



Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Polimertechnika Tanszék

EGYIRÁNYBAN ERŐSÍTETT KOMPOZIT RUDAK HAJLÍTÓ
KARAKTERISZTIKÁJÁNAK ÉS TÖNKREMENTELI
FOLYAMATÁNAK ELEMZÉSE

Tézisek

Rácz Zsolt

Témavezető: Dr. Vas László Mihály

Budapest

2006

1. tézis A DIN 65 071:1992 szabvány továbbfejlesztéseként kidolgoztam egy olyan gyártástechnológiát és megterveztem egy olyan eszközrendszert (impregnáló berendezés, sajtoló szerszám), amely alkalmas 1D-s roving erősítő szerkezetből reprodukálható minőségű, egyirányban erősített (UD), négyszög keresztmetszetű (2...10 mm vastag, 10 mm széles, 300 mm hosszú) – a fenti szabvány követelményeit kielégítő – jól reprodukálható tulajdonságokkal rendelkező (száltartalom: 62 ± 2 tf%, üregtartalom: max. 2%, méretingadozás: $h \pm 0,15$ mm; $b \pm 0,1$ mm) kompozit rudak laborszintű előállítására.

A kidolgozott gyártástechnológia magas és jól reprodukálható – a próbatest előállításra vonatkozó szabvány által előírt követelményeket kielégítő – minőségi szintet biztosít a legyártott UD kompozit rudak szerkezeti-geometriai, és mechanikai tulajdonságai szempontjából.

2. tézis Kimutattam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD rudak ($h = 2, 4, 6, 8$ és 10 mm, $b = 10$ mm) három-, és négyponos hajlító vizsgálatánál (3PBT és 4PBT), az első töréshez tartozó erő értékből a klasszikus rúd elmélet (CBT) alapján számolt normál- (σ_x) és nyírófeszültségek (τ_{xz}) geometriai beállításoktól, illetve a minta vastagsági méretétől függő változása az alábbi összefüggésekkel írható le a teljes értelmezési tartományt tekintve (3PBT: $0 \leq x = L/h < \infty$, 4PBT: $0 \leq z = L_2/L < 1$):

3PBT ($z = 0$):

$$\sigma_{3PBT}(x, z) = \frac{3}{2 \cdot b} \cdot x \cdot \frac{F(x, z)}{h} \rightarrow \begin{cases} c_{asy}, & x \rightarrow \infty \\ 0, & x = 0 \end{cases} \quad (T1)$$

$$\tau_{3PBT}(x, z) = \frac{3}{4 \cdot b} \cdot \frac{F(x, z)}{h} \rightarrow \begin{cases} 0, & x \rightarrow \infty \\ \tau_{theo}, & x = 0 \end{cases} \quad (T2)$$

4PBT:

$$\sigma_{4PBT}(x, z) = \frac{3}{2 \cdot b} \cdot x \cdot (1 - z) \cdot \frac{F(x, z)}{h} \rightarrow \begin{cases} c_{3PBT}(x, z), & z = 0 \\ 0, & z = 1 \end{cases} \quad (T3)$$

$$\tau_{4PBT}(x, z) = \frac{3}{4 \cdot b} \cdot \frac{F(x, z)}{h} \rightarrow \begin{cases} \tau_{3PBT}(x, z), & z = 0 \\ \tau_{theo}, & z = 1 \end{cases} \quad (T4)$$

ahol 3PBT és 4PBT-re:

$$f(x, z) = \frac{F(x, z)}{h} = \frac{a_0}{b_0 + b_1 \cdot x \cdot (1 - z)} \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (T5)$$

ahol az $f(x, z)$ függvény konstansai a vizsgált UD anyag esetén:

$$a_0 = 1$$

$$b_0 = 4,8740 \cdot 10^{-4} \text{ [mm/N]}, \quad b_1 = 9,0465 \cdot 10^{-6} \cdot h + 6,0144 \cdot 10^{-5} \text{ [mm/N]}. \quad (T6)$$

Ezekkel a következő – az L/h és L_2/L aránytól független – aszimptotikus anyagjellemző értékeket kaptam: $E_{asy} = 1917...996$ MPa és $E_{theo} = 153,87$ MPa ($h = 2...10$ mm, $b = 10$ mm esetén).

3. tézis Kimutattam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD kompozit rudak ($b = 10$ mm, $h = 2, 4, 6, 8$ és 10 mm) hárompontos hajlító vizsgálata (3PBT) esetén (geometriai paraméterek: $R_1 = 5$ mm, $R_2 = 2$ mm) az L/h aránytól függő – a minta vastagsági méretétől (b/h arány) szinte független –, a lehajlás-erő karakterisztika alapján értelmezett látszólagos hajlító modulus (E_{app}) a mérések (mérési beállítások: $L/h = 5, 10, 15, 20$ és 25) szerint szignifikáns változása az alábbi összefüggésekkel írható le a teljes értelmezési tartományban ($0 < x = L/h < \infty$):

$$E_{3PBT}(x) = \frac{1}{4 \cdot b} \cdot x^3 \cdot \frac{\Delta F}{\Delta f}(x) \rightarrow \begin{cases} E_f, & x \rightarrow \infty \\ 0, & x \rightarrow 0 \end{cases} \quad (T7)$$

ahol:

$$g(x) = \frac{\Delta F}{\Delta f}(x) = \left[\frac{a_0 + a_1 \cdot x}{b_0 + b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2} \right]^3 \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (T8)$$

ahol a $g(x)$ függvény konstansai:

$$a_0 = 0,788, \quad a_1 = 1, \\ b_0 = 1,437 \left[\frac{mm}{N} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad b_1 = 0,080 \left[\frac{mm}{N} \right]^{\frac{1}{3}}, \quad b_2 = 0,056 \left[\frac{mm}{N} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (T9)$$

Ezekkel a következő – az L/h és b/h aránytól független – aszimptotikus anyagjellemző értéket kaptam: $E_f = 136,4$ MPa.

4. tézis Kimutattam, hogy hárompontos hajlító vizsgálat esetén a vizsgált karbonszál/epoxi UD minták ($b = 10$ mm, $h = 4$ mm) jellemző törési módját, illetve a teljes károsodási folyamatának lefutását az alkalmazott alátámasztási távolság ($5 \leq L/h \leq 25$) jelentősen befolyásolja.

- a. Az optikai felvételek és a regisztrált lehajlás-erő karakterisztikák alapján bebizonyítottam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD anyag hárompontos terhelésénél a terhelőfej alatt ($R_1 = 5$ mm) elsődlegesen bekövetkezett tönkremeneteli formák jellegüket tekintve három jól elkülöníthető típusra oszthatók az alátámasztási távolság (L/h arány) függvényében: $5 \leq L/h \leq 10$ – többrétegű delamináció, először nyíró-, majd nyomó jellegű tönkremenetel; $L/h = 15$ – vegyes típusú törés, előbb nyomott oldali repedés, majd rétegelválás; $20 \leq L/h \leq 25$ – nyomott oldali közel függőleges repedés a szignifikáns törési mód, a delamináció már csak lokálisan károsodás.

- b. A hárompontos hajlító vizsgálattal (mérési beállítások: $L/h = 15, 20$ és 25) párhuzamosan elvégzett akusztikus emissziós (AE) mérések eredményei alapján megállapítottam, hogy az irreverzibilis mikroszintű károsodás már az első makroszintű törést okozó erő 50%-át elérve megindult, és az eseményszám közelítőleg állandó sebességgel – a regisztrált amplitúdók közelítőleg azonos relatív eloszlása mellett – nőtt a makroszintű törés bekövetkezéséig. Kimutattam, hogy a terheletlen állapottól az első makroszintű törésig bekövetkezett események száma – azaz a kumulált eseményszám (ΣE) – a terhelés különböző tartományjaiban – $(0-0,5) \cdot F_{\max}$, $(0,5-0,8) \cdot F_{\max}$, $(0,8-1) \cdot F_{\max}$ – az alábbi összefüggéssel írható le az alátámasztási távolság (L) függvényében:

$$\Sigma E = a_i \cdot L^{2,6583} \quad (T10)$$

ahol:

$$(0-0,5) \cdot F_{\max} : \quad a_1 = 3,090 \cdot 10^{-3} [\text{mm}^{-2,6583}] \quad (T11)$$

$$(0,5-0,8) \cdot F_{\max} : \quad a_2 = 9,764 \cdot 10^{-3} [\text{mm}^{-2,6583}] \quad (T12)$$

$$(0,8-1) \cdot F_{\max} : \quad a_3 = 8,963 \cdot 10^{-3} [\text{mm}^{-2,6583}] \quad (T13)$$

5. tézis Kimutattam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD rudak ($h = 4$ mm) hárompontos hajlító terhelése esetén a lehajlás-erő kapcsolat – mint a károsodást mérhetően jellemző folyamat – becslésére kidolgozott, a húzott oldali szélső rétegek szakadására épülő, E-köteg típusú szálköteg-cella modell a teljes károsodási folyamat fenomenológikus – a modellparaméterek (c_E , $c_{\varepsilon 0}$, $c_{\varepsilon 1}$) helyes megválasztása esetén – leírására alkalmas, és 95%-os valószínűségi szintű konfidencia intervallumban jó közelítéssel előrejelzi az átlagos hajlító erő alakulását a teljes tönkremenetelig.

6. tézis A legyártott karbonszál/epoxi UD minták mechanikai vizsgálatának – szakító és hárompontos hajlító vizsgálat – szilárdságra vonatkozó eredményeit a Weibull analízis alapján elemeztem.

- a. A legyártott UD anyag több szerkezeti szinten – egyedi karbonszál, impregnált karbonszál roving és karbonszál/epoxi UD kompozit – elvégzett szakító vizsgálati eredményeinek statisztikus elemzése alapján megállapítottam, hogy a Weibull elmélet húzó igénybevétel okozta tönkremenetel esetén jól alkalmazható a rideg természetű karbonszál, karbonszál/epoxi anyagok húzószilárdságának leírására. A Weibull analízis alapján kimutattam, hogy az erősítő szál átlagos elméleti szilárdságának (σ_S) kihasználtsága, valamint a Weibull skálaparaméter (σ_0) csökken, míg az alakparaméter (m) nő a magasabb szerkezeti szintek felé haladva.

- b. A vizsgált karbonszál/epoxi UD rudak ($b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$) hárompontos hajlító vizsgálatának (mérési beállítások: $L/h = 5, 10, 15, 20$ és 25) eredményei alapján megállapítottam, hogy a Weibull skálaparaméter (σ_0) nőtt az alátámasztási távolság növekedésével, míg a Weibull alakparaméter (m) megközelítőleg konstans értékű ($m = 18,6$) maradt. A Weibull analízis alapján kimutattam, hogy az alátámasztási távolság (L) függvényében a Weibull paraméterekkel becsült elméleti hajlító szilárdság (σ_{FW}) átlagosan 23,5%-kal kisebb, mint a törés pillanatában számolt hajlító szilárdsága (σ_x), azaz a Weibull elmélet a vizsgált UD rudak esetén korrekció nélkül nem alkalmazható a méret-hatás okozta hajlítoszilárdság változás becsülésére.

7. tézis Kísérleti vizsgálatokkal kimutattam, hogy a legyártott karbonszál/epoxi UD minták esetén ($h = 2, 4, 6, 8$ és 10 mm , $b = 10 \text{ mm}$) a szabványos vizsgálati paraméterek – L/h arány = $5, 10, 15, 20$ és 25 ; b/h arány = $1, 1,25, 1,67, 2,5$ és 5 – függvényében hogyan változik a szálerősített polimer kompozitok hárompontos hajlító (ASTM D790) és rétegeközi nyíró (ASTM D2344) tulajdonságainak meghatározására vonatkozó szabványok érvényessége.

- a. Kimutattam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD anyag esetén a $15 \leq L/h \leq 25$ tartomány csak $b/h \geq 5$ beállítás mellett alkalmas a hajlító szilárdság meghatározásra. A $1 \leq b/h \leq 2,5$ beállítások esetén a mért hajlító szilárdság értékek csak korrekció alkalmazásával elfogadhatók.
- b. Kimutattam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD anyag esetén a $10 \leq L/h \leq 15$ tartomány alkalmas – $1 \leq b/h \leq 5$ – az anyag tényleges rétegeközi nyíroszilárdságának meghatározására.
- c. A hárompontos hajlító vizsgálat során regisztrált lehajlás-erő karakterisztikák elemzésével kimutattam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD anyag esetén a hajlító modulus – húr-modulusként értelmezett – $20 \leq L/h \leq 25$ tartományban ad elfogadható eredményt.
- d. Kísérletileg bebizonyítottam, hogy a vizsgált karbonszál/epoxi UD anyag esetén ($b = 10 \text{ mm}$, $h = 4 \text{ mm}$) a tönkremenetel minden esetben – $5 \leq L/h \leq 25$ – a nyomott oldalon indult meg, azaz nem teljesült az ASTM D790 szabvány húzott oldali szakadásra vonatkozó előírása.
- e. A legyártott karbonszál/epoxi UD rudak hárompontos hajlító vizsgálatának eredményei és a kidolgozott illesztési módszer alapján, az ASTM D790 szabvány szerinti vizsgálatok kiegészítéseként javasolható a mérési eredmények kiterjesztése a $0 < L/h < \dots$ tartományra és az L/h aránytól független σ_{asy} , σ_{theo} és E_f aszimptotikus minősítő értékek meghatározása, amellyel a mérések alapján nyerhető információk bővíthetők.