

Modeling of Braided Fiber Reinforced Composites Crosslinked by Electron Beam

Balázs Zsigmond

T H E S E S

1. I have demonstrated that the electron beam (EB) initiated crosslinking of carbon fiber reinforced braided epoxy-acrylate matrix composite systems improves the mechanical properties as related to the conventional, chemical crosslinking. Relevant mechanical properties such as bending modulus and interlaminar shear strength of the EB treated (172 kGy) composite profiles (20x25 mm) are substantially (30-50%) better than that of the corresponding, conventionally (chemically) treated systems (if 2% Butanox M-50 (peroxy) catalyst, 2% dimethylaniline and 0.05% promoter are added and it is left at room temperature for 36 hours) that consisting of the same components. This indicates a better adhesion between the fiber and the matrix.
2. I have proven with measurements that the whole tensile failure process of the studied braided composite tubes (the internal diameter is 25.5 mm and average external diameter is 26.1 mm) can be divided into four, well-separable section of deformation:
 - I. *Range of engineering applications*, where the deformation is proportional to the stress and no cracks and breakage is experienced;
 - II. *Range of continuous neck-forming*, where neck-forming occurs as a result of further deformation and this neck expands along the whole length of the specimens as far as clamping;
 - III. *Range of the impregnated bundle tension*, where bundles slip on each other and orientate into the direction of loading and the process continues as bundle tension;
 - IV. *Range of final failure*, where the fiber bundles start to break and then the final failure takes place.
3. I have proven that the fiber bundle cell model can be applied well to describe the tensile force of the braided composites.
 - 3.1. In Range I, where the tensile process of the braided composite is proportional to the force (F_C , Eqn. (T1)), the initial tensile stiffness in the studied braiding angle range (48-67°) can be estimated with the oblique bundle (ET-bundle) (simplest) model.

$$F_C = \varphi \cdot \frac{\overline{F_B}}{2n \cdot N} \cdot \frac{\overline{A_C}}{A_S} + (1 - \varphi) \cdot \overline{E_M} \cdot u \cdot \overline{A_C}, \quad (\text{T1})$$

where u is the strain, φ is the fiber content, $\overline{F_B}$ is the average tensile force of bundle, n is the number of carriers, N is the number of elementary fibers in a roving, $\overline{A_C}$ is the average cross-section area of the composite, $\overline{A_S}$ is that of elementary fibers and $\overline{E_M}$ is the average tensile modulus of elasticity of the matrix.

3.2 I have derived a hyperbolic contraction function ρ , ratio of external radii, Eqn. (T2), which is well applicable in Range I to describe the radial deformation of the composite tube (both the braid and the matrix) with the help of the contraction parameter (b) determined in the measurements.

$$\rho = \frac{1}{(1+u)^b} \quad (\text{T2})$$

4. I have shown that the first maximum of the tensile force (neck-formation force) for the studied composite correlates well ($R=0.95$) with the modeled maximal value of tensile force in the function of the braiding angle.
 - 4.1. The first breakage peak of the real composite – due to neck-forming – appears at 44% of the modeled value (the real average square error was 11.9%) based on the minimization of the quadratic deviation of the measured and modeled values.
 - 4.2. The measurable peaks of stress at the beginning of neck-forming show a steep change, predicted by modeling, in the studied braiding angle range ($48-67^\circ$). The deviation between the measured and transformed values was 2%.
5. I have proven that a small value of the standard deviation (3.52°) around the average value of the braiding angle (57.09°) has practically no effect on the initial tensile stiffness and on the neck-forming force of the studied composite tubes.
6. I have worked out the ETH-bundle model in which the preset bundle (EH) is a composite bundle that is the parallel combination of the oblique and preset bundles, hence the tensile force of triaxially braided composites (containing oblique and longitudinal bundles as well) can be described ($\overline{F_B^{ETH}}$, Eqn. (T3)) in Range I. This provides an opportunity to estimate the initial stiffness of braided tubes, furthermore it supplies an indirect method to determine loosening and its standard deviation of axial tows.

$$F_C = \varphi \cdot \frac{\overline{F_B^{ETH}}}{(2n + n_a) \cdot N} \cdot \frac{\overline{A_C}}{\overline{A_S}} + (1 - \varphi) \cdot \overline{E_M} \cdot u \cdot \overline{A_C}, \quad (\text{T3})$$

where n_a is the number of axial tows.

**Modeling of Braided Fiber Reinforced Composites Crosslinked by Electron Beam
(Fonatolt, szélerősítésű, elektronkezeléssel térhálósított kompozitok modellezése)**

Zsigmond Balázs

T É Z I S E K

1. Kimutattam, hogy a fonatolt szénszálerősítésű, epoxi-akrilát mátrixú kompozit elektronkezeléssel történő térhálósítása javítja a kompozit mechanikai tulajdonságait a hagyományos, kémiai térhálósítással előállítottéhoz képest. Az elektronkezelt (172 kGy) kompozit profilok (20x25 mm) lényegesen (30-50 %-al) jobb mechanikai (pl. hajlító modulus és interlamináris szilárdság) tulajdonságokkal rendelkeznek, mint a hagyományos (kémiai) úton térhálósított rendszerek (2% Butanox M-50 (peroxi) katalizátor, 2% dimetilanilin és 0,05% promoter hozzáadásával, szobahőmérsékleten, 36 órán tartva) ugyanazon összetevők megválasztása esetén. Ez eredményezi a jobb adhéziót a szál és a mátrix között.
2. Mérésekkel alátámasztottam, hogy a vizsgált fonatolt kompozit cső (belső átmérő 25,5 mm, a külső átmérők átlaga 26,1 mm) teljes tönkremeneteli folyamata a húzás során a deformáció négy, jól elkülöníthető részére osztható:
 - I. *Mérnöki alkalmazás tartománya*, ahol észlelhető repedés, törés nélkül egyenletesen növekvő deformáció tapasztalható;
 - II. *Folyamatos nyakképződés tartománya*, ahol a deformáció hatására, nyakképződés következik be, és folyamatosan terjed a próbatest teljes hossza mentén egészen a befogásig;
 - III. *Impregnált kötegszakítás tartománya*, ahol a kötegek elcsúszva egymáson beállnak a terhelés irányába, és lényegében kötegszakításba megy át folyamat;
 - IV. *Végső tönkremenetel tartománya*, ahol a kötegek elkezdenek szakadozni, majd bekövetkezik a végső tönkremenetel.
3. Bebizonyítottam, hogy a szálköteg cella modell jól alkalmazható a fonatolt kompozitok húzó erejének leírására.
 - 3.1. A ferde szálú szakadó (ET) köteget tartalmazó (legegyszerűbb) modellel az I. tartományban jól lehet becsülni a fonatolt kompozit húzóerejét (F_C , T1 egyenlet), ezáltal a kezdeti merevségét az általam vizsgált fonatolási szögtartományban (48-67°).

$$F_C = \varphi \cdot \frac{\overline{F_B}}{2n \cdot N} \cdot \frac{\overline{A_C}}{A_S} + (1 - \varphi) \cdot \overline{E_M} \cdot u \cdot \overline{A_C}, \quad (T1)$$

ahol u a nyúlás, φ a száltartalom, $\overline{F_B}$ a köteg átlagos szakítóereje, n a babák (rovingok) száma, N a rovingban lévő elemi szálak száma, $\overline{A_C}$ a kompozit, $\overline{A_S}$ az elemi szálak átlagos keresztmetszete, $\overline{E_M}$ a mátrix átlagos rugalmassági modulusza.

3.2. Az általam levezetett hiperbolikus kontrakciós függvény ρ , a külső átmérők aránya (T2 egyenlet), a kísérletek révén meghatározott kontrakciós paraméter mellett (b) az I. tartományban jól alkalmazható a vizsgált kompozit cső (mind a fonat mind a mátrix) radiális irányú deformációjának modellezésére.

$$\rho = \frac{1}{(1+u)^b} \quad (\text{T2})$$

4. Kimutattam, hogy a vizsgált kompozit első lokális maximumához tartozó erő (nyakképződési erő) jól korrelál ($R=0,95$) – a fonatolási szög függvényében – a modellezett maximális értékekkel.

4.1. A mért és modellezett értékek négyzetes eltérésének minimalizálása alapján a valós kompozitok első törési csúcsa – a nyakképződés miatt – a modellezett csúcserőértékek 44%-ánál jelentkezett (11,9%-os átlagos relatív négyzetes hiba mellett).

4.2. A nyakképződés kezdetén mérhető csúcserőértékek a modellezéssel előre jelzett meredek változást mutatják a vizsgált fonatolási szögtartományban (48-67°). A mért és transzformált értékek meredekségének eltérése 2% volt.

5. Bebizonyítottam, hogy a vizsgált kompozit csövek esetén a fonatolási szög átlagérték körüli (57,09°) kismértékű szórásának (3,52°) lényegében nincs hatása a kezdeti húzómerevségre és a nyakképződési erőre.

6. Kidolgoztam az előfeszített (EH) köteggel bővített összetett, ferde és előfeszített kötegek párhuzamos kapcsolásából képzett (ETH) köteg modellt, amely az I. tartományban alkalmas az axiális szálbevezetésű, triaxiális fonatolt kompozitok húzóerejének ($\overline{F_B^{ETH}}$, T3 egyenlet), ezáltal kezdeti merevségének a becslésére is, továbbá közvetett módszert szolgáltat az axiális szálak belazulásának és annak szórásának közvetett meghatározására.

$$F_C = \varphi \cdot \frac{\overline{F_B^{ETH}}}{(2n + n_a) \cdot N} \cdot \frac{\overline{A_C}}{\overline{A_S}} + (1 - \varphi) \cdot \overline{E_M} \cdot u \cdot \overline{A_C}, \quad (\text{T3})$$

ahol n_a az axiális szálbevezetések száma.