

MŰANYAG KOMPOZITOK MECHANIKAI JELEMZŐINEK VIZSGÁLATA

Molnár Tamás – Bíró István – Szuchy Péter – Varnyú Ferenc – Csikós Sándor –
Gogolák László – Sárosi József

Absztrakt: A polimer kompozitok rendkívül kedvező tömegre vonatkoztatott mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetően egyre inkább teret hódítanak számos ipari szegmensben, így többek között a repülőgépiparban is. Ezen anyagok tömeges felhasználásának egyelőre árak, valamint néhány - az egyéb szerkezeti anyagokéhoz képest - kedvezőtlen tulajdonságuk szab határt. Jelenleg már jelentős mennyiségben használnak magasabb üzemi hőmérsékletet elviselő poliimid (polyimide) és bismaleinimid (bismaleimide) alapanyagú hőre keményedő mátrixgyantákat (Thermosetting resins), valamint hőre lágyuló polimereket (thermoplastics) az erősítőanyagok beágyazására. A vizsgálatunk célja, hogy a repülőgépiparban alkalmazható műanyag kompozitok mechanikai jellemzőinek vizsgálatával (QUASAR 100-as szakítógéppel) és elemzésével, az üzemeltetési és gazdaságossági anomáliákat elemezzük és javaslatot tegyünk olyan összetételekre, melyek ezeket a problémákat megoldja.

Kulcsszavak: műanyag kompozitok, anyagvizsgálat, mechanikai szilárdsági jellemzők.

Abstract: Due to their exceptional advantageous mass-referred mechanical characteristics the polymer composites are gathering more and more ground in several industrial segments, for example in the aircraft industry as well. Their application in large quantities is still limited by their price and some disadvantageous attributions compared to some other structural material. Nowadays significant quantity of higher temperature resistant polyimide and bismaleimide based thermosetting matrix resins and thermoplastic polymers are used for bedding the reinforcing materials. The goal of our examination is to analyse the operational and economy efficiency anomalies with testing and analyzing (by QUASAR 100 testing machine) the mechanical characteristics of the plastic composites used in the aircraft industry, and to make a proposal for such compounds that solve these problems.

Keywords: plastic composites, material test, mechanical strength characteristics.

1. Bevezetés

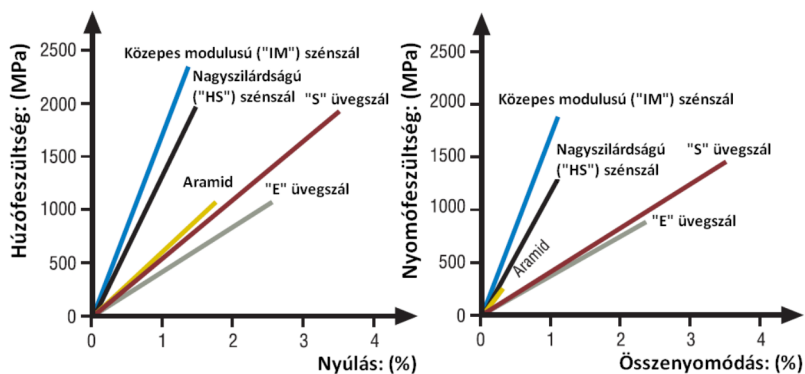
A térhálós polimer mátrixú kompozitokra általában jellemző az alacsony szakadási nyúlás, illetve a rideg tönkremenetel, mely elsősorban olyan felhasználási területeken jelent hátrányt, ahol a termék ütésszerű, vagy összetett terhelésnek is ki van téve. [Pukánszky, 2011] A rideg viselkedés ellenőrzése és detektálása ipari szempontból kedvező eredményekkel szolgálhat. A repülőgépekre, illetve azok alkatrészei esetében folyamatos fásztó igénybevételnek, és hirtelen behatásoknak vannak kitéve, ezért a mechanikai szilárdsági jellemzők vizsgálata döntő szempont, hogy ne viselkedjenek ridegen, vagyis ne hirtelen, kis deformáció-értékeknél menjenek tönkre. Napjainkban a könnyű sport- és általános célú repülőgépek és az új generációs katonai csapásmérő-, illetve vadászrepülőgépek, helikopterek sárkányszerkezetében széleskörűen alkalmazzák a korszerű műanyag kompozit anyagokat. [Czél et. al., 2013]

A szálerősítésű epoxi kompozitok esetében azonban elmondható, hogy megfelelő tervezés és gyártástechnológia esetén hosszú élettartammal bírnak, mert az inhomogén szerkezetüknek köszönhetően a csúcsterhelések vagy a hosszantartó változó igénybevételek hatására nem jön létre a fémek esetében ismert fáradásos tönkremenetel, amely egy bizonyos idő után a szerkezet hirtelen és nagyarányú szilárdságvesztésével jár. [Czvikovszky, 2000] A kompozit anyagok szilárdsága nagyon kis mértékben, de folyamatosan csökken az idő és a terhelés függvényében a beágyazó anyagban keletkező mikrorepedések és az erősítőszálak elenyésző hányadának szakadása miatt. A kompozit anyagok erősítőszálai igen nagy szakítószilárdságúak és nagy a rugalmassági modulusuk, viszont a sűrűségük jóval kisebb a fémekénél emellett anizotróp szerkezetűek is lehetnek, így az azonos vagy jobb mechanikai paraméterek melletti tömegcsökkenést eredményeznek. A repülőgépiparban legelterjedtebb erősítőszálak a következők: nagyszilárdságú szénszál (HS Carbon), közepes modulusú szénszál (IM Carbon), nagy modulusú szénszál (HM Carbon), alacsony modulusú Aramidszál (Aramid LM), ultranagy modulusú aramidszál (Aramid UHM), „E” üvegszál („E” Glass). A Wöhler görbékből megállapítható, hogy a kompozitok esetében az anyagfáradás olyan kismértékű, hogy nagyság-rendileg kisebb tervezési és súlyproblémákat okoz, mint a fémek esetében [Gáthi et. al., 2011]

2. Anyag és módszer

A kompozit-szerkezetek húzó- és nyomószilárdsága a fémektől eltérően jelentősen eltérhet, amely üvegszál és a szénszálak nagyobb részénél 15 ÷ 30 % között van, de az extrém nagy szakítószilárdságú szénszálak esetében 50 % is lehet. Aramidszálakkal (Kevlar) erősített kompozitokban pedig a 60 %-ot is meghaladhatja, azaz a nyomószilárdságuk ennyivel gyengébb, mint a húzószilárdságuk, ezért a váltakozó irányú hajlításra terhelt szerkezeteket a nyomószilárdsági értékkel kell méretezni. A kompozit anyagok húzószilárdsága és nyomószilárdsága közötti eltéréseket szemlélteti az 1. ábra [Vermes, 2015]

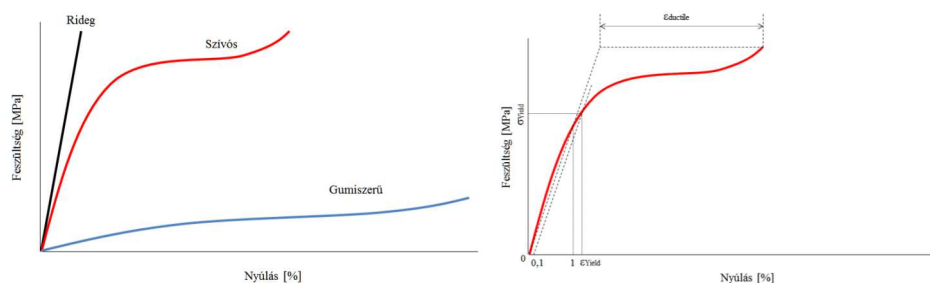
1. ábra Egyirányú (UD) prepreg kompozitok összehasonlítása húzó- és nyomóigénybevétel hatására



Forrás: [Vermes 2015]

Az anyagok feszültség hatására deformációval válaszolnak, megkülönböztetünk a „szilárd” anyagok feszültség-nyúlás görbéje alapján: rideg, gumyszerű, szívós viselkedést, mely látható a 2. ábrán. Rideg anyag esetében, a feszültség-nyúlás síkon megközelítőleg lineáris viselkedést mutat, az anyagok a szakadásukig jó közelítéssel rugalmasan viselkednek, vagyis a terhelés megszűnése után visszanyerik eredeti alakjukat, a tönkremenetel viszont általában kis deformációértéknél, hirtelen jelentkezik. A szálerősített rendszerek általában ilyen rideg viselkedést mutatnak terhelés hatására. A gumyszerű viselkedés az elasztomerekre és gumikra jellemző. [Koncz et. al.,2000] A szívós viselkedés esetében a lényeg, hogy egy kezdeti reverzibilis, energiarugalmas szakasz után irreverzibilis változás következik be, amely a terhelés megszűnése után maradó deformációként, vagy a rugalmassági modulus csökkenése formájában jelentkezik. [Lukács et. al.,2000] Fémeknél a diszlokációk menti elcsúszások megindulásához nagyobb feszültség szükséges mint a későbbi egyenletes mozgáshoz. Polimerek esetén az időfüggő viselkedés miatt a lokális maximum oka lehet a túl gyors mechanikai behatás, amit az anyag nem tud késés nélkül követni szerkezete megváltozásával. [Mészáros, 2009] A szívósság lényegében tehát nem más, mint a tönkremeneteli folyamat kitolása magasabb deformáció értékek felé, miközben az anyag már szakadás előtt is irreverzibilis változásokon megy keresztül, károsodást szenved, és ezzel energiát nyel el. A szálerősítésű kompozitok vizsgálata során folyási feszültségként (σ_{Yield}) azt a pontot definiálták, mely a kezdeti modulus egy tized százalék deformációval eltolt egyenesének és a valós feszültség-nyúlás görbének a metszéspontjához tartozó feszültségérték., mely a 2. ábrán látható. A folyási nyúlás (ϵ_{Yield}) az ezen metszésponthoz tartozó deformáció mértéke. A szívós nyúlás ($\epsilon_{ductile}$) a szakadási nyúlás, és a kezdeti modulus egyenesén az azonos feszültségértékhez (szakadási feszültség) tartozó nyúlásértékek különbsége. [Vermes, 2015]]

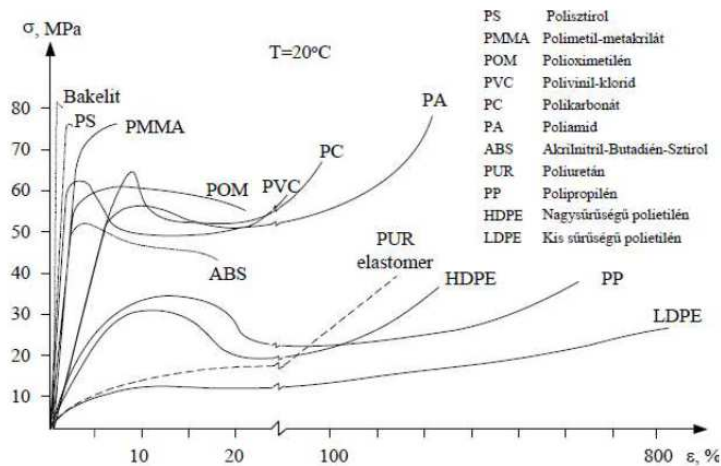
2. ábra Tipikus feszültség-nyúlás görbék, szívósság értelmezése



Forrás: [Vermes 2015]

Napjainkban a legnagyobb mennyiségben felhasznált tömeg és műszaki célú polimerek tipikus szakítógörbéit mutatja a 3. ábra. Jól látható, hogy mennyire eltérő viselkedést mutatnak az egyes polimer típusok. Vannak olyanok, amelyek azonos körülmények mellett ridegen törnek, de akadnak olyanok is, amelyek több száz %-os nyúlást képesek elviselni teljes tönkremenetel nélkül. [Gunczer, 2009]

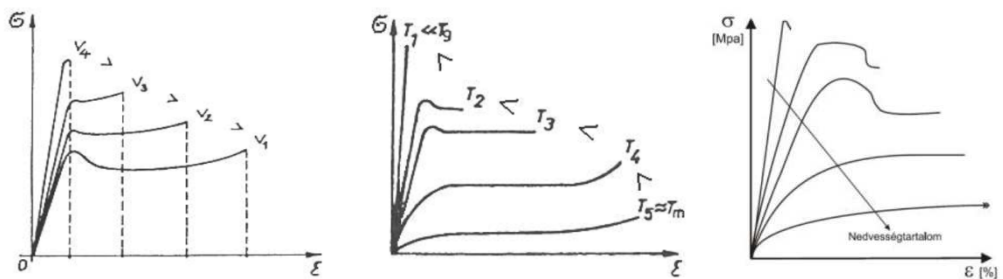
3. ábra Különböző polimerek szakító diagramja



Forrás: [Sápi et. al. 2015]

A polimerekre jellemző, hogy a vizsgálati körülmények megváltozása jelentősen befolyásolja az anyag mechanikai tulajdonságait. A főbb befolyásoló paraméterek a következők, szakítási sebesség, vizsgálati hőmérséklet, nedvességtartalom. Szakítási sebesség: nagyobb szakítási sebességek esetén a viszkoelasztikus tulajdonságokkal rendelkező anyagok (polimerek) merevebben viselkednek, általában a szilárdságuk is nagyobb értékre adódik (4/a ábra) Vizsgálati hőmérséklet: a polimerek esetén már kis hőmérsékletváltozás is jelentősen befolyásolja a merevséget, a szilárdságot, illetve a tönkremeneteli folyamat jellegét. A polimerek az ún. üvegesedési hőmérsékletük (T_g) alatt üvegszerű állapotban ridegen, míg e felett az ún. nagyrugalmas állapotban szívósabban viselkednek, valamint nagyobb a szakadási nyúlásuk is (4/b ábra) [Sápi, 2015]

4. ábra Eltérő sebességgel (a), eltérő hőmérsékleten (b), eltérő nedvességtartalom (c) mellett felvett szakító diagram a szakító diagramok



Forrás: [Sápi et. al. 2015]

Nedvességtartalom: vannak olyan polimerek, amelyek képesek a tulajdonságaikat befolyásoló mennyiségű (1-4%) nedvesség abszorbeálására (pl.: poliamidok, poliészterek, természetes polimerek, egyes szálerősített kompozitok). A nedvességnek lágyító hatása van, azaz csökkenti a rugalmassági moduluszt, szilárdságot, növeli a szakadási nyúlást (4/c ábra). [Pék, 2000]

2.1. Szakítóvizsgálatból meghatározható mechanikai jellemzők

A szakítóvizsgálat eredményeként az adott mérési körülményekre vonatkozóan megkapjuk az anyag erő-nyúlás ($F-\Delta l$) görbéjét. Ezt át lehet paraméterezni mérnöki feszültség-relatív nyúlás ($\sigma-\varepsilon$) görbévé (5. ábra): az erő tengely helyén a mérnöki feszültséget (σ [MPa]) megkapjuk, ha az erőt (F [N]) osztjuk a próbatest kiindulási keresztmetszetével (A_0 , [mm²]):

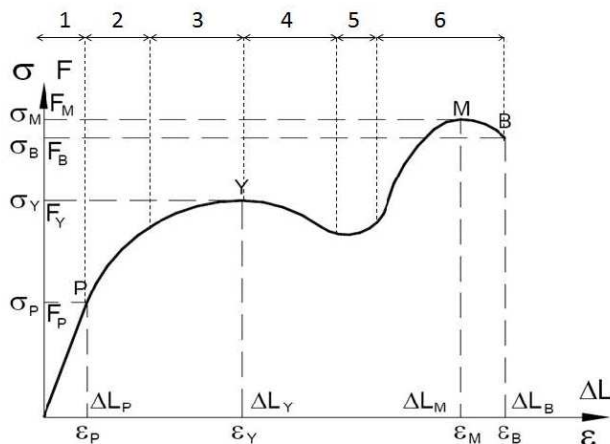
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ [MPa]} \quad (1)$$

A relatív nyúlás (ε) pedig a próbatest megnyúlásának (Δl [mm]; $\Delta l = l - L_0$, ahol l a próbatest aktuális hossza) és a kezdeti mérési hosszának (L_0 , [mm]) a hányadosa:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (2)$$

A szakító diagramot (5. ábra) az alábbi hat nevezetes szakaszra lehet felosztani: 1. szakasz: kis terheléseknél, lineáris rugalmas alakváltozás. 2. szakasz: terhelés növelésével megindul a lineárisan viszkoelasztikus deformáció (idő függvényében visszaalakul). 3. szakasz: nagyobb terheléseknél, nemlineáris viszkoelasztikus deformáció. 4. szakasz: nyakképződés szakasza, csökken a mérnöki feszültség, elkezdődik a makromelekulák lokális rendeződése. 5. szakasz: nyakképződés kiterjedése= állandósult folyás szakasza. 6. szakasz: a globális rendeződés hatására nő a szakítószilárdság (alakváltozási keményedés). Ebben a szakaszban a rendeződött szálak a szakítószilárdsági értéküket elérve egymás után elszakadnak.

5. ábra Általános műanyag szakító diagram, jellegzetes szakaszok



Forrás: [Pék, 2000]

A szakítóvizsgálat során regisztrált erő-nyúlás görbéből (illetve az ebből képezhető feszültség-relatív nyúlás görbéből) a következő mechanikai mennyiségeket lehet leolvasni, illetve számítani. [Sápi et. al. 2015]

σ_Y folyás határ: az az első feszültség, amelynél a nyúlás a feszültség növekedése nélkül növekszik. A gyakorlatban bizonyos polimereknél fel sem lép a folyás jelensége, másoknál több 100 %-os folyási alakváltozás következhet be, amelyet a próbatesten nyakképződés és szerkezeti átalakulás kísérhet. A folyást bizonyos polimerek esetén az ún. feszültség fehéredés jelezheti. [Pék, 2000]

σ_M húzószilárdság: a maximális erő és a kezdeti keresztmetszet hányadosa. A maximális erő elérésekor az anyag a leggyengébb pontjában helyileg instabil állapotba kerül, ezen a helyen megkezdődik a keresztmetszet kontrakciója, helyi keresztmetszet csökkenése. A folyamat folytatódhat nyakképződéssel, vagy hirtelen szakadással [Sápi et. al., 2015]

σ_B szakító szilárdság: a szakadáskor mért erő és a kezdeti keresztmetszet hányadosa. A feszültség-relatív nyúlás diagram segítségével az alakváltozási mutatószámok is meghatározhatók. Ezek közül a legfontosabbak a következők: **Nyúlás a maximális erőnél (ϵ_M):** ahol L_0 a próbatest vizsgált szakaszának eredeti terheletlen hossza, L_M a próbatest vizsgált szakaszának a maximális erőnél mért megnyúlt hossza:

$$\epsilon_M = \frac{L_M - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

Szakadási nyúlás (ϵ_B): ahol L_B : a próbatest vizsgált szakaszának a szakadáskor mért megnyúlt hossza:

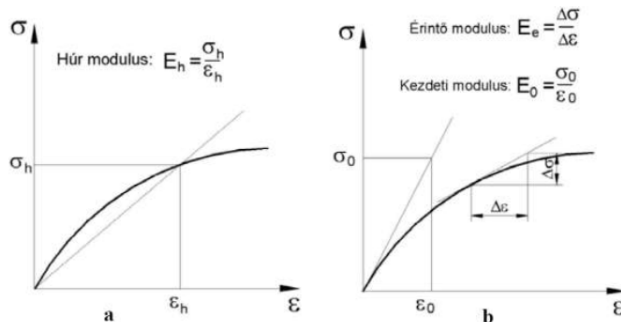
$$\epsilon_B = \frac{L_B - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (4)$$

A σ - ϵ görbéből a vizsgált anyagra nézve különböző rugalmassági modulusok határozhatók meg (E). Kétféle típusú rugalmassági modulusról beszélhetünk:

Húr modulus (E_h): a görbe tetszés szerinti pontját az origóval összekötő egyenes meredeksége, természetesen pontról pontra változik (6. ábra). [Gáthi et. al., 2011]]

Érintő modulus (E_e): a görbe tetszőleges pontjához húzott érintő meredeksége (6. ábra). Mivel a szakítógörbe nem lineáris, így érintőjének meredeksége is pontról pontra változik. A feszültség - relatív nyúlás görbe origójába húzott érintőjének meredekségét kezdeti rugalmassági modulusnak nevezzük (E_0). Ha a görbe kezdőpontjához nem pontosan húzzuk be az érintőt, akkor a pontos érintőtől való kis eltérés is nagy pontatlanságot eredményez a rugalmassági modulus értékében. A gyakorlatban a 0,05 % és 0,25 % relatív nyúlásértékhez tartozó görbepontokon átmenő egyenesnek a meredekségét tekintjük az anyag rugalmassági modulusának. [Sápi et. al.,2015]

6. ábra Rugalmassági modulusok, (a): húr modulus (b): érintő modulus



Forrás: [Pék, 2000]

A szakítógörbe alatti terület a szakításra fordított munka, azaz a törési munka (W_B). A törési munka rideg anyagoknál kisebb, szívós anyagoknál nagyobb. A törési munka és a rugalmassági modulus általában egymással fordítottan arányos. Mivel a gépészeti alkalmazásokban egyaránt nagy rugalmassági modulusú, ugyanakkor nagy szívósságú anyagokra van szükség, ezért a tervezésnél kompromisszumot kell kötni, és az adott szerkezetre optimalizálva kell megválasztani az adott mechanikai tulajdonságokkal rendelkező anyagot.

$$W_B = \int_0^{\Delta l} F \cdot \Delta l \quad [J] \quad (5)$$

A feszültségek számításánál az aktuális erőt mindig a kezdeti keresztmetszettel osztjuk, ekkor az ún. látszólagos vagy mérnöki feszültségeket kapjuk. A nyúlás során azonban a próbatest keresztmetszete csökken. Ha a pillanatnyi erőt a pillanatnyi keresztmetszettel osztjuk, akkor a valódi feszültséget kapjuk. A pillanatnyi keresztmetszet (A_p) közelítőleg számítható a térfogat megmaradás elvét feltételezve a következő összefüggéssel:

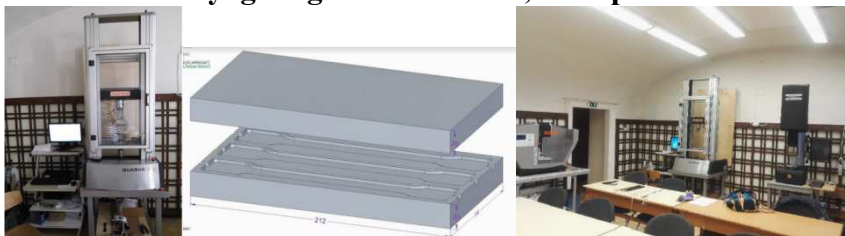
$$A_0 \cdot L_0 = A_p \cdot L_p \quad A_p = \frac{A_0 \cdot L_0}{L_p} = A_p = \frac{A_0 \cdot L_0}{L_0 + \Delta L_p} \quad (6)$$

ahol: A_0 a kezdeti keresztmetszet, L_0 a kezdeti mérési hossz, L_p a pillanatnyi hossza az L_0 kezdeti mérési hosszának, $L_p = L_0 + \Delta L_p$, ΔL_p az erő-nyúlás görbéről leolvasható pillanatnyi nyúlása a kezdeti mérési hosszának. Ez a számítási mód a próbatest szakítóvizsgálatának csak addig a szakaszáig használható, amíg a sűrűség állandó, illetve a próbatest keresztmetszete a hossz mentén azonosan csökken, azaz a helyi kontrakció megindulásától, illetve a nyakképződés szakaszában nem. [Pék, 2000]

3. Eredmények és értékelésük

A próbatest kialakítása és szabványos megválasztásán kívül szempont volt, hogy az SZTE-MK Anyagvizsgáló laborjában rendelkezésre álló szakítógéppel 7. ábra, (Galdabini Quasar 100) el tudjuk végezni a vizsgálatokat. A próbatest kialakítása során a szabványban előírt legkisebb próbatest legyártására került sor, azonban a szakítógépünkkel a méréshatárok helyes beállításával és megválasztásával el tudtuk végezni a vizsgálatainkat. Először egy próba vizsgálatot hajtottunk végre, mely során az esetlegesen felmerült problémákat tudtuk orvosolni, ilyen volt a szakadási nyúlás értékek helyes bekalibrálása. A próbatest kialakítása érdekében 3D-ben terveztük meg a próbatest sablonokat (öntőforma), mely a következő 7. ábrán látható.

7. ábra SZTE MK Anyagvizsgáló laborterem, 3D-s próbatest öntőforma



Forrás: A szerzők saját szerkesztése.

A legyártásra került próbapálcák összetétele: Polimer, Polietilén PE –TIP - 7700M, kompozit : kén, agyagásvány, az alap polimer jelölése PE-K001. A minta próbapálcák (etalon) kialakítása a 8. ábrán láthatóak, Az alap polimerhez képest különböző tömegszázalékba bekevert agyagásvány és kén került beállításra, a minták jelölése a következőképpen történt (a további vizsgálatok helyes rögzítése érdekében): PE-K002: 0,5 tömeg% agyagásvány, PE-K003: 0,5 tömeg% kén, a vizsgálati eredmények a 1. táblázatban található.

8. ábra SZTE MK Anyagvizsgáló laborterem, 3D-s próbatétel öntőforma



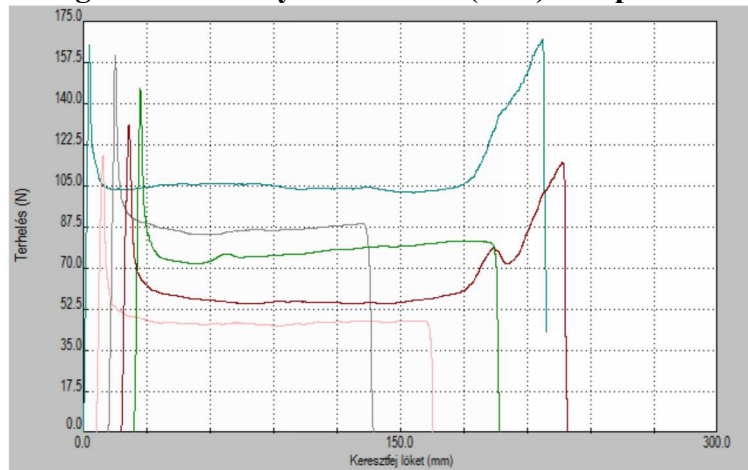
Forrás: A szerzők saját szerkesztése.

1. táblázat Vizsgálati eredmények az alkalmazott kompozitok esetében.

| Próbatest kód | Vizsgálati dátum | Vastagság (a) | Szélesség (b) | Szakadási nyúlás | F _t | F _m | R _m |
|---------------|------------------|---------------|---------------|------------------|----------------|----------------|----------------------|
| | | (mm) | (mm) | (mm) | (N) | (N) | (N/mm ²) |
| PE-K001-1 | 18-02-2019 | 2,18 | 3,89 | 138,2 | 52,5 | 145,5 | 17,16 |
| PE-K001-2 | 18-02-2019 | 2,14 | 3,89 | 122,3 | 58,5 | 131,0 | 15,74 |
| PE-K001-3 | 18-02-2019 | 2,42 | 3,89 | 144,2 | 13,5 | 159,5 | 16,94 |
| PE-K001-4 | 18-02-2019 | 2,09 | 4,00 | 63,2 | 21,5 | 117,0 | 14,00 |
| PE-K001-5 | 18-02-2019 | 2,28 | 3,95 | 146,2 | 43,0 | 166,0 | 18,43 |
| PE-K002-1 | 04-03-2019 | 2,11 | 3,85 | 25,34 | 63,5 | 123,5 | 15,28 |
| PE-K002-2 | 04-03-2019 | 2,12 | 3,85 | 126,0 | 56,5 | 131,0 | 16,2 |
| PE-K002-3 | 04-03-2019 | 2,11 | 3,85 | 164,6 | 12,5 | 169,5 | 20,96 |
| PE-K002-4 | 04-03-2019 | 2,18 | 3,89 | 54,5 | 32,5 | 130,5 | 16,4 |
| PE-K002-5 | 04-03-2019 | 2,14 | 3,85 | 26,22 | 52,5 | 139,0 | 17,19 |
| PE-K003-1 | 04-03-2019 | 2,15 | 3,85 | 211,4 | 38,5 | 127,0 | 15,34 |
| PE-K003-2 | 04-03-2019 | 2,15 | 3,85 | 13,28 | 67,5 | 121,0 | 14,62 |
| PE-K003-3 | 04-03-2019 | 2,14 | 3,86 | 93,13 | 51,5 | 137,0 | 16,61 |
| PE-K003-4 | 04-03-2019 | 2,16 | 3,85 | 93,22 | 49,0 | 139,0 | 16,79 |
| PE-K003-5 | 04-03-2019 | 2,15 | 3,85 | 178,2 | 38,5 | 137,0 | 16,55 |

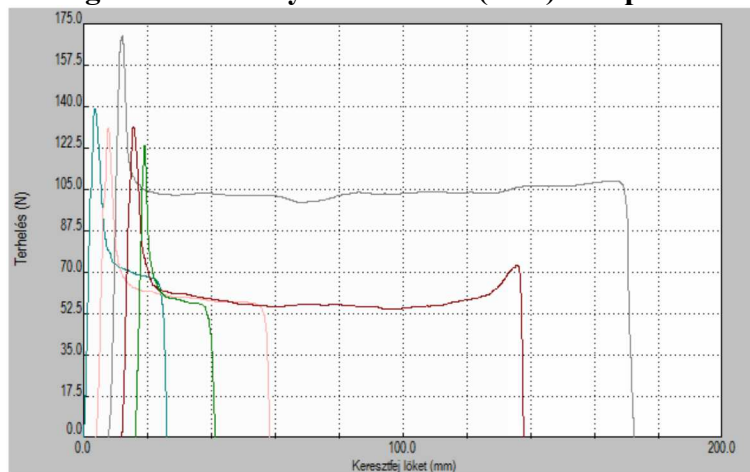
Forrás: A szerzők saját szerkesztése.

9. ábra Vizsgálati eredmények PE-K001 (1.-5.) kompozitok esetében.



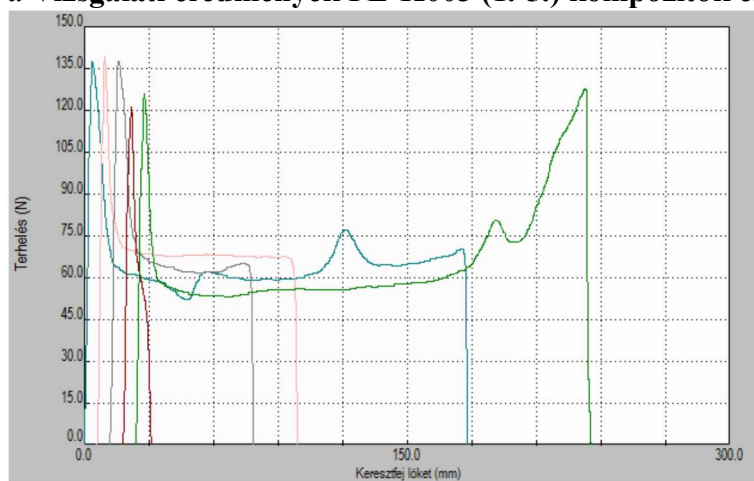
Forrás: A szerzők saját szerkesztése.

10. ábra Vizsgálati eredmények PE-K002 (1.-5.) kompozitok esetében.



Forrás: A szerzők saját szerkesztése

11. ábra Vizsgálati eredmények PE-K003 (1.-5.) kompozitok esetében.



Forrás: A szerzők saját szerkesztése

4. Következtetések

A szerkezeti anyagok választékában a polimerek és kompozitjaik alkalmazása, azok kiváló mechanikai, fizikai és kémiai tulajdonságai miatt, igen elterjedt. A kis sűrűség és az ahhoz tartozó nagy szilárdság, a csillapító és szigetelőképeség, a vegyszer és korrózióállóság, a tervezhető anizotrópia stb. napjaink legnépszerűbb anyagává tették a szintetikus polimereket. Alkalmazásukkal nemcsak energiát takaríthatunk meg, hanem a fenntartható fejlődés zálog is ez az anyagcsalád. A mai polimertechnikai kutatások arra irányulnak, hogy olyan anyagokat fejlesszünk, amelyek környezetbarátabbak, csökkentik az energiafelhasználást, könnyebbé és komfortosabbá teszik a hétköznapi életünket.

Köszönetnyilvánítás:

„A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. EFOP-3.6.1-16-2016-00014

Irodalomjegyzék

1. Czvikovszky – Nagy – Gaál: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, 2000
2. Gáthi Balázs – Koncz Imre: Repülőgépek szerkezete, A II. Nemzeti Fejlesztési Terv Társadalmi Megújulás Operatív Program TÁMOP-4.1.2/A/2-10/1-2010-0018 azonosító számú programja keretében készült jegyzet. 2011.
3. Gunczer L.(2009): Anyagismeret és Gyártástechnológia jegyzetmodulok.
4. Gunczer L. (2009):, Anyagvizsgálatok. SZTE MK, Szeged 2009.
5. Mészáros-Varnyú (2009): Műszaki anyagismeret (CooSpace elektronikus jegyzet).
6. Gunczer L. (2009): Anyagszerkezettan és gyártástechnológia, Egyéb anyagok (kiegészítés). SZTE Univ Kiadó, Szeged 2009.
7. Rác, Elemér. Repülőgéptervezés. Budapest : Tankönyvkiadó, 1955.
8. Lukács – Csomós – Gácsi - Karcagi – Magyar – Tomolya: Fáradásos repedésterjedés különböző típusú kompozitokban, Anyagvizsgálók Lapja, 2004/4
9. Koncz – Magyarosi – Pusztai: Kompozitok és szendvicsszerkezetek - Repülőgép kompozit szerkezetjavító szakmai oktatási jegyzet, 2000
10. Megson, T.H.G. Aircraft Structure for Engineering Students. Arnold, 1999. ISBN 0 340 70588 4.
11. Pukánszky B., Móczó J.: Műanyagok. Typotex kft., Budapest, Magyarország (2011).
12. Czél G., Jalalvand M., Wisnom M.R.: Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional hybrid composites made of discontinuous carbon/epoxy and continuous glass/epoxy plies. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 72, 75-84 (2015).
13. Wisnom M.R., Czél G., Fuller J.D., Jalalvand M.: High performance pseudo-ductile composites. 20th International Conference on Composite Materials, Copenhagen, Denmark (2015).
14. Czél G., Wisnom M.R.: Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 52, 23-30 (2013).
15. Sági A. Nagy L. (2015): Segédanyag a Nanotechnológia és anyagvizsgáló laboratóriumi gyakorlathoz jegyzet, SZTE-TTIK, Anyagtudományi Intézet.
16. Pék L. (2000): Anyagszerkezet és anyagismeret, Dinasztia Kiadó, Budapest, ISBN 9636573263
17. Vermes B.(2015) BME-Gazdaságtudományi Egyetem Polimertechnika Tanszék, TDK: Megnövelt szívósságú, szénszál/epoxi kompozit főiránytól eltérő húzó tulajdonságainak meghatározása.

English title of the article

ANALYSIS OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF PLASTIC COMPOSITES

Molnár Tamás, PhD, főiskolai docens, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Műszaki Intézet (Szeged), molnart@mk.u-szeged.hu

Bíró István, PhD, egyetemi docens, dékán, intézetvezető Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Műszaki Intézet (Szeged), biro@mk.u-szeged.hu

Szuchy Péter, tudományos munkatárs, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Műszaki Intézet (Szeged), szpeter@mk.u-szeged.hu

Varnyú Ferenc, tanszéki mérnök, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Műszaki Intézet (Szeged), varnyuf@mk.u-szeged.hu

Csikós Sándor, egyetemi tanársegéd, Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Műszaki Intézet (Szeged), csikos-s@mk.u-szeged.hu

Sárosi József, PhD, főiskolai docens, intézetvezető-helyettes Szegedi Tudományegyetem Mérnöki Kar, Műszaki Intézet (Szeged), sarosi@mk.u-szeged.hu