

REPEDÉSTERJEDÉS ÉS RÉTEGKÖZI SZILÁRDSÁG ANALITIKUS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA PÁRHUZAMOS ELCSÚSZÁS ESETÉN

Szekrényes András*

ABSTRACT:

The interlaminar fracture of glass/polyester composite is investigated from the theoretical and experimental points of view. The investigations are performed with the aid of the end loaded split (ELS) and the over notched flexure (ONF) specimens. The specimens were manufactured in the BME, Department of Applied Mechanics. Two kinds of tests were carried out. At the first stage crack initiation tests were performed on both the ELS and ONF coupons. At the second stage the crack propagation was investigated. The experimental data was evaluated by three different techniques and the results by them were compared to each other. The three reduction techniques agree closely in the case of the initiation tests performed on the ELS specimens. In contrast, the results depend on the applied reduction technique in the case of the ONF specimen. The crack propagation was possible to be investigated only in the case of the ONF specimen. Also, in this case the applied evaluation methods show quite good agreement.

1 BEVEZETÉS

A kompozit anyagok gyakorlati alkalmazása napjainkban egyre nagyobb méreteket ölt. Ezeket az anyagokat már régóta alkalmazzák például különféle járművek, repülőgépek és űrhajók előállításához. A kompozit anyagok legelőnyösebb tulajdonságai a nagy szilárdság, a kis súly és a magas értékű rugalmassági modulus. Mindemelllett a kompozitok heterogén felépítésű anyagok. A szál-mátrix struktúra eredményeként a nagy szilárdság a száliránnyal párhuzamos irányban jelentkezik. Ha a kompozit anyag nem száliránnyal párhuzamos terhelést vesz fel, akkor az anyag tönkremenetele igen sokféle módon jelentkezhet. Az egyik legfontosabb károsodási jelenség az ún. rétegek közötti törés, amely igen jelentősen csökkenti a kompozit anyag merevségi és szilárdsági tulajdonságait. A rétegek közötti törés a terhelés módja szerint három alapvető formában jelentkezik: I, II és III módokban [1]. A jelenlegi tanulmányban a II mód, más néven a párhuzamos elcsúszás esetével fogunk foglalkozni.

A II módú rétegek közötti törés vizsgálatára hat különböző próbatest típust fejlesztettek ki a kutatók. Az end

notched flexure (ENF) típus napjainkban is a kísérletek leggyakoribb eszköze [2,3]. Az ENF próbatest nem teszi lehetővé a repedés terjedésének vizsgálatát. Ennek kiküszöbölése érdekében született meg az ENF stabilizált formája (SENF) [4,5]. Mind a mai napig igen kevés SENF próbatesten végzett kísérlet látott napvilágot. Az end loaded split (ELS) próbatest egy újabb konfiguráció, amelynek előnye, hogy lehetővé teszi a repedésterjedés vizsgálatát [6,7]. Sajnos azonban itt is felléphetnek stabilitási problémák. Később a kutatók kifejlesztették az ENF négy ponton megtámasztott változatát (4ENF) [8,9]. Jelentős előrelépés volt az, hogy a stabilitási probléma megszűnt. A terhelő szerkezet azonban egy kissé bonyolultabb lett. Az over notched flexure (ONF) típus ezt is kiküszöböli [3,10]. Mindemelllett, hasonlóan a 4ENF-hez stabil repedésterjedést tesz lehetővé és igen egyszerűen elvégezhető. Napjainkban jelent meg az ún. tapered ENF (TENF) próbatest, amely szintén az ENF egyfajta változata [11]. A TENF megfelelően kialakított geometria esetén lehetővé teszi, hogy a repedés hosszát ne kelljen a mérések folyamán mérni. Ez akkor fontos, ha a repedés hosszát igen nehéz pontosan meghatározni (pl. szénszál erősítésű kompozitban).

A jelenlegi kutatómunka tárgyát az ELS és az ONF (1. ábra) típusú próbatestek képezik. Ezek a próbatestek jelentősen eltérnek egymástól a külső erő bevezetése és a kényszerek szempontjából. Más szempontból igen kevés kísérleti eredmény látott napvilágot üvegszál erősítésű ELS és különösen ONF próbatestek felhasználásával. A tanulmány célja kísérleti eredmények bemutatása az említett próbatestek segítségével, illetve azok összehasonlítása szakirodalmi adatokkal.

2 KÍSÉRLETEK

A próbatesteket egy speciális présszerszámban gyártottuk le üvegszál roving és telítetlen poliészter gyanta felhasználásával. A próbatestek geometriai adatai: vastagság: $2h=6.1$ mm, szélesség: $b=20$ mm, teljes hossz (a megtámasztásra tekintettel): 180 mm. Az előállított próbatestek száltérfogat aránya: $V_f=43\%$. A gyártás folyamán egy nylon fóliát helyeztünk a rétegek közé, ezzel állítottuk elő a repedési felületet. A próbatestek hajlító rugalmassági modulusát hárompontos hajlító vizsgálattal határoztuk meg. A modulus értéke: $E_{II}=33$ GPa. További rugalmassági

* Ph.D hallgató, BME, Műszaki Mechanikai Tanszék, Lektorált cikk.

jellemzőket határoztunk meg a Niederstadt-féle közelítő formulával, ezek értékei: vastagság menti modulus: $E_{33}=7.2$ GPa, nyíró rugalmassági modulus: $G_{13}=3$ GPa, illetve Poisson-tényező: $\nu_{13}=0.27$.

A kísérleti berendezések a 2. ábrán láthatók. A vizsgálatokat egy Amsler típusú elmozdulás-vezérelt szakítógépen végeztük el. Az elmozdulás értéket a 2. ábrán bekeretezett mechanikus mérőórával mértük, a terhelő erő értékét a szakítógép skálájáról olvastuk le. Az ELS típusú vizsgálatnál a próbatest hossza $L=150$ mm volt. Az ONF típusnál a teljes hossz: $2L=151$ mm, illetve a terhelés baloldali támasztól mért távolsága: $s=47.5$ mm volt. A terhelőfej és a támasztékok (ld. 2. ábra) viszonylag nagy lekerekítései miatt mindkét geometria paramétereit korrigáltuk. Mivel a kísérleti berendezések nem szabványosak ezért a korrekció részleteit nem közöljük.

Kétféle vizsgálatot hajtottunk végre. Az első fázisban a repedés kiindulását vizsgáltuk. Az ELS próbatesteket a következő repedési hossz értékek mellett állítottuk elő: 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, 90, 100, 110, 120, 130 és 140 mm. Az ONF típusnál az 50-től 105 mm-ig terjedő tartományt vizsgáltuk 5 mm-es növekményekkel. Mindkét esetben a próbatesteket a repedés kiindulásáig terheltek. Üvegszál erősítésű kompozit esetén a repedés kiindulása szabad szemmel is viszonylag nagy pontossággal határozható meg. Ez annak köszönhető, hogy a próbatestek kisé átlátszóak. A próbatesteket a repedés kiindulásáig terheltek, ez alatt az elmozdulás és az erő értékeit feljegyeztük.

A második fázisban hat darab ONF próbatest segítségével a repedés terjedését tanulmányoztuk. A próbatestek oldalára egy milliméterskálát szerkesztettünk, amely lehetővé tette a repedési hossz szabad szemmel történő mérését. Az 50 mm kezdeti repedési hosszal ellátott próbatesteket terhelés alá helyeztük, majd a kiindulás után a terhelést úgy szabályoztuk, hogy a repedés hossza 2-3 mm-t növekedjen. Ily módon az 50-től 110 mm-ig terjedő repedési hossz tartományában végeztük el a vizsgálatokat.

2.1 A KÍSÉRLETI ADATOK FELDOLGOZÁSA

Az adatok kiértékeléséhez három, szakirodalomban elfogadott és elterjedt módszert alkalmaztunk. A lineárisan rugalmas törésmechanikában két fontos mennyiséget határoznak meg: a próbatest rugóállandóját és a repedésterjedési energiát. A rugóállandó definíciója [7,8]:

$$C = \frac{\delta}{P}, \quad (1)$$

ahol δ a próbatest elmozdulása a terhelési pontban, P pedig a külső terhelés értéke. A repedésterjedési

energia az Irwin-Kies kifejezés [1,10] segítségével határozható meg:

$$G_{II} = \frac{P^2 dC}{2b da}, \quad (2)$$

ahol b a próbatest szélessége, a pedig a repedés hossza.

2.1.1 KALIBRÁCIÓS MÓDSZER

A lineárisan rugalmas rúdelmélet általában harmadfokú függvényeket ad a próbatestek rugóállandójára. Ennek megfelelően szakirodalomban az alábbi egyenleteket alkalmazzák [10]:

$$C^{ELS} = C_{01} + ma^3, \quad (3)$$

$$C^{ONF} = C_{02} + n(a-2L)^3. \quad (4)$$

ahol C_{01} , C_{02} , m és n görbeillesztési technikával (pl.: legkisebb négyzetek módszerével) határozható meg. A repedésterjedési energia (2) alapján számítható ki.

2.1.2 DIREKT RÚDELMÉLET

E módszer szintén a lineáris rúdelmélet eredményén alapszik, oly módon, hogy abból kiküszöbölik a hajlítómódulust valamint beleépítik a kísérletileg mért elmozdulást:

$$G_{II}^{ELS} = \frac{9P\delta a^2}{2b(3a^3 - L^3)}, \quad (5)$$

$$G_{II}^{ONF} = \frac{9P\delta}{2b(2L-a)\theta}, \quad (6)$$

ahol:

$$\theta = 1 + \frac{4a}{2L-a} + \frac{8aL}{(2L-a)^2} + \frac{16L^2a}{(2L-a)^3} + \frac{8Ls(s-4L)}{(2L-a)^3}. \quad (7)$$

2.1.3 EGZAKT RÚDELMÉLET

Az előző két módszert direkt kiértékelő technikának nevezi a szakirodalom, mivel közvetlenül a kísérletileg mért paramétereket használják. Az egzakt rúdelmélet esetén indirekt módszerről van szó, aminek oka, hogy a kísérletileg mért elmozdulást a rúdelmélet eredményével helyettesítjük. A rugóállandó és a repedésterjedési energia egyenleteinek analitikus levezetése hosszadalmas, így előző munkákra hivatkozunk. A [10] és [12] referenciák alapján az ELS próbatest rugóállandója a következő egyenlettel írható le:

$$C^{ELS} = \frac{3a^3 + L^3}{2bh^3 E_{11}} + \frac{L}{2bhkG_{13}} + \frac{3}{\pi} \frac{L^2}{2bh^2 E_{11}} \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{a^3}{2bh^3 E_{11}} \left[1.06 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.125 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right], \quad (8)$$

ahol L a teljes hossz, h a próbatest vastagságának fele, $k=5/6$ a nyírási korrekciós tényező. A repedésterjedési energia a (2) egyenlet alkalmazásával:

$$G_{II}^{ELS} = \frac{9P^2 a^2}{4b^3 h^3 E_{11}} \left[1 + 0.236 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.014 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right]. \quad (9)$$

Az ONF típusú próbatestre hasonló, ám kissé bonyolultabb egyenletek vezethetők le [10]:

$$C^{ONF} = \frac{s^2 c^3}{8bh^3 E_{11} L^2} \left[1 + 4 \frac{a}{c} + 8 \frac{aL}{c^2} + 16 \frac{aL^2}{c^3} + 8 \frac{Ls(s-4L)}{c^3} \right] J + \frac{s(2L-s)}{8bhkG_{13}L} + \frac{s^2 c^3}{8bh^3 E_{11} L^2} \left[1.06 \left(\frac{h}{c} \right) \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.125 \left(\frac{h}{c} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right] J, \quad (10)$$

$$G_{II}^{ONF} = \frac{9P^2 s^2 c^2}{16b^3 h^3 E_{11} L^2} \left[1 + 0.236 \left(\frac{h}{c} \right) \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.014 \left(\frac{h}{c} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{G_{13}} \right) \right], \quad (11)$$

ahol L a teljes hossz fele, s a terhelés pozíciója, c a repedésmentes szakasz hossza ($2L-a$).

3 EREDMÉNYEK ÉS DISZKUZZIÓ

3.1 A REPEDÉS KIINDULÁSA

3.1.1 ERŐ-ELMOZDULÁS GÖRBÉK

A kísérletek során meghatározott erő-elmozdulás görbéket a 3a, ill. b. ábrákon foglaltuk diagramba. Mindkét próbatest esetén lineárisan rugalmas választ rögzítettünk, ami indokoltá teszi a lineárisan rugalmas törésmechanika alkalmazását. A különböző repedési hosszértékekhez tartozó görbék végpontjaiban következett be a repedés kiindulása. Az ELS próbatest esetén azt figyelhetjük meg, hogy a kritikus erő értéke fokozatosan csökken a repedési hossz növekedésével (ld. a nyíl által mutatott irányt a 3a. ábrán). Az ONF típus esetén ennek ellenkezőjét állapíthatjuk meg, azaz a repedés növelésével egyre nagyobb erő szükséges a kritikus érték eléréséhez. Megfigyelhető, hogy az ELS próbatest esetén lényegesen nagyobb elmozdulások lépnek fel az ONF-hez képest.

3.1.2 RUGÓÁLLANDÓ ÉS REPEDÉSTERJEDÉSI ENERGIA

Mindkét próbatest mért és számított rugóállandóját a 4. ábra mutatja. A mérés és a számítás eredménye igen közel áll egymáshoz. Az ONF típus esetén a rugóállandó görbéje kissé eltér a hagyományos törésmechanikai próbatestek rugóállandójától. Ez azal magyarázható, hogy az egyenletekben a repedésmentes szakasz (c) jelenik meg, mint karakterisztikus távolság.

A három kiértékelő módszer az 5. ábrán látható eredményeket adta a repedésterjedési energia esetén. Az 5a. és b. ábrák alapján megállapíthatjuk, hogy az energia értéke egy állandósult értéket vesz fel. Az ELS próbatestnél a kalibrációs módszer 713 J/m^2 értéket mutat, mint átlagos állandósult értéket. A direkt rúdelmélet eredménye 765 J/m^2 , míg az egzakt rúdelméleté 680 J/m^2 . A három módszer eredménye

jól egyezik, a köztük lévő eltérés oka az, hogy az egzakt rúdelmélet némileg alábecsli a kísérletileg mért elmozdulás értékeket és így a rugóállandót is. Az ONF típusú vizsgálat eredményeit az 5b. ábrán foglaltuk össze. Az előző sorrendnek megfelelően a három módszer eredménye: 540 J/m^2 , 790 J/m^2 , ill. 795 J/m^2 . Tehát a kalibrációs módszer eredménye lényegesen különbözik az utóbbi kettőtől. Ez kissé meglepő, hiszen a 4b. ábrán a mért és számolt rugóállandó értékei jól egyeztek. Ennek ellenére azt állapíthatjuk meg, hogy a kalibráció módszer nem ajánlott az ONF típus esetén a kísérleti adatok kiértékelésére. Összehasonlítva a két teszt eredményeit a kapott eredmények helytállóak.

3.2 A REPEDÉS TERJEDÉSE

A repedésterjedés vizsgálatához csak az ONF próbatestet használtuk fel. Ennek az volt az oka, hogy az ELS próbatestnél fellépő nagy elmozdulások nem tették lehetővé a repedésterjedés vizsgálatát.

3.2.1 ERŐ-ELMOZDULÁS GÖRBÉK

A hat darab próbatest erő-elmozdulás görbéje a 6. ábrán látható. Összehasonlítva a kiindulási tesztek eredményével (ld. 3b. ábra) a repedés terjedéséhez szükséges erő értéke kétszer nagyobb tartományon belül változik. Egy érdekes tulajdonság, hogy az erő-elmozdulás görbék lényegében bilineáris jellegűek. Ez jelentősen eltér a hagyományos próbatestek esetétől, ahol általában hiperbolikusan csökken az erő értéke az elmozdulás függvényében.

3.2.2 RUGÓÁLLANDÓ ÉS REPEDÉSTERJEDÉSI ENERGIA

A mért és kiszámított rugóállandót a 7. ábrán foglaltuk össze egy próbatestre. Rögtön észrevehetjük, hogy a mért és számított értékek nem állnak olyan közel egymáshoz, mint a kiindulási vizsgálatoknál (4b. ábra). Az eltérést olyan jelenségek, kísérő hatások segítségével lehet magyarázni, amelyek a kiindulási tesztek esetén nem lépnek fel. Ilyen lehet, pl. az ún. száláthidalási jelenség, amely folyamán egyes szálak a mátrixanyagból kihúzódva hidat képeznek a próbatest két karja között. Másrészt a súrlódás jelenségét kell megemlíteni, amely fellép ugyan a kiindulási tesztekénél is, ám az erő-elmozdulás görbéket (3b. és 5. ábra) összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy terjedés esetén lényegesen nagyobb elmozdulások jönnek létre. Ezek szintén befolyásolhatják a súrlódás hatását. A száláthidalási jelenség nehezen leírható. A súrlódási hatást számos szerző [3,13] vizsgálta, ám mindegyikük úgy találta, hogy ez a hatás elhanyagolható. Így a

modell és a kísérlet eredménye közötti eltérés tisztázása további munkát igényel.

A repedésterjedési energia értékei a 8. ábrán láthatóak. A diagram az áttekinthetőség érdekében csak két próbatestre a kalibrációs módszer alapján kapott eredményeket mutatják. A kalibrációs módszer az említett két próbatestre 2670, ill. 2414 J/m² állandósult értékeket ad. Hat próbatest eredménye alapján az átlagérték 2789 J/m². Ugyanezen eredmények a direkt rúdelmélet alapján 3050 J/m² és 2589 J/m² a két próbatestre, ill. 3121 J/m² átlagérték. Végül az egzakt rúdelmélet eredményei: 2893 J/m², 2497 J/m² két próbatestre és 2790 J/m² átlagos állandósult érték. A három módszer tehát igen jó egyezést tanúsít a terjedési vizsgálatok eredményei alapján.

4 ÖSSZEHASONLÍTÁS

A szakirodalom igen gazdag kompozitok II-es módú rétegek közötti törése szempontjából. A továbbiakban számos szerző eredményét hasonlítjuk össze a fentebb bemutatott repedésterjedési energia értékeivel. Az 1. táblázatban többféle kompozit anyagra kapott eredményeket foglaltunk össze. A táblázat adatai alapján látható, hogy üvegszál erősítésű kompozitban a terjedés esetén a rétegek közötti szilárdság jóval magasabb, mint kiindulás esetén. Hashemi és társai hasonló értékeket mért karbon [6] és PES (polyether-ether-sulphone) [7] szálakkal erősített próbatestek felhasználásával. Az utolsó három sorban bemutatott eredmények lényegesen kisebb értékűek az előző négy sor eredményeivel összehasonlítva. Szintén meg kell említeni, hogy Schuecker és Davidson [8] terjedés esetén kisebb értéket határoztak meg a 4ENF próbatest felhasználásával, mint kiindulás esetén. Wang és társai [3] négy konfiguráció eredményét hasonlították össze. A kapott értékek az 1. táblázat utolsó sorában láthatóak. Ezek alapján, bár a rétegek közötti szilárdság elméletileg független a konfigurációtól, kisebb-nagyobb eltérések jelentkezhetnek, ha különböző próbatest típusot használunk. Az említett szerzők eredményivel összehasonlítva a jelenlegi eredményeket jelentős hasonlóságot állapíthatunk tehát meg. A repedésterjedési energiára a repedési hossz függvényében a 5. és 8. ábrákon meghatározott trendek szintén hasonlóak a Davies és társai [9], Hashemi és társai [6,7] valamint Wang és társai [3] által meghatározott görbék lefolyásához.

KÖVETKEZTETÉS

A rétegek közötti szilárdság (repedésterjedési energia) értékeit az ELS és ONF típusú próbatestek segítségével határoztuk meg üvegszál erősítésű poliészter próbatestekre. A kísérletek folyamán kétféle vizsgálatot hajtottunk végre. Az első fázisban a repedés kiindulását vizsgáltuk mindkét próbatest fel-

használásával. Az adatok kiértékeléséhez három módszert alkalmaztunk, amelyek egymáshoz közeli értékeket adtak az ELS próbatest esetén. Az ONF próbatestnél a kalibrációs módszer eredménye nem volt elfogadható, tekintve, hogy a másik két módszer eredménye lényegesen jobban egyezett egymással és az ELS próbatesten kapott eredményekkel is. Így a kalibrációs módszer használata nem javasolt az ONF próbatest repedés kiindulási vizsgálatánál.

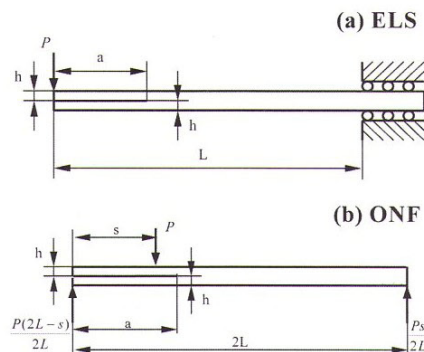
A terjedési tesztek csak az ONF próbatest segítségével végeztük el. Ebben az esetben a három kiértékelő módszer eredményei igen jó korrelációt tanúsítottak. Meg kell jegyezni, azonban, hogy a számolt és mért rugóállandó értékei között jelentős különbséget tapasztaltunk, amely további tisztázásra szorul. A rétegek közötti szilárdságra kapott eredményeket más szerzők eredményeivel is összehasonlítottuk. Egyes esetekben jelentős hasonlóságot állapítottunk meg, más esetekben azonban jelentkeztek eltérések. Az utóbbi azzal magyarázható, hogy mechanikai terhelés hatására a különböző típusú kompozit anyagok különbözőképpen viselkednek.

IRODALOM

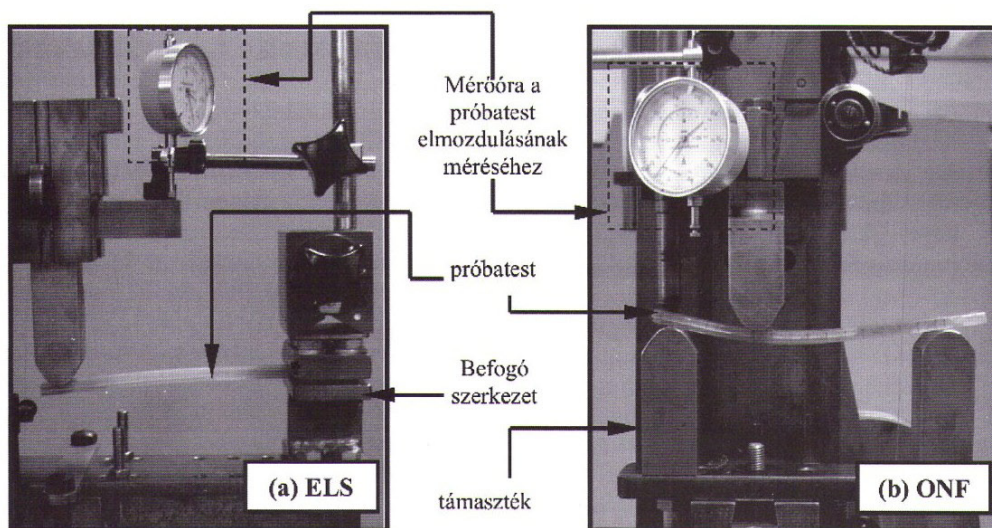
- [1] KANNINEN M.F., POPELAR C.H., *Advanced Fracture Mechanics*, Oxford University Press, 1985
- [2] OZDIL F., CARLSSON L.A., DAVIES P., *Beam analysis of angle-ply laminate end-notched flexure specimens*, *Composites Science and Technology* 1998, 58, pp.1929-1938
- [3] WANG W.-X., TAKAO Y., NAKATA M., *Effects of friction on the measurement of the mode II interlaminar fracture toughness of composite laminates*. *Proceedings of the 14th International Conference on Composite Materials*, July 14-18, 2003, San Diego, California, USA
- [4] KAGEYAMA K., YANAGISAWA N. *Journal of the Japan Society of Composite Materials*, 1989, 15; pp.71-77
- [5] DAVIES P., DUCEPT F., BRUNNER A.J., BLACKMAN B.R.K., DE MORAIS A.B., *Development of a standard mode II shear fracture test procedure*, *Proceedings of the 7th European Conference on Composite Materials (ECCM-7)*, London, May 1996, Vol. 2, pp 9-15
- [6] HASHEMI S., KINLOCH J., WILLIAMS J.G., *The effects of geometry, rate and temperature on mode I, mode II and mixed-mode I/II interlaminar fracture toughness of carbon-fibre/poly(ether-ether ketone) composites*, *Journal of Composite Materials*, 1990, 24, pp.918-956
- [7] HASHEMI S., KINLOCH J., WILLIAMS J.G., *Mechanics and mechanisms of delamination in a poly(ether sulphone)-fibre composites*.

- Composites Science and Technology 1990, 37, pp.429-462
- [8] SCHUECKER C., DAVIDSON B.D., Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination, Composites Science and Technology 2000, 60, pp.2137-2146
- [9] DAVIES P., CASARI P., CARLSSON L.A., Influence of fiber volume fraction on the interlaminar fracture toughness of glass/epoxy using the 4ENF specimen. Composites Science and Technology 2004 (megjelenés alatt)
- [10] SZEKRÉNYES A., UJ J. Mode-II fracture analysis in unidirectional E-glass/polyester composite. Journal of Composite Materials 2005 (megjelenés alatt)
- [11] QIAO P., WANG J., DAVALOS J.F., Analysis of tapered ENF specimen and characterization of bonded interface fracture under mode-II loading. International Journal of Solids and Structures 2003, 40; pp1865-1884. Corrigendum, 2003, 40; pp.4091-4091
- [12] WANG J, QIAO P., Novel beam analysis of the end notched flexure specimen for mode-II fracture. Engineering Fracture Mechanics 2004, 71, pp.219-231
- [13] CARLSSON, L., A., GILLESPIE J. W., PIPES R. B., On the analysis and design of the end notched flexure (ENF) specimen for mode II testing. Journal of Composite Materials 1986, 20; pp.594-604
- [14] REYES G., CANTWELL W.J., The mechanical properties of fibre-metal laminates based on glass fibre reinforced polypropylene, Composites Science and Technology 2000, 60, pp.1085-1094
- [15] ALBERTSEN H., IVENS J., PETERS P., WEVERS M., VERPOEST I., Interlaminar fracture toughness of CFRP influenced by fiber surface treatment: Part 1. Experimental results. Composites Science and Technology 1995, 54; pp.133-145

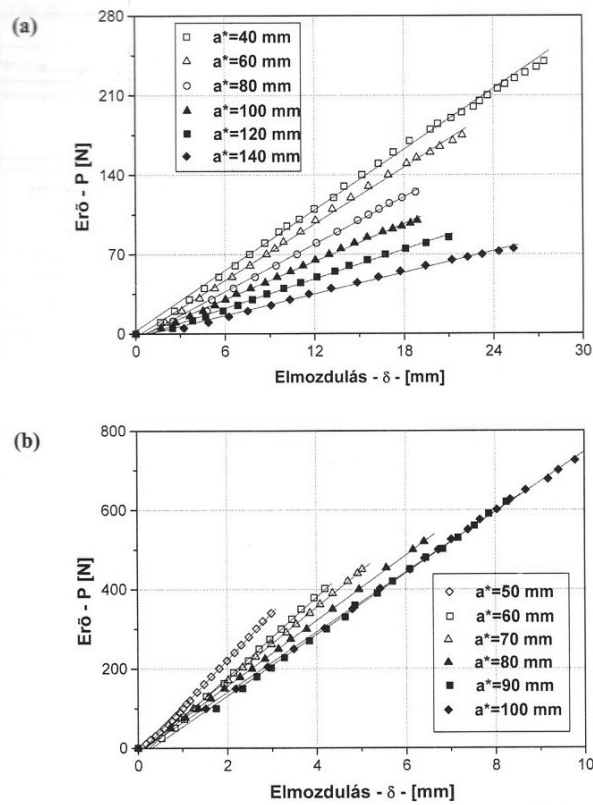
ÁBRÁK



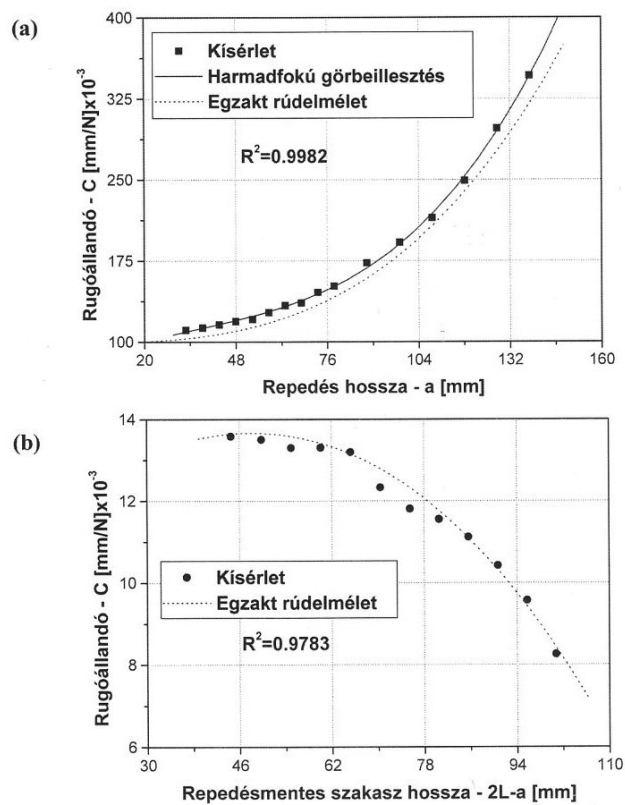
1. ábra Próbatestek II-es módú vizsgálathoz



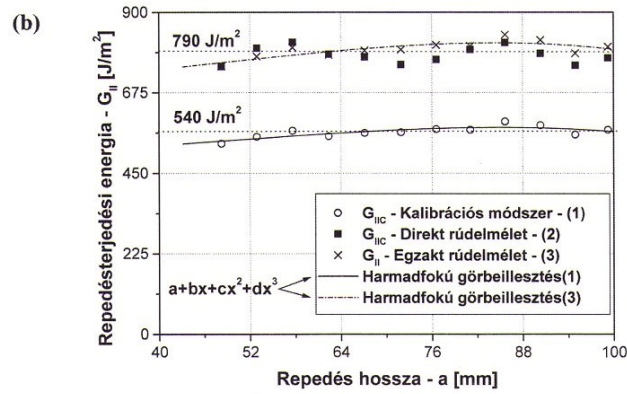
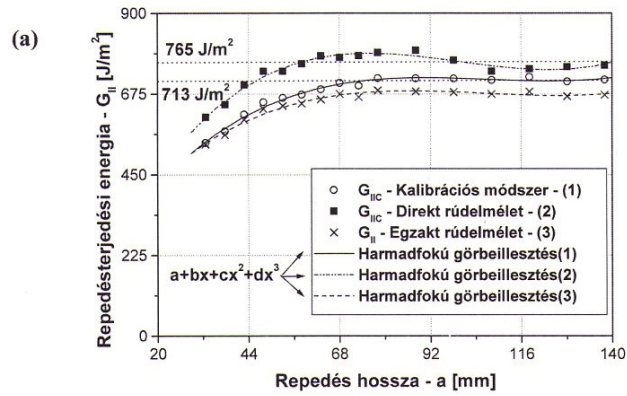
2. ábra. Kísérleti berendezés az end-loaded split (a) és over notched flexure (b) próbatestekhez.



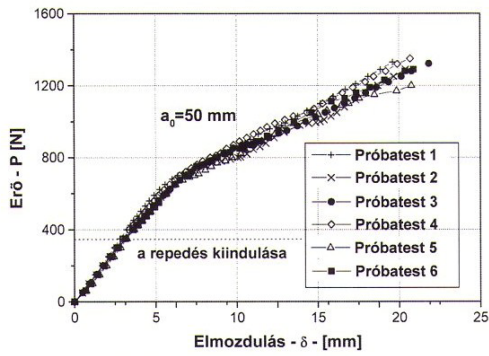
3. ábra Erő-elmozdulás görbék a repedés kiindulásáig, ELS teszt (a), ONF teszt (b).



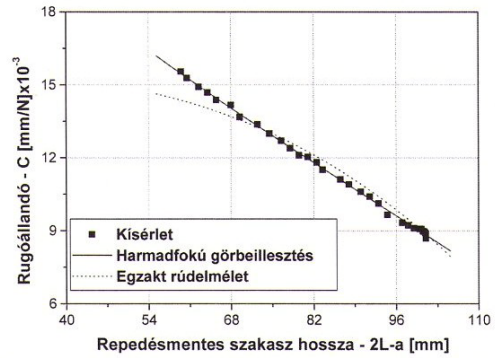
4. ábra. Mért és számolt rugóállandó a repedés kiindulásakor, ELS teszt (a), ONF teszt (b).



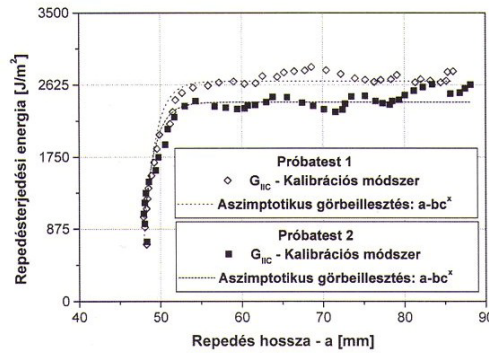
5 ábra. A repedésterjedési energia értékei a repedés kiindulásakor, ELS teszt (a), ONF teszt (b).



6. ábra. Az ONF próbatestek erő-elmozdulás görbéi repedésterjedés esetén



7 ábra. Mért és számolt rugóállandó egy darab ONF próbatestre repedésterjedés esetén.



8 ábra. A repedésterjedési energia értékei két darab ONF próbatestre.

I. táblázat. Rétegek közötti szilárdság (G_{IC} T [J/m²]) a repedés kiindulása és terjedése esetén

Szerző - anyag típus	ENF	ELS	ONF	4ENF	ELS	ONF	4ENF
		kiindulás			terjedés		
Saját – üveg/poliészter	-	713	790	-	-	2789	-
Ozdil et al. [2] – üveg/poliészter	496	-	-	-	-	-	-
Davies et al. [5] – üveg/epoxi	-	-	-	2130	-	-	3040
Reyes et al. [14] – üveg/polipropilén	3800	-	-	-	-	-	-
Hashemi et al. [6] – karbon/PEEK	-	1730	-	-	2890	-	-
Hashemi et al. [7] – PES	-	1250	-	-	1850	-	-
Albertsen et al. [15] - C/HG9106	335	565	-	-	800	-	-
Schuecker et al. [8] – IM7/8552	1100	-	-	1200	-	-	850
Wang et al. [3] – T800/3631	600	-	-	-	640	780	600

Termékfejlesztő

szakemberképzés legfejlettebb

CATIA

Környezetben

Kezdés: 2005. szept. 16

A programunk átfogó ismereteket ad a fejlett ipari gyakorlatban alkalmazott számítógépes tervezési technológiáról:

- ▶ Összefüggéseiben érteti meg napjaink fejlett modellezési módszereit,
- ▶ félüzemi laboratóriumi környezetben készít fel ipari feladatok megoldására,
- ▶ azokra a témákra koncentrálnak, amelyek a hazai és a hazánkban tevékenykedő nemzetközi vállalatoknál,
- ▶ valamint a külföldi munkavállalás szempontjából egyaránt elsődleges fontosságúak.

Érdeklődjön: <http://www.banki.hu/%7eagi/szakmlap/szmlap.htm>