

# Üvegszál erősítésű kompozitok deformációjának mérése szénszálak segítségével

## DEFORMATION ANALYSIS IN GLASS FIBER REINFORCED COMPOSITES BY CARBON FIBERS

FORINTOS Norbert <sup>1,2\*</sup>, CZIGÁNY Tibor <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék,  
Budapest, 1111 Műegyetem rakpart 3.,

<sup>2</sup> MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest, 1111 Műegyetem rakpart 3.

\*forintosn@pt.bme.hu; tel:+36306446900

### ABSTRACT

*In this article a structural condition monitoring method for in-situ crack detection and strain monitoring is presented. The mechanism is based on the electrical property of a carbon fiber. Carbon fiber bundle was laminated into an electrically insulating glass fiber reinforced epoxy matrix composite. Under load the electrical resistance of the carbon fibers increases as the specimen deforms, at failure the electronic circuit breaks and infinite resistance can be measured.*

### ÖSSZEFOGLALÓ

*A cikk egy folyamatos állapotfelügyeleti eljárást mutat be, amely alkalmas a polimer kompozitokban létrejövő repedés, illetve deformáció üzem közbeni kimutatására. A jelzési mechanizmus a szénszálak elektromosan vezető tulajdonságára alapul. Szigetelő üvegszövet erősítésű epoxi mátrixú kompozitba helyezve a szénszálköteg ellenállása a deformációval arányosan növekszik, tönkremenetel esetén az elektromos áramkör megszakad, az ellenállás végtelen lesz.*

**Kulcsszavak:** kompozit, szénszál, állapotfelügyelet, deformáció

### 1. BEVEZETÉS

A polimer kompozit olyan szerkezeti anyag, amely két fázist, szivós mátrixot és nagy szilárdságú erősítőanyagot tartalmaz. Számos előnyös tulajdonsággal rendelkeznek: jó korrózióálló, kis fajsúly mellett érhető el nagy szilárdság, valamint mechanikai tulajdonságai a szálak irányításával az adott alkalmazási terület igényeinek megfelelően alakítható ki. E jellemzők miatt napjainkban egyre több iparágban egyre nagyobb mennyiségben alkalmazzák, legfontosabb területek a repüléstechnika, szélenergia, sporteszközök piaca és az járműiparban. Ezeken a területeken kulcsfontosságú a kezdődő repedések észlelése, a tönkremenetel megelőzése. A kompozit szerkezetek állapotfelügyelete, azaz az anyag épségének folyamatos ellenőrzése lehetővé teszi az anyagban bekövetkező változások észlelését, a hibák azonnali kimutatását. A szakirodalomban megtalálható, polimer kompozitokra is alkalmazható roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások egy lehetséges csoportosítása az 1. táblázatban látható.

1. táblázat. Roncsolásmentes anyagvizsgálatok csoportosítása

	Optikai elven működő	Elektromos vezetéken alapuló
<b>Felületen alkalmazott</b>	- Érintkezésmentes optikai technológiák	- Nyúlásmérő bélyeg
<b>Anyagba épített</b>	- Bragg rácsos szál szenzor - Optikai vezetőképesség változás mérése	- Elektromos ellenállás változás mérése

A felületen alkalmazott módszerek utólagosan, már elkészített próbatesteken vagy kész termékeken is alkalmazhatóak, jellemzően rövid idejű vizsgálatoknál használják. Az anyagba épített érzékelőknél közös,

hogy már gyártás közben, a szerkezetbe helyezik az érzékelőket, ezáltal hosszabb idejű, a gyártástól az életciklus végéig tartó mérés érhető el.

Az érintkezésmentes optikai technológiák közé sorolhatók az olyan eljárásokat, amelyek a felület min-tázatát, vagy a rajta elhelyezett mérőjelet valamilyen optikai eljárással, például nagyfelbontású kamerával követi, majd képfeldolgozó program segítségével a figyelt pixelek elmozdulásából határozható meg a nyúlás. A mérőberendezés hátránya, hogy pontossága jelentősen függ a képrögzítő eszköz minőségétől, valamint a megvilágítástól, illetve a próbatest nyúlásának csak átlagos, a teljes mérőhosszra érvényes értékét tudja regisztrálni 0.

Az optikai szál a távközlésben betöltött szerepén kívül repedések, törés, abrazív kopás, hőmérséklet-változás, illetve nyúlás kimutatására is alkalmas eszköz. Kompozitba építve más-más eljárásokkal, többféle képen alkalmazható. Az egyik technológia alapja az optikai szálak polarizációs tulajdonságainak változása feszültség vagy nyújtás hatására, amely megváltozást arra alkalmas eszközzel mérni lehet. Egy másik eljárásnál a fényintenzitást mérik: az egyik oldalán megvilágított optikai szálon áthaladó fény mennyisége a másik végén detektálható, a mért mennyiség csökkenéséből a szerkezetben létrejövő nyúlásra vagy hibára lehet következtetni 0. Optikai szál alkalmazásával elérhető folyamatos állapotfelügyelet úgy, hogy nem szükséges a kompozitban használt anyagoktól eltérő tulajdonságú berendezés használata, így a szerkezet mechanikai folytonossága nem változik.

A nyúlásmérő bélyegek fizikai alapja, hogy a vizsgált test nyúlásával változik a bélyeg, ezzel együtt a rajta elhelyezett fémes vezető hossza, illetve az anyagmegmaradás törvényének értelmében csökken a keresztmetszete. E két változás hatására, az Ohm-törvénnyel összhangban növekszik a szál ellenállása. A ma is használt formában a vezető anyagot nem közvetlenül a mérendő felületre, hanem egy hordozó rétegre viszik fel, majd ezt ragasztják a vizsgált részre 0. A próbatest deformációjának hatására megnyúlt bélyeg ellenállása arányosan változik, a mért értékekből következtetni lehet a fajlagos nyúlásra. Nem csak fémes vezető ellenállása változik meg deformáció hatására, hanem például az erősítésként alkalmazott szénszálkötege is, az ilyen szálakkal erősített kompozitok, vagy a szénszálat szigetelő (például üvegszál) kompozitba építve intelligens anyag hozható létre. Az erősítőszálként használt szénszál elektromos tulajdonságát vizsgálva Owston 0 megállapította, hogy mechanikai feszültség hatására lineárisan változik a szál ellenállása. Ha a kompozit anyagban terjedő repedés eléri a szenzorként használt szálat és el is szakítja azt, akkor az ellenállás végtelen lesz. Szénszálkötegek beépítésével és ellenállásának folyamatos követésével ezáltal megvalósítható a strukturális önérzékelés 0. A szénszálak ellenállását befolyásolja például a hőmérséklet is, így megfelelő kalibrálással akár hőmérő szenzorként is alkalmazható 0.

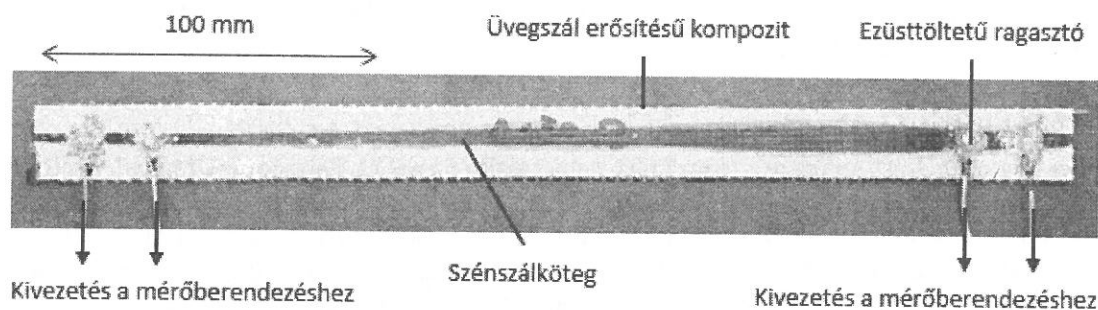
Ebben a cikkben egy olyan eljárás kerül bemutatásra, amely alkalmas kompozit alkatrészek alakváltozásának folyamatos, akár üzem közbeni mérésére, valamint a tönkremenetel kimutatására szénszálkötegek segítségével.

## 2. KÍSÉRLETI RÉSZ

A kísérletekhez a szénszálat nem erősítésként, hanem elektromos áram továbbítására használtuk, ehhez először az alkalmazott szálköteg elektromos tulajdonságait vizsgáltuk. A szenzort szigetelő kompozitba építettük és egytengelyű húzóvizsgálatot végeztünk el, közben folyamatosan mértük a szálkötegek ellenállását. A mérés pontosságát befolyásoló tényezők közül kettő hatását külön elemeztünk, ezért készítettünk próbatesteket különböző elemi szálszámmal, valamint feszesen tartott és laza szálkötegekkel.

### 2.1. Felhasznált anyagok, próbatest gyártás

A kísérletekhez Zoltek PX35 szálköteget építettünk kompozit próbatestekbe, amelyet RT 270 1546 típusú üvegszövetből és epoxi gyantából (ipox ER 3016 gyanta és MH 3124 térhálósító, 100:40 arányban) készítettünk. A próbatesteket kézi laminálással készítettük, majd a főlölesleges gyanta eltávolításának érdekében préselést alkalmaztunk 300000 Pa nyomáson, 15 órán át, végül 80°C-on, 7 órán át hőkezeltük. A szénszálköteget a laminálás közben feszesen helyeztük a kompozit lemezbe, majd csavarok segítségével rögzítettük. Az elkészített kompozit lapból 300x25 mm méretű próbatesteket vágtunk ki (1. ábra).

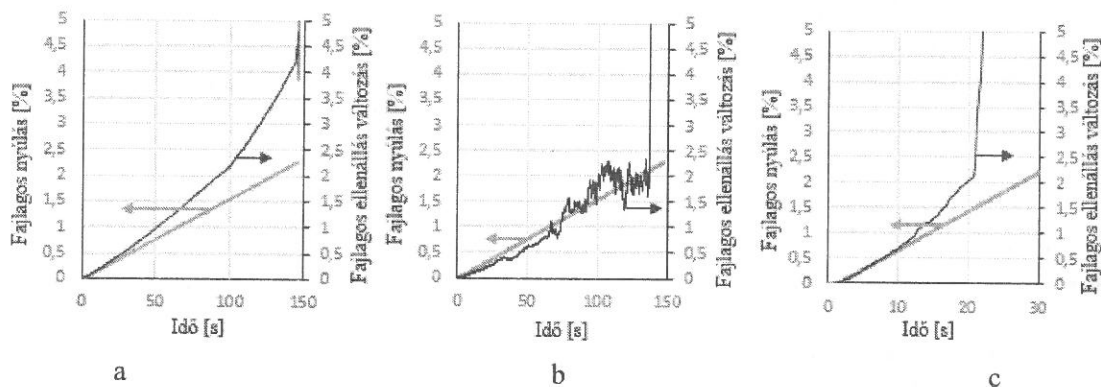


1. ábra. A húzóvizsgálathoz előkészített próbatestet

A szénszálköteg ellenállásának méréséhez elektromos kapcsolatot kellett létesíteni, ehhez a szálkötegek végeinél a gyantát visszacsiszoltuk, majd vezető huzalokat ragasztottunk Loctite 3888 típusú, kétkomponensű, ezüsttöltetű ragasztóval a szénszálkötegek szabaddá vált részeihez.

## 2.2. Kísérletek és eredményeik

A próbatestek deformációjának és a szénszálkötegek elektromos ellenállásának megváltozása közti kapcsolatot terhelés alatt lehet kimutatni, ezért a próbatestet egytengelyű húzóvizsgálattal terheltük Zwick Z250 univerzális szakítógépen. A szénszálköteg ellenállását Agilent 34970A adatgyűjtő berendezéssel, négyvezetékes módszerrel mértük. E módszer elve, hogy a berendezésen keresztül a két szélső vezetéken megadott áram folyik, míg a két középső vezetéken mérhető a feszültség. Ezzel a módszerrel kiküszöbölhető a rendszer- és a kontaktellenállás zavaró hatása, illetve a kétvezetékes elrendezéshez képest a változásokra érzékenyebb ez a mérés. A kísérletek során három különböző tulajdonságú próbatestet vizsgáltunk: kevesebb és több elemi szál tartalmazó (~25 000 és ~12 000 darab), megfeszített szálköteggel készített, valamint egy laza szálköteget tartalmazó mintadarabot. A próbatest deformációját a keresztfej elmozdulásából számítottuk, ez adta az összehasonlítási alapot az elektromos ellenállásból számított nyúlásértékhez. A kezdeti értékekkel fajlagosított nyúlás és ellenállás változás az idő függvényében közös diagramban ábrázoltuk (2. ábra).



2. ábra. Fajlagos változások kevesebb (a) és több elemi szálszám (b), valamint laza szálköteg (c) esetén

A diagramok jól szemléltetik, hogy az ellenállás kezdetben lineárisan változik, majd nagyobb deformációnál progresszíven nő az értéke, végül a szálköteg szakadásánál végtelen értéket vesz fel. A progresszív hatás már kis száltartalomnál is az elemi szálak szakadásával magyarázható: gyártás során törekedtünk a szálköteg feszességének megtartására, de ez minden egyes elemi szátra nem lehetséges, ezért a kezdetben nem egyenes, ezáltal nagyobb kezdeti hosszú szálak a próbatest egységnyi nyúlásánál kevésbé deformálódtak, ezért más időpillanatban érték el a szakadási nyúlásukat. Az egyre több elszakadó szál következtében csökkent a hasznos vezetési keresztmetszet, ezért nőtt az ellenállás.

A legtöbb szál viszont egy pillanatban szakadt el, ekkor az áramvezetés megszűnt, az ellenállás végtelen lett (2.a ábra). Nagyobb száltartalomnál több szál rendelkezett nagyobb kezdeti hosszal, ezért a szálszakadás hatása is jobban befolyásolta a szálköteg ellenállását, nagyobb megnyúlásnál a szenzor működése bizonytalanabb. A szálköteg szakadása viszont így is egyértelműen kimutatható (2.b ábra). A görbe szálköteget

tartalmazó próbatest szakításakor a szálakat összetett igénybevétel terheli, ezért a tiszta húzáshoz képest már kisebb nyúlásnál elszakadnak (2.c ábra).

### 3. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott mérési eljárás a szénszálnak nem erősítő szerepét, hanem elektromos vezetőképességét használta ki. Szénszálköteget üvegszövet erősítésű, epoxi mátrixú kompozit próbatestekbe építve egy olyan elrendezést hoztunk létre, amely alkalmas a kompozit deformációjának jelzésére. Kísérletekkel bizonyítottuk, hogy a módszer már kisméretű alakváltozásnál is működik, a kapcsolat a fajlagos ellenállás változás és a nyúlás között ekkor a legegyszerűbb. Nagyobb nyújtásnál az elemi szénszálak szakadása miatt az ellenállás változás a valóságosnál nagyobb deformációt feltételez, ebben a szakaszban a jelző rendszer korrekciós tényező bevezetésével alkalmazható. A szálkötegre jellemző átlagos szakadási nyúlást a mérőberendezés egyértelműen jelzi végtelen ellenállás értékkel.

Alkalmazhatóság szempontjából a kisebb méretű szálkötegek használata a célszerűbb, mert így a teljes deformáció tartományban egyértelmű jel mérhető, valamint kisebb nyúlás esetén is nagyobb az ellenállás megváltozása, amit kisebb felbontású műszerrel is ki lehet mutatni. Ezen kívül törekedni kell az egységes kezdeti hosszú szálak beépítésére, mert a különböző hosszúságú elemi szálak a terhelés más-más szakaszában szakadnak el, ezáltal a mérés pontosságát jelentősen rontják.

Kompozit anyagból készült szerkezeteknél, ha ismert a deformáció, akkor becsülhető, sőt időben való közbeavatkozással akár megelőzhető a tönkremenetel, vagy hatékonyabban kihasználható a szerkezet teherviselő képessége. Szenzorozott vagy önérzékelő anyagokat például kompozitból készült buszba építve egyrészt folyamatosan ellenőrizhető az önhordó karosszéria épsége, másrészt ezen túlmutató, hasznos információ gyűjthető: a fellépő deformáció alapján meg lehet becsülni az utasok számát, amely becslés segítségével hatékonyabb fuvarszervezés érhető el a feltűnően zsúfolt vagy üres járatok kimutatásával.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A cikk megjelenését a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (K116070) és NVKP (NVKP\_16-1-2016-0046) pályázatai támogatták.

### FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3684> (2016.10.18.)
- [2] Ramakrishnan M., Rajan G., Semenova Y., Farrel G.: Overview of fiber optic sensor technologies for strain/temperature sensing applications in composite materials. *Sensors*, 2016/16, p 99.
- [3] Hoffmann K.: An introduction to stress analysis and transducer design using strain gauges, [www.hbm.com](http://www.hbm.com), 2016.
- [4] Owston C. N.: Electrical properties of single carbon fibres, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1970/3, 1615-1626.
- [5] Forintos N., Czigány T.: Kompozitba épített elektromosan vezető érzékelő. *Polimerek*, 2016/2, 196-199.
- [6] Chung D. D. L.: Carbon materials for structural self-sensing, electromagnetic shielding and thermal interfacing. *Carbon*, 2012/50, 3342-3353.
- [7] Janesch J.: Two-wire vs. Four-wire resistance measurements: which configuration makes sense for your application? [www.tek.com](http://www.tek.com), 2013.