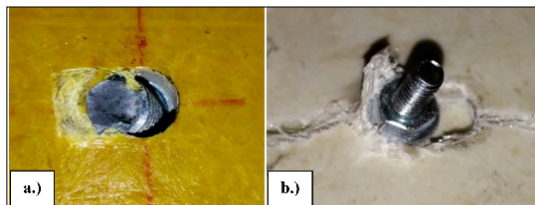
5. ábra. A GRP-lemezek szakítóvizsgálatának eredményei

dett. A csavarok átmérőjének a növelésével egyre nagyobb kötési szilárdságot tudtunk létrehozni, de ennek van egy felső határértéke, amikor a kötőelem átmérőjéhez szükséges furat már túl sok üvegszálat szakít meg, és a tönkremeneteli mód a **2. ábra** szerinti (b és d) tiszta húzási vagy kiszakadásos lesz. Ekkor a kötési szilárdság újra csökkenő tendenciát mutatna.

A kísérlet során két jellegzetes tönkremenetelt figyeltünk meg (**6. ábra**). A gyakoribb a csapágy típusú (**6a. ábra**), amely minden esetben nyírt kötőelemmel párosult, az alapanyag azonban változó mértékben károsodott. A másik, a nyírás típusú tönkremenetel a 4 mm-es lemezvastagság esetén jelentkezett (**6b. ábra**). E meghibásodás során az alapanyagból kiszakadt a kötőelem (a kötőelem károsodása nélkül).

4. Következtetések

A kísérletek alatt két jellegzetes tönkremeneteli típust figyeltünk meg, ezek alapján kijelölhetők a jövőbeli kutatási irányok és értékelhetők a kötések szilárdsági paraméterei. A szakirodalom-kutatás alapján a csapágy típusú tönkremenetel okozza a legnagyobb erőátvitelt. A 10 mm vastagságú GRP-lemezek esetén a felhasznált kötőelemek nem bizonyultak megfelelőnek, ugyanis a kötés meghibásodását minden esetben a kötőelem elnyíródása okozta, a furat jelentősen nem deformálódott. Ezért ennél a vastagságnál további kutatásokra van szükség nagyobb kötőelem-átmérővel. A 6 mm vastagságú lemezek esetén az M4-es és M5-ös csavarok szintén elnyíródtak, a furatot jelentősen nem károsították. M6-os csavar esetén a **6a. ábrán** látható, enyhe furatdeformáció jelentkezett, a mérési eredmények azonban egyértelmű kötőelem-elnyíródást igazolnak. Ezek alapján a 6 mm-es lemezvastagság esetén is további vizsgálatok szükségesek M6-os és nagyobb kötőelemek alkalmazásával. A 4 mm-es GFRP-lemezek vizsgálata során eltérő eredményeket kaptunk. M4-es kötőelem alkalmazása adta a legkisebb kötésszilárdságot, tisztán nyírás típusú tönkremenetelt okozott.



6. ábra. a) Csapágy típusú tönkremenetel nyírt kötőelemmel ($t = 6$, M6-os csavar) b) Nyírás típusú tönkremenetel ($t = 4$ mm, M5-ös csavar)

sú tönkremenetel mellett (**6b. ábra**). A kötőelem szinte sértetlen maradt és kiszakadt az anyagból. Az M5-ös és M6-os csavarok a nyírási és a csapágy típusú meghibásodás vegyes képét mutatták, de végül kiszakadtak az alapanyagból, a kötőelem jelentős károsodása nélkül. A szakítóvizsgálat eredményei alapján (**5. ábra**) a 4 mm vastag GRP-lemez esetén M4-es vagy annál kisebb csavart nem ajánlott alkalmazni, mert nyírási típusú tönkremenetelt okoz, és a kötési szilárdság kedvezőtlenebb, mint M5-ös és M6-os csavar alkalmazása esetén. M5-ös csavar alkalmazása esetén 218%-os, M6-os csavar alkalmazása esetén 260%-os kötési szilárdság-növekedést mértünk az M4-es csavarhoz képest. Látható, hogy a nagyobb kötőelem-átmérő kedvezőbb kötési erőt eredményez, de ennek van egy felső határértéke, amelynél már túl sok erősítőszálat szakít meg a furat, és új tönkremeneteli mód jelentkezik, várhatóan kisebb kötési erő.

Összességében az eredményeink felhasználhatók egy jövőbeni kutatás kiindulási adataiként. Célszerű lenne minden lemezvastagság esetén új kísérletsorozatot végezni nagyobb átmérőjű kötőelemek felhasználásával, részletesen feltérképezni a tönkremeneteli módokat, meghatározni az optimális kötőelemméretet és -elhelyezést. Így ki lehetne dolgozni egy technológiai ajánlást az adott anyagvastagságokhoz.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00052. számú, az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal által kiírt pályázat keretében valósult meg.

Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Barkanov E., Akishin P., Emmerich R., Graf. M.: *Numerical simulation of advanced pultrusion processes with microwave heating*. In Proceedings of the VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering. 2016, vol. 4. 7720–7738).
<https://doi.org/10.7712/100016.2368.5953>
- [2] Gallegos C., Marco F.: *Theoretical and Experimental Performance Analysis of a Cellular GFRP Vehicular Bridge Deck*. 2016.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1737.6887>
- [3] Coelho A. M. G., Mottram J. T.: *A review of the behaviour and analysis of bolted connections and joints in pultruded fibre reinforced polymers*. Materials & Design, 74. (2015) 86–107.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.02.011>
- [4] Bank L. C.: *Composites for construction: structural design with FRP materials*. John Wiley & Sons, 2006. ISBN-13: 978-0471-68126-7.
- [5] Ramful R.: *Failure Analysis of Bamboo Bolt Connection in Uniaxial Tension by FEM by Considering Fiber Direction*. Forest Products Journal, 71/1. (2021) 58–64.
<https://doi.org/10.13073/FPJ-D-20-00066>
- [6] Turvey G. J.: *Single-bolt tension joint tests on pultruded GRP plate – effects of tension direction relative to pultrusion direction*. Composite structures, 42/4. (1998) 341–351.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(98\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(98)00079-8)
- [7] Turvey G. J., Sana A.: *Pultruded GFRP double-lap single-bolt tension joints – temperature effects on mean and characteristic failure stresses and knock-down factors*. Composite Structures 153. (2016) 624–631.
<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.06.016>
- [8] Tajeuna T. A., Légeron F., Langlois S., Labossiere P., Demers M.: *Effect of geometric parameters on the behavior of bolted GFRP pultruded plates*. Journal of Composite Materials, 50/26. (2016) 3731–3749.
<https://doi.org/10.1177/0021998315625101>
- [9] Wang Y.: *Bearing behavior of joints in pultruded composites*. Journal of composite materials, 36/18. (2002) 2199–2216.
<https://doi.org/10.1177/0021998302036018535>
- [10] Mottram J. T., Zheng Y.: *State-of-the-art review on the design of beam-to-column connections for pultruded frames*. Composite structures, 35/4. (1996) 387–401.
[https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(96\)00052-9](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00052-9)