

OTKA záró kutatási beszámoló a

Kompozit anyagok törésmechanikai és dinamikai vizsgálata

c., 69096 azonosító számú kutatáshoz

Vezető kutató: Dr. Szekrényes András, egyetemi docens

1. Előfeszített próbatestek alkalmazása törésmechanikában

A kutatás első évében elkészültek a 2008. évben elvégzendő kísérleti munkához szükséges mennyiségű kompozit próbatestek. 2008. elején a III-as törési módus vizsgálatához szükséges berendezés is elkészült. A berendezést először a III-as módusú repedésfeszítő erő meghatározására használtam fel üveg/poliészter típusú próbatestekben. Később a berendezést kiegészítve lehetővé vált az általános I/II/III-as törési módus vizsgálata is. A módszer az előfeszítéses technika általánosításán alapszik, amelynek lényege, hogy a próbatestben a három módus közül kettőt előfeszítés segítségével rögzítünk, majd a harmadik módust a próbatestet egy szakítógéppben terhelve a repedés megindulásáig növeljük. A kísérleti eredmények feldolgozásához egy szilárdságtani modellt fejlesztettem ki rüdelméletek alapján. A III-as törési módus során számos olyan mechanikai deformáció is jelentkezik, amely I-es és II-es módusoknál nem, ilyenek pl. a próbatest elcsavarodása, vagy a Saint-Venant-féle deformáció. Emiatt a modellt igen összetett, azt a MAPLE szoftverrel kezeltem. A kombinált I/II/III-s törési módust ANSYS szoftverben készített végeelem modellek segítségével is vizsgáltam üvegszál erősítésű poliészter próbatestekben. A legfontosabb következtetés az, hogy a kombinált módus esetén a repedésterjedési front nem szimmetrikus a próbatest szélessége mentén. Ez megegyezik más kutatók eredményeivel. A jelenség a II-es és III-as módusokból adódó axiális elmozdulások előjelével magyarázható. A szakirodalom alapján azonban más, III-as és I/III-as, II/III-as módusú rendszereknél is hasonló nehézségek lépnek fel. Az alkalmazhatóságot kísérletek segítségével alátámasztottam, az elért eredményeket egy konferencia-előadáson (*Magyar Mechanikai Konferencia, 2007*) és egy idegen nyelvű folyóiratcikkben (*Periodica Polytechnica, 2008*) foglaltam össze. Később elkészült az eredeti megfogó szerkezethez képest egy nagyobb pófa is, amelybe már jóval nagyobb repedési hosszúságú próbatestek is befoghatók. A nagyobb repedési hossz esetén a terhelés hatására létrejövő deformáció is nagyobb lesz, így az pontosabban mérhető. Az új befogópófa alkalmazását és a mért eredményeket egy zürichi és egy drezdai konferencián is bemutattam.

2. Kísérleti alapú stabilitási kritérium repedésterjedés esetén

Az üveg/poliészter próbatesteken eddig (2002-2007 között) elvégzett I-es és II-es törési módusú kísérleti eredményeket összefoglaltam és azokat kiegészítettem a III-as módusú törésmechanikai kísérletek eredményeivel. A mért adatok alapján egy kísérleti alapú repedésstabilitási kritériumot fogalmaztam meg. A mérések során összesen kilenc-féle törésmechanikai rendszert használtam fel. A stabilitás a vizsgált rendszereknél egy kritikus repedési hosszt jelent, amely alatt a repedésterjedés instabil, viszont afölött stabil. A kísérleti alapú stabilitási kritérium eredményeit összehasonlítottam egy már létező elméleti kritériummal. Minden rendszerrel nagyon jó egyezést mutattam ki a hagyományos (elméleti)

és az új kísérleti alapú kritérium eredményei között. Megmutattam a kísérleti alapú kritérium előnyeit és hátrányait, az eredményeket egy folyóiratcikk formájában foglaltam össze (*Experimental Mechanics*, 2010) és egy magyar nyelvű konferencián is bemutattam (*Gépészet 2008*). A kísérleti alapú kritérium leginkább olyan rendszereknél hasznos, ahol a próbatest merevsége igen nagy, vagy pedig nehéz pontosan meghatározni a vizsgált kompozit anyagtulajdonságait.

3. Előfeszített próbatest vegyes I/III-as törési módus esetén

A III-as törési módus vizsgálatára alkalmas nagyobb befogópofa segítségével kifejlesztettem egy vegyes I/III-as törési módus vizsgálatára alkalmas rendszert, és azon kísérleteket is végeztem. A nagyobb befogópofa előnye, hogy segítségével hosszabb repedéssel ellátott próbatestek is vizsgálhatók, amely a mérési pontosságot jelentősen növeli. A mérések kiértékeléséhez rúdmodellt, illetve végeelem modelleket alkalmaztam. I/III-as törési módus esetén a hagyományos kiértékelő, illetve kísérleti adatfeldolgozó módszerek sokszor félrevezető eredményt adnak. Ennek oka egyrészt maga a vegyes törési mód. Végeelem modellek segítségével kimutattam, hogy az I-es és III-as módusú repedésfeszítő erők a próbatest vastagsága mentén nem állandóak, és arányuk, azaz a módusok aránya szintén változik a vastagság mentén. Az analitikus módszerek a repedésfeszítő erők és a módusok aránya eloszlásának átlagát adják vissza. Mivel a törés ott következik be, ahol a repedésfeszítő erő maximális, így az analitikus modell alkalmazása során 20%-os hiba is előfordulhat, ez azonban csak egy elméleti hiba a végeelem modellekhez képest. A szakirodalomban az általam kifejlesztett rendszeren kívül eddig összesen két I/III-as, kompozit anyagoknál is alkalmazható törésmechanikai tesztet találtam, amelynél az említett adatfeldolgozási problémák szintén fennállnak. Az I/III-as törési módusú rendszer leírása és a kapott eredmények – amelyek közül legjelentősebb egy a G_I - G_{III} síkon meghatározott törési határgörbe - egy nemzetközi folyóiratban jelentek meg (*Composites – Part A*, 2009).

4. A geometria hatása a III-as módusú repedésfeszítő erőre

Az elkészített kisebb és nagyobb befogópofákkal megvizsgáltam a III-as módusú repedésfeszítő erő változását a repedési hossz és a próbatest vastagsága függvényében. Ehhez további próbatestek gyártására volt szükség. A kísérletek során az 50-155 mm közötti repedéstartományt vizsgáltam, és minden egyes repedési hosszánál négy próbatestet használtam fel a méréseknél. A próbatestek szélességét is változtattam. Az eredmények azt mutatják, hogy a repedés megindulásakor a repedésfeszítő erő a repedési hossz növekedésével jelentős mértékben csökken. Az általam alkalmazott III-as módusú teszt előnye, hogy a hagyományos rúd-geometriájú próbatesteket képes kezelni és létezik analitikus kiértékelő módszer is (*International Journal of Mechanical Sciences*, 2009). Ezzel szemben a többi szakirodalomban vizsgált teszt lemez alakú próbatestekkel működik, ami jelentősen megnehezíti a kísérletek előkészítését és növeli a hibalehetőségeket is (pl. próbatestek gyártása bonyolultabb, több anyag kell a gyártáshoz, nagyobb a valószínűsége a gyártási hibáknak, stb.). A kísérleti eredményeket összefoglaltam, az általam alkalmazott teszt előnyeit, hátrányait más tesztekhez képest is felsoroltam és egy cikk formájában egy kompozit tudományokkal foglalkozó folyóiratban publikáltam (*Journal of Composite Materials*, 2011), valamint a témával egy nemzetközi konferencián is részt vettem.

5. Vegyes I/II-es tesztek kifejlesztése és megépítése

A vegyes rétegek közötti törés vizsgálatához elkészítettem egy újabb I/II-es módusú próbatest típust, az ún. prestressed end-loaded split (PELS) rendszert. Az új próbatest előnye, hogy egy befogott rudat feszítünk elő, ezáltal nagyobb repedési hosszall ellátott próbatestek is vizsgálhatók. Az eredményekről szóló cikk egy külföldi folyóiratban jelent meg (*Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010).

2010 januárjában elkészült az ún. mixed-mode bending (MMB) típusú vegyes I/II-es törési módusú próbatest. Ezzel a tanszéki laboratórium felszereltsége nagymértékben nőtt. A kompozit törésmechanika szakirodalmának jelentős hiányossága, hogy a különböző vegyes I/II-es módusú tesztek különböző anyagokra végzik el, így a kapott eredményeket nem célszerű összehasonlítani. Az MMB próbatest segítségével üvegszál erősítésű poliészter kompozitban meghatároztam a törési határgörbét a G_I - G_{II} síkon. Ugyanerre az anyagra a határgörbét egy előző, OTKA által támogatott pályázatban az ún. prestressed end-notched flexure (PENF) próbatesttel is meghatároztam. A két módszer eredményeit összefoglaltam és a Gépészet 2010 nemzetközi konferencián egy előadást is tartottam belőle (*Mechanical Engineering 2010 Conference*), illetve egy hat oldalas cikk az elektronikus konferenciakiadványban is megjelent. Az összehasonlítás azt mutatja, hogy a két teszt egymáshoz közeli eredményt ad, de ehhez pontos kísérletekre van szükség. Bemutattam az MMB teszt alkalmazását hosszú repedések esetén, az eredményeket egy hazai folyóiratban publikáltam (*GÉP*, 2010).

6. Tapadási zóna modell alkalmazása kompozit próbatestekre

Az ún. tapadási vagy kohéziós zóna modellt alkalmaztam ortotrop kettős-konzol (DCB) próbatestre. A kohéziós zóna modell bilineáris rugókat feltételez a kettős-konzol próbatest repedéscsúcsában. A modellt Hadavinia és Williams 2002-ben publikálta izotrop anyagú próbatestre. A levezetett analitikus képletek azt mutatják, hogy a bilineáris karakterisztika alakjától független az a korrekció, ami a repedéscsúcsba helyezett rugókból adódik. A kohéziós zóna modellt az ANSYS végelem szoftver segítségével is alkalmaztam DCB kísérleti eredmények feldolgozására. A végelem számítás során bemenő adatként szerepel a rugókban ébredő maximális feszültség és a repedésfeszítő erő kritikus értéke. A numerikus modell segítségével erő-elmozdulás görbéket lehet kiszámítani, illetve visszszámolni. A végelemmel visszszámolt és a kísérletileg kimért erő-elmozdulás görbék között nem túl jó egyezés van, ha a kritikus repedésfeszítő erő értéke jelentősen változik a repedési hosszal. Ennek oka, hogy a numerikus modellben csak konstans repedésfeszítő erőt lehet megadni. Az eredményekről egy nemzetközi konferencián tartottam szóbeli előadást (*ECCM14*, 2010).

7. Előfeszített próbatest vegyes II/III-as és I/II/III-as törési módus esetén

A tanszéki laboratóriumban kifejlesztettem egy új, a II/III-as rétegek közötti törés vizsgálatára alkalmas tesztet. Bár egy hasonló II/III-as rendszer 2007-ben publikálásra került, az újabb próbatestben a II-es módusú repedésfeszítő erő értékét lehet fixre állítani. A már megépített III-as módusú töréshez készült befogószerkezetbe helyezve az előfeszített próbatestet egy jóval pontosabb II/III-as rendszert kapunk. A rendszer egyébként az ún. end-loaded split (ELS) és a modified-split cantilever beam (MSCB) próbatestek szuperpozíciója. A rendszer legfőbb előnyei, hogy rúdszerű próbatesteket alkalmaz és analitikus kiértékelő módszer is levezethető hozzá. A próbatestet a laboratóriumban alkalmaztam, a szükséges kísérleteket elvégeztem. Fontos megjegyezni, hogy az új II/III-as teszt hosszabb repedésekkel ellátott próbatestekre pontosabb. A kompozit szakirodalomban legjobb tudomásom szerint

csak két II/III-as rendszer elérhető, az egyik jóval nagyobb, lemez alakú kompozit próbatesteket alkalmaz, a másik pedig sokkal bonyolultabb felszerelést és próbatestet igényel. Az elvégzett munkáról egy már elfogadott folyóiratcikk (*Composites – Part A*, 2012), egy konferenciacikk (*World Academy of Science*, 2011), egy MTA bizottsági ülés és egy konferenciaelőadás (*ICAMII*, 2011) során számoltam be. A próbatestet ezután kiegészítettem az I-es módussal is, amit úgy értem el, hogy egy adot átmérőjű acélgörgőt helyeztem a próbatest karjai közé. Így sikerült kifejleszteni egy olyan próbatestet, amely az I-es, II-es és III-as módusok tetszőleges kombinációját képes megvalósítani. Ilyen módon sok mérés után elsőként sikerült egy térbeli törési felületet meghatároznom az I-es, II-es és III-as módusú repedésfeszítő erők által meghatározott térben. A témáról egy cikket írtam, amely a egy külföldi folyóiratban jelent meg (*Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2011).

8. Delaminált kompozit rudak rezgései

A kompozit próbatestek gyártási módszerét módosítottam úgy, hogy olyan próbatesteket is tudjak gyártani, amelyen rezgésmérést is lehet végezni. Ez úgy volt lehetséges, hogy a próbatestek középső részében helyeztem el egy fóliát úgy, hogy a repedés mindkét vége zárt legyen. A megfelelő számú próbatestet gyártottam és előkészítettem a rezgésméréshez. Összesen tizenhét féle próbatest készült el, amelyek a delamináció hosszában és vastagság menti elhelyezkedésükben különböznek egymástól. Kétféle rezgésmérési módszert alkalmaztam. Az első esetben egy kis tömegű ($m = 0.3$ g) gyorsulásérzékelőt és egy modális kalapácsot alkalmaztam. A modális kalapáccsal a próbatest befogott végét megütve egy analizátor segítségével mértem a gyorsulásérzékelő jelét. A mérés segítségével mind a delaminált próbatest sajátfrekvenciáit, mind pedig a lengésképeket sikerült kimérni. Emellett elvégeztem az un. söprő szinuszos gerjesztésű vizsgálatot is, amely a szakirodalom alapján pontosabb, mint a modális kalapáccsal végzett. A két teszt eredményeit összehasonlítottam és megállapítottam, hogy alacsony frekvenciáknál (első három sajátfrekvencia) hozzávetőlegesen azonos eredményt adnak, magasabb frekvenciáknál már jelentkeznek eltérések. A mérések mellett analitikus és numerikus modellt is készítettem. Az analitikus modell a hagyományos rúdelméleten alapszik, amely a szakirodalomban az egyik leggyakoribb alkalmazás. A numerikus modellhez BEAM2D végelemek felhasználásával egy egyszerű kiértékelő programot írtam MAPLE szoftverben. Az egyszerű modellek eredményeit összehasonlítottam a kísérletileg meghatározott frekvenciákkal és lengésképekkel és azt tapasztaltam, hogy a modellek eredményei több esetben távol esnek a mért frekvenciák értékeitől. Egy tanulmányban kimutattam, hogy a statikus vizsgálatoknál is alkalmazott un. rugalmas csukló modell alapján a repedéscsúcsban kialakuló állapot miatt ébredő normálerők a delaminált szakaszok merevségét időfüggővé teszik, azaz a delaminált szakaszokon nyomott, illetve húzott rudak nemlineáris rezgéseiről van szó. A feltevést kísérleti megfigyelések (videók és fotók) alapján is igazoltam. A feladat megoldására egy közelítő végelem modellt állítottam össze, amely a dinamikus stabilitási feladatokhoz hasonlóan egy Mathieu-Hill egyenletekből álló egyenletrendszer megoldását jelenti. Az egyenletrendszer a megoldás időfüggő részének Fourier-sorba fejtésével lineáris egyenletrendszerré alakítható és a hagyományos módon levezethető a frekvenciaegyenlet. A mérési és számítási eredményeket összefoglaltam és egy cikk formájában benyújtottam a *Journal of Sound and Vibration* c. folyóiratnak, amely jelenleg bírálat alatt van (ezért nem szerepel a közleményeknél) illetve egy konferencián előadást is tartottam a témából (*XI. Magyar Mechanikai Konferencia*, 2011).

9. Repedésfeszítő erő analitikus számítása lemez alakú próbatestekben

Lemez alakú próbatesteknél a repedésfeszítő erő számítására ezidáig csak végeselemes, illetve kombinált végeselemes/analitikus módszerek léteztek. A rúdszerű próbatestekre levezett modellek alapján kifejlesztettem egy tisztán analitikus módszert lemezekre. A számításhoz a Kirchhoff-féle lemezelméletet használtam fel. Egy delaminált lemez repedésmentes szakaszán felvett differenciális elemre felírtam az egyensúlyi egyenleteket és megfogalmaztam a kinematikai feltételeket. E feltételek közül az elmozdulásra nézve a rúdmodell egy az egyben átültethető. Új hipotézis viszont a szögváltozásra vonatkozó feltétel, amely alapján levezettem a rétegek közötti nyírófeszültségekre vonatkozó differenciálegyenleteket. A modell segítségével lehetséges a repedésfeszítő erőt a repedési front mentén tisztán analitikusan meghatározni Fourier-soros megoldással. A megoldást bemutattam egy egyszerűen (csuklósan) alátámasztott lemezre. Mindehhez MAPLE szoftverben egy megoldót írtam. Az eredményeket egy cikkben foglaltam össze (*Engineering Fracture Mechanics*, 2011), amely jelenleg bírálat alatt van. Kimutattam, hogy a delaminált lemezek rezgéseinél (hasonlóan a rudakhoz) a delaminált szakasz merevsége időfüggővé válik, azaz nemlineáris egyenleteket kell megoldani.

Az eredeti költségtervhez képest annyi változtatás történt, hogy 2011 közepén engedélyt kértem egy második számítógép vásárlására. Ez mindenképpen szükséges volt a kutatás befejezéséhez, főleg a rezgésméréseknél került felhasználásra. 2011-ben kérvényeztem a pályázat zárási dátumának módosítását 2011. június 30-ról 2011 október 31-re. Ennek köszönhetően sikerült az eredetileg vállalt célokat elérni. 2011 októberében kérvényeztem bizonyos összegek átcsoportosítását, az átcsoportosított összeget egy gyorsulásérzékelőre és szakkönyvek vásárlására fordítottam. Végezetül szeretném megköszönni az OTKA által nyújtott támogatást.

Budapest, 2011-11-30

Dr. Szekrényes András
egyetemi docens