

Kompozitba épített elektromosan vezető érzékelő

Forintos Norbert^{1*}, Czigány Tibor^{1,2}

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

²MTA-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, Budapest

A cikk egy olyan új eljárást mutat be, amely alkalmas polimer kompozitokban létrejövő deformáció, illetve repedés üzem közbeni kimutatására. A jelzési mechanizmus alapja az elektromosan vezető szenzor fizikai tulajdonságainak megváltozásakor létrejövő ellenállás-változás. Érzékelőként szénszál köteget építettünk üvegszövet erősítésű, epoxi mátrixú kompozitba, és vizsgáltuk a szenzor statikus igénybevételre adott válaszát.

Kulcsszavak: kompozit, szénszál, állapotfelügyelet, nyúlásmérés

1. BEVEZETÉS

A kompozit anyagok elterjedésével egyre több méretezési információ áll a mérnökök rendelkezésére, ezáltal a tervezés során kifinomultabb, könnyebb szerkezetek alkothatók. A gondos számítások ellenére előfordulhatnak nem várt terhelések vagy nagy energiájú behatások, amelyek roncsolhatják a kompozit anyagot. Repedésekkel, törésekkel gyengített alkatrész már nem képes a tervezett módon üzemelni, ezért e hibák észlelése különösen fontos a biztonságos használat érdekében.

A kompozit alkatrészeket jellemzően hosszú élettartamra tervezik, ezért a sérülések kimutatására érdemes olyan eljárást alkalmazni, amely a vizsgálat közben nem roncsolja a darabot. Társított anyagokra is alkalmazható roncsolásmentes anyagvizsgálatok egy lehetséges csoportosítása az 1. ábrán látható.

Az eljárások két nagy csoportja az időszakos (off-line), valamint a valós idejű (in-situ) adatgyűjtést megvalósító folyamatos technológiák. Az off-line technológiák üzemén kívül, tervezett karbantartások során alkalmazhatók, jellemzően gondos előkészítést és bonyolult berendezéseket (például sugárzás kibocsájtó és detektor) igényelnek. Az in-situ eljárások ezzel szemben folyamatos visszajelzést adnak az anyag állapotáról az üzem közbeni mérések segítségével, szenzorok be-

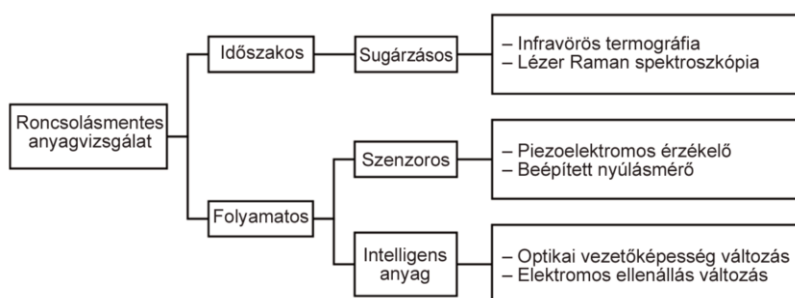
építésével, vagy valamilyen különleges anyagi tulajdonság felhasználásával valósíthatók meg.

Az időszakos, sugárzásos eljárások fizikai alapja, hogy valamilyen frekvencia-tartományú besugárzásra a sérült anyag rész a megszokottól eltérő válaszjelet ad. Alkalmazhatóságukhoz elengedhetetlenek a gondos felület-előkészítés és a bonyolult, nehezen mozgatható berendezések, ezért nagy minták (pl. repülőgépszárny, szélerőmű-lapát) teljes vizsgálata igen körülményes. Az infravörös termográfia során a vizsgálandó anyagrészt meghatározott hőmennyiséggel besugározzák, majd a hűlési folyamatot hőkamerával vizsgálják. Sérült anyag környékén a hővezetési tulajdonságok megváltoznak, ezért ott a kihűlés tovább tart. Az ilyen, magasabb hőmérsékletű helyek a hőkamera képén észlelhetők [1]. A feszültség és törés meghatározása Raman spektroszkópiával a monokromatikus fény és a vizsgált anyag atomjainak kölcsönhatásán alapul. A fotonok szóródása lehet a rugalmas Rayleigh szórás, ekkor a foton energiája nem, csak terjedésének iránya változik, vagy a Raman szórás, amely során a foton energiájának egy része az atom egy elektronját gerjeszti. Az energiakülönbség mérésével következtetni lehet a vizsgált minta összetételére, vagy az ismert anyag feszültségállapotára. Arjyaval és társai [2] az ún. távoli lézer Raman spektroszkópia eljárást alkalmazták kom-

pozit próbatesteken: kísérletük során egy kis Raman szórású anyagba (üvegszálak kompozit) helyeztek egy nagy Raman szórású anyagot (aramid szál), ezáltal a próbatest belső feszültségi állapotáról kaptak mérhető adatot.

Számos alkalmazási területen, ahol az üzemi terhelés huzamosabb ideig éri az alkatrészt, például szélerőművek turbinalapátjában, nem elegendő az üzemszünetek alatt ellenőrizni az anyag sértetlenségét.

A keletkező repedések azonnali kimutatá-



1. ábra. Roncsolásmentes anyagvizsgálatok csoportosítása

*forintos@pt.bme.hu

sára alkalmasak a kompozit szerkezetbe épített kisméretű érzékelők. A piezoelektromos elven működő szenzorok fizikai alapja a kristályokban deformáció hatására létrejövő feszültségkülönbség, illetve e folyamat megfordítása, azaz a feszültségkülönbség hatására deformálódó (elektrosztrikciós) aktuátorok alkalmazása. Yam és társai [3] aktuátorokat és szenzorokat építettek próbatestükbe, majd az aktuátorra több frekvenciakomponensű feszültséget kapcsoltak. A deformálódó kristályok ismert hullámokat indítottak a kompozit lemezen, amelyek a hibás részeken áthaladva megváltoztak. A beépített szenzorok segítségével a mért és az eredeti jelek különbségéből következtetni lehet a hiba típusára. A nyúlásmérő bélyegek működéséhez hasonló eszköz hozható létre, ha elektromosan szigetelő kompozitba gyártás közben vezető fémhuzalt építenek. A terhelt alkatrészben a fémszál együtt nyúlik a környezetével, a hossz- és keresztmetszet-változás hatására változik az ellenállása, ezért a szál két pontja közti feszültségesés mérésével meghatározható a szerkezet deformációja, ugyanakkor a végtelen ellenállás a szál elszakadására, az alkatrész tönkremenetelére utal [4].

A kompozit anyag valamely tulajdonságát felhasználva intelligens, azaz a környezetük megváltozását érzékelni képes anyag hozható létre. A távközlésben alkalmazott optikai kábelek analógiájára az erősítésként használt üvegszál is alkalmazható fényjel továbbítására. A szálak sérülése esetén az átjutó fény mennyisége csökken, szakadáskor teljesen megszűnik, tehát a kilépő fény mérésével vizsgálni lehet a szerkezet integritását [5]. A beépített nyúlásmérő elvét más, elektromosan vezető anyaggal is alkalmazni lehet, így a kompozitok előállításához használt szénszál is alkalmas a folyamatos állapotfelügyelet megvalósítására. A mechanikai feszültség és a szál elektromos ellenállása közti kapcsolatot vizsgálva Owston [6] megállapította, hogy egyértelmű, lineáris összefüggés van e két érték közt. A szénszál vagy két szénszálköteg közti elektromos vezetőképességet a geometriai tulajdonságokon kívül környezetük más jellemzői is befolyásolják: Chung [7] kutatta az összefüggést az ellenállás-változás és a páratartalom, hőmérséklet, valamint nyomás között.

A folyamatos adatgyűjtés segítségével a szerkezet végzetes hibájának észlelésén kívül más fontos információ is gyűjthető: a szenzorok kalibrálása után a mért jel már kismértékű változásokkor következtetni lehet az alkatrész kihasználtságára, ezáltal elkerülhető a túlterhelésből adódó tönkrementel.

A cikk célja bemutatni egy újfajta roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárást, amely a kompozit szerkezetet alkotó anyagok elektromosan vezető tulajdonságára épít. Az eljárás fizikai háttere, hogy elektromosan szigetelő, üvegszál erősítésű epoxi mátrixú kompozitba helyezett vezető szénszálköteg ellenállása a nyúlás hatására megváltozik. Az így kapott szenzor alkalmas a folyamatos adatgyűjtésre, tehát a szerkezetben bekövetkező sérülések azonnali kimutatásán kívül lehetőség nyílik a vizsgált test bizonyos fizikai állapotváltozásának, például megnyúlásának meghatározására.

2. KÍSÉRLETI RÉSZ

Kísérleteink során először külön vizsgáltuk a szénszálköteg elektromos tulajdonságait, majd kompozit próbatestbe építettük. Az így előállított mintákat statikus terheléssel deformáltuk, és eközben mértük a szénszálköteg ellenállását.

Az alakváltozás és az ellenállás-változás közti kapcsolat kimutatásához először vizsgáltuk a szénszálköteg (ZOLTEK PX35 folyamatos száltekercs) elektromos tulajdonságait terheletlen és statikusan terhelt állapotban, Mastech MY-64 digitális multiméterrel. Az előkísérletek eredményeként megállapítottuk, hogy az 50 ezer elemi szálból álló köteg elektromosan vezető, hosszra fajlagosított ellenállása $0,6 \Omega/\text{cm}$. E fajlagos érték a vezető anyagokra jellemző Ohm törvénnyel összhangban nő, ha csökkentjük a szálak számát, azaz a keresztmetszetet, vagy növeljük a vizsgált hosszt [8]. ZWICK Z020 típusú szakítógépen 2 mm/perc szakítási sebességgel terheltük a szálköteget, és közben fém csatlakozók felhelyezésével, digitális multiméterrel vizsgáltuk az ellenállás-változást. A nyúlás közben mért értékek nem mutattak egyértelmű összefüggést a hosszváltozással, amelyet a csatlakozó és a szálak közti érintkezés esetlegessége, illetve a kezdetben nem egységesen megfeszített szálak nem azonos hosszváltozása okozhatott. A szálköteg szakadásakor az ellenállás jelentősen megnőtt, tehát a módszer be nem épített szálköteggként is alkalmas szálszakadás kimutatására.

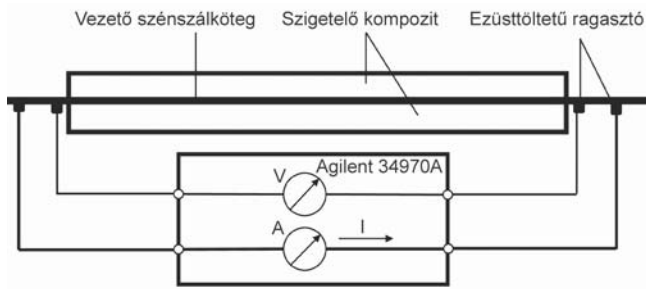
Az eljárás alkalmazhatóságának vizsgálatához a szálköteget szigetelő üvegszövet epoxi kompozitba (IPOX ER 1010 nagy viszkozitású gyantát IPOX MH 3124 térhálósítóval 100:34 arányban), hosszirányban építettük be. A térhálósítás idejére hőkezeltük 24 órán keresztül szobahőmérsékleten, majd 6 órán keresztül 60°C -on. Az elkészült próbatest méretei: 350 mm hosszú, 35 mm széles, 4 mm vastag, a darabok mindkét végén a szénszálkötegek $5\text{--}5 \text{ cm}$ -rel túllógtak. Egy próbatest keresztmetszeti képe látható a 2. ábrán, a felvétel OLYMPUS BX51M típusú optikai mikroszkóppal és C-5060 Camedia típusú digitális fényképezőgéppel készült.



2. ábra. Próbatest keresztmetszetének optikai mikroszkópos képe

A biztos és állandó elektromos kapcsolat érdekében a szálköteg szabad végeihez fémhuzalt ragasztottunk LOCTITE 3888 típusú, kétkomponensű, ezüstöltetű, elektromosan vezető ragasztóval, melynek hőkezelését 80°C -on végeztük 2 órán keresztül. A kísérletet 5 mm/perc statikus terheléssel ZWICK Z020 szakítóberendezéssel végeztük el, az ellenállást AGILENT 34970A adatgyűjtő berendezéssel, négyvezetékes módszerrel mértük (3. ábra).

A négyvezetékes mérés elve, hogy a berendezésen keresztül a két szélső vezetéken megadott áramot juttatunk át, míg a két középső vezetékkel mérjük a feszültségesést. Ezzel a módszerrel kiküszöbölhető a rendszer- és a kontaktellenállás zavaró hatása, illetve a kétvezetékes elrendezéshez képest a változásokra érzékenyebb ez a mérés [9].



3. ábra. Négyvezetékes mérési elrendezés

Az eredmények kiértékelésekor a nyúlást és a fajlagos ellenállás változást közös diagramban ábrázolva (4a. ábra) megfigyelhető az egyértelmű összefüggés a két érték között. Azonos időpillanathoz tartozó adatpárokat ábrázolva (4b. ábra) olyan kalibrálási diagramot kaptunk, amely segítségével meghatározható az úgynevezett bélyegállandó.

A fajlagos értékek összehasonlításakor a kezdeti, kis nyúlású szakaszhoz kvázi lineáris ellenállás változás tartozik, amely később progresszíven egyre meredekebb lesz. Az ellenállás megváltozásának kezdete és vége szignifikánsan egybeesik a terhelés kezdetével és végével, azaz a szén-szállkőteg vizsgálatával ki lehet mutatni a nyúlást.

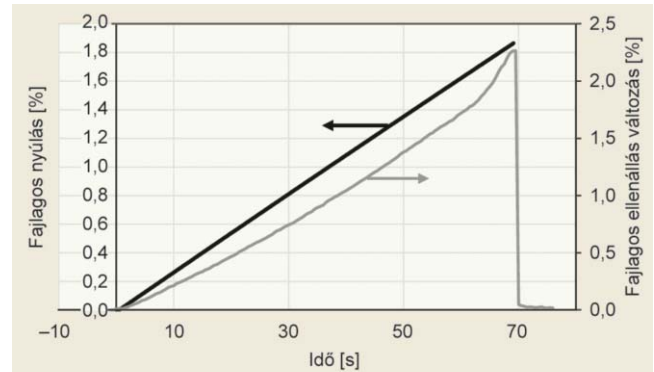
A nyúlásmérő bélyegeknél ismert bélyegállandó (K) az a viszonyszám, amely megmutatja az összefüggést a bélyegen mért ellenállás-változás ($\Delta R/R$) és a hosszváltozás (ϵ) között (1) [10]:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \epsilon = K \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

A bélyegállandó meghatározásának lépései a kalibrálási diagram alapján: lineáris összefüggést feltételezve a pontpárookra egyenes illesztése, az egyenes meredeksége megadja a K érték reciprokát, az illesztés pontossága az R^2 értékkel jellemezhető. A mérések során $K = 0,9397 \pm 0,0944$, illetve $R^2 = 0,9815 \pm 0,0130$ érték adódott.

A nyújtás megszüntetésével az ellenállás értéke a kezdeti érték közelébe tért vissza, de nem egyezett a kiindulási értékkel, hanem enyhén növekedett. Ez a hatás a polimerekre jellemző, ami a már kis nyúlásoknál is jelenlévő maradó alakváltozás okozta megnövekedett kezdeti hosszal magyarázható [11].

A kísérletek során előfordult, hogy a próbatest kicsúszott a befogópofák közül, ekkor a terheletlen állapotnak megfelelően a maradó alakváltozással megnövelt kezdeti hossza tért vissza. Az adatgyűjtő berendezés segítségével rögzítettük az ellenállás értékeket, amelyben hirtelen ugrás látható, az állandósult érték kicsivel nagyobb, mint a kezdeti érték volt (5. ábra).



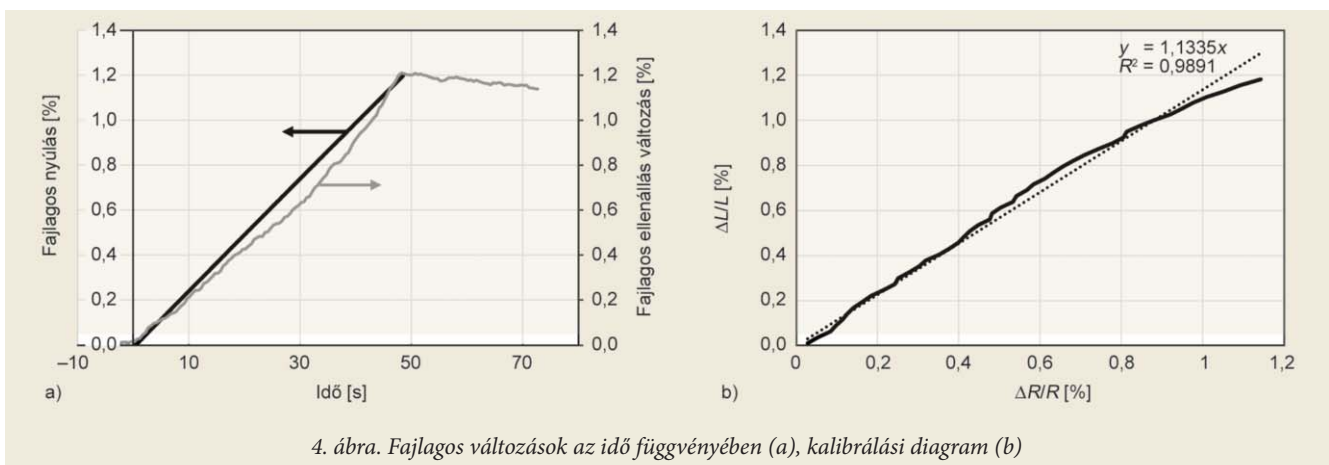
5. ábra. Fajlagos változások a próbatest megcsúszásakor

Az adatok elemzésekor megállapítottuk, hogy az ellenállás változása azonnal, az adatgyűjtő berendezés időbeli felbontásán belül követte a hirtelen deformáció-csökkenést. E változás egyértelmű jelzője lehet a hirtelen folyamatoknak, például jármű karosszériájába építve mutathatja az alkatrész vagy a rögzítés tönkremenetelét. A szenzor hibakimutatásra való használatkor ugyanakkor fontos a jó időlépés megválasztása: nagyon sűrű mintavételezés megnöveli a számítási kapacitást, túl nagy lépésekkor viszont hosszú idő telhet el a behatás és annak érzékelése között.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy kompozit szerkezeti elembe létrejövő repedés kimutatására a szén-szál elektromos tulajdonságát használtuk, ezáltal intelligens anyagot hoztunk létre. A szenzor működésének alapját először a szén-szállkőtegen végzett előkísérletekkel vizsgáltuk, ekkor megállapítottuk, hogy a szén-szállkőteg klasszikus vezetőként viselkedik, tehát hosszának vagy keresztmetszetének változtatásával arányosan változik a vizsgált szakasz ellenállása.

Ezután kompozit próbatesteket gyártottunk, és vizsgáltuk



4. ábra. Fajlagos változások az idő függvényében (a), kalibrálási diagram (b)

a szénzál ellenállásának alakulását statikus terhelés alatt. A szigetelő üvegszál-epoxi kompozitba épített szénzál ellenállás-mérés eredményeként megállapítottuk, hogy a fajlagos ellenállás-változás jó közelítéssel megegyezik a fajlagos nyúlás változásával. Az így kapott mérési elrendezés jellegében hasonlít a nyúlásmérő bélyegek működésére, viszont alkalmazásához nem szükséges külső érzékelő. A szénzál ellenállás változásához is hozzárendelhető bélyegállandó, amely segítségével a próbatest nyúlása meghatározható, ám ezen érték megállapításához kalibrálás szükséges. A szorító pofákból való kicsúszáskor tapasztalt jelenség alapján az elektromosan vezető szenzor nem csak statikus terhelések jelzésére, hanem hirtelen változások érzékelésére is alkalmas lehet, ehhez további vizsgálatok szükségesek.

A bemutatott szenzort összetettebb szerkezetekbe építve tehát megoldható a folyamatos állapotfelügyelet úgy, hogy nem szükséges a vizsgáló személyzetnek pontról pontra szemrevételeznie az alkatrészeket. Több, hálószerűen elhelyezett szénzálköteg segítségével létrehozható egy struktúra, ami több irányú deformációt is képes kimutatni, valamint sérülések, repedések pontos helyét is meg lehet határozni.

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

FELHASZNÁLT FORRÁSOK

- [1] Vavilov, V. P.; Billard, S.; Ayvazyan, V. M.: A thermal tomographic unit for testing composite materials, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 50, 679–683 (2014).
- [2] Arjyal, B. P.; Galotis, C.; Ogin, S. L.; Watthingham, R. D.: Monitoring local strain in cracked cross-ply composites using an embedded aramid fibre strain sensor, *Journal of Materials Science*, 33, 2745–2750 (1998).
- [3] Yam, L. H.; Yan, Y. J.: Online detection of crack damage in composite plates using embedded piezoelectric actuators/sensors and wavelet analysis, *Composite Structures*, 58, 29–38 (2002).
- [4] Salzano, T. B.; Calder, C. A.; Dehart, D. W.: Embedded-strain-sensor development for composite smart structures, *Experimental Mechanics*, 32, 225–229 (1992).
- [5] Fernando, G. F.; Hayes, S.; Liu, T.; Brooks, D.; Monteith, S.; Ralph, B.; Vickers S.: *In situ* self-sensing fibre reinforced composites, *Smart Materials and Structures*, 6, 432–440 (1997).
- [6] Owston, C. N.: Electrical properties of single carbon fibres, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 3, 1615–1626 (1970).
- [7] Chung, D. D. L.: Continuous carbon fiber polymer-matrix composites and their joints, studied by electrical measurements, *Polymer Composites*, 22, 250–270 (2001).
- [8] Lerner, L. S.: *Physics for scientists and engineers*, Jones and Bartlett, Boston (1996).
- [9] Heaney, M. B.: Electrical conductivity and resistivity, in 'Electrical measurement, signal, processing and displays' (Szerk.: Webster, J. G.), CRC Press, Boca Raton, 14. oldal (2003).
- [10] Hannah, R. L.; Reed, S. L.: *Strain gage users' handbook*, Elsevier Science Publishers Ltd and Society for Experimental Mechanics, London (1992).
- [11] Alger, M. S. M.: *Polymer science dictionary*, Chapman & Hall, London (1997).