

KOMPOZIT TERMÉKEK ÁLLAPOTELEMZÉSI MÓDSZEREI

EVALUATION METHODS OF COMPOSITE PRODUCTS

Hegedűs Gergely¹, PhD hallgató

Czigány Tibor^{1,2}, MTA levelező tagja

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

²MTA–BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport

ABSTRACT

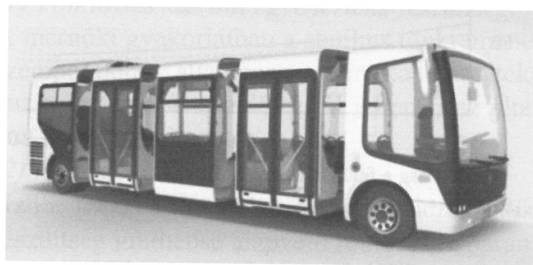
The aim of this publication is to present some notable examples from the non-destructive evaluation (NDE) methods of polymer composite materials, and the main methods of those NDE techniques, which use optic instruments and optic fibres.

1. BEVEZETÉS

Ósidők óta használ az emberiség kompozit eszközöket, melyek fejlődése napjainkig töretlen. A jelentős térhódítás a polimer kompozitok összetett szerkezetének köszönhető, amely szívós mátrixból, és a teherviselés kitüntetett irányában a szerkezeti anyag szilárdságát növelő, nagy szilárdságú és rendszerint nagy rugalmassági modulusú erősítőanyagból áll. Közöttük kiváló adhéziós kapcsolattal, mely hosszú távon, tartós- és ismétlődő terhelések esetén is fennáll [1]. A velük kapcsolatos nagy mérnöki szabadságnak köszönhetően nem csak kis, egyedi, hanem nagy teherbírású és nagyméretű, sorozatgyártásra alkalmas alkatrészek alapanyagaként is használhatjuk ezen anyagokat, így már mindennaposak többek között a járműiparban is. Magyarországon is egyre nagyobb szerepet kap a kompozitok szerkezeti anyagként való felhasználása a korábban használt, nehezebb fémszerkezetek kiváltására. Az elmúlt években tervezett és sorozatgyártás alatt álló, magyar fejlesztésű Modulo autóbusz könnyűszerkezetes karosszériája is teljes mértékben polimer kompozitból készül [2] (1. ábra), amelynek modularitásán túl nagy előnye a szerkezet súlyának nagymértékű csökkentése.

A fémek homogénebb szerkezetével szemben a kompozitok felépítése sokkal bonyolultabb, ebből adódóan új módszert kívánnak nem csak az alkatrészek méretezése, szerkezo optimalizálása, gyártástechnológiája, hanem a szerkezeti elemek állapotvizsgálatának

szempontjából is. A kompozitok összetett szerkezetében terhelés alatt máshogy viselkedik a mátrix és az erősítőszál, valamint a határfelület is. A szerkezeti elemek állapotismerete éppen emiatt rendkívül fontos, mind a termékfejlesztés, mind a használat alatt, mindenekelőtt akkor, ha személyi biztonsággal összefüggő alkatrészeket vizsgálunk.



1. ábra Magyar fejlesztésű Modulo busz [2]

2. KOMPOZIT TERMÉKEK ÁLLAPOTELEMZÉSI MÓDSZEREI

Az állapotelemzési eljárások nagy részéhez önálló, az alkatrésztől független berendezés szükséges. Ezekkel az eljárásokkal különböző hatékonysággal lehet elemezni a termékek állapotát, de általában nem a felhasználás helyén, nem beszerelt állapotban, nem működés közben. További hátránya ezen eljárásoknak, hogy úgynevezett „helyi” technikák, mivel egyszerre csak egy viszonylag kis terület vizsgálatára korlátozódnak (mindazonáltal több „helyi” technika összegzésével információit kaphatunk a szerkezet egészéről is).

A szakirodalom- megkülönböztet „direkt” és „indirekt” eljárásokat [3]. A direkt módszerekkel szemben az indirekt eljárások nem tárják fel közvetlenül a rejtett hibákat, vagy szerkezeti változásokat. Ehelyett például a hiba okozta hőmérsékletváltozást, vagy a felület deformációját jelzik terhelés hatására. A beépített hibafeltáró módszereknél a megváltozott szerkezeti reakció a kompozitba integrált szenzor jelváltozásából

következtethető. A szenzor jelváltozását egy külső egységgel mérni lehet, ami összefügg a szerkezet deformációjával. Ezen eljárások - mivel a szenzor az alkatrészbe van beépítve - használhatóak működés közben, nem szükséges az alkatrészhez hozzáférni, és ezáltal egy folyamatos állapotelemzésre adnak lehetőséget. A csoportok közötti határvonalak nem teljesen definiáltak, egyes technikák összetettségük miatt akár több csoportba is besorolhatóak. Az alábbi felsorolásban csak a polimer kompozit szerkezetekre használható roncsolásmentes állapotelemző módszereket foglaltuk össze, számos további eljárás létezik, amelyek jellemzően a fémeknél használhatóak (örvényáramú-, mágneses repedés vizsgálat stb.).

Direkt állapotelemzési módszerek:

- Szemrevételezés és érintés, kopogtatás
- Mechanikai vizsgálat
- Mikroszkópos vizsgálat
- Folyadékbehatolásos vizsgálat
- Diffrakciós képalkotó eljárás
- Akusztikus emisszió
- Ultrahangos mérés
- Nagy távolságú ultrahangos mérés
- Akusztográfia
- Akusztó-ultrahang
- Mikrohullámú vizsgálat
- Terahertz képalkotás
- Röntgenvizsgálat

Indirekt állapotelemzési módszerek:

- Infravörös termográfia
- Rétegbevonásos optikai feszültségmérés
- Holografikus interferometria
- Lézer interferometria
- Lézer-ultrahang

Beépített állapotelemzési módszerek:

- Nyúlásmérő bélyeg
- Kapacitív érzékelő
- Piezorezisztív érzékelő
- Piezoelektromos átalakító
- Szén nanocsöves deformáció mérés
- Önjelölő kompozit
- Beépített szénszálalás állapotelemzés
- Optikai szálalás módszerek:
 - Intenzitás alapú intrinsic szenzorok
 - Interferométer alapú optikai érzékelők
 - Fényvezető szálba írt Bragg rácsok
 - Elosztott paraméterű szenzorok

Jelen cikk terjedelmi korlátai nem teszik lehetővé a fenti eljárások részletes bemutatását, ezért a következőkben bemutatjuk a legelterjedtebb technikák mellett, a napjainkban egyre inkább előtérbe kerülő optikai szálalás módszereket.

2.1. Akusztikus emisszió

A szilárd testben tárolt energia felszabadulása közben rugalmas hullámok keletkeznek (többségében 1 kHz és 1 MHz közötti tartományban), amelyet akusztikus emisszióknak nevezünk. Ezen hullámok néha akár emberi füllel is hallhatóak. A hullámok érzékelésére és feldolgozására sokfajta megoldás létezik. Terhelés alatt az anyagra erősített szenzorokkal ezek a hanghullámok érzékelhetők, alkalmas elektronikus rendszerben feldolgozhatók.

Az akusztikus jelet leíró paraméterek (amplitúdó, frekvencia, hullámszám) értelmezéséből a hangforrás milyenségére következtetni lehet (jól elkülönülnek a mátrix és az erősítőanyag tönkremeneteli formái). Több szenzor felhelyezésével, és az anyagban a hanghullám terjedési sebességének ismeretével a beérkezési időpontok különbségeit mérve a hangforrás pontos geometriai helye is meghatározható [4]. Előnye, hogy nagyméretű objektum egészében figyelhető. Az ultrahangos eljárásokhoz képest olcsó, gyors, akár üzem közben is végezhető (beépített szenzorok is kivitelezhetőek). Romhány és társai [5] cikkükben AE módszert használtak sérülés terjedésének vizsgálatára. Megállapítják, hogy a módszer alkalmas terhelés alatt a megfelelő méretű, bemetszett próbatesten a sérülés terjedésének, növekedésének megbízható meghatározására. Hátránya a módszernek, hogy a környezeti hangok a szenzorok által mért adatokban zajként jelennek meg, és amelyek kiszűrése nehézkes és időigényes folyamat. Az érzékelt jel egyszeri, nem reprodukálható.

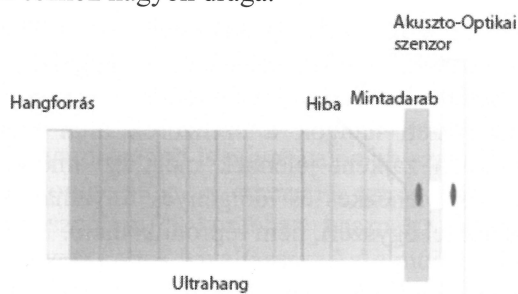
2.2. Ultrahangos mérés

Az ultrahangos vizsgálat általánosan az 500 kHz és 20 MHz frekvenciatartományon belüli hanghullámokkal történik. Az ultrahangos elektroakusztikus átalakítók (transducer) lényegi részei ezen berendezéseknek, mert képesek elektromos jelet piezoelektromos egység segítségével impulzusszerű hanghullámokká alakítani, és fordítva. Általában 0,5 – 25 MHz-es frekvenciatartományban működnek, de különleges alkalmazásokban magasabb és mélyebb tartományok is előfordulhatnak. Az

átalakító egy rövid időtartamú hangimpulzust generál, és ugyanez, vagy egy másik „vevő” átalakító a visszatérő jelet figyeli. Az anyagon belüli hibát egy arról visszaverődő hanghullám, vagy két átalakító esetén a mért jel erősségének csökkenése jelzi [6] (a két átalakító kerülhet akár egy oldalra is [7]). A berendezéseket megkülönböztethetjük a vizsgálatban részt vevő átalakítók száma alapján (impulzus-visszhang, impulzus áthangzás), a hanghullámokat közvetítő közeg alapján, és a mérési eredmények megjelenítése alapján. Léteznek fázisvezérelt (Phased-arrays), több piezo-elektromos elemet tartalmazó átalakítók is [6]. A vizsgálati módszer előnye, hogy a hibákról közvetlenül visszaverődő hanghullámokkal mutatja ki a belső hibákat, hátránya, hogy csak viszonylag kis területet lehet egyszerre feltárni.

2.3. Akusztográfia

A hagyományos ultrahangos eljárásokból kifejlesztett eljárás, ami az ultrahangon alapuló analógiája a röntgenkép készítésnek. A feszültségre érzékeny 2D felületérzékelő közvetlenül optikai információvá képes konvertálni a jelet, hasonlóan, mint fluoreszkáló képernyő a röntgensugarakat vizuális képpé (2. ábra). Ez az eljárás képes nagy területek ultrahangos térképének (közel) valós idejű megjelenítésére [8, 9]. További előnye az eljárásnak, hogy képes bonyolultabb alakzatok vizsgálatára is. Összehasonlítva a pásztázó ultrahang vizsgálattal, részletgazdagabb, és kevésbé zajos képet lehet kapni. Hátránya, hogy az eszköz nagyon drága.

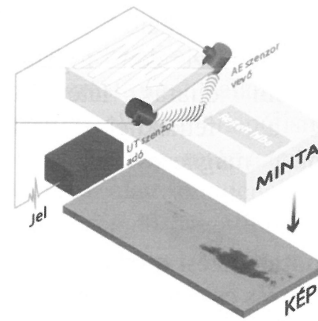


2. ábra Akusztográfia működési elve [8]

2.4. Akusztó-ultrahang vizsgálat

Egy piezoelektromos átalakító segítségével a vizsgált alkatrész felületére előre meghatározott szöget bezáró ultrahang impulzusokat küldenek a vizsgálat alatt, amelyek a mintán keresztülhaladnak, és az anyagon belüli különböző inhomogenitásokon visszaverődnek (3. ábra). Más elrendezés esetén az adó- és vevő

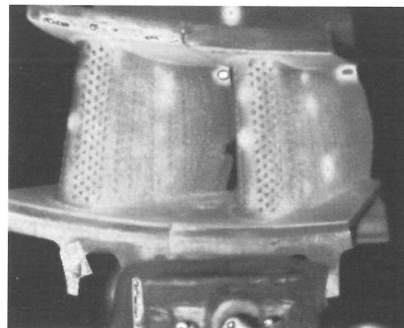
átalakítókat közvetlenül a felületre helyezik. A visszakapott jel függ a küldő és fogadó átalakító közötti anyagi struktúrától. Belső folytonossági hiba (pl. rétegelválás) esetén a visszavert akusztikus energia megváltozik, ami feltárja a hibát. A jel megfigyelése hasonlóan történik, mint az akusztikus emissziós vizsgálatnál [10]. Az eljárás előnye az ultrahangos vizsgálattal szemben, hogy az adó és vevő átalakítóknak és a vizsgálandó mintának nem kell egy egyenesbe esniük.



3. ábra Akusztikus ultrahang vizsgálat elve [11]

2.5. Infravörös termográfia

A termográfiai eljárások közös elve a vizsgált elem gerjesztése külső energiaforrással (pl.: mechanikus rezgés, fény, hang), a vizsgált elem kibocsátott sugárzásának (3-14 μm) mérése, majd ezen információ képi megjelenítése. A módszer használatával a mintadarabot gerjesztik, és a gerjesztés hatására a törésekben, repedésekben keletkező hőváltozást figyelik. Például piezoelektromos gerjesztők nagy amplitúdójú hang-, vagy ultrahang hullámokkal rezegtethetik a mintadarabot, és infravörös kamerával figyelik a válaszként az anyaghibákban, repedésekben sűrűsödés hatására generálódó hőt (4. ábra) [6]. Előnye az eljárásnak, hogy képi információt szolgáltat, de hátránya, hogy a vizsgálandó mintát gerjeszteni kell.



4. ábra Termográfiaval készült képe egy vizsgált mintadarabnak [12]

2.6. Beépített optikai szálak érzékelők

Optikai szálakat kétféle módon használhatunk szenzorként: ha a szál maga csak az információt közvetíti az érzékelő és feldolgozó egység között, extrinsic szenzornak, míg ha a szál maga a jelátviteli (fényvezető) közeg, és az érzékelő egyben, intrinsic szenzornak nevezzük. A szálban terjedő fény valamely jellemzője (intenzitása, fázisa, polarizációja, hullámhossza, időzítése, spektrális eloszlása) megváltozik a külső körülmények hatására (mint például a szál terhelés, deformáció). Ennek megfelelően vannak intenzitás alapú, spektrális alapú, polarimetrikus és interferometrikus szenzorok, illetve ezek kombinációi. A mérést általában visszavezetjük intenzitás-mérésre. Előnyük, hogy működésüket elektromágneses zavarforrás nem befolyásolja (pl.: rádióhullámok, villámlás, háttér sugárzás), nincs szükség elektromágneses szempontból árnyékolásra, ugyanakkor az optikai szál maga sem sugároz, így nem jelent zavarforrást. Könnyen beépíthetők kis méretük, kis tömegük, flexibilitásuk miatt, anyaguk nagymértékben ellenáll korróziónak, hőterhelésnek, továbbá a jelfeldolgozó, kiértékelő egységet nem szükséges beépíteni. Az optikai szálak csillapítása lényegesen kisebb, mint a rézvezetőjű kábeleké, vagy a rádiós összeköttetéseké, ezért nagy távolságok közötti adattovábbításra kiválóan alkalmazhatóak. Továbbá igen gyorsak és az esetek többségében valós időben megfigyelhetők [13, 14]. További előnyük, hogy beépítve a szenzor maga használható gyártás közbeni folyamatos megfigyelésre, használat közbeni állapotelemzésre és sérüléselemzésre (5. ábra) [15].

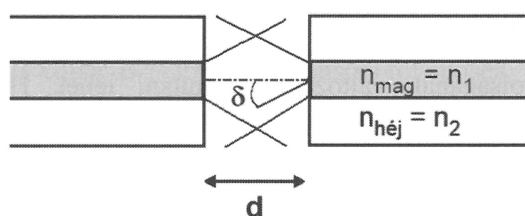


5. ábra Életciklus alatti elemzés beépített optikai szállal [15]

Hátrányuk, hogy általában drágábbak, mint az elektromos, elektromechanikus érzékelők, és szakadásuk után, kis méretük miatt nehézkes a javításuk. További hátrányuk, hogy a szálakkal (felépítésükből adódóan) rendkívül nehéz több irányban a deformációt mérni [16].

2.7. Intenzitás alapú intrinsic szenzorok

Az intenzitás alapú optikai szenzoroknál külső környezeti hatásra az áthaladó vagy a visszavert fény intenzitása megváltozik, és ez a változás mérhető. Az intenzitásváltozás a szál belsejében történő veszteségek miatt jön létre. Ilyen szenzorral egyszerűen megvalósítható mikrométeres nagyságrendű távolság- vagy rezgésmérés. Két szálvég között a fényátvitel nagymértékben függ a szálvégek közötti távolságtól. A rendszer okozta csillapítás függ a mag és héj törésmutatójától (n_1, n_2), és a légrés nagyságától (d). Az optikai szálból kilépő fény az üveg-levegő határfelületen törik, és minél nagyobb a kilépő- és belépő szálvég távolsága, annál kevesebb fénysugár lép be. A szálba csak azon sugarak képesek belépni, melyek az ún. akceptancia-szög (δ) alatt érkeznek, a többi visszaverődik (6. ábra). A légrés nagysága a kilépő fény intenzitásmérésével meghatározható [13].



6. ábra Intenzitás alapú száloptikai szenzorok távolságmérésének elvi ábrája [13]

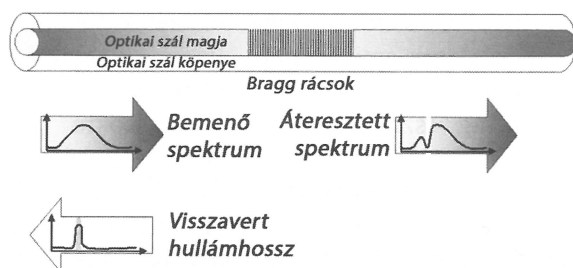
2.8. Interferométer alapú optikai érzékelők

Az interferometrikus szenzorok két különböző hatásnak kitett optikai ágából állnak. Az egyik ág (referencia) a külső hatások ellen védve van, a másik ág (szenzor) a külső hatásokra (pl. hőmérsékletváltozás, nyomásváltozás, kémiai hatás) megváltoztatja optikai tulajdonságait, pl. hossz vagy törésmutató. Ezáltal a két ág között optikai úthossz különbség jön létre. Működési elvük a fázismoduláción alapszik, miszerint az átvitt fény fázisa az optikai úthossz változása miatt módosul. Ugyanazon koherens fényforrással megvilágítva mindkét szál, a fáziskülönbség interferométerben intenzitásmérésre visszavezethető. A szenzorok

érzékenysége nagy, de mérési tartományuk korlátozott (ekvivalens hossz maga a hullámhossz). Különböző interferométer elrendezések vannak. A Sagnac-interferométer két ága ugyanabban a hurokban van, a fény a két ágban ellenkező irányban terjed, így a fáziseltolódás révén pl. a hurok forgása érzékelhető. A Mach-Zehnder interferométer két egymódusú üvegszálból áll, az egyik ága a referencia a másik az érzékelő. Ez az egyik legpontosabb optikai szenzor. Ehhez hasonló a Michelson-interferométer, de felépítésében különbözik: a két ág végén egy-egy tükör van, így a fény oda-vissza befutja az ágakat. A kereskedelemben kapható ilyen érzékelőt SOFO interferométernek hívják [13, 17].

2.9. Fényvezető szálba írt Bragg-rácsok

Az optikai Bragg rács a fényvezető szál magjában a tengelyére merőlegesen álló, a szál magjától eltérő törésmutatójú keskeny sávok sorozata (7. ábra). A szálba fényt bocsátva a törésmutatótól, és a sávok távolságától függően a rács visszaver bizonyos hullámhosszúságú nyalábot, míg minden más hullámhossz ezen zavartalanul áthalad. A sávok távolsága, alakja függ a deformációtól és a hőmérséklettől. Ha ez megváltozik, akkor más hullámhosszúságú fény verődik vissza. A visszavert fény hullámhosszúságtól függő intenzitás elemzésével, a hullámhossz eltolódásból a sávok távolságának változását számítani lehet. Ha deformáció és hőmérsékletváltozás egyszerre előfordulhat, szükséges egy szabad referenciasávot használni a hőmérsékletváltozás kompenzálására. Egy optikai szálon akár több, különböző hullámhosszhoz tartozó sávozást is ki lehet alakítani különböző helyeken (tipikusan 4-16, vagy akár több száz [18]), így több ponton mérhető a deformáció [14].

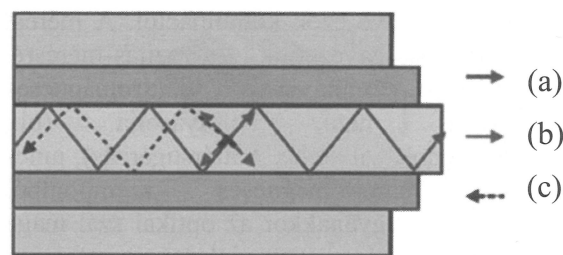


7. ábra FBG szenzor működési elve [15]

2.10. Elosztott paraméterű szenzorok

Elosztott paraméterű szenzorokkal egy fizikai jellemzőnek az üvegszál mentén történő

folytonos (elosztott) érzékelése lehetséges, így nagyszámú különálló szenzor kiváltására alkalmasak. A szenzorok főként a Rayleigh-, a Raman-, vagy a Brillouin szórás elvén működnek. Mindegyik módszer a mért jellemző (pl.: deformáció, hőmérséklet) és a visszaverődő fény optikai jellemzőinek összefüggésére épít (8. ábra). Egy optikai szálban terjedő fényimpulzus Rayleigh- és Brillouin szórás miatt visszaverődő fénye mérhető, és használható hőmérséklet és deformáció mérésére is. A Raman-szórás miatt visszaverődő fény elemzése hőmérsékletmérésre alkalmas [19].



8. ábra Optikai szálban a fény terjedése (a), a fényszóródás (b) és a visszaszóródás (c) jelensége [19]

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott eljárások alapján is elmondható, hogy alapvetően kétféle módszer lehetséges a kompozit szerkezetek állapotának vizsgálatára. Egyik lehetőség a külső berendezés segítségével történő vizsgálat, amelynek során a vizsgálatot a kompozit szerkezet felületének egészén elvégezve közvetve vagy közvetlenül feltárhatóak a szerkezeten belüli hibák. Másik lehetőség a kompozit szerkezet összetettségét kihasználni, és beépített szenzorok visszakapott jeléből számítani a szerkezetben ébredő feszültséget, illetve deformációt. Ebből a kapott jelből következtetni lehet a szerkezetben történt strukturális változásokra. A külső, nem beépített módszerek alkalmasak lehetnek egy időszakos állapotvizsgálatra, míg beépített szenzorokkal folyamatos megfigyelés alatt, akár működés közben, *in-situ* lehet követni a szerkezet belső deformációit. A két eljárás hasznosan kiegészítheti egymást [20], beépített érzékelőkkel következtetni lehet a sérülésre, és adott helyen „külső” berendezéssel pontosabban fel lehet tární a szerkezeten belüli hibák típusát, kiterjedését és egyéb tulajdonságait.

Beépített érzékelőkkel, és különösen beépített optikai szálakkal meg lehet figyelni a

kompozit szerkezet teljes élettartama alatt, az életciklus különböző szakaszaiban (laminálás, térhálósodás, formából való kiemelés, összeszerelés, használat) bekövetkező deformációkat, feszültségeket és az ebből eredő sérüléseket, hibákat. Az optikai szálak további előnye, hogy beépítésükkel nem romlanak jellemzően a kompozit szerkezeti elem mechanikai tulajdonságai. Hátrányuk a relatív összetettségük, és szűk dinamikus mérési tartományuk. További hátrányuk, hogy csak a szál közvetlen környezetéről kapható információ.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS



Az Emberi Erőforrások Minisztériuma ÚNKP-16-3-I. kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának támogatásával készült.

A cikk megjelenését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal - NKFIH, OTKA K 116070 pályázata támogatta.

5. IRODALOM

- [1] Czvikovszky T., Nagy P., Gaál J.: A polimertechnika alapjai. Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000
- [2] http://totalcar.hu/magazin/hirek/2015/10/01/evopro_modulo_hazaibem/, 2015.10.14.
- [3] Pezzoni R.: Laser-shearography for nondestructive testing of large area composite helicopter structures. in Proceeding of 15th World Conference on Nondestructive Testing. Rome, Italy, 2000
- [4] Czigány T.: A károsodási zóna kialakulása és a repedésterjedés erősített polipropilén rendszerekben. PhD thesis. Budapest Műszaki Egyetem, 1997
- [5] Romhány G., Czigány T., Karger-Kocsis J.: Determination of J-R curves of thermoplastic starch composites containing crossed quasi-unidirectional flax fiber reinforcement. Composites Science and Technology, 66, 3179-3187, 2006
- [6] <https://www.cnde.iastate.edu/>, 2015.10.19.
- [7] Kite A. H.: Nondestructive evaluation of a carbon fiber wing spar. PhD thesis. Iowa State University, 2007
- [8] Sandhu J. S., Wang H.: Recent advances in acoustography-based NDE. in Recent Advances in Experimental Mechanics (ed.: Gdoutos E. E.) Kluwer Academic Publisher, Netherland, 2002
- [9] Tampus P.: Beszámoló a 17. roncsolásmentes vizsgálati világkonferenciáról. Anyagvizsgálók lapja, 3, 83-95, 2009
- [10] Zhenqing L.: Lamb Wave Analysis of Acousto-Ultrasonic Signals in Plate. in Proceeding of 15th WCNDT. Róma, Olaszország, 2000
- [11] <http://www.mistrasgroup.com/products/technologies/acoustoultrasonics.asp>, 215.11.16.
- [12] <https://thermal.cnde.iastate.edu/index.xml> 2015.10.19.
- [13] Gholamzadeh B., Nabovati H.: Fiber optic sensors. International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering, 2, 1107-1117, 2008
- [14] Glisic B., Inaudi D.: Fibre optic methods for structural health monitoring, John Wiley & Sons Ltd., New York, 2007
- [15] Minakuchi S., Takeda N.: Recent advancement in optical fiber sensing for aerospace composite structures. Photonic Sensors, 3, 345-354, 2013
- [16] Güemes A., Fernández-López A., Soller B.: Optical Fiber Distributed Sensing - Physical Principles and Applications. Structural Health Monitoring, 9, 233-245, 2010
- [17] Glisic B.: Fiber optic sensors for subsea structural health. in Subsea optics and imaging (eds.: Watson J. and Zielinski O.) Woodhead Publishing, Oxford, 434-467, 2013
- [18] Childers B.A., Froggatt M.E., Allison S.G.: Use of 3000 Bragg grating strain sensors distributed on four eight-meter optical fibers during static load tests of a composite structure. in Proceeding of the SPIE Conference, San Diego, CA, 2001
- [19] Sánchez D. M., Gresil M, Soutis C.: Distributed internal strain measurement during composite manufacturing using optical fibre sensors. Composites Science and Technology, 120, 49-57, 2015
- [20] Lee J., Chong S. Y., Sunuwar N.: Repeat scanning technology for laser ultrasonic propagation imaging. Measurement Science and Technology, 24, 1-11, 2013