

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.

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.

Kulcsszavak: műanyag kompozitok, anyagvizsgálat, mechanikai szilárdsági jellemzők

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–Móczó, 2011) A rideg viselkedés ellenőrzése és detektálása ipari szempontból kedvező eredményekkel szolgálhat. A repülőgépekre, illetve azok alkatrészei esetében folyamatos fárasztó 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)

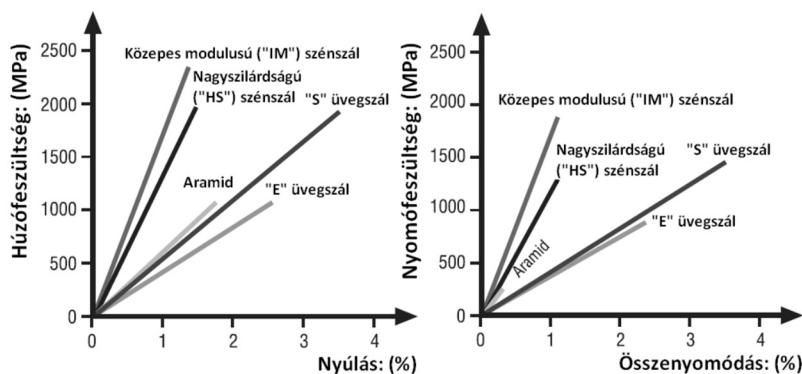
A szálerősítésű epoxi kompozitok esetében azonban elmondható, hogy megfelelő tervezés és gyártástechnológia esetén hosszú élettartammal bírnak, mert az inhomogén szerkezetüknek köszönhetően a csúcsterhelések vagy a hosszantartó változó igénybevételek hatására nem jön létre a fémek esetében ismert fáradásos

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 szénzál (HS Carbon), közepes modulusú szénzál (IM Carbon), nagy modulusú szénzál (HM Carbon), alacsony modulusú Aramidzál (Aramid LM), ultranagy modulusú aramidzál (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. (Gáti–Koncz, 2011)

2. Anyag és módszer

A kompozit-szerkezetek húzó- és nyomószilárdsága a fémektől eltérően jelentősen eltérhet, amely üvegszál és a szénzálak nagyobb részénél 15 ÷ 30 % között van, de az extrém nagy szakítószilárdságú szénzálak esetében 50 % is lehet. Aramidzálakkal (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

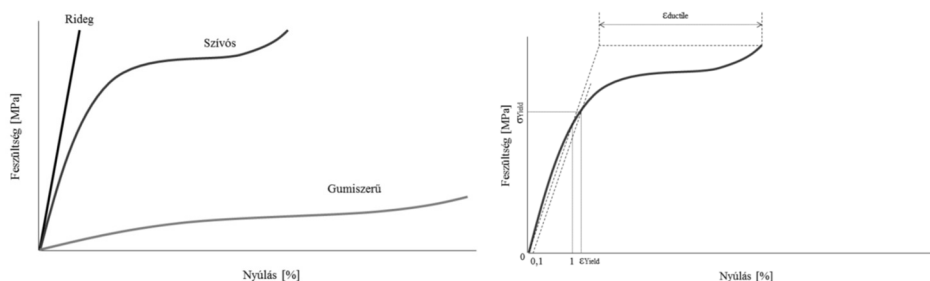


Forrás: Vermes (2015)

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 deformáció-értéknél, 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–Varnyú, 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 ($\epsilon_{\text{ductile}}$) a szakadási nyúlás, és a kezdeti modulus egyenesén az azonos feszültségértékhez (szakadási feszültség) tartozó nyúlásértékek különbsége. (Vermes, 2015)

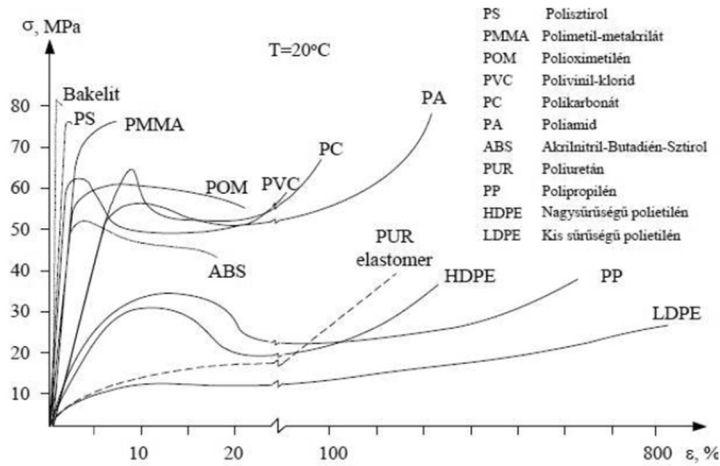
2. ábra: Tipikus feszültség-nyúlás görbék, szívósság értelmezése



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)

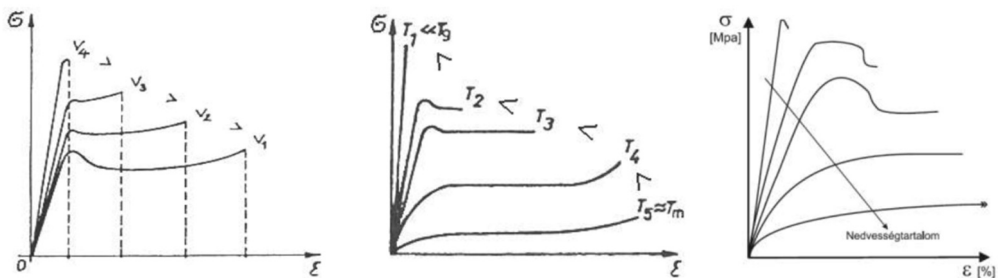
3. ábra: Különböző polimerek szakító diagramja



Forrás: Sági-Nagy (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). (Sági-Nagy, 2015)

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



Forrás: Sági-Nagy (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 - Δl) görbéjét. Ezt át lehet paraméterezni mérnöki feszültség-relatív nyúlás (σ - ε) 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]):

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

ahol:

σ = mérnöki feszültség

F = erő

A_0 = próbatest kiindulási keresztmetszete

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:

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

ahol:

ε = relatív nyúlás

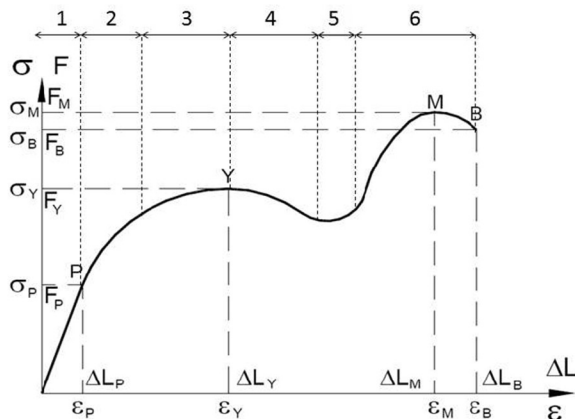
Δl = próbatest megnyúlása

L_0 = kezdeti mérési hossz

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-Nagy, 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-Nagy, 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:
 - a) **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:

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

ahol:

ϵ_M = relatív nyúlás a maximális erőnél

L_M = próbatest vizsgált szakaszának a maximális erőnél mért megnyúlt hossza

L_0 = próbatest vizsgált szakaszának eredeti terheletlen hossza

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

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

ahol:

ε_B = szakadási nyúlás

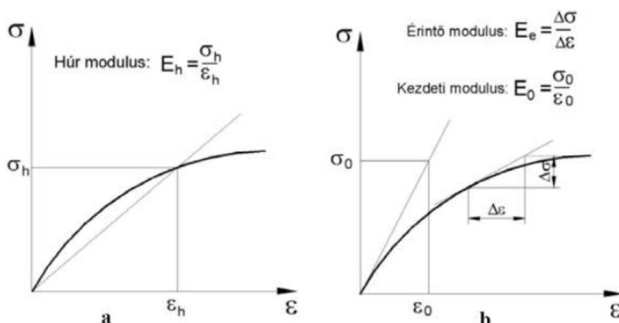
L_B = próbatest vizsgált szakaszának a szakadáskor mért megnyúlt hossza

L_0 = próbatest vizsgált szakaszának eredeti terheletlen hossza

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). (Gáti–Koncz, 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–Nagy,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.

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

ahol:

W_B = törési munka

Δl = próbatest megnyúlása

L_0 = kezdeti mérési hossz

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:

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

ahol:

A_0 = kezdeti keresztmetszet

L_0 = kezdeti mérési hossz

A_p = pillanatnyi keresztmetszet

$L_p = L_0 + \Delta l_p$: kezdeti mérési hossz pillanatnyi hossza

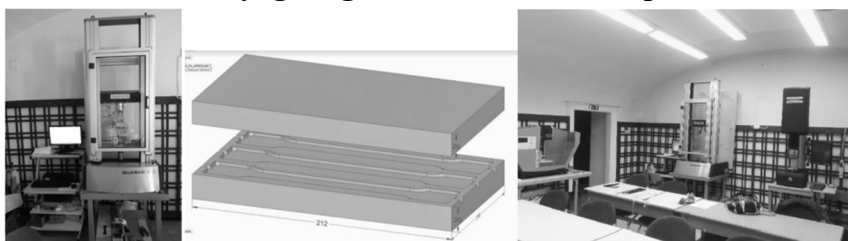
Δl_p = a kezdeti mérési hosszhoz az erő-nyúlás görbéről leolvasható pillanatnyi nyúlása

ahol: A_0 a kezdeti keresztmetszet, L_0 a kezdeti mérési hossz, L_p a pillanatnyi hossza az L_0 kezdeti mérési hosszhoz, $L_p = L_0 + \Delta l_p$, Δl_p az erő-nyúlás görbéről leolvasható pillanatnyi nyúlása a kezdeti mérési hosszhoz. 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 próbatestek kialakítása során a szabványban előírt legkisebb próbatest legyártására került sor, azonban a szakítógéppel a méréshatár 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.

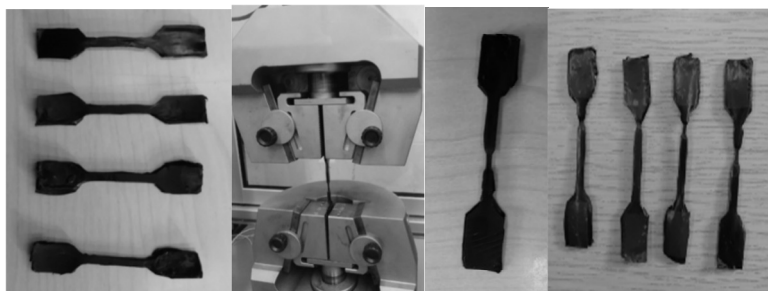
7. ábra: SZTE MK Anyagvizsgáló laborterem, 3D-s próbatest öntőforma



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 próbatest öntőforma

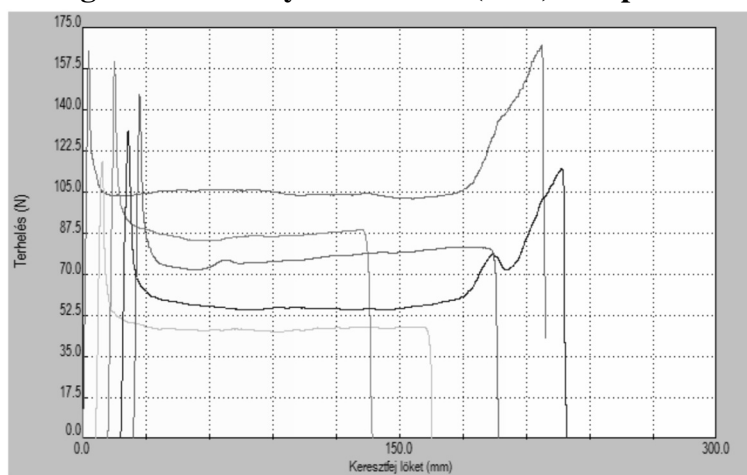


Forrás: A szerzők saját szerkesztése.

1. táblázat: Vizsgálati eredmények az alkalmazott kompozitok esetében.

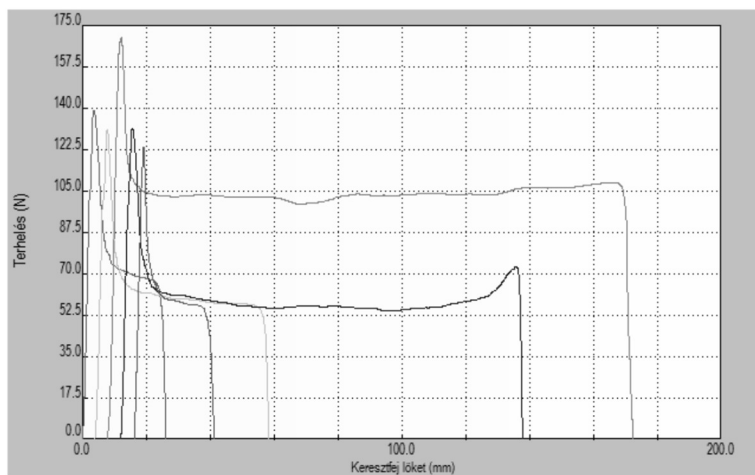
Próbatest kód	Vizsgálati dátum	Vastagság (a)	Szélesség (b)	Szakadási nyúlás	F _t	F _m	R _m
		(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(N)	(N/mm ²)
PE-K001-1	18-02-2019	2,18	3,89	138,2	52,5	145,5	17,16
PE-K001-2	18-02-2019	2,14	3,89	122,3	58,5	131,0	15,74
PE-K001-3	18-02-2019	2,42	3,89	144,2	13,5	159,5	16,94
PE-K001-4	18-02-2019	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.

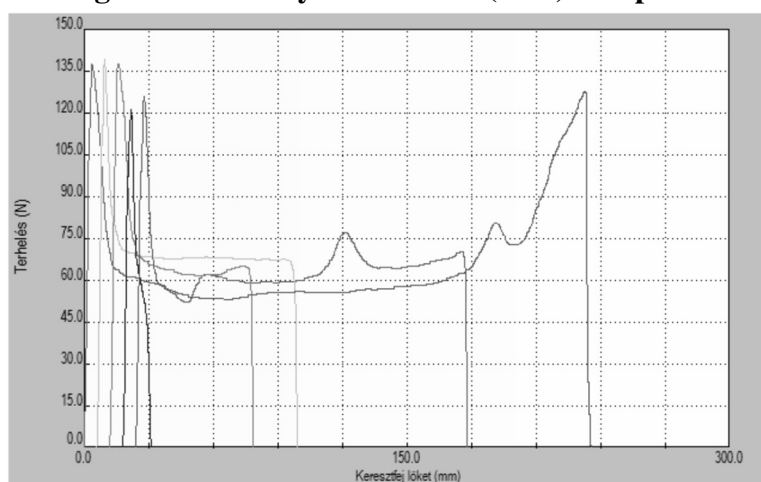
Forrás: A szerzők saját szerkesztése.

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

- Czél G., Jalalvand M., Wisnom, M. R. (2015): 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.
- Czél G., Wisnom M. R. (2013): 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.
- Czvikovszky, Nagy, Gaál (2000): *A polimertechnika alapjai*. Műegyetemi Kiadó.
- Gáti B., Koncz I. (2011): *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.
- Gunczer L. (2009): *Anyagszerkezettan és gyártástechnológia, Egyéb anyagok (kiegészítés)*. SZTE Univ Kiadó, Szeged.
- Gunczer L. (2009): *Anyagvizsgálatok*. SZTE MK, Szeged.
- Gunczer L. (2009): *Anyagismeret és Gyártástechnológia jegyzetmodulok*. SZTE MK, Szeged.
- Koncz, Magyarosi, Pusztai (2000): *Kompozitok és szendvicsszerkezetek – Repülőgép kompozit szerkezetjavító szakmai oktatási jegyzet*.
- Lukács, Csomós, Gácsi, Karcagi, Magyar, Tomolya (2004): Fáradásos repedésterjedés különböző típusú kompozitokban, *Anyagvizsgálók Lapja*, 14 (4)
- Megson T. H. G. (1999): *Aircraft Structure for Engineering Students*. Arnold.
- Mészáros, Varnyú (2009): *Műszaki anyagismeret*. (CooSpace elektronikus jegyzet).
- Pék L. (2000): *Anyagszerkezet és anyagismeret*. Dinasztia Kiadó, Budapest.
- Pukánszky B., Móczó J. (2011): *Műanyagok*. Typotex Kft., Budapest.
- Rácz E. (1955). *Repülőgéptervezés*. Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest.
- Sápi A., Nagy L. (2015): *Segédanyag a Nanotechnológia és anyagvizsgáló laboratóriumi gyakorlathoz jegyzet*. Anyagtudományi Intézet, SZTE-TTIK, Szeged.
- Vermes B. (2015): *Megnövelt szívósságú, szénszál/epoxi kompozit főiránytól eltérő húzó tulajdonságainak meghatározása*. Tudományos Diákköri Konferencia, Polimertechnika Tanszék, BME-Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest.
- Wisnom M. R., Czél G., Fuller J. D., Jalalvand M. (2015): High performance pseudo-ductile composites. *20th International Conference on Composite Materials*, Kopenhagen.