



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

JANDRICS ANDRÁS

TDK DOLGOZAT

SZÉNSZÁLAS KOMPOZITOK SZAKADÁSI NYÚLÁSÁNAK  
PONTOS MEGHATÁROZÁSÁRA ALKALMAS, EGY IRÁNYBAN  
ERŐSÍTETT SZÉNSZÁL/EPOXI-ÜVEGSZÁL/EPOXI RÉTEGEKBŐL  
RAGASZTÁSSAL KÉSZÜLT PRÓBATESTEK KIFEJLESZTÉSE

Témavezető:

*Dr. Czél Gergely*

egyetemi docens

BUDAPEST, 2022

### *Nyilatkozat az önálló munkáról*

Alulírott, *Jandrics András* (Q5NXEK), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Karának hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2022.11.07.

*hallgató*

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani Dr. Czél Gergely docens úrnak, aki szakértelmével és hasznos tanácsaival hozzájárult a dolgozatom elkészültéhez.

# TARTALOMJEGYZÉK

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Bevezetés.....                                                           | 2  |
| 2. Szakirodalmi áttekintés .....                                            | 3  |
| 2.1. Szén/epoxi-üveg/epoxi hibrid kompozitok.....                           | 3  |
| 2.1.1. <i>A hibrid hatás</i> .....                                          | 4  |
| 2.1.2. <i>Hibrid kompozitok gyakorlati alkalmazásai</i> .....               | 4  |
| 2.2. Unidirekcionális kompozit próbatestek szakítóvizsgálata .....          | 5  |
| 2.2.1. <i>Az ISO és ASTM szabványos próbatestek</i> .....                   | 5  |
| 2.2.2. <i>Szakítóvizsgálatok pontosságát rontó hatások</i> .....            | 7  |
| 2.2.3. <i>Új típusú próbatestek</i> .....                                   | 11 |
| 2.2.4. <i>Folytonos védőrétegű próbatest</i> .....                          | 13 |
| 2.3. Célkitűzések a szakirodalom alapján.....                               | 15 |
| 3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések.....                       | 17 |
| 3.1. Felhasznált alapanyagok.....                                           | 17 |
| 3.2. Alkalmazott berendezések.....                                          | 17 |
| 4. új típusú hibrid kompozit Próbatestek kifejlesztése.....                 | 19 |
| 4.1. Próbatest tervezés.....                                                | 19 |
| 4.2. Üvegszálás kompozit rétegek gyártása.....                              | 19 |
| 4.3. Hibrid kompozit szendvics lapok ragasztása .....                       | 21 |
| 5. Hibrid próbatestek szakítóvizsgálati eredményei .....                    | 24 |
| 5.1. Autoklávban együtt térhálósított (co-cured) szendvics próbatestek..... | 24 |
| 5.2. Ragasztott szendvics próbatestek .....                                 | 31 |
| 5.3. Mérési eredmények összehasonlítása .....                               | 38 |
| 6. ÖSSZEFOGLALÁS .....                                                      | 40 |
| 6.1. További megoldásra váró feladatok .....                                | 40 |
| 7. Felhasznált források .....                                               | 41 |

## JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

### Latin betűk

| Jelölés          | Megnevezés, megjegyzés, érték                                               | Mértékegység   |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------|
| p                | nyomás (pressure)                                                           | MPa            |
| E                | rugalmassági modulus (elastic modulus)                                      | GPa            |
| G <sub>II</sub>  | II. módú fajlagos repedésterjesztő erő (mode II strain energy release rate) | N/mm           |
| G <sub>IIC</sub> | II. módú törési szívósság (mode II fracture toughness)                      | N/mm           |
| T                | hőmérséklet (temperature)                                                   | °C             |
| V                | térfogat (volume)                                                           | m <sup>3</sup> |

### Görög betűk

| Jelölés         | Megnevezés, megjegyzés, érték                                     | Mértékegység |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|--------------|
| $\alpha$        | lineáris hőtágulási együttható (coefficient of thermal expansion) | 1/K          |
| $\varepsilon_b$ | szakadási nyúlás (elongation at break)                            | %            |
| $\sigma_x$      | húzófeszültség (normal tensile stress)                            | MPa          |
| $\sigma_y$      | lefejtő feszültség (peel stress)                                  | MPa          |
| $\sigma_z$      | keresztirányú húzófeszültség (transverse tensile stress)          | MPa          |
| $\tau_{xy}$     | nyírófeszültség (shear stress)                                    | MPa          |

### Rövidítések

| Rövidítés | Megnevezés                                                      |
|-----------|-----------------------------------------------------------------|
| CFRP      | szénszál erősítésű kompozit (carbon fibre reinforced composite) |
| GFRP      | üvegszál erősítésű kompozit (glass fibre reinforced composite)  |
| LE        | alacsony nyúlású (low elongation)                               |
| HE        | magas nyúlású (high elongation)                                 |
| PTFE      | politetrafluoretilén (polytetrafluorethylene)                   |

## 1. BEVEZETÉS

A polimerek és polimer mátrixú kompozitok nagy fejlődésen mentek keresztül az elmúlt évtizedekben. Egyre gyakrabban alkalmazzák ezeket a szerkezeti anyagokat teherviselő elemként is, ugyanis alacsony sűrűségük miatt jobb a tömegre vetített szilárdságuk, mint a fémeké, valamint az erősítésük az igénybevételek irányának függvényében beállítható. Ezen tulajdonságok miatt egyre elterjedtebbek a kompozit alkatrészek olyan területeken, mint a repüléstechnika, hajógyártás, sporteszköz gyártás, valamint az olyan high-tech területek, mint az űrtechnika vagy a Forma-1 versenysorozat.

Legtöbbször üvegszálás, szénszálás és aramidszálás kompozitokról beszélünk, de léteznek hibrid kompozitok is, amelyek általában két különböző fajta szálát tartalmazznak. Szén- és üvegszálakat tartalmazó hibrid kompozitok fejlesztésére nagy hangsúlyt fektet az anyagtudomány, ugyanis ezen a területen kiválóan ki lehet használni a két különböző anyag tulajdonságait. A kompozitok méretezése jóval bonyolultabb, mint a homogén izotrop szerkezeti anyagoké (pl. fémek) ezért nagy hangsúlyt kap az anyagvizsgálat. Az egy irányban erősített kompozitok húzóvizsgálatára manapság használt szabványok egyik hátránya, hogy a használatuk során a próbatest gyakran idő előtt tönkremegy, így a vizsgálat nem szolgáltat pontos eredményt. Ez azért van, mert a befogás közvetlen környezetében feszültségkoncentrációk ébrednek. Ha két üvegszálás réteg közé szénszálás réteget teszünk, akkor a szakítóvizsgálat során a nagyobb rugalmassági modulusú, kisebb szakadási nyúlású szénszálás réteget megvédi az alacsonyabb modulusú, de sokkal szívósabb üvegszálás réteg, ezért az így elkészített próbatestek pontosabb eredményt adnak a szénszálás réteg szakadási nyúlásának meghatározásakor.

Cél és társai [1] már foglalkoztak ilyen típusú hibrid próbatestekkel, amelyek kitűnő eredményeket produkáltak, viszont esetükben a különböző prepregeket együtt térhálósították autoklávban, ezért az eltérő hőtágulási együtthatókból adódó, a próbatestek szobahőmérsékletre hűlése során keletkező maradó feszültségek miatt utólagos korrekciót kellett végezniük a szénszálás réteg mért szakadási nyúlásán.

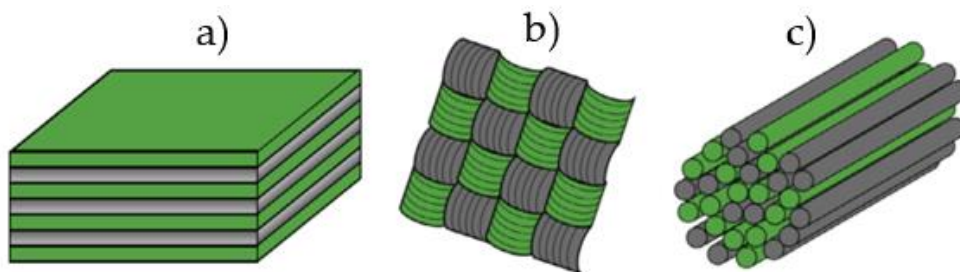
Lehetséges alternatíva, hogy a már kitérhálósított üvegszálás és szénszálás kompozit lapokat szobahőmérsékleten ragasztjuk össze. Az így elkészült hibrid kompozit próbatesteknél már nem kell korrigálni a mért eredményeket és a folyamat is egyszerűbb. A dolgozatomban ilyen ragasztott próbatestek kifejlesztésével foglalkoztam, különös figyelmet fordítva a gyártási folyamat nehézségeinek feltárására, valamint a szénszál/epoxi réteg szakadási nyúlásának minél pontosabb meghatározására. Ezenkívül összehasonlítottam a ragasztott próbatestek eredményeit olyan eredményekkel, amelyeket együtt térhálósított próbatestek mérése során kaptam.

## 2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A kutatás kezdetén a kapcsolódó szakirodalmat tanulmányoztam. A fejezetben bemutatom a hibrid kompozitokkal kapcsolatos alapismereteket és a különböző unidirekcionális kompozit próbatestekkel kapcsolatos kutatási irányokat.

### 2.1. Szén/epoxi-üveg/epoxi hibrid kompozitok

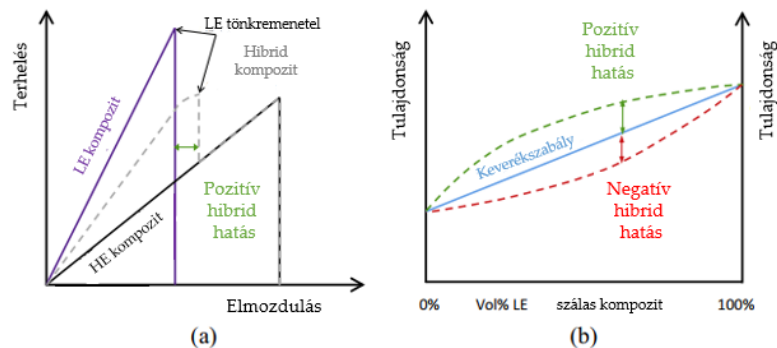
A kompozit anyagok kitűnő merevséggel és szilárdsággal rendelkeznek, alacsony sűrűség mellett. Esetleges felmerülő probléma lehet az anyag szívóssága. Napjainkban aktív kutatások folynak ezen a területen. Erre a problémára kínál megoldást a hibrid kompozitok alkalmazása. Hibrid kompozitok alatt olyan anyagokat értek, amelyek befoglaló mátrixa legalább kettő különböző típusú erősítőanyagot tartalmaz. Általában a kétféle különböző szállal erősített polimer mátrixú kompozitokat értjük alatta. A különböző szálak együttes alkalmazása ígéretes a kompozit anyagok szívósítására, mechanikai tulajdonságaik kiegyensúlyozására, a szálak előnyös tulajdonságainak megtartására és bizonyos hátrányok kiküszöbölésére. Például a laminátok közepében szénszál helyett üvegszálat alkalmazva csökkenthetjük a költségeket, miközben a hajlító tulajdonságok szinte változatlanok maradnak. Továbbá a hibrid kompozitok kitűnően alkalmazhatóak a szénszál ridegsége miatt korlátozott szakadási nyúlási értékek kiterjesztésére, ugyanis a kis nyúlású szálakkal erősített rétegek szakadása után a nagyobb nyúlású szálak fel tudnak még venni terhelést. Ez a jelenség alkalmazható akár a szerkezetek túlterhelésének előrejelzésére is. Az alacsony és magas nyúlási értékű szálak a kompozitban több különböző módon kombinálhatóak. Ezek közül a három legfontosabb a rétegenkénti („interlayer”), a rétegen belüli („intralayer”), valamint a szálankénti („inrayarn”) felépítés. Ezek a 1. ábrán láthatóak. [2-4]



1. ábra: Szén- és üvegszálak különböző kombinálási lehetőségei: a) interlayer, b) intralayer, c) inrayarn. [2]

### 2.1.1. A hibrid hatás

A hibrid hatás legegyszerűbb értelmezése azt mondja ki, hogy az alacsony szakadási nyúlású szálakkal erősített rétegek (pl. szénzál/epoxi) törési nyúlása látszólag megnövekedik egy nem hibrid, alacsony szakadási nyúlású szállal erősített kompozit tönkremeneteléhez képest. Egy másik meghatározás szerint a hibrid hatás eltérés az általános keverékszabályoktól. Ez a szakadási nyúláson kívül egyéb mechanikai jellemzőkben is megjelenhet. A hibrid hatás két definíciójának szemléltetése látható a 2. ábrán. Az egyre gyarapodó mérési adatoknak köszönhetően elméleti hipotéziseket állítottak fel a hibrid hatáshoz kapcsolódóan, többnyire a rétegenkénti és a szálankénti felépítésre alkalmazva. Az egyik ilyen a maradó feszültségek hipotézise, amely az erősítőszálak különböző hőtágulási együtthatók következtében létrejövő maradó feszültségekhez kapcsolódik. Egy másik hipotézis az unidirekcionális kompozit próbatestek tönkremenetele során létrejövő dinamikus feszültség koncentrációkat vizsgálja, amelyek a szálakon a szakadás következtében mintegy hullámszerűen végighaladó feszültség következtében jönnek létre. Meg kell azonban jegyezni, hogy a hibrid kompozitokban tapasztalt tönkremeneteli nyúlás növekmény lehetséges oka, hogy a kis nyúlású szálakkal erősített réteg esetén a viszonyítási alapot szolgáltató nem hibrid próbatestek rendszerint a befogás környezetében mennek tönkre az ott fellépő feszültségkoncentráció hatására. [2]



2. ábra: Hibrid hatás kétféle értelmezése (HE – magas szakadási nyúlású, LE – alacsony szakadási nyúlású) [2]

### 2.1.2. Hibrid kompozitok gyakorlati alkalmazásai

A szén- és üvegszál erősítésű hibrid kompozitok használata széleskörű az iparban. A teljesítmény és az ár-érték arány megfelelő kihasználásával szemben támasztott igény segíti elő a hibridizáció alkalmazását. Különösen elterjedtek a hibrid kompozitok a sportiparban: különböző szörfdeszkák, árbocok, sílécek és snowboardok, különböző ütők, valamint például a Formula 1-ben alkalmazott bukósisakok esetén is szén- és üvegszál hibridizációját használják. A sportiparon

kívül jelentős felhasználási terület a szélerőművek lapátjainak szerkezete, a szélenergia árának csökkentése érdekében. [5]

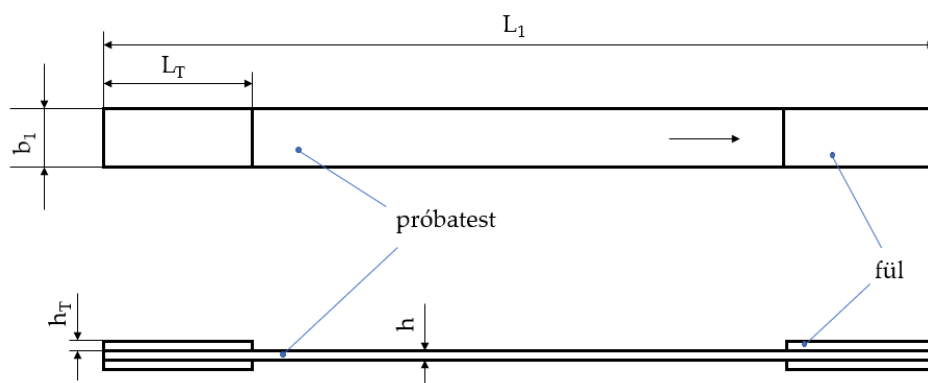
## 2.2. Unidirekcionális kompozit próbatestek szakítóvizsgálata

Anyagvizsgálat terén jelentős hangsúlyt helyeznek a kutatások a megfelelő próbatest geometria kiválasztására, továbbfejlesztésére. A polimer kompozitok anyagvizsgálatának kiindulópontja az egy irányban erősített, azaz unidirekcionális próbatestek húzóvizsgálata. A vizsgálat során olyan alapvető mechanikai tulajdonságokat lehet meghatározni, mint az anyag szakítószilárdsága, szakadási nyúlása és rugalmassági modulusa. Ezek elengedhetetlen bemenő paraméterek a kompozit anyagokból készülő termékek tervezésénél.

### 2.2.1. Az ISO és ASTM szabványos próbatestek

Az unidirekcionális kompozit próbatestek szabványos szakítóvizsgálatát jelenleg az ISO 527-5-ös és az ASTM D3039-es szabványok írják le. Meg lehet még említeni az ASTM D5083-as szabványt is, amely szintén hőre nem lágyuló mátrixú kompozitok szakítóvizsgálatával foglalkozik.

Az ISO 527 használható hőre lágyuló, hőre nem lágyuló mátrixú kompozitokra, beleértve az előre impregnált, prepregből készült kompozitokat is, valamint magába foglalja az erősítőszálak valamennyi anyagát (üveg, szén, aramid, stb.) és az egy irányban álló szálak összes elterjedt kisserelését (szál, roving, unidirekcionális szövetek és szalagok). A szabvány a méréshez kétfajta próbatestet ír elő, amelyek egymásra merőleges szálirányukban, valamint szélességükben és vastagságukban különböznek. Az A típusú próbatest esetén a szálak párhuzamosak a terhelés irányával, teljes hossza 250 mm, amelyből az extenzométerekhez javasolt mérési hossz 50 mm. Szélessége  $15 \pm 0,5$  mm, vastagsága  $1 \pm 0,2$  mm. A próbatestek oldalainak 0,2 mm-en belüli párhuzamossággal kell rendelkezniük. A B típusú próbatest szálai a terhelés irányára merőlegesek, szélessége  $25 \pm 0,5$  mm, vastagsága pedig  $2 \pm 0,2$  mm. A próbatest végeire ragasztott fülek, amelyek megvédik a próbatestet a befogópofa karmai által okozott roncsolódásoktól, mindkét típus esetén üvegszál erősítésű kompozit lapok, a próbatest hosszanti tengelyével  $\pm 45^\circ$ -ot bezáró száliránnyal, keresztirányú (cross-ply) rétegrendben. A próbatestre rögzítés nagy nyúlású szerkezeti ragasztóval történik. A fül vastagsága 0,2 és 2 mm közé kell esnie, elvékonyodás nélkül. Az ISO szabványos próbatest vázlata az 3. ábrán látható. [6]



3. ábra: Szabványos próbatestek vázlata -(Az ábrán található méretek részletezését lásd az 1. táblázatban)

Az ASTM D3039 szabvány hasonló leírásokat tartalmaz, mint az ISO 527, viszont bizonyos esetekben eltér attól, valahol pedig szabadabb kezet hagy a vizsgáló személy(ek)nek. A geometriára vonatkozó előírásokat három kategóriába sorolja be: általános követelmények (kötelező forma és tűrések), specifikus követelmények (nem kötelező, de ajánlott méretek) és részletes példák (nem kötelező, tipikus alkalmazások). A próbatestnek állandó téglalap keresztmetszete kell, hogy legyen. Minimum hossza a következőképp van meghatározva: befogás + kétszer a szélesség + a mérési hossz. További paraméterek meghatározása szükség szerint történik, de a szabvány tartalmaz javaslatokat is a különböző dimenziókra. Ezek összehasonlítását az ISO 527-es előírt méretekkel az 1. táblázat tartalmazza. A szélesség és a vastagság értékei elősegítik, hogy a mérési hosszban következzen be a tönkremenetel. [7]

| Szabvány   | Szélesség,<br>$b_1$ [mm] | Teljes<br>hossz,<br>$L_1$<br>[mm] | Vastagság,<br>$h$ [mm] | Fül<br>hossza,<br>$L_T$<br>[mm] | Fül<br>vastagsága,<br>$h_T$ [mm] | Fül<br>ferdeségi<br>szöge [°] |
|------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| ASTM D3039 | 15                       | 250                               | 1                      | 56                              | 1,5                              | 7 vagy 90                     |
| ISO 527    | 15                       | 250                               | 1                      | >50                             | 0,2-2                            | 90                            |

1. táblázat: Javaslatok a különböző próbatestek méreteire ASTM D3039 és ISO 527 alapján [6][7]

Fül használata nem feltétlenül szükséges, de a szabvány javaslatot ír elő különböző megoldásokra. Említést tesz súrlódáson alapuló fülekről is, amelyeket nem szükségszerű a próbatesthez ragasztani. A legelterjedtebb ilyen fül az egyszerű csiszolópapír, abrazív oldalával a próbatest felé fordítva. Természetesen ezeknek is ki kell bírniuk a befogókból származó nyomást. A fülek ajánlott anyagára az ASTM szabvány is az ISO-hoz hasonlóan a cross-ply rétegrendű üvegszálak kompozit lapokat ajánlja. A ragasztó ajánlás is megegyezik: egy nagy szakadási nyúlású szerkezeti ragasztó, amely megfelel a környezeti és mechanikai követelményeknek.

A D3039-es szabvány meghatároz egy összefüggést, amellyel a fül minimális hosszát lehet kiszámolni.

$$L_{min} = F^{tu}h/2F^{su} \quad (1)$$

ahol  $L_{min}$  [mm] a fül szükséges minimális hossza,  $F^{tu}$  [MPa] a próbatest anyagának szakítószilárdsága,  $h$  [mm] a próbatest vastagsága,  $F^{su}$  [MPa] pedig az alkotók (szerkezeti ragasztó, próbatest, fül) nyírószilárdsága közül a legalacsonyabb értékű. [7]

Az ISO próbatestek befogásának kialakításához dolgoztak javaslatként a 90-es évek közepén Hoyo és társai [8], egy kampányszerű kísérletsorozat keretein belül. Vizsgálták a különböző nemzeti szabványokat: a japán JIS K7073, az európai prEN 2561 és a német DIN 29971 szabványokat, valamint szerepelt a próbatestek között a már említett az amerikai ASTM D3039. A kialakítások összehasonlítását szemlélteti a 2. táblázat. A feszültségeloszlás vizsgálata során megállapították, hogy a normál, ferdeség nélküli fülek tövében jelentősebb feszültségkoncentráció keletkezik, mint a ferde fül esetében, viszont a ferde fülek között a próbatestekben erőteljes rétegelválás jött létre, némelyik próbatest a fülek alatt eltört. A mérésorozat során megállapították, hogy a különböző kialakítású fülekkel rendelkező próbatestek szilárdságában nem volt számottevő különbség. Mivel a normál, egyenes fül kialakítás sokkal idő- és költségkímélőbb megoldás, végül amellet döntöttek, hogy ezt a verziót javasolják az ISO szabványhoz.

|            | JIS K7073     | ASTM<br>D3039-76  | prEN 2561                      |             | DIN 29971         |
|------------|---------------|-------------------|--------------------------------|-------------|-------------------|
|            |               |                   | A, B                           | C           |                   |
| Fül alakja | ferde         | ferde             | normál                         | fül nélküli | normál            |
| Fül anyaga | GFRP<br>szótt | GFRP<br>cross-ply | GFRP<br>+45°/-45°<br>cross-ply | -           | GFRP<br>+45°/-45° |

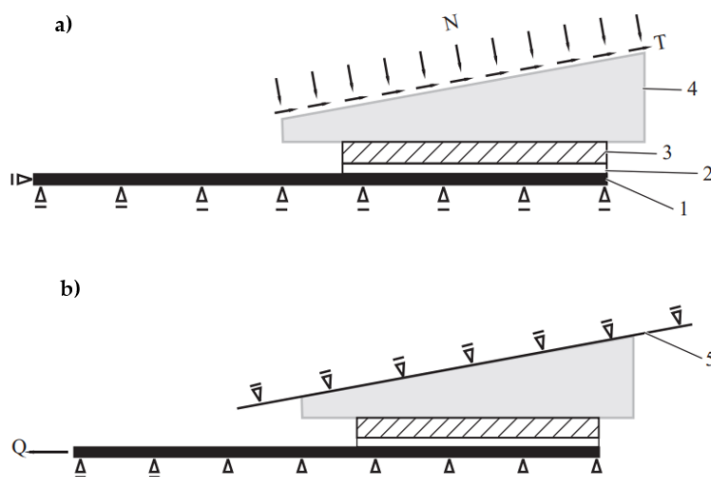
2. táblázat: Különböző nemzeti szabványok által előírt fül kialakítások [8]

### 2.2.2. Szakítóvizsgálatok pontosságát rontó hatások

Egy vizsgálat akkor jó, ha megfelelően reprezentálja az anyaggal szemben támasztott követelményeket és az előírásokat. Természetesen vannak olyan tényezők, hatások, amelyek kisebb-nagyobb mértékben ezt befolyásolják, ezáltal a mérési eredményt rontják. Az egyik leggyakoribb következmény, hogy a próbatest a befogás közvetlen közelében megy tönkre, nem pedig a várt módon, a mérési hossz (gauge length) A mért szakadási nyúlás értékek pedig jelentősen alacsonyabbak, mint amit a szálak szakadási nyúlása alapján várnánk. Ennek a

legfőbb oka az, hogy a befogásnál feszültségkoncentráció alakul ki és ezen a területen kezdenek először mikropedések kialakulni az anyagban. [9]

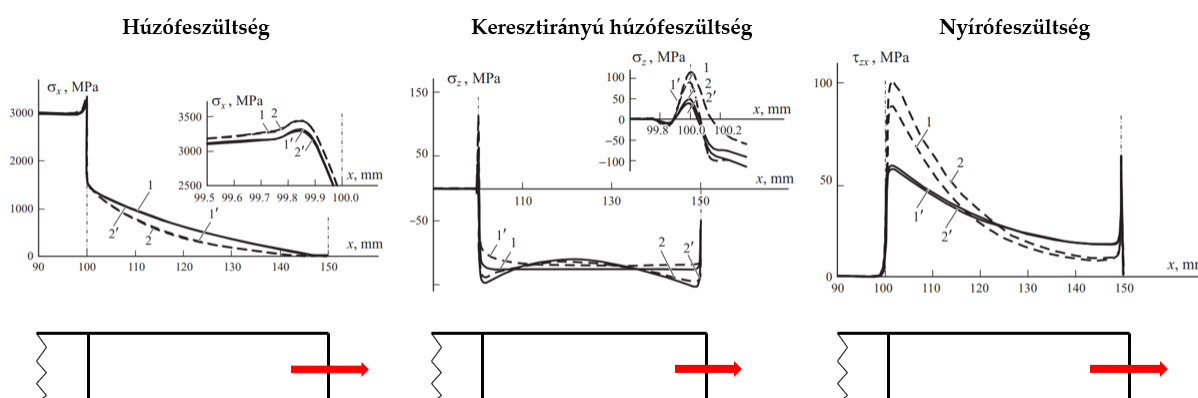
Portnov és társai [9] végelelemes vizsgálatot végeztek nagyszilárdságú, unidirekcionális szén/epoxi kompozit próbatestek szakítóvizsgálatára: A kritikus területet vizsgálták, ahol a terhelés a fülekről a próbatestre adódik át. A modellezett próbatestek geometriája a már részletezett ASTM D3039 szabványnak megfelelő volt. Ragasztónak poliuretán szerkezeti ragasztót használtak, míg a fül szőtt üvegszál erősítésű kompozit lap volt. Számításaik során két modellt alkalmaztak, egy érintkezési peremfeltétellel rendelkező és egy ezt nélkülöző modellt, amelyek a befogópofákra adott erőbevitel módját különböztették meg. Ezek a 4. ábrán láthatóak. Az érintkezésmentes esetben az ék alakú befogópofára egy egyenletesen eloszló nyíróerőt ( $T$ ) és egy normál nyomóerőt ( $N$ ) adtak rá. Ezzel szemben a kontakttal rendelkező modell során egy  $Q$  húzóerőt alkalmaztak a próbatestre. Ebben a modellben a befogópofa egy csúszásmentes külső felülethez érintkezik. A külső erőket úgy választották meg, hogy a próbatestek vizsgált zónájában (working zone) egységesen 3000 MPa legyen a tengelyirányú húzófeszültség. Az eredmények szempontjából a kontakttal rendelkező modell állt közelebb a valósághoz, viszont ebben az esetben csúszásmentes kapcsolatot feltételeztek a merevnek tekintett befogópofákon. (4. ábra, 5) A szimulációk során kettő, elasztikus és elasztoplasztikus anyagmodellt is használtak. Utóbbit a poliuretán ragasztó minél pontosabb modellezése érdekében.



4. ábra: A befogások modellezési módjai: a) érintkezési peremfeltétel nélküli és b) érintkezési peremfeltétellel rendelkező modell. 1 - kompozit próbatest, 2 – ragasztó réteg, 3 – fül, 4 - befogópofa, 5 – érintkezési felület. [9]

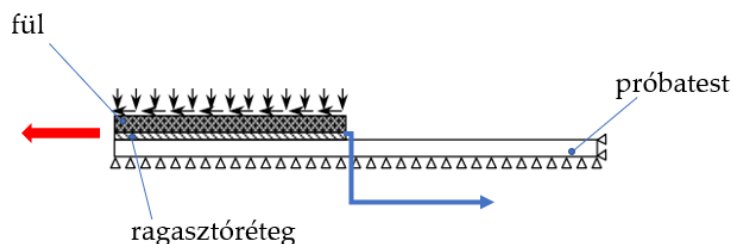
A feszültségeloszlásokat vizsgálva az 5. ábrán, a szénzál erősítésű kompozit próbatest külső felületén megállapítható, hogy a két különböző modellel előállított eredmények nem sokban térnek el egymástól, ami a  $\sigma_x$  húzó és  $\sigma_z$  vastagság irányú

feszültséget illeti. Mindkét esetben jól látható, hogy a feszültségek maximum értéke hirtelen ugrással a fül szélén jelentkezik, túlterhelést okozva ezen a területen a mérési hosszhoz képest. Hasonló feszültségkoncentráció mutatható ki a nyírófeszültség ( $\tau_{xz}$ ) esetében is, viszont ott az érintkezési peremfeltételekkel rendelkező modell esetében az érték közel 29%-kal magasabb. A  $\sigma_z$  feszültség a fül alatt nyomó jellegű és közel egyenletes eloszlású, kivéve a fül elülső élénél. Ez a feszültségcsúcs káros, ugyanis növelheti a nyírófeszültséget a ragasztórétegben. A diagramokon 1-es számozással vannak jelölve az érintkezésmentes, 2-essel pedig az érintkezési felületekkel rendelkező modellek. Normál számmal jelölték az elasztikus, vesszővel pedig az elasztoplasztikus anyagmodellel készített szimulációt. [9]

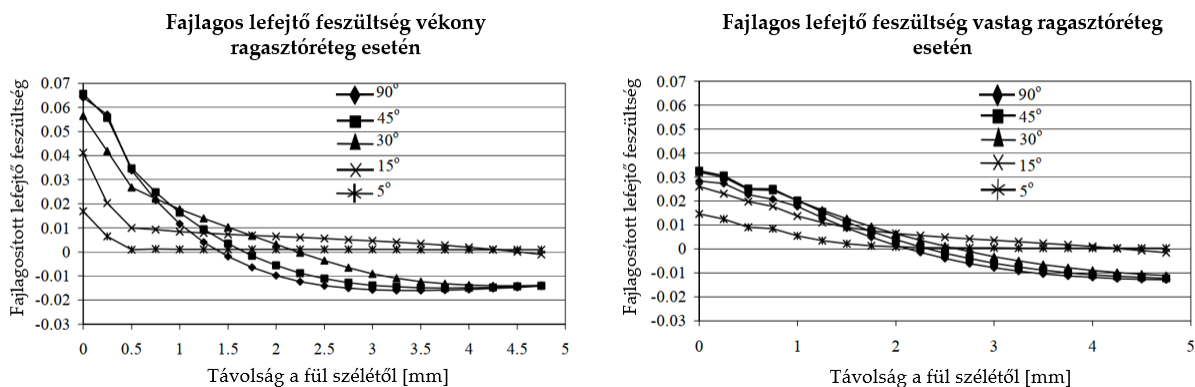


5. ábra: Feszültségeloszlás a szén/epoxi kompozit próbatest hossza mentén.  
(A piros nyíl a húzás irányát jelöli.) [8]

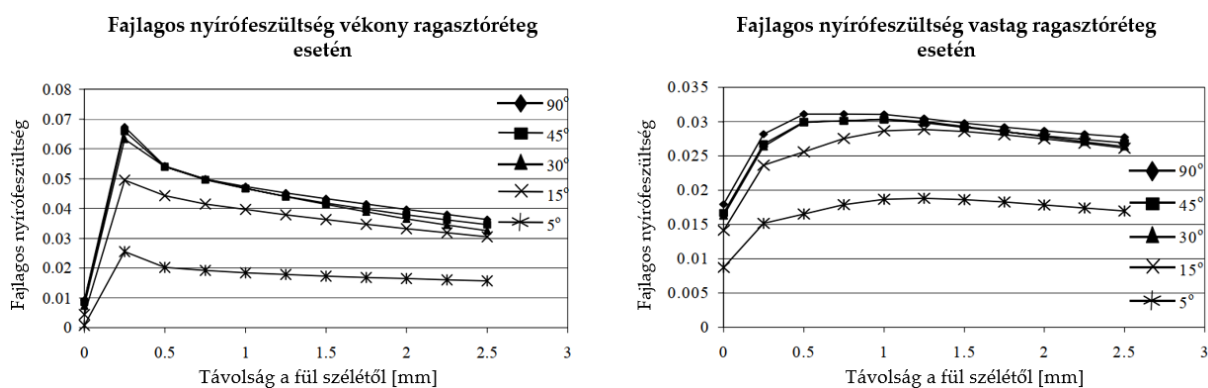
Hasonló feszültségkoncentrációs csúcsokat mutat be Adams és Adams [10] a kompozit húzó próbatestek fülének felragasztásához készített segédlete. A tanulmányban ők is végeselemes szimulációval ismertetik a fülek szélein megjelenő feszültségcsúcsokat. A vizsgálat során a fülek ferdeségi szögének feszültség csökkentő hatását vizsgálják, majd több szögérték esetén mutatják be a fül szélétől mért távolság függvényében a  $\sigma_y$  lefejtő, valamint a  $\tau_{xy}$  nyíró feszültség értékek alakulását. A ragasztás során külön vizsgálták a vastagabb (1,27 mm), illetve vékonyabb (0,25 mm) ragasztóréteg hatását. A feszültség értékek fajlagosítva vannak a távol a vizsgált területtől, a mérési hosszzen fellépő  $\bar{\sigma}_x$  tengelyirányú feszültséggel. A 6. ábra mutatja be a szimmetria miatt negyedelt próbatest modellt. Az ábrán piros nyíl jelöli a húzás irányát, a kék nyíl pedig azt jelöli, hogy az eredményeket szemléltető, 7. és 8. ábrákon honnan indulnak a görbék, ahonnan a szabad hossz irányába tartanak.



6. ábra: A próbatest modellje [10]



7. ábra: Lefejtő feszültségek a fül szélétől, a fülek különböző ferdeségi szögének figyelembevételével [10]



8. ábra: Nyírófeszültségek a fül szélétől, a fülek különböző ferdeségi szögének figyelembevételével [10]

A diagramokról látszik, hogy a nyírófeszültség a fül széleinél koncentrálódik, ami a ragasztórétegben kialakuló lefejtő feszültséggel kiegészülve könnyedén előidézhetheti az idő előtti tönkremenetelt. Vastag ragasztóréteggel a fül tövében a feszültségugrás mértéke kb. a felére csökken és az eloszlása is egyenletesebb. A legjobb eredményt a feszültségkoncentráció csökkenésére az 5°-os ferdeségű fül kialakítás eredményezte, viszont ezt körülményes és drága legyártani. Mivel a kisebb ferdeségi szögű fülek kialakítása nehézkes, a szerzők 10-15° közötti értéket javasolnak. [10]

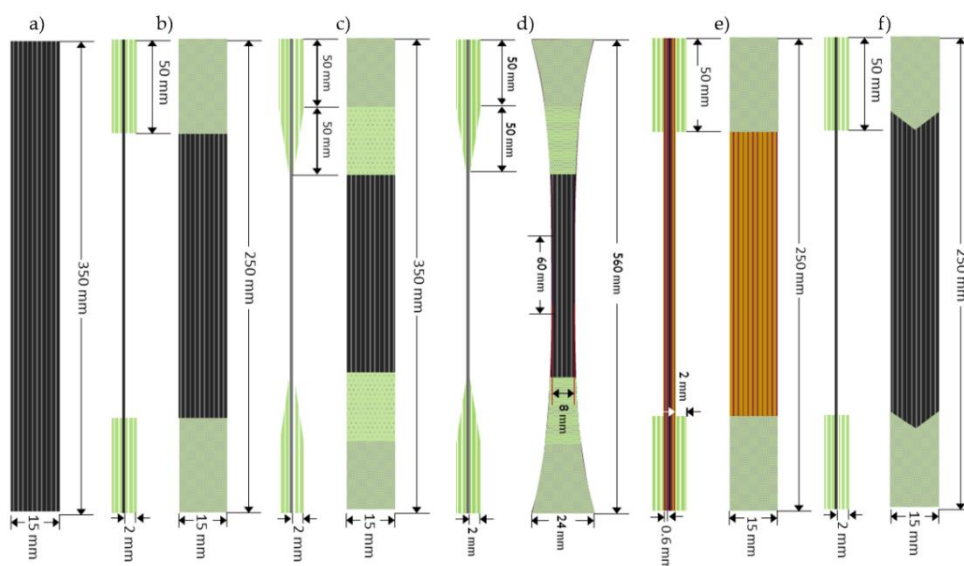
### 2.2.3. Új típusú próbatestek

A legnagyobb kihívást az előző alfejezetben ismertetett, a befogás közvetlen környezetében keletkező feszültségkoncentráció kiküszöbölése jelenti. Fazlali és társai [11] a különböző kompozit próbatest geometriákat és azok szakítóvizsgálatából meghatározott mechanikai jellemzőket vizsgálták. Leírják, hogy a feszültségkoncentrációt az alábbi tényezők befolyásolják:

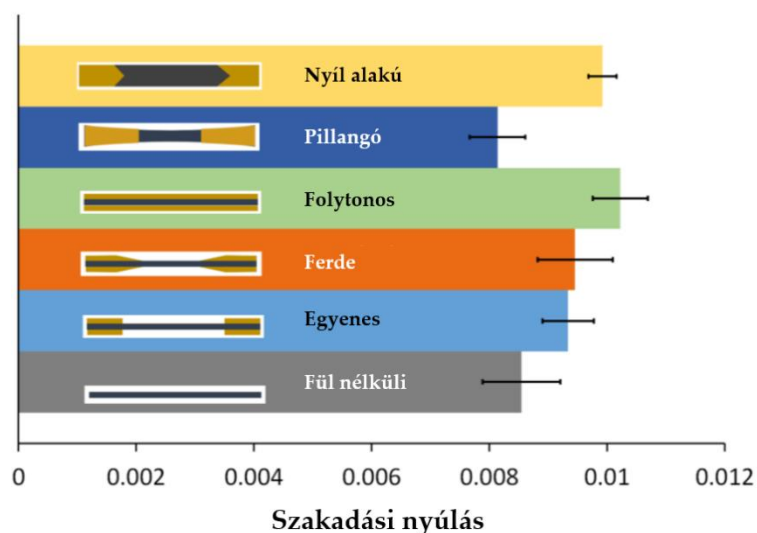
- A fül anyaga: ajánlottan üvegszál erősítésű kompozitok, az alacsony merevségük, megfelelő nyírószilárdságuk és széleskörű elérhetőségük miatt.
- A fül hossza: hosszabb fülek használatakor alacsonyabb szorítóerőt kell a befogópofáknak kifejteniük és emiatt kisebb feszültségkoncentrációk jönnek létre.
- A fül vastagsága: a fül vastagságát csökkentve vele együtt csökkennek a folytonossági zavarok és a keresztirányú feszültségek. Egy megfelelő vastagsággal rendelkező fül megvédi a próbatestet a felületi sérülésektől.
- A fül geometriája: az ASTM és ISO szabványok ajánlásai közül a ferdeséggel rendelkező fület érdemes használni, ez ugyanis kisimítja a geometriai egyenetlenséget, ezáltal füllel rendelkező rész merevsége nem hirtelen csökken, hanem fokozatosan. Egy megfelelően sima átmenet csökkenti a feszültségkoncentrációkat is. A feszültségkoncentrációk kiküszöbölésére legjobb kialakítás az először Czél és társai [1] által használt, próbatest hossza mentén folytonos védőréteg. Szintén ez a kialakítás eredményezi a szénszál erősítésű kompozitok legmagasabb szakadási nyúlás értékét.
- A ragasztó tulajdonságai és vastagsága: egy alacsony modulusú szívós, vastag ragasztóréteg képes csökkenteni a feszültségkoncentrációkat.
- A próbatest geometriája: az ASTM és az ISO szabványok által javasolt téglalap alakú próbatest téglalap alakú füllel nem bizonyul a legjobb választásnak unidirekcionális próbatestek szakítóvizsgálata esetén, mivel a geometriában éles átmenetek vannak, amelyek idő előtti tönkremenetelt idézhetnek elő. Kedvezőbb kialakítás a feszültségkoncentrációk csökkentése érdekében például a finomabb átmenetekkel rendelkező pillangó alakú próbatest.
- A próbatest füleinek pozíciója a befogópofában: fontos szerepet játszik a keresztirányú feszültségek és a fül-próbatest rétegeltválás csökkentésében, hogy a fül rész teljesen fedésben van-e a pofában, esetleg egy része kilóg belőle.

Fazlali és társai tanulmányukban négy féle fül geometriát és kettő féle próbatest geometriát vizsgáltak. Megállapították, hogy a fül nélküli próbatestek szakadási nyúlása kb. 9%-kal alacsonyabb, mint a szabványos, fülekkel rendelkező próbatestek esetében. Ez a fülek használatának szükségességét támasztja alá. A fülek

ferdeségének csökkentése  $2^\circ$ -ra nem növelte jelentősen a szakadási nyúlás értékeket. Általánosságban elmondható a kutatásaik alapján, hogy a ferdeségi szög csökkentése növeli a fül leválásának valószínűségét a megfelelő szorítóerő hiánya és a magasabb keresztirányú feszültség kialakulása miatt. A folytonos védőrétegű próbatestek átlagosan 8,5%-kal növelték a mért szakadási nyúlást az ASTM szabványbeli próbatesthez képest, viszont ezek esetében hátrány, hogy nem lehet közvetlenül mérni a nyúlást, valamint a két különböző anyag miatt az egyszerre térhálósítás során maradó nyúlások keletkeznek, ezért az eredményeket utólag korrigálni kell. A pillangó alakú próbatest bár viszonylag egyenletes feszültségeloszlást biztosít a mérési hosszban, de a gyártás során keletkező sérülések és a szálakkal párhuzamos repedések korai tönkremenetelt idézhetnek elő. Ez a próbatest kialakítás eredményezte a legalacsonyabb szakadási nyúlást. Az ASTM szabványhoz képest még jelentős, 6,1%-os növekedést a nyíl alakú fülekkel ellátott próbatest eredményezett. Külön előnye ennek a fajtának, hogy közvetlenül mérhető a nyúlás a szénszál/epoxi réteg felületén, valamint eloszlatja a feszültségkoncentrációkat a fül pereme mentén, valamint finomabb feszültségátmenetet biztosít, mivel a nyíl alakú fül pereme hosszabb, mint az egyenes szélűé. A különböző próbatest kialakítások és egymáshoz képesti teljesítményük a 9. és 10. ábrákon láthatóak. [11]



9. ábra: Különböző unidirekcionális kompozit szakítópróbatest kialakítások (nem méretarányos ábra; a – fül nélküli kialakítás, b – egyszerű ISO próbatest, c – ferde füllel rendelkező kialakítás, d – pillangó kialakítás ferde füllel, e – folytonos védőrétegű kialakítás egyenes fülekkel, f – nyíl alakú fül kialakítás) [11]

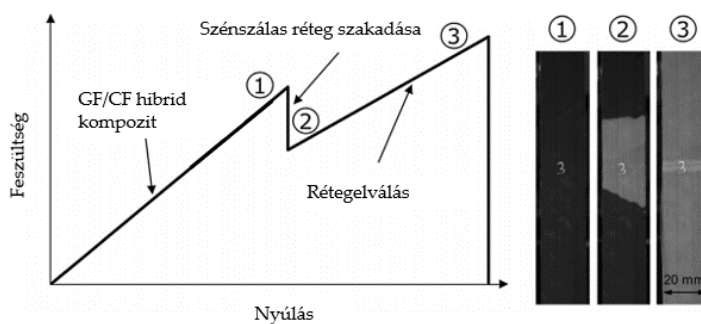


10. ábra: Próbatestek szakadási nyúlásának összehasonlítása [11]

#### 2.2.4. Folytonos védőrétegű próbatest

Ahogy az előző alfejezetből is látszik, a folytonos unidirekcionális üvegszálak kompozit védőrétegekkel szendvicsszerkezetet alkotó szénszálak kompozit próbatest eredményezte a legmagasabb szakadási nyúlási értéket. A kiemelkedő nyúlási értéken kívül további előnyei is vannak ennek a kialakításnak. Az üvegszálak rétegek megvédik a középen elhelyezkedő, vizsgált, jóval merevebb, teherviselő szénszálak réteget az idő előtti tönkremeneteltől, ugyanis az üvegszálak kompozit rétegnek magasabb a szakadási nyúlása. Ez a jelenség annak köszönhető, hogy a folytonos fül alkalmazása képes megszüntetni a befogás közelében fellépő feszültségkoncentrációkat. [1]

Czél és társai [1] úgy tervezték meg ezeket a próbatesteket, hogy a merev szénszálak réteg szakadása után az üvegszálak védőréteg veszi fel a terhelést és azonnal instabil rétegelválás jön létre a szabad hosszon, ami egy jól kiértékelhető feszültségcsökkenést eredményez a szakítódiagramon. Ez látható a 11. ábrán.



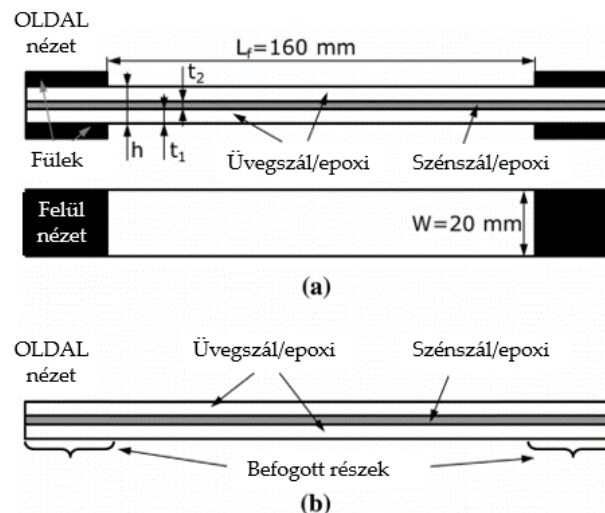
11. ábra: Erőesés a kis nyúlású réteg törésekor rétegek közti hibrid kompozitok esetén és a rétegelválás megjelenése a szénszál/epoxi-üvegszál/epoxi hibrid próbatesten [1]

Méréseik során többnyire használtak extra füleket a próbatestek végén, de egy sorozatnál ezt elhagyták, bizonyítva, hogy folytonos védőrétegű próbatest esetén nem feltétlenül szükségesek. A próbatestek sematikus ábrája a méretekkel a 12. ábrán látható. A tervezett tönkremenetel eléréséhez két tervezési irányelvet határoztak meg:

1. A külső, üvegszálak réteg szakadási nyúlásának jelentősen nagyobbak kell lennie, mint a szénszálak rétegé, hogy ne menjen tönkre azzal együtt.
2. A II. módú fajlagos repedésterjesztő erő ( $G_{II}$ ) a szénszál tönkremenetelekor magasabb kell legyen, mint a határfelület II. módú törési szívóssága ( $G_{IIC}$ ). Ez azért fontos, hogy a szénszálak réteg törésekor azonnal rétegelválás lépjen fel, amely jól detektálható feszültség esést eredményez a szakító diagramon. Ez a vizsgálati eredmények pontos kiértékeléséhez elengedhetetlen.

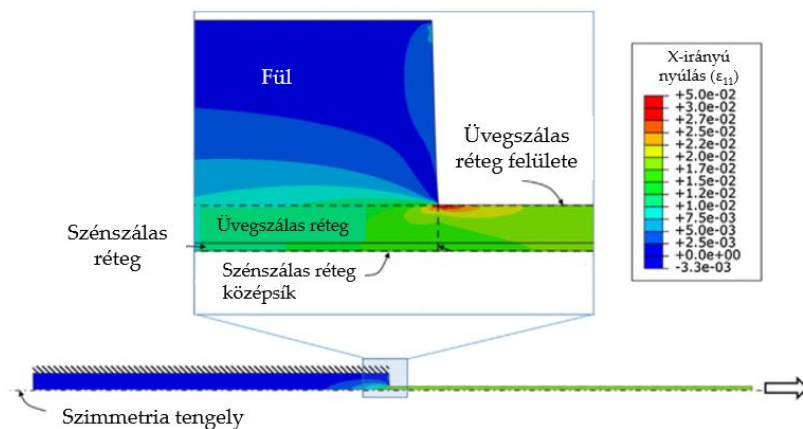
$$G_{IIC} < G_{II} = \frac{\varepsilon_{2b}^2 E_2 t_2 (2E_1 t_1 + E_2 t_2)}{8E_1 t_1} \quad (2)$$

ahol  $E_1$  az üvegszálak, míg  $E_2$  a szénszálak réteg rugalmassági modulusa,  $t_1$  az üvegszálak réteg, míg  $t_2$  a szénszálak réteg vastagsága,  $\varepsilon_{2b}$  pedig a szénszálak réteg várható szakadási nyúlása.



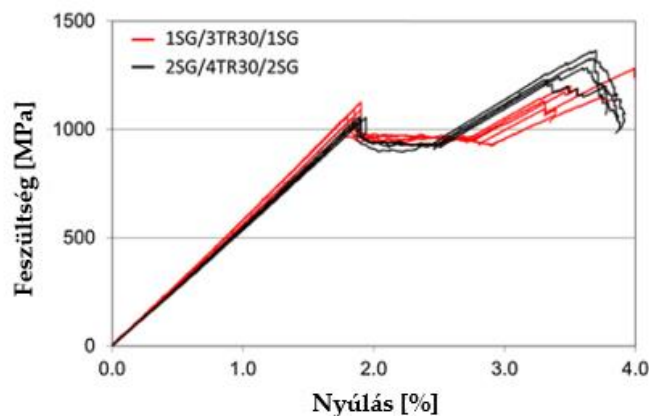
12. ábra: Próbatest geometriák a) fülekkel rendelkező, b) fül nélküli folytonos védőrétegű próbatestek [1]

A bemutatott próbatest feszültségkoncentráció mentes viselkedését végeeselemes számításokkal is alátámasztották. A szimulációhoz lineárisan elasztikus anyagmodellt használtak. Ahogy a 13. ábra is szemlélteti, a magas alakváltozású területek a nagy szakadási nyúlású üvegszálak rétegre korlátozódnak. A feszültségkoncentráció az üvegszálak rétegben a befogás környezetében biztosítja, hogy a szénszálak réteg feszültségkoncentráció mentes tudjon maradni.



13. ábra: Alakváltozás a végeleemes számítások alapján [1]

A szakítóvizsgálatok során a gyártó által, a technikai adatlapban előírt szakadási nyúláshoz közeli értéket kaptak. A 14. ábrán látható, 1,9-1,95%-os nyúlásokat még korrigálni kellett a szén és üveg rétegek eltérő hőtágulási együtthatóiból származó maradó nyúlások miatt. Végül 1,85-1,9%-os nyúlásértékeket kaptak, ami jóval a nem hibrid kialakításban mért értékek felett vannak. A várakozásoknak megfelelően a folytonos védőrétegű hibrid próbatestek nem a fülek környezetében, hanem a szabad hosszban mentek tönkre, bizonyítva, hogy a módszer sikeresen kűszöböli ki a befogás közeli feszültségkoncentrációkat, ezáltal az idő előtti tönkremenetelt is. [1]



14. ábra: S-üveg/szén/S-üveg hibrid kompozit próbatestek szakítógörbéi [1]

### 2.3. Célkitűzések a szakirodalom alapján

A dolgozat célja a folytonos védőrétegű hibrid kompozit próbatestek továbbfejlesztése. A fejlesztés fő irányvonala a szén- és üvegszálak kompozit lapok magas hőmérsékleten (125 °C) együtt térhálósításának kiváltása szobahőmérsékleten, ragasztásos eljárást alkalmazva. Ezáltal kikűszöbölhetőek az alapanyagok különböző

hőtágulási együtthatói által okozott maradó feszültségek és így nincs szükség mérés utáni korrekcióra. Ez nagyban megkönnyíti a kiértékelést, mivel a vizsgált anyagok pontos hőtágulási együtthatói rendszerint nem elérhetőek. Céлом volt továbbá az új eljárás gyártási folyamatainak sikeres végrehajtásához megfelelő körülmények feltárása, az optimális gyártási paraméterek meghatározása. Ezen kívül további cél a befogópofa alatti fülek teljes elhagyása, ami tovább egyszerűsíti a próbatestek gyártását.

### 3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

A fejezet során bemutatom a kutatás során felhasznált anyagokat és berendezéseket.

#### 3.1. Felhasznált alapanyagok

Az új típusú szén/epoxi-üveg/epoxi hibrid kompozit próbatesteket kereskedelembe kapható prepreg alapanyagok felhasználásával gyártottam. A prepreg anyag, ahogy a neve is mutatja, gyantával előre átitatott szálerősített rétegeket jelent, ahol a gyanta egy nem teljesen térhálósodott, ún. B állapotban van jelen. Az S-üveg/epoxi prepreg gyártója az amerikai Hexcel Corporation, míg a T800 jelölésű szén/epoxi prepregé a japán Toray Industries. A szénszálas prepregből készült 1 mm névleges vastagságú kompozit lapokat közvetlenül a Toray cégtől kaptam, kitérhálósítva és méretre vágva. Az üvegszálas prepregből magam gyártottam le a próbatestek kialakításához szükséges, szintén 1 mm névleges vastagságú kompozit lapokat a következő fejezetben ismertetett módon. A ragasztáshoz Araldite 2011 típusú, kétkomponensű, epoxi ragasztót használtam. A felhasznált anyagok tulajdonságait a 3. táblázat tartalmazza.

| Prepregek                          | Névleges szál felületi tömeg [g/m <sup>2</sup> ] | Névleges szál térfogathányad [-] | Kitérhálósított réteg vastagsága [μm] | Húzó szakadási nyúlás [%] | Húzó rugalmassági modulus [GPa] |
|------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| AGY Y-110 S-2 Glass/913 epoxi      | 190                                              | 0.5                              | 153.8                                 | 3.7 <sup>(a)</sup>        | 45.6                            |
| OCV Flite strand S glass/913 epoxi | 150                                              | 0.6                              | 102                                   | 3.7 <sup>(a)</sup>        | 56.6                            |
| Toray T800S/3900 epoxi             | 192                                              | 0.55                             | 194                                   | 2% <sup>(b)</sup>         | 163.2                           |

a) Korábbi vizsgálatokból származó tapasztalati érték

b) Gyártói adatlap szerint a szálak szakadási nyúlása

3. táblázat: Alapanyagok tulajdonságai [12 - 14]

#### 3.2. Alkalmazott berendezések

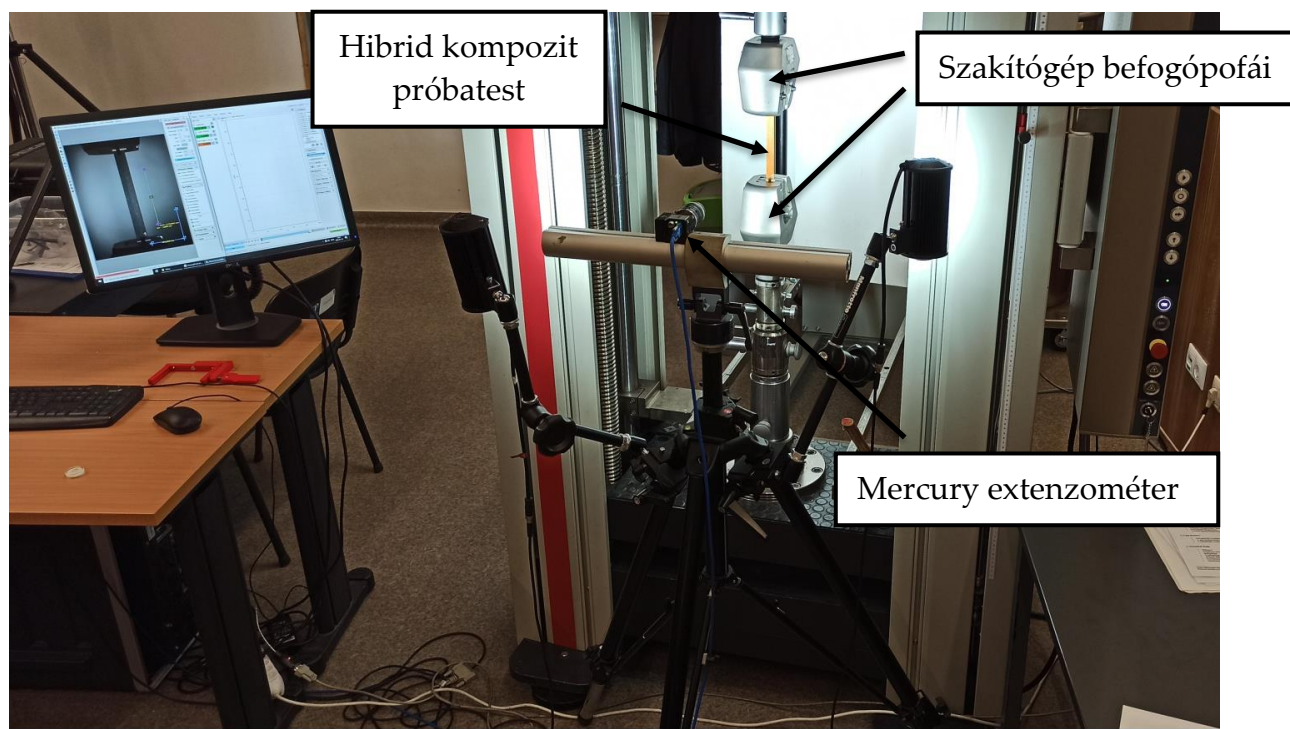
A hibrid kompozit próbatestek egytengelyű szakítóvizsgálatát egy számítógépvezérelt Zwick Z250 univerzális, elektro-mechanikus szakítógépen végeztem. A gépre egy 250 kN-os erőmérő cellát és 100 kN terhelhetőségű Instron 2716-003 típusú manuális működésű ékpályás befogópórákat szereltem fel. A keresztfej-elmozdulás sebességét 5 mm/percre állítottam. A folytonos védőréteggel ellátott kompozit

próbatestekre nem volt külön fül felragasztva a befogott részre, hanem 80-as szemcsenagyságú dörzspapírt használtam arra a célra, hogy a befogópofa éles felülete ne az üvegszálas védőréteget roncsolják.

A nyúlásokat egy Mercury RT optikai extenzométerrel mértem, ami a cseh Sobriety cég Mercury Monet típusú kamerájával volt felszerelve. A próbatesteken található jelek, amelyeket a mérés során az extenzométer követ, 50, ill. 100 mm távolságra voltak egymástól. A 15. ábrán a mérési összeállítás látható.

A próbatestek üvegszál erősítésű részét, amely a folytonos védőréteget képezte, egy Olmar ATV 1100/2000 típusú autoklávban gyártottam le. A prepregek a gyártó ajánlása alapján 60 percen keresztül voltak az autoklávban, 125 °C hőmérsékleten és 0,7 MPa nyomáson.

Az elkészült kompozit lapokból a próbatesteket egy Mutronic Diadisc gyémántkorongos vágóberendezéssel munkáltam ki.



15. ábra: Mérési összeállítás

## 4. ÚJ TÍPUSÚ HIBRID KOMPOZIT PRÓBATESTEK KIFEJLESZTÉSE

Ebben a fejezetben az új típusú hibrid kompozit próbatestek gyártásának módját részletezem.

### 4.1. Próbatess tervezés

A próbatestek megtervezésénél és a rétegek számának megválasztásánál arra törekedtem, hogy az üvegszál/epoxi rétegek vastagsága megegyezzen a készen kapott 1 mm vastag szénszál/epoxi lapok vastagságával. A próbatestek kifejlesztése előtt fontos volt megbizonyosodnom arról, hogy a hibrid kompozit az elvártaknak megfelelően fog viselkedni és a szénszálal réteg szakadása után rétegelválás keletkezzen a szén és üveg rétegek között. Ehhez a már korábban, a 2.2.4-es alfejezetben ismertetett összefüggést használtam fel. Cél és társai tanulmánya [15] alapján a tömör kompozit II. módú törési szívóssága 1-2 N/mm, ami sokkal kisebb, mint a tervezett rétegrendek esetén a szénszálal réteg 2%-os szakadási nyúlásánál kiszámított II. módú fajlagos repedésterjesztő erő ( $G_{II}$ ). Ezeket az értékeket a 4. táblázat tartalmazza. Tehát a próbatess a két érték közötti nagy különbség miatt várhatóan a szén- és üvegszálal rétegek közötti rétegelválással fog tönkremenni közvetlenül a szénszálal réteg szakadását követő erőesés után.

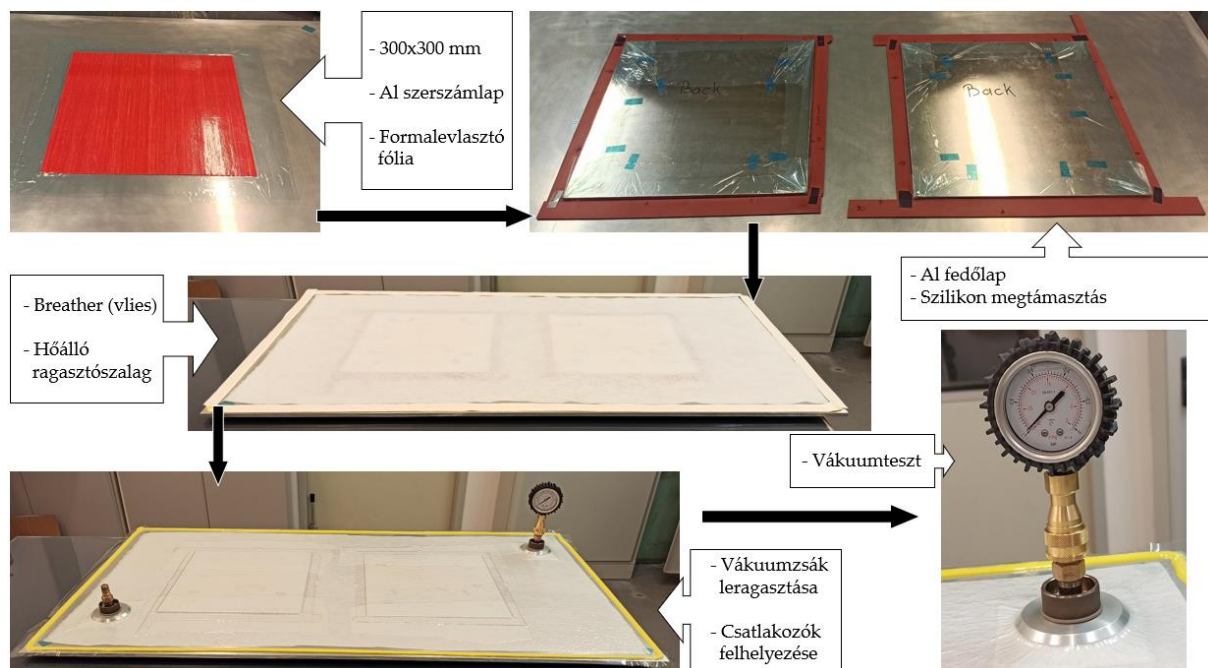
| Rétegrend                                                     | $G_{II}$<br>[N/mm] |
|---------------------------------------------------------------|--------------------|
| [190 G <sub>7</sub> /200 C <sub>5</sub> /190 G <sub>7</sub> ] | 41,112             |
| [150 G <sub>9</sub> /200 C <sub>5</sub> /150 G <sub>9</sub> ] | 39,945             |
| [150 G <sub>8</sub> /200 C <sub>5</sub> /150 G <sub>9</sub> ] | 42,960             |

4. táblázat: A különböző rétegrendű unidirekcionális hibrid kompozit lemezek II. módú fajlagos repedésterjesztő ereje (G – üveg/epoxi, C- szén/epoxi, a rétegben található szálak fajlagos felületi tömege a G vagy C előtt szereplő szám g/m<sup>2</sup>-ben, az alsó indexek pedig a rétegek számát jelölik)

### 4.2. Üvegszálal kompozit rétegek gyártása

A kutatás során a próbatesteket kampányszerűen, öt sorozatban gyártottam, különböző paraméterek mellett. A gyártási folyamatára a 16. ábrán látható. Az üvegszálal prepreg tekercset először ki kell venni a fagyasztóból, hogy könnyebben kezelhető legyen. Miután az anyag kiengedett, 300x300 mm-es lapokat vágtam belőle. A prepreg tekercs két formaleválasztó réteggel van együtt feltekercselve, amelyből az egyik egy polietilén fólia, a másik pedig egy szilikonos papír réteg. A kivágott lapok egymásra helyezése során először a formaleválasztó rétegeket kell eltávolítani, majd a tapadós rétegeket kell megfelelően pozícionálva egymásra

helyezni. Miután egymásra fektettem a megfelelő számú réteget, vákuumzsákba helyeztem az összeállítást és 5-10 percre folyamatos vákuum alá helyeztem, hogy a rétegek közé szorult levegőt eltávolítsam. Ez idő alatt a munkát lehet folytatni további lapok összeállításával. A méretre vágott és megfelelően egymásra helyezett prepreg lapokat ezután mindkét oldalon PTFE formaleválasztó fólia réteggel láttam el és a már egy harmadik réteg formaleválasztó fóliával leterített, síkra mart alumínium szerszámlapra helyeztem, majd a felső felület síklapúságát biztosító azonos méretű, 5 mm vastag alumínium lappal fedtem be. A kompozit lemez méretein túllógó formaleválasztó fólia rétegeket a fedőlapra hajtottam fel és ott ragasztószalaggal rögzítettem, hogy megakadályozzam a gyártási hőmérsékleten meglágyuló epoxi távozását. Ezután a lapokat 20-30 mm széles, 2-3 mm vastag szilikon csíkokkal vettem körbe, ami a fedőlapok nyomás hatására történő elmozdulását, illetve a kompozit oldalirányú deformációját akadályozza meg. Ezután az alumínium szerszámlap széleire felhelyeztem a hőálló ragasztószalagot, valamint a vákuum elosztó paplant. Fontos, hogy a prepreg lapok széleinél, ahol vastagságváltozás van, több réteg paplant alkalmazzunk. Ezután a már felhelyezett tömítő szalag segítségével rögzítettem a vákuumzsákot, ügyelve arra, hogy sehol ne legyen szivárgás. Ezt követően felhelyeztem a két vákuum csatlakozót. Ezek közül az egyiket keresztül alkalmaztam a vákuumot, a másikon pedig a vákuum értékét ellenőrizhettem. Vákuum ráadása után 5-10 perces vákuumtesztet végeztem, ellenőrizve, hogy megfelelően zár-e a rendszer, nincsenek-e szivárgások. Ezt követően az üveg/epoxi kompozit lapokat autoklávban térhálósítottam a prepreg gyártójának javasolt receptje alapján, 125 °C-on, 0,7 MPa nyomáson 60 percig. A vákuumzsák lezárása után és a folyamat kezdetén 0,095 MPa nagyságú vákuumot adtam a rendszerre. Azonban kikapcsoltam a vákuumot, amikor az autoklávban a túlnyomás elérte a 0,12 MPa értéket. A folyamat végén a kész lapok eltávolítása, kibontása következett, majd szükség szerint az élek sorjázása, ahol egy kis gyanta préselődött ki. Az öt sorozatból az első és a harmadik esetén az üvegszálak kompozit lapot a már korábban, a Toray által Japánban kiterhálósított szénszálak kompozit lapra térhálósítottam autoklávban. Ez annyiban tért el egy különálló üvegszálak lap gyártási folyamatától, hogy itt a még B állapotban lévő üveg prepreg lapokat a már kész szénszálak lapra illesztettem, együtt kerültek a vákuumzsákba, majd az autoklávba. Sorjázás után gyémántkorongos vágóberendezéssel a vizsgálni kívánt méretben kivágtuk a próbatesteket. A próbatestek teljes hossza 250 mm, szélességük 15 mm volt.



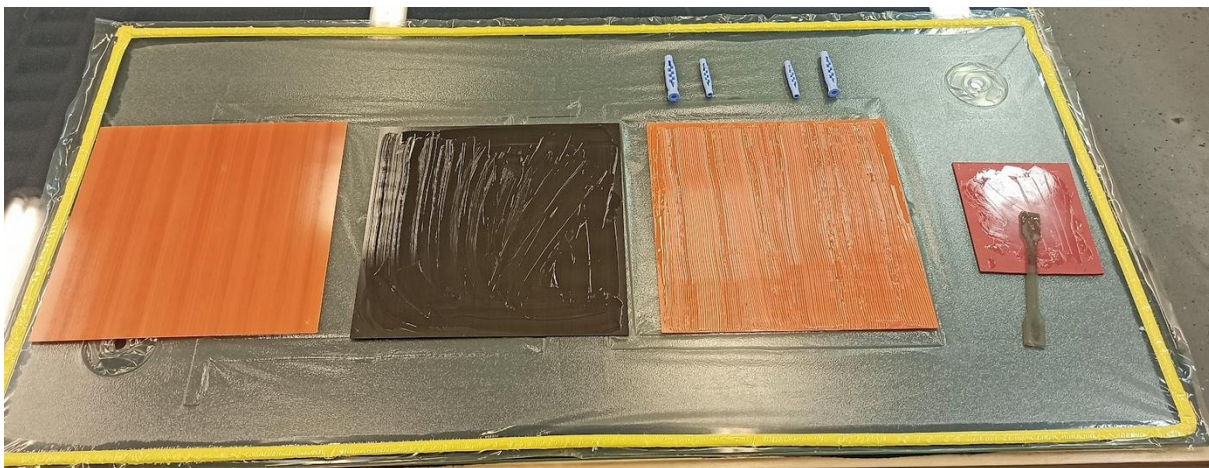
16. ábra: Kompozit lapok gyártási folyamata prepregből

#### 4.3. Hibrid kompozit szendvics lapok ragasztása

Cél és társainak [11] próbatesteitől a gyártott, új fejlesztésű próbatestek abban tértek el, hogy az üvegszálal prepregből készült kompozit lapokat a Toray-tól kapott, már térhálósított szénszálal prepreg lapoktól külön térhálósítottam autoklávban, majd Araldite 2011 típusú epoxi szerkezeti ragasztóval ragasztottam össze őket. Ez egy egyszerűnek látszó, de a gyakorlatban bonyolult művelet, ugyanis törekedni kell a lapok adott élének megfelelő illeszkedésére, és ezzel együtt légbuborékmentes, egyenletesen elosztatott ragasztóréteget kell létrehozni a lapok között. Mivel szendvicsszerkezeetről beszélünk, különösen nehéz biztosítani, hogy mindhárom lap egy lépésben tökéletes fedésbe kerüljön, mivel a középső lap úgy is ki tud csúszni a két külső közül, hogy azok pozíciója tökéletes marad. Az is kulcsfontosságú, hogy a kialakuló szendvics szerkezetű lemez fedőlappjai a lehető leginkább párhuzamosak legyenek, hiszen a befogópofák sík próbatestet tudnak megfelelően rögzíteni.

A légbuborékmentes illeszkedést kétféle módon próbáltam elérni. A folyamat első eleme mindig a lapok acetonos tisztítása volt. Két esetben a szénszálal lapot nedvesítettem ragasztóval, majd először az egyik élét illetve fokozatosan próbáltam ráhelyezni az üvegszálal lapot, egy vastag acélhengert görgetve a már illeszkedő felületeken. A ragasztót ez esetben a hengerlés irányára párhuzamos csíkokban vittem fel egy fogazott spatulával és a lapok végén távtartókat használtam két különböző vastagságban, amelyeket a hengerlés közben távolítottam el, először a vastagabbakat, majd a vékonyabbakat. A már ragasztóval nedvesített lapok a távtartókkal a 17. ábrán láthatóak. Az első alkalommal 25 g ragasztót alkalmaztam, de ez nem bizonyult elégnek, így a második alkalomra megemeltam a mennyiséget 36 g-ra, valamint dörzspapírral megcsiszoltam a felületeket, a jobb tapadás

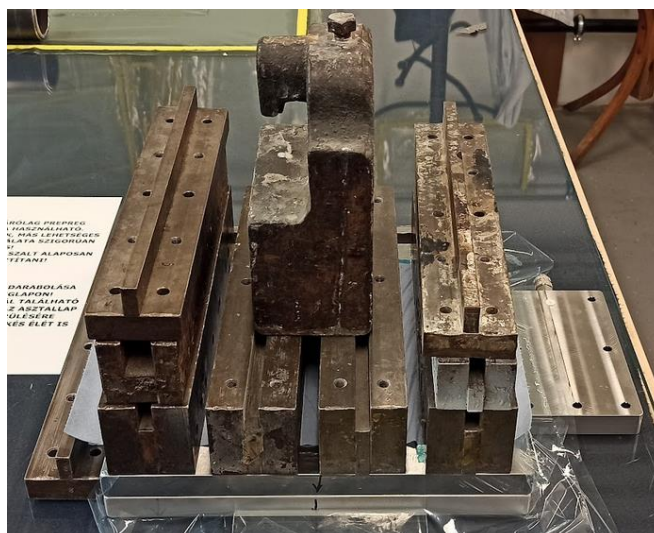
érdekében. A ragasztó megkötése szobahőmérsékleten vákuum alatt történt, 24 órán keresztül. Az első ragasztott szériánál csak a térhálós kompozit lapokat helyeztem a vákuumzsákba, míg a második szériánál vákuum helyett egy 20 mm-es acéllapot és további acéltömböket használtam nehezeként, hogy megpróbáljam elkerülni az egyenlőtlenül eloszlott ragasztó okozta vastagságbeli különbségeket. A harmadik ragasztott próbatest széria gyártása alkalmával nem az eddigi 300x300 mm-es lapokkal próbálkoztam, hanem kisebb 300x100 mm-es térhálósított kompozit lapokat ragasztottam össze. A hengeres megoldás helyett ezúttal vékony ragasztóréteggel nedvesítettem a felületeket, valamint az üvegszálak lap közepére vittem fel több ragasztóanyagot, amit a lapok összeillesztése után körkörös mozdulatú dörzsöléssel oszlattam el a felületek között. Különbség volt még, hogy ezúttal sem vákuum alatt kötött meg a ragasztó, hanem kb. 30 kg-nyi nehezek (20 mm-es alumínium lap, 20 mm-es acél lap és további extra nehezek) nyomta egyenletesen a lapokat. Ez látható a 18. ábrán. Miután a ragasztó megkötött, az együtt térhálósított (Co-cured) lapokhoz hasonlóan a ragasztott hibrid kompozit lapokat is a Mutronic gyémánttárcsás vágóberendezéssel vágtam méretre (250x15 mm) és sorjáztam. Az elkészült sorozatok felépítését a 5. táblázat részletezi.



17. ábra: A ragasztás menete

| Sorozat           | Felépítés                                                     |
|-------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>Co-cured 1</b> | [190 G <sub>7</sub> /200 C <sub>5</sub> /190 G <sub>7</sub> ] |
| <b>Co-cured 2</b> | [150 G <sub>9</sub> /200 C <sub>5</sub> /150 G <sub>9</sub> ] |
| <b>Bonded 1</b>   | [190 G <sub>7</sub> /200 C <sub>5</sub> /190/G <sub>7</sub> ] |
| <b>Bonded 2</b>   | [150 G <sub>9</sub> /200 C <sub>5</sub> /150 G <sub>9</sub> ] |
| <b>Bonded 3</b>   | [150 G <sub>8</sub> /200 C <sub>5</sub> /150 G <sub>8</sub> ] |

5. táblázat: Hibrid kompozit lapok felépítése adott felületi sűrűségű prepreg rétegekből.  
(G – üveg/epoxi, C- szén/epoxi, a rétegekben található szálak fajlagos felületi tömege a G vagy C előtt szereplő szám g/m<sup>2</sup>-ben, az alsó indexek pedig a rétegek számát jelölik)



18. ábra: A Bonded 3 sorozat gyártásakor alkalmazott nehezékek

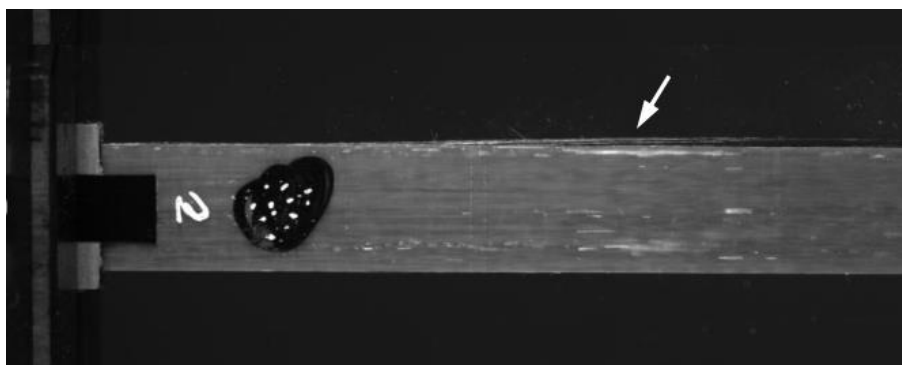
## 5. HIBRID PRÓBATESTEK SZAKÍTÓVIZSGÁLATI EREDMÉNYEI

A fejezetben bemutatom az új típusú hibrid próbatestek szakítóvizsgálatának eredményeit. A cél a folytonos üvegszálak védőréteggel ellátott hibrid kompozit próbatestek előnyének szemléltetése volt, aminek segítségével a szendvics szerkezet középső, szénszálak rétegének szakadási nyúlása pontosabban kimérhető. Mindegyik mérés során a befogott felületeken 80-as szemcseméretű csiszolópapírt alkalmaztam, amibe a befogópofák karmai megfelelően bele tudtak kapaszkodni, így a folytonos üvegszálak védőréteg nem roncsolódott.

### 5.1. Autoklávban együtt térhálósított (co-cured) szendvics próbatestek

Ahogy már korábban is említettem, az öt gyártási-mérési sorozatból az első, valamint a harmadik során az üvegszálak lapokat közvetlenül a zsírtalanított szénszálak lapokra térhálósítottam. Erre utal a próbatest adatokat tartalmazó táblázatokban szereplő „Co-cured” kifejezés. A próbatestek mérés előtt lement geometriai jellemzőit és a szakítóvizsgálatból kapott eredményeket táblázatokban foglaltam össze.

A legelső vizsgálat során problémába ütköztem, ugyanis a szénszálak rétegek szakadása előtt a szálakkal párhuzamos repedések is megjelentek a próbatestek szélein. Erről egy vizsgálat közbeni felvétel látható a 19. ábrán.



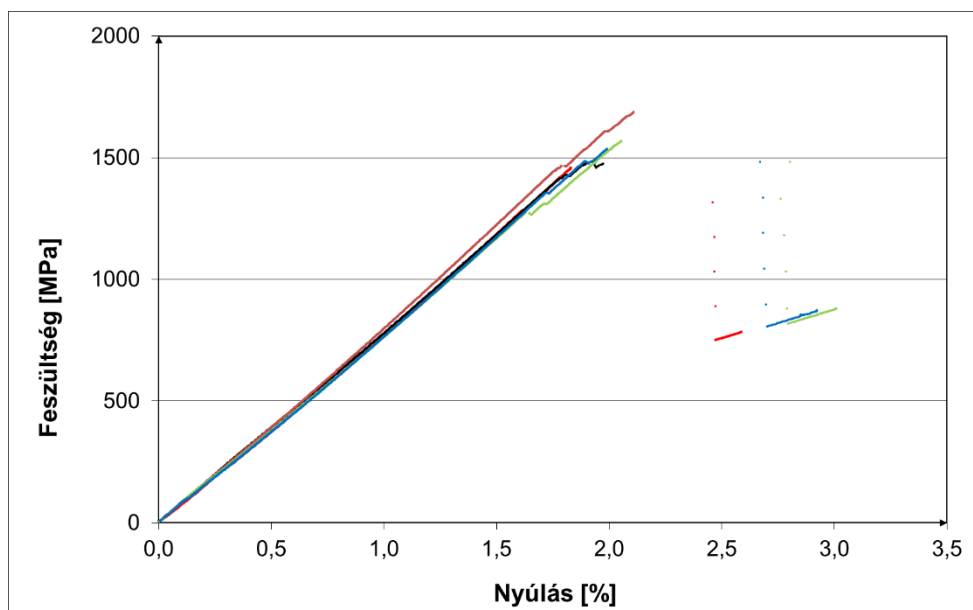
19. ábra: A nyúlásmérő rendszer kamerájának felvétele a szálakkal párhuzamos repedésről

Az első öt próbatestnél mutatkozott ez a jelenség, amelynek részletesebb megvizsgálását követően kiderült, hogy a Toray által küldött kitérhálósított szénszálak kompozit lapok kivágásánál szálorientációs hiba lépett fel. A gyártó a szálakra merőlegesen jelölte az orientációt, én pedig a kapott lemez egyik száliránnyal párhuzamosnak vélt oldalát tekintettem referenciának. Utólag, a kompozit lap 340 mm-es hosszán (a Toray lapjai nagyobbak voltak, mint az általam gyártott üvegszálak kompozit lapok) 1,5-2 mm eltérést tapasztaltam, ami mindössze 0,33°-os orientáció hiba, de ez is elég volt ahhoz, hogy a próbatestek végső szakadása

előtt kimutatható erőesések következzenek be, amik zavarták a kiértékelést. Ezek miatt ez a sorozat a Co-cured 0 nevet kapta és a további sorozatok elkészítése előtt a szénszálas kompozit lap orientációs hibáját korrigáltam. A lap széléről ferdén levágtam egy keskeny csíkot, amivel a valós szálirányhoz közeli referenciát alakítottam ki. További hat próbatestet vágtam ki helyes irányban, majd ezeket Co-cured 1 sorozat néven vizsgáltam meg és értékeltem ki. Azt a következtetést vontam le ebből az esetből, hogy a lapok megfelelő orientációját mindig meg kell vizsgálni. A Co-cured 0 sorozat vizsgálatának eredményeit a 6. táblázat tartalmazza, a mérés során kapott feszültség-nyúlás görbék pedig a 20. ábrán láthatóak. Jól látszik, hogy a károsodás kezdetéhez tartozó nyúlásértéktől kezdődően feszültség esések jelennek meg a görbéken. Ezek jelzik a szálakkal párhuzamos repedések megjelenését. A jelenséget a vizsgálat utáni próbatesteken a 21. ábra mutatja be.

| Co-cured 0 sorozat, próbatest sorszám | Mért szélesség | Mért vastagság | Átlagos rugalmassági modulus (hibrid lemez) | Szakadási nyúlás | Szénszálas réteg szakadáskor fellépő átlagos feszültség a hibrid lemezben | Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás | Korrigált szakadási nyúlás (termikus) |
|---------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                       | mm             | mm             | GPa                                         | %                | MPa                                                                       | %                                   | %                                     |
| <b>1</b>                              | 15,08          | 3,18           | 74,76                                       | 1,830            | 1457,5                                                                    | 1,620                               | 1,816                                 |
| <b>2</b>                              | 15,08          | 3,21           | 77,67                                       | 1,972            | 1474,8                                                                    | 1,770                               | 1,958                                 |
| <b>3</b>                              | 15,09          | 3,21           | 78,16                                       | 2,109            | 1688,2                                                                    | 1,770                               | 2,096                                 |
| <b>4</b>                              | 15,09          | 3,22           | 75,24                                       | 2,054            | 1569,2                                                                    | 1,630                               | 2,040                                 |
| <b>6</b>                              | 15,10          | 3,23           | 74,76                                       | 1,992            | 1537,1                                                                    | 1,630                               | 1,978                                 |
| <b>Átlag</b>                          | 15,088         | 3,210          | 76,12                                       | 1,991            | 1545,3                                                                    | 1,684                               | <b>1,978</b>                          |
| <b>Szórás</b>                         | 0,008          | 0,019          | 1,66                                        | 0,105            | 91,8                                                                      | 0,079                               | 0,105                                 |
| <b>Relatív szórás</b>                 | 0,055          | 0,583          | 2,18                                        | 5,290            | 5,9                                                                       | 4,668                               | 5,327                                 |

6. táblázat: A Co-cured 0 sorozat szakítóvizsgálatának eredményei



20. ábra: A Co-cured 0 sorozat feszültség-nyúlás görbéi



21. ábra: Párhuzamos repedések szemléltetése a vizsgálat után (Co-cured 0 sorozat)

A már helyes irányban kivágott próbatestekből készült Co-cured 1 sorozat eredményei az 7. táblázatban láthatóak. (A próbatestek számozása 5-től kezdődik, mert a kampányszerű mérések során az azonos lemezből korábban már készültek próbatestek.) A kiértékelés során vastagságnak a táblázatban látható átlagos 3,21 mm-t használtam.

| Co-cured 1 sorozat, próbatest sorszám | Mért szélesség | Mért vastagság | Átlagos rugalmassági modulus (hibrid lemez) | Szakadási nyúlás | Szénszálas réteg szakadáskor fellépő átlagos feszültség a hibrid lemezben | Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás | Korrigált szakadási nyúlás (termikus) |
|---------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                       | mm             | mm             | GPa                                         | %                | MPa                                                                       | %                                   | %                                     |
| 5                                     | 15,05          | 3,21           | 74,0                                        | 2,055            | 1703,49                                                                   | -                                   | 2,041                                 |
| 6                                     | 15,05          | 3,21           | 72,8                                        | 2,075            | 1671,64                                                                   | -                                   | 2,061                                 |
| 7                                     | 14,96          | 3,16           | 73,3                                        | 2,135            | 1604,92                                                                   | -                                   | 2,121                                 |
| 8                                     | 14,95          | 3,25           | 77,2                                        | 1,956            | 1616,21                                                                   | -                                   | 1,942                                 |
| 9                                     | 14,97          | 3,24           | 73,8                                        | 2,069            | 1686,21                                                                   | -                                   | 2,055                                 |
| 10                                    | 14,98          | 3,2            | 75,2                                        | 2,021            | 1584,11                                                                   | 1,936                               | 2,007                                 |
| Átlag                                 | 14,99          | 3,21           | 74,4                                        | 2,052            | 1644,43                                                                   | -                                   | 2,038                                 |
| Szórás                                | 0,045          | 0,032          | 1,59                                        | 0,060            | 48,93                                                                     | -                                   | 0,060                                 |
| Relatív szórás                        | 0,300          | 0,993          | 2,14                                        | 2,913            | 2,98                                                                      | -                                   | 2,933                                 |

7. táblázat: A Co-cured 1 sorozat szakítóvizsgálatának eredményei

Mivel az üveg-, illetve szénszálas lapoknak különböző a hőtágulási együtthatója, korrekciót kellett alkalmaznom a szakadási nyúlási értékek meghatározása során. Ez az alábbi egyenletek segítségével történt:

$$\alpha_{comp} = v_f \cdot \alpha_f \cdot \frac{E_f}{E_{comp}} + (1 - v_f) \cdot \alpha_m \cdot \frac{E_m}{E_{comp}} \quad (3)$$

$$\alpha_{hibrid} = \frac{t_2}{h} \cdot \alpha_{CFEP} \cdot \frac{E_1}{E_{eq0}} + \left(1 - \frac{t_2}{h}\right) \cdot \alpha_{GFEP} \cdot \frac{E_2}{E_{eq0}} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{T,h} = \alpha_{hibrid} \cdot \Delta T = \alpha_{hibrid} \cdot (125^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) \quad (5)$$

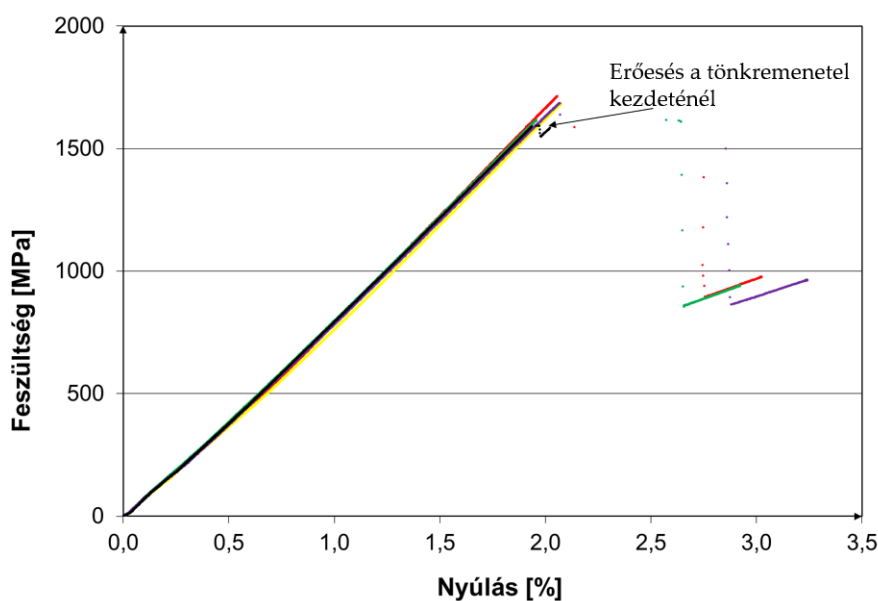
$$\varepsilon_{T,CFEP} = \varepsilon_{T,h} - \varepsilon_{Free,CFEP} = \alpha_{hibrid} \cdot \Delta T - \alpha_{CFEP} \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$\varepsilon_{Corr,CFEP} = \varepsilon_h - \varepsilon_{T,CFEP} \quad (7)$$

ahol  $\alpha_f$  a szálak és a mátrix névleges hőtágulási együtthatója ( $\alpha_{CF} = 4 \cdot 10^{-7} \frac{1}{K}$ ,  $\alpha_{GF} = 2 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ ) és  $\alpha_m$  ( $\alpha_{ep} = 6 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K}$ ),  $\alpha_{comp}$  a kompozit hőtágulási együtthatója,  $v_f$  az egyes kompozit rétegek szál térfogathányada,  $E_f$  és  $E_m$  a szál és mátrix névleges húzó rugalmassági modulusa,  $E_{comp}$  az adott kompozit lemez névleges rugalmassági modulusa,  $\alpha_{hibrid}$ ,  $\alpha_{CFEP}$  és  $\alpha_{GFEP}$  a hibrid, a szén/epoxi és az üveg/epoxi lapok hőtágulási együtthatója  $t_2/h$  a szénszálas réteg vastagságaránya,  $\varepsilon_{T,h}$  a hibrid lap maradó nyúlása,  $\Delta T$  a szobahőmérséklet és a térhálósítási folyamat hőmérsékletének különbsége,  $\varepsilon_{T,CFEP}$  a szénszálas réteg maradó nyúlása a hibridben,

$\varepsilon_{\text{Free,CFEP}}$  a monolit szén/epoxi lemez maradó nyúlása,  $\varepsilon_{\text{Corr,CFEP}}$  pedig a hibrid kompozit korrigált szakadási nyúlása. A szénszálak réteg maradó nyúlásának értéke 0,0143% volt. [16]

Jól látható, hogy a korrekció után is kiemelkedő, többnyire 2% feletti, alacsony szórású szakadási nyúlás értékeket kaptam és csak egy esetben volt a szénszálak réteg tönkremenetele során egy kezdeti erőesés, ez jól látható a próbatestek összesített feszültség-nyúlás diagramján (22. ábra). Megfigyelhető, hogy a szakadási nyúlási értékek legfeljebb 3%-ban térnek el az átlagtól. Ez annak az eredménye, ahogy a 23. ábrán is látható, hogy a szénszálak réteg a szabad hosszban ment tönkre, nem pedig idő előtt, a befogás környezetében. A vizsgálatok során igyekeztem a szénszálak réteg tönkremenetele után leállítani a mérést, hogy az üvegszálak védőréteg ne menjen tönkre és így további információkat tudjak szerezni a próbatestek viselkedéséről. A sorozat próbatestjei közül a 6-os és 7-es számú esetén indultak meg jelentősebb szakadások és kezdődött el a végső tönkremenetel a védőrétegben.



22. ábra: A Co-cured 1 sorozat szakítógörbéje



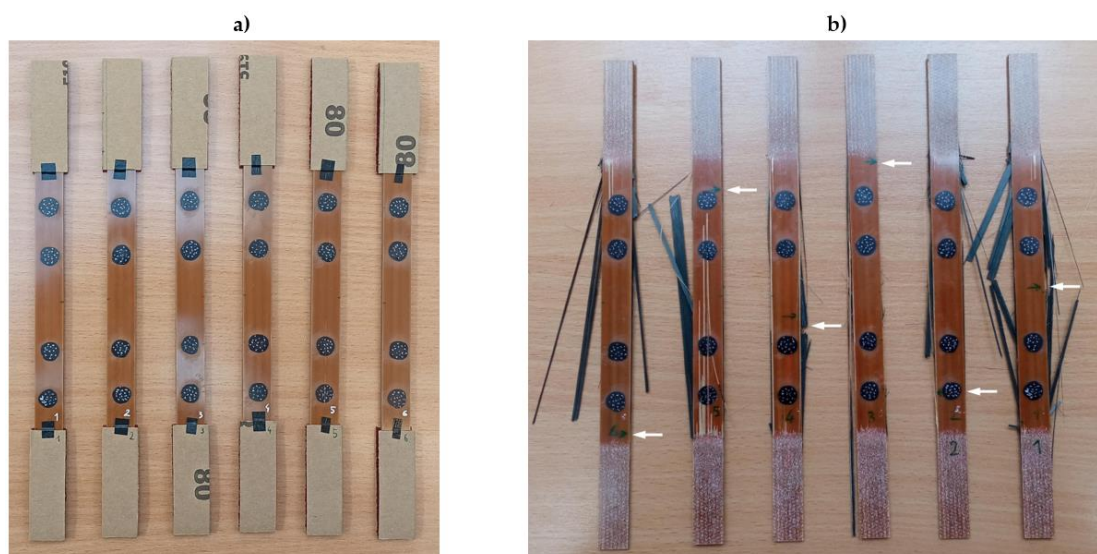
**23. ábra: A Co-cured 1 sorozat próbatestei szakítóvizsgálat után (a jelölések tönkremenetek helyét mutatják)**

A második sorozat, amelyben a Toray által gyártott szénszálak kompozit lapra térhálósítottam az üvegszálak rétegeket, már a kisebb felületi sűrűségű S-üveg erősítésű prepreg alapanyagból készült. Ennek eredményeképp a próbatestek vékonyabbak lettek, viszont az új üvegszálak lemezeknek magasabb volt a száltartalma. A geometriai adatokat és a vizsgálat során nyert eredményeket a 8. táblázat tartalmazza. Látható, hogy a vékonyabb védőréteggel rendelkező próbatestek szénszálak középső rétegének szakadási nyúlása is eléri a gyártói adatlapon a szálakra megadott 2% körüli értéket és a korábbi sorozathoz képest nem mutat statisztikailag értékelhető eltérést (a szórásmezők átfednek). Ennél a sorozatnál egy helyen volt látható, hogy mikor indult el a tönkremenetel erőesés kíséretében. A magasabb üvegszálak térfogathányad miatt ez a sorozat átlagosan 14 GPa-val magasabb rugalmassági modulus értékeket mutatott.

| Co-cured 2 sorozat, próbatest sorszám | Mért szélesség | Mért vastagság | Átlagos rugalmassági modulus (hibrid lemez) | Szakadási nyúlás | Szénszálas réteg szakadáskor fellépő átlagos feszültség a hibrid lemezben | Károsodás kezdetéhez tartozó nyúlás | Korrigált szakadási nyúlás (termikus) |
|---------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
|                                       | mm             | mm             | GPa                                         | %                | MPa                                                                       | %                                   | %                                     |
| 1                                     | 15,02          | 2,85           | 90,5                                        | 1,957            | 1813,7                                                                    | -                                   | 1,944                                 |
| 2                                     | 15,02          | 2,84           | 88,6                                        | 1,995            | 1829,0                                                                    | 1,887                               | 1,982                                 |
| 3                                     | 15,03          | 2,84           | 86,2                                        | 1,986            | 1816,2                                                                    | -                                   | 1,972                                 |
| 4                                     | 15,03          | 2,84           | 88,6                                        | 2,076            | 1907,2                                                                    | -                                   | 2,062                                 |
| 5                                     | 15,02          | 2,84           | 87,1                                        | 2,038            | 1807,1                                                                    | -                                   | 2,024                                 |
| 6                                     | 15,02          | 2,84           | 89,3                                        | 2,023            | 1893,8                                                                    | -                                   | 2,009                                 |
| Átlag                                 | 15,02          | 2,84           | 88,4                                        | 2,012            | 1844,5                                                                    | 1,9                                 | 1,999                                 |
| Szórás                                | 0,005          | 0,004          | 1,52                                        | 0,04             | 44,18                                                                     | -                                   | 0,042                                 |
| Relatív szórás                        | 0,034          | 0,144          | 1,72                                        | 2,085            | 2,395                                                                     | -                                   | 2,099                                 |

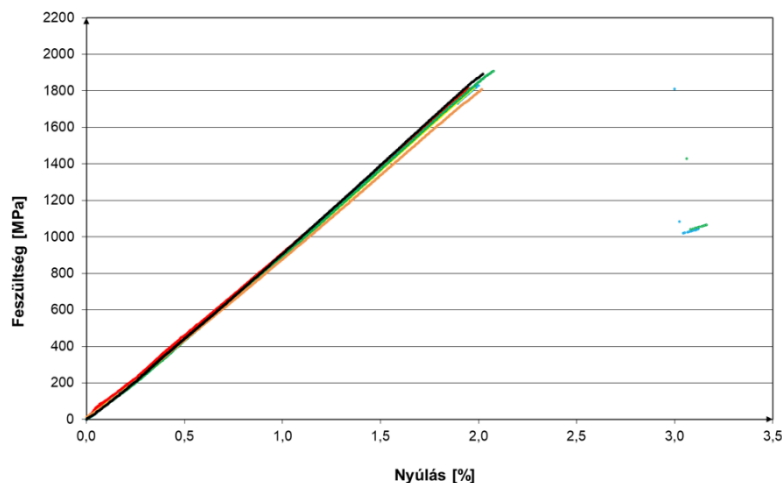
8. táblázat: A Co-cured 2 sorozat szakítóvizsgálatának eredményei

A 24. ábrán láthatóak a próbatestek a mérés előtt, illetve a mérés után. Ahogy a mérés utáni fotón is jelölve van, négy próbatest a szabad hosszon ment tönk्रे, kettő pedig a befogás közelében, de nem a befogópofa alatt. Mivel nem a befogás közelében tört próbatestek eredményezték a legalacsonyabb szakadási nyúlási értéket ezeket is elfogadhatónak ítéltém. Mivel a tönkrementel helye feszültségkoncentráció mentes esetben véletlenszerű, nem meglepő, ha hatból két próbatest a végek közelében törik.



24. ábra: A Co-cured 2 sorozat próbatestei a) mérés előtt és b) mérés után

A sorozat feszültség-nyúlás görbéi a többi sorozat során tapasztaltakhoz hasonlóan szinte teljesen együtt futnak. A görbéket tartalmazó diagram a 25. ábrán látható.



25. ábra: A Co-cured 2 sorozat feszültség-nyúlás görbéje

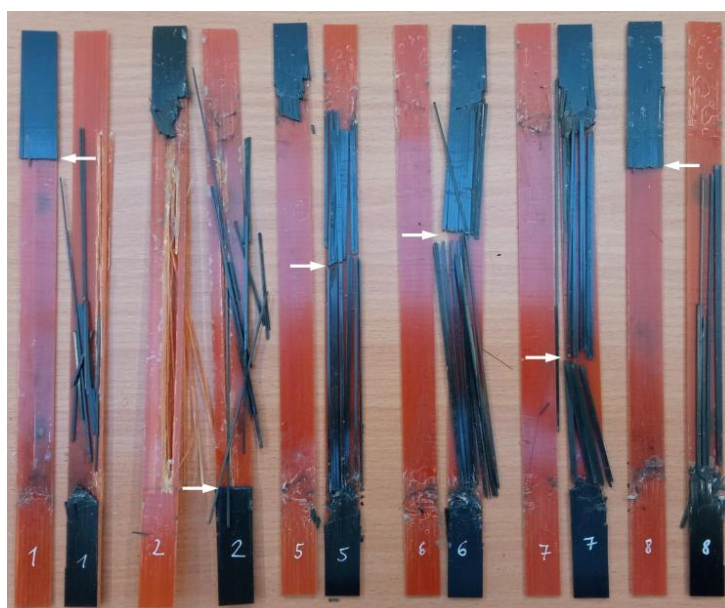
## 5.2. Ragasztott szendvics próbatestek

Az első ragasztott sorozat a 190 g/m<sup>2</sup> felületi sűrűségű üvegszál prepreg és a ragasztóréteg eredményeként az eddigi legvastagabb próbatesteket tartalmazta, viszont a feszültségek számításához szükséges próbatest keresztmetszet értéket az azonos rétegrendű Co-cured sorozathoz használt névleges 3,21 mm-en tartottam. Mivel a ragasztó réteg várhatóan elhanyagolható feszültség felvételére képes, így az összehasonlíthatóság érdekében érdemes azonos névleges vastagsággal dolgozni. Az együtt térhálósított sorozatokkal ellentétben a ragasztott hibrid próbatestek nagy előnye, hogy a szénszál réteg szakadási nyúlását nem kell a maradó hőfeszültségek miatt korrigálni. Erre azért van lehetőségünk, mert a lapokat külön-külön térhálósítottuk, majd szobahőmérsékleten ragasztottam, ellentétben az együtt térhálósított lapokkal, ahol a rétegek tapadása a térhálósodás emelt hőmérsékletén jön létre és a lehűlés során eltérő mértékben feszülnek meg az eltérő hőtágulású rétegek. Ahogy a 9. táblázatban is látható, a szakadási nyúlások értékei 2% körül alakultak, az átlagtól kevesebb, mint 1%-ban tértek el. A ragasztott próbatestek rugalmassági modulusának átlagértéke 74,2 MPa lett, ami szinte megegyezik az azonos felépítésű első Co-cured sorozat rugalmassági modulusának átlagértékével. Mivel azonos névleges vastagsággal értékelttem ki a két sorozatot, ez hasznos visszajelzés a ragasztott próbatestek hatékony teherviselésével kapcsolatban.

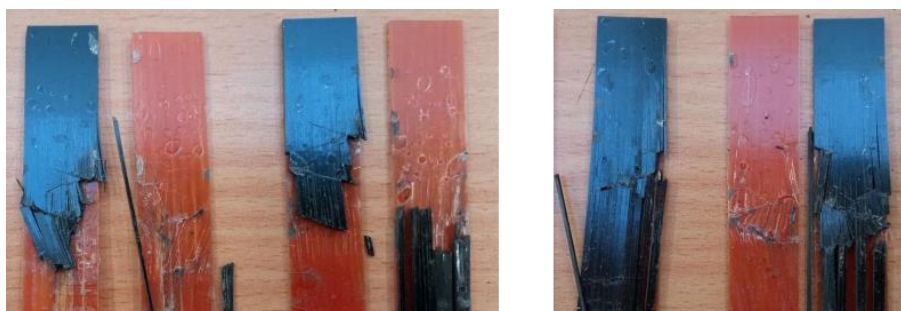
| Bonded 1 sorozat, próbatest sorszám | Mért szélesség | Mért vastagság | Átlagos rugalmassági modulus (hibrid lemez) | Szakadási nyúlás | Szénszálas réteg szakadáskor fellépő átlagos feszültség a hibrid lemezben |
|-------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                                     | mm             | mm             | GPa                                         | %                | MPa                                                                       |
| 1                                   | 14,97          | 3,32           | 75,7                                        | 2,006            | 1620,3                                                                    |
| 2                                   | 15,04          | 3,48           | 75,1                                        | 1,977            | 1640,9                                                                    |
| 5                                   | 15,07          | 3,56           | 74,9                                        | 1,984            | 1665,0                                                                    |
| 6                                   | 15,08          | 3,55           | 73,1                                        | 1,993            | 1617,3                                                                    |
| 7                                   | 15,05          | 3,56           | 73,3                                        | 2,007            | 1631,8                                                                    |
| 8                                   | 15,05          | 3,54           | 73,1                                        | 2,027            | 1640,8                                                                    |
| Átlag                               | 15,04          | 3,50           | 74,2                                        | 1,999            | 1636,0                                                                    |
| Szórás                              | 0,039          | 0,094          | 1,16                                        | 0,018            | 17,3                                                                      |
| Relatív szórás                      | 0,258          | 2,681          | 1,57                                        | 0,899            | 1,06                                                                      |

9. táblázat: A Bonded 1 sorozat szakítóvizsgálatának eredményei

A tönkremenetelkor kezdődő rétegelválás miatt a szendvics próbatesteket könnyen szét tudtam nyitni. Így meg tudtam vizsgálni a szénszálas réteg tönkremenetelét. Ahogy a 26. ábrán látható, a szénszálas réteg többnyire a szabad hosszon ment tönkre, ami arra enged következtetni, hogy a ragasztott próbatestek esetén is érvényes a feszültség koncentrációk eliminálása a befogópofák környezetében. Továbbá, ha megvizsgáljuk a 27. ábrát, akkor látható, hogy a szakadás után mindig bekövetkezik egy nyomás jellegű roncsolódás is a befogott felületek végeinél, ami a szénszálas réteg szakadás utáni nagyon nagy sebességgel történő visszarugózásából adódhat.

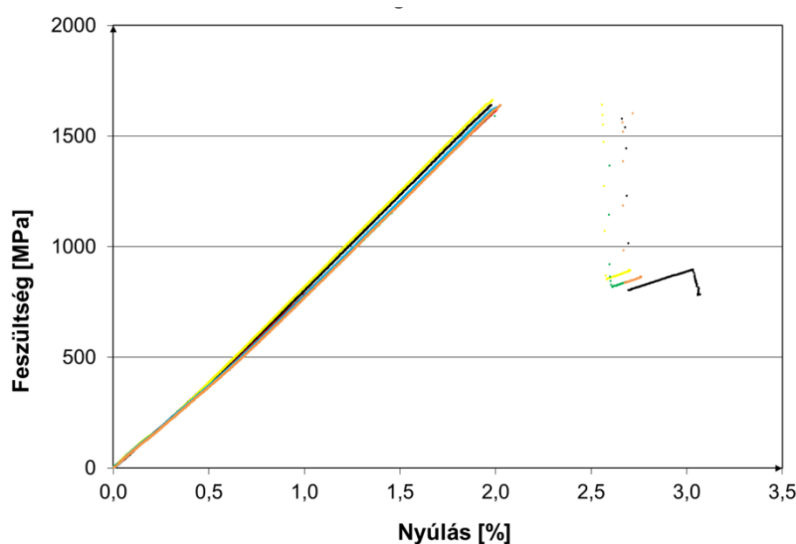


26. ábra: A Bonded 1 sorozat próbatestei a vizsgálat után, szétnyitva



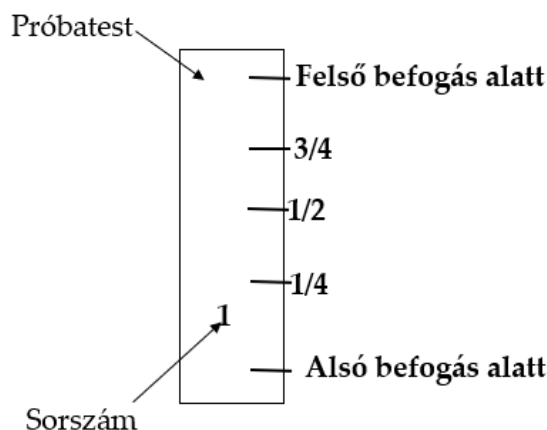
27. ábra: Nyomó jellegű tönkremenetel a befogás környékén

A 27. ábra bal oldalán jól látható továbbá, hogy a ragasztás nem volt tökéletes, mert a kikeményedett ragasztóban több kisebb légbuborék is található. Az eredmények azonban nem utalnak a ragasztási hibák miatt bekövetkező szakadási nyúlás csökkenésre, így ezt másodlagos hatásnak tekinthetjük. További gondot okozott még a hibrid kompozit lapok egyenlőtlen vastagsága. A lap szélei rendre elvékonyodtak. Valószínűleg a vákuum hatására a sík felület elérése érdekében alkalmazott 5 mm vastag alumínium lap meghajlott bizonyos mértékben. Ez azt eredményezte, hogy a befogásnál fellépő szorítóerő nem volt teljesen egyenletes, ami feszültségkoncentrációkat okozhatott. Ez látható az első két próbatest tönkremeneteli helyénél. Az eredeti egy helyett két réteg 80-as szemcseméretű dörzspapír használata megoldotta a problémát. A 28. ábrán látható feszültség-nyúlás diagramon látszik, hogy a görbék meredeksége közel megegyezik, a megfelelő befogási környezet kialakítása után az első ragasztott sorozat összes próbateste hasonlóan viselkedett, ami jó előrejelzéseket adott a módszer reprodukálhatósága szempontjából.

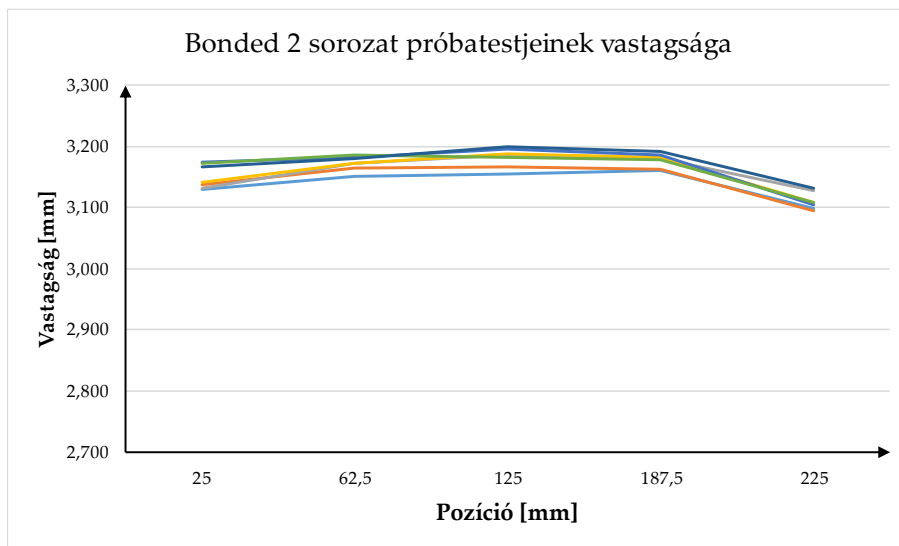


28. ábra: A Bonded 1 sorozat szakítógörbéi

A második ragasztott hibrid kompozit próbatest sorozat alkalmával nagyobb hangsúlyt fektettem a próbatestek egyenlőtlen vastagságának problémájára. Ezúttal egy 20 mm vastag alumínium lapot helyeztem a kompozit lap tetejére, hogy lesúlyozzam, amíg a ragasztó térhálósodott. A kibontás és vágás után minden próbatestnek öt pontban mértem meg a vastagságát. A mérési pontok a 29. ábrán láthatóak. A 30. ábrán pedig a vastagság változása látható. Megfigyelhető, hogy a próbatestek továbbra is elvékonyodnak a széleik felé, valamint a szendvics kompozit lap, amiből a próbatestek ki lettek vágva, a szélessége mentén is kimutathatóan vastagodik. Továbbá ahogy a 31. ábrán is látszik, a légbuborékok a Bonded 2 sorozatnál is jelen voltak.



29. ábra: Vastagságmérés a próbatest hossza mentén



30. ábra: A Bonded 2 sorozat próbatesteinek vastagsága s szálirány mentén

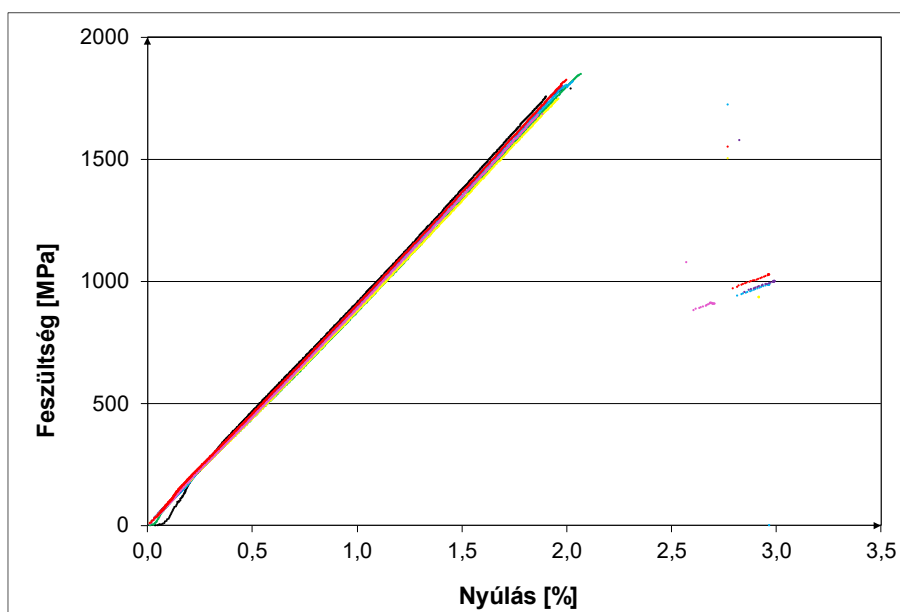


31. ábra: A Bonded 2 sorozat szétnyitott próbatestei a ragasztóban található légbuborékokkal

Ez a sorozat a  $150 \text{ g/m}^2$  felületi sűrűségű üvegszálal prepregből készült, ezért a vastagsága kisebb, mint az első ragasztott sorozaté. A kiértékelés során az azonos felépítésű Co-cured 2 sorozat névleges vastagságait használtam a már említett okokból. Ahogy a 10. táblázatból is látható, a próbatestek szakadási nyúlásának átlaga  $1,985\%$ , mivel a 6-os próbatest értéke jelentős mértékben alacsonyabb a többinél. Észrevehető azonban, hogy ahogy vastagodnak a próbatestek, a szakadási nyúlás valamivel csökken. Az értékek az átlagtól  $2,549\%$ -ban térnek el. A 32. ábrán látható görbék szinte végig együtt futnak, meredekségük közel megegyezik.

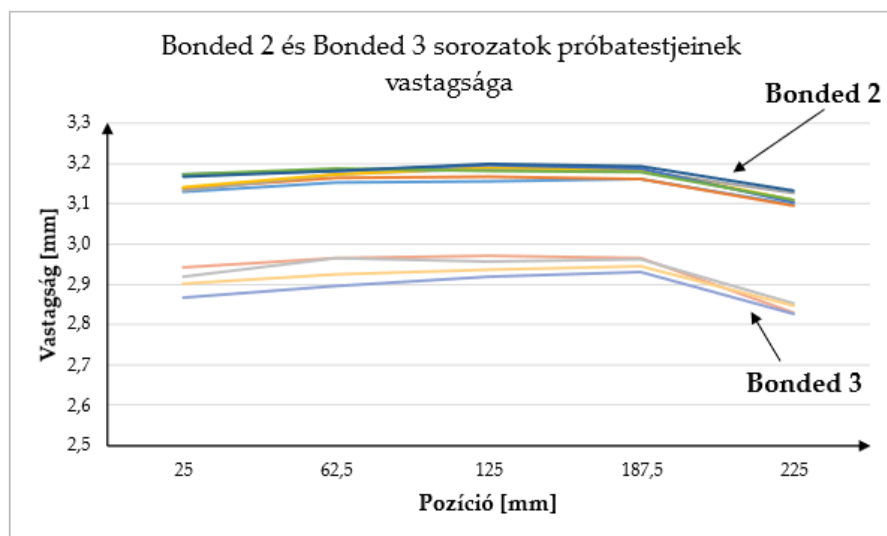
| Bonded 2 sorozat, próbatest sorszám | Mért szélesség | Mért vastagság | Átlagos rugalmassági modulus (hibrid lemez) | Szakadási nyúlás | Szénszálal réteg szakadáskor fellépő átlagos feszültség a hibrid lemezben |
|-------------------------------------|----------------|----------------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                                     | mm             | mm             | GPa                                         | %                | MPa                                                                       |
| 1                                   | 14,96          | 3,139          | 90,5                                        | 2,021            | 1788,4                                                                    |
| 2                                   | 14,94          | 3,145          | 89,3                                        | 2,023            | 1893,8                                                                    |
| 3                                   | 14,98          | 3,160          | 89,5                                        | 2,029            | 1818,2                                                                    |
| 4                                   | 15,01          | 3,159          | 90,5                                        | 1,977            | 1810,2                                                                    |
| 5                                   | 15,01          | 3,168          | 89,0                                        | 1,960            | 1748,7                                                                    |
| 6                                   | 15,02          | 3,165          | 89,3                                        | 1,886            | 1685,7                                                                    |
| 7                                   | 15,02          | 3,174          | 90,7                                        | 1,997            | 1825,9                                                                    |
| Átlag                               | 14,99          | 3,159          | 89,8                                        | 1,985            | 1795,8                                                                    |
| Szórás                              | 0,031          | 0,012          | 0,70                                        | 0,051            | 65,36                                                                     |
| Relatív szórás                      | 0,208          | 0,395          | 0,78                                        | 2,549            | 3,64                                                                      |

10. táblázat: A Bonded 2 sorozat szakítóvizsgálatának eredményei



32. ábra: A Bonded 2 sorozat szakítógörbéi

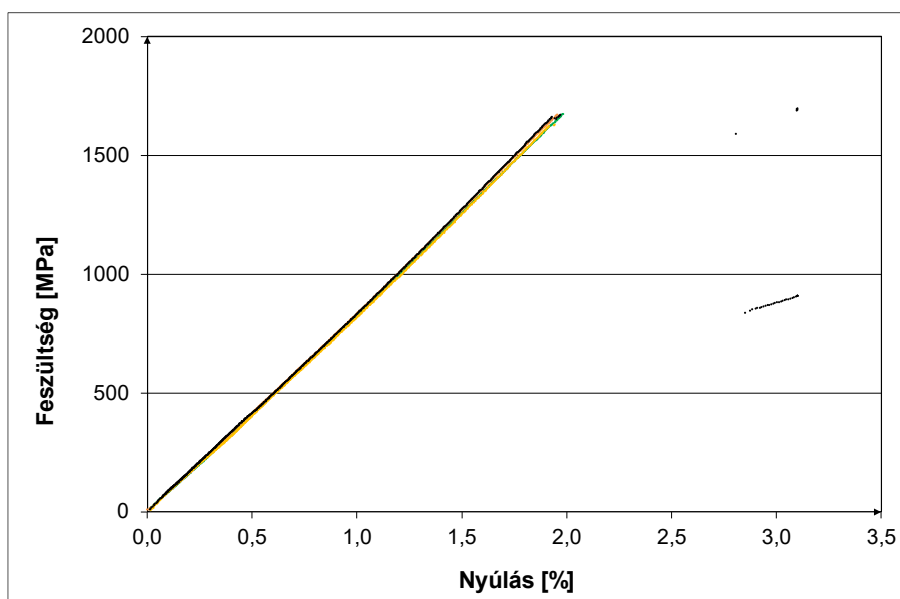
A harmadik, egyben utolsó ragasztott sorozat esetén is külön vizsgáltam a vastagság változását a hibrid kompozit lap szélessége mentén, valamint minden egyes kivágott próbatest hossza mentén. Ennél a konstrukciónál a 20 mm-es alumínium lapon kívül egy 20 mm-es acél lapot is használtam, valamint kb. 30 kg extra tömeget. Ezek ellenére, ahogy a 33. ábráról is látható, a vastagság továbbra sem lett teljesen egyenletes. Ennek ellenére a próbatestek továbbra is tartották azt az egyenletes teljesítményt, ami a korábbi sorozatoknál jellemző volt, ezért úgy tűnik, hogy egy bizonyos mértékű vékonyodás a próbatestek végei felé, nem okoz kimutatható változást a mért szakadási nyúlásokban. Ez látható a 11. táblázatban is, valamint a 34. ábrán is, ahol a görbék meredeksége továbbra is szinte megegyezik. Ebben a sorozatban már csak 8-8 réteg 150 g/m<sup>2</sup> felületi sűrűségű üvegszálal prepreget használtam, így a próbatestek még vékonyabbak lettek, mint az előző sorozatokban, illetve a szakadási nyúlásuk is valamivel 2% alatt alakult.



33. ábra: A Bonded 2 és Bonded 3 sorozatok próbatesteinek vastagsága szálirányban

| Bonded 3 sorozat, próbatest sorszáma | Mért szélesség | Vastagság | Átlagos rugalmassági modulus (hibrid lemez) | Szakadási nyúlás | Szénszálas réteg szakadáskor fellépő átlagos feszültség a hibrid lemezben |
|--------------------------------------|----------------|-----------|---------------------------------------------|------------------|---------------------------------------------------------------------------|
|                                      | mm             | mm        | GPa                                         | %                | MPa                                                                       |
| 1                                    | 14,99          | 2,935     | 82,9                                        | 2,019            | 1672,5                                                                    |
| 2                                    | 15,00          | 2,931     | 83,8                                        | 1,976            | 1669,8                                                                    |
| 3                                    | 14,88          | 2,911     | 82,9                                        | 1,944            | 1629,0                                                                    |
| 4                                    | 15,00          | 2,887     | 83,8                                        | 1,973            | 1670,2                                                                    |
| Átlag                                | 14,97          | 2,916     | 83,3                                        | 1,978            | 1660,4                                                                    |
| Szórás                               | 0,059          | 0,022     | 0,55                                        | 0,031            | 20,94                                                                     |
| Relatív szórás                       | 0,397          | 0,746     | 0,66                                        | 1,575            | 1,26                                                                      |

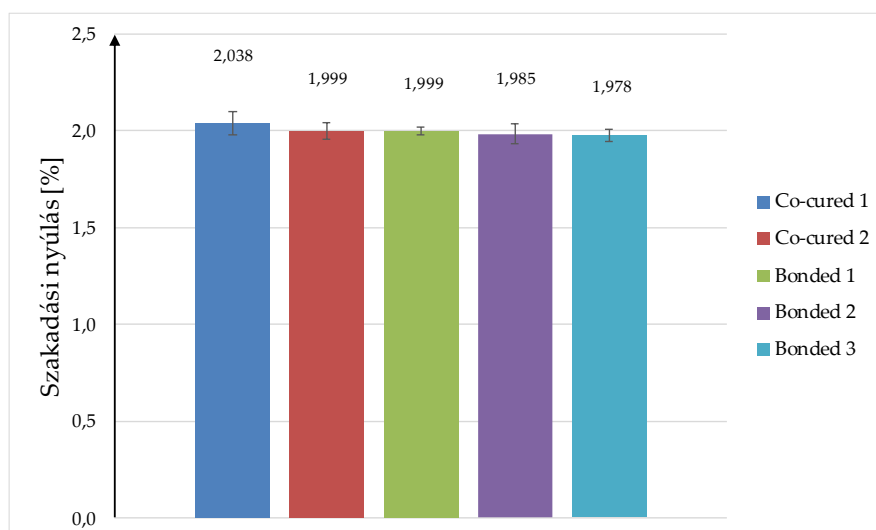
11. táblázat: A Bonded 3 sorozat szakítóvizsgálatának eredményei



34. ábra: A Bonded 3 sorozat szakítógörbéi

### 5.3. Mérési eredmények összehasonlítása

A mérések során mindegyik sorozat próbatestei átlagosan a gyártói adatlapon szereplő 2%-os szakadási nyúlás körül teljesítettek. Az eredményeket oszlopdiagramon hasonlítottam össze, ez a 35. ábrán látható. A legmagasabb szakadási nyúlási átlagértéket az első autoklávban együtt térhálósított sorozat eredményezte, viszont jól láthatóan e sorozat értékeinek van a legmagasabb szórása is. Az elvékonyodások ellenére a legalacsonyabb szórással az első ragasztott sorozat rendelkezik, és a szakadási nyúlások átlagértéke is nagyon jól közelíti a gyártói adatlapon a szálakra megadott 2%-ot. Ez mindegyik sorozatról elmondható, valamint fontos megállapítani, hogy több esetben 2% fölé is ment az értékük. A második ragasztott sorozat értékei között volt egy lefelé kiugró érték, ha azt kivettem volna, akkor az új átlag 2,001% lett volna, ami a legmagasabb a ragasztott sorozatok között. A legalacsonyabb szakadási nyúlás átlagértéket a Bonded 3 sorozat eredményezte.



35. ábra: A szakadási nyúlási értékek összehasonlítása

## 6. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok során arra a megállapításra jutottam, hogy a folytonos védőréteggel ellátott, ragasztott hibrid próbatestek kiválóan alkalmasak a szénszálas réteg szakadási nyúlásának mérésére. A védőréteg megóvjja a középső réteget a befogás környezetében fellépő feszültség koncentrációktól, ezért a próbatestek a szabad hosszon mentek tönkre. Mivel mindegyik réteget külön-külön autoklávban gyártottuk, megfelelő ragasztás esetén a kiemelkedő teljesítmény garantált. Ezen kívül, mivel a ragasztás szobahőmérsékleten történik, nem kell foglalkozni az eltérő anyagú rétegek különböző hőtágulási együtthatójából adódó maradó hőfeszültségekkel a mérési eredmények kiértékelésekor. Továbbá, a ragasztott próbatestek vizsgálat utáni szétnyitásával további következtetéseket tudunk levonni a különböző rétegek és próbatest típusok viselkedéséről.

### 6.1. További megoldásra váró feladatok

Természetesen a módszer még nincs teljesen kiforrva, a következő feladatok még további figyelmet igényelnek:

- A lemezek közötti ragasztóréteg vastagságának kiegyenlítése, hogy ne vékonyodjanak el a próbatestek a széleik felé.
- A ragasztórétegben található légbuborékok számának csökkentése, megszüntetése.
- Olyan ragasztási módszer kifejlesztése, ami biztosítani tudja a rétegek lehető legpontosabb illeszkedését és pozicionálását.

## 7. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Czél G., Jalalvand M., Wisnom M. R.: Hybrid specimens eliminating stress concentrations in tensile and compressive testing of unidirectional composites. *Composites Part A (Applied Science and Manufacturing)*, 91, 436-447. (2016)
- [2] Swolfs Y., Gorbatiikh L., Verpoest I.: Fibre hybridisation in polymer composites: A review. *Composites: Part A*, 67, 181-200. (2014)
- [3] Rév T., Jalalvand M., Fuller J., Wisnom M., Czél G.: A simple and robust approach for visual overload indication – UD thin-ply hybrid composite sensors. *Composites: Part A*, 121, 376-385. (2019)
- [4] Wisnom M., Potter K., Czél G., Jalalvand M.: Strain overload sensor. GB2544792B, Egyesült Királyság (2020)
- [5] Swolfs Y., Gorbatiikh L., Verpoest I.: Recent advances in fibre-hybrid composites: materials selection, opportunities and applications. *International Materials Reviews*, 181-215. (2018)
- [6] BS EN ISO 527: Plastics. Determination of tensile properties (2009).
- [7] ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials (2011).
- [8] Hoyo M., Sawada Y., Miyairi H.: Influence of clamping method on tensile properties of unidirectional CFRP in 0° and 90° directions – round robin activity for international standardization in Japan. *Composites*, 25, 786-796. (1994)
- [9] Portnov G. G., Kulakov V. L., Arnautov A. K.: A refined stress-strain analysis in the load transfer zone of flat specimens of high-strength unidirectional composites in uniaxial tension 2. Finite-element parametric analysis. *Mech. Compos. Mater.* 43, 29–40. (2007)
- [10] Adams D. O., Adams D. F.: *Tabbing Guide for Composite Test Specimens*. University of Utah, Department of Mechanical Engineering (2022).
- [11] Fazlali B., Ashodia S. A., Carvelli V., Lomov S. V., Swolfs Y.: Proper tensile testing of unidirectional composites. in *American Society for Composites Conference*, Tucson, Arizona, US (2022)
- [12] AGY Y-110 S-2 Glass/913 epoxi technikai adatlap
- [13] OCV Flite strand S glass/913 epoxi technikai adatlap
- [14] Toray T800S/3900 epoxi technikai adatlap
- [15] Czél G., Jalalvand M., Wisnom M.R.: Development of pseudo-ductile hybrid composites with discontinuous carbon- and continuous glass prepreps. 16<sup>th</sup> European Conference on Composite Materials (2014)

- [16] Wisnom M.R., Czél G., Swolfs Y., Jalalvand M., Gorbatiikh L., Verpoest I.: Hybrid effects in thin ply carbon/glass unidirectional laminates: Accurate experimental determination and prediction. *Composites: Part A*, 88, 131-139. (2016)