



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

**KOMPOZIT SZERKEZETEK ÁLLAPOTELEMZÉSE OPTIKAI
MÓDSZEREKKEL
PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZETE**

KÉSZÍTETTE:

HEGEDŰS GERGELY

OKLEVELES IPARI TERMÉK- ÉS FORMATERVEZŐ MÉRNÖK

TÉMAVEZETŐ:

DR. CZIGÁNY TIBOR

EGYETEMI TANÁR

- 2019 -

1. Bevezetés

A kompozit eszközök fejlődése napjainkig töretlen, a szálerősítésű műanyagokat az élet szinte minden területén fellelhetjük. A pozitív tulajdonságaikat a felépítő anyagok célszerű megválasztásával előnyösen kiaknázzhatjuk a felhasználásnak megfelelően, így testre szabott (tailor-made) termékeket készíthetünk. 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 [9, 10]. Ezen kompozitok mindennapos használata számos megoldandó mérnöki feladatot jelent. A fémek homogén szerkezetével szemben a kompozitok felépítése sokkal összetettebb, ebből adódóan új módszereket kívánnak az alkatrészek méretezése, szerkezetoptimalizálása, gyártástechnológiája szempontjából is, amelyek jelentősen eltérnek a „hagyományos” fém alkatrészeknél használt eljárásoktól.

A kompozit szerkezet viselkedése az élettartama alatt eltér a fémek viselkedésétől. A fémszerkezetek jóval homogénebb anyagával ellentétben a kompozitok összetett szerkezetében terhelés alatt máshogy viselkedik a mátrix és az erősítőszál. A kompozit szerkezetek állapotismerete éppen ezért rendkívül fontos, ami magával vonzza a kompozitok állapotvizsgálatának új módszereit, és megköveteli a minél egyszerűbb roncsolásmentes, üzem közbeni (*in-situ*) elemzési módszerek kifejlesztését [8].

Az állapotelemzési eljárások nagy részéhez önálló, az alkatrésztől független berendezés szükséges, amelyekkel változó hatékonysággal lehet elemezni a termékek állapotát, de általában nem a felhasználás helyén, nem beszerelt állapotban és nem működés közben. Ezzel szemben a beépített hibafeltáró módszereknél a megváltozott szerkezeti reakció a kompozitba integrált szenzor által szolgáltatott jel változásából következtethető. Mivel a szenzor az alkatrészbe van beépítve, így működés közben is alkalmas folyamatos jeladásra, a jelek külső feldolgozásával az állapot folyamatos követésére. Szálerősítésű kompozitok esetében a szálerősítő elektromos vezetőképességét és az üvegszál fénytovábbító képességét lehetne erre kihasználni. A fényteljesítményének változásából következtetni lehetne a kompozit szerkezet állapotára.

A PhD munka eredményeként a céltom olyan költséghatékony optikai állapotelemző technológia alapjainak lefektetése volt, amely a kompozitok összetett szerkezetét kihasználva a kompozit szerkezetek roncsolásmentes, üzem közbeni állapotelemzésére szolgál. Céltom ezen szerkezeteknél a kritikus tönkremenetel előtt a jelen lévő deformációt folyamatosan kimutatni, mert ennek ismerete a felhasználók számára nagyfokú biztonságot nyújthat.

2. Az irodalom kritikai elemzése, célkitűzés

Alapvetően kétféle módszer lehetséges a polimer 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 feltárhatók a szerkezeten belüli belső hibák. Másik lehetőség a kompozit szerkezet összetettségét kihasználva szenzorokat beépíteni a szerkezetbe, majd következtetni az ezek által küldött jelekből a szerkezetben ébredő feszültségre, deformációra, és a szerkezet strukturális változásaira, akár működés közben is. A két eljárás hasznosan kiegészítheti egymást.

Beépített optikai szenzorokkal meg lehet figyelni a kompozit szerkezet teljes élettartama alatt, azon belül az életciklusának különböző szakaszaiban (laminálás, térhálósodás, formából való kiemelés, összeszerelés, használat) bekövetkező deformációkat, feszültségeket és az ebből eredő károsodásokat, hibákat. Az optikai szálak további előnye, hogy beépítésükkel nem romlanak számottevően 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.

Az irodalomkutatás alapján úgy gondolom, hogy a polimer kompozit szerkezetek állapotvizsgálatára a kereskedelmi forgalomban kapható beépített optikai állapotelemzési eljárások közül a Bragg-rácsokkal ellátott (FBG) szenzor alkalmazása lehet a legmegfelelőbb, mivel ez a módszer pontos deformáció-értékeket, megfelelő felbontást és érzékenységet tesz lehetővé. Ezek alapján indokoltnak látom, hogy FBG szenzorral előkísérleteket végezzek, és ezen a módszeren keresztül megismerkedjek a beépített optikai állapotelemzés területéhez tartozó eszközökkel, alkalmazási korlátokkal.

Bár az FBG szenzoros módszer laboratóriumi körülmények között gyakran használt eljárás, ennek ellenére költségérzékeny iparágakban (pl. járműipar) nem terjedt el, mert viszonylag bonyolult, drága rendszer beépítését teszi szükségessé. Irodalomkutatásom alapján úgy gondolom, hogy a távközlésben elterjedt üveg optikai szál, és a távközlési hálózatok jellemzésére használt optikai beiktatásos csillapításmérő gazdaságosabb megoldás lehet polimer kompozit szerkezetek állapotának vizsgálatára, habár ezt még egyetlen kutatói közösség sem vizsgálta. Ezek alapján kísérletet teszek az optikai üvegszál kompozitba való beépítésével, és a szál csillapításnövekedésének figyelésével gazdaságosan használható állapotelemzési rendszer fejlesztésére, a kompozit szerkezet feszültséggyűjtő helyeinek megfigyelésére. Ezt a kompozit szerkezetbe épített optikai szál mellett egy beiktatásos csillapításmérő berendezés alkalmazásával fogom elvégezni. Az optikai szál feszültséggyűjtő

helyekre beépítve a szál csillapításának megváltozása által elemezhető lehetne a kompozit deformációja, amellyel akár egy költséghatékony mérési módszer alapja is megteremtethető.

A kompozitba épített optikai szálak hátránya, hogy átmérőjük többszöröse a szerkezetben lévő erősítő szálakénak, környezetükben gyantadúsulás lép fel, emiatt a szerkezet integritását megbontják, és mechanikai tulajdonságait negatív irányban befolyásolhatják.

Bár a kompozitokat erősítő üvegszálak mind anyagukban, mind felépítésükben, mind gyártástechnológiájukban eltérnek a fényvezető optikai szálaktól, mégis egyes publikációk alapján különleges területen felhasznált gyantákba ágyazott, utólagosan eltávolított felületkezelő rétegű erősítő üvegszálkötegek fénytovábbításra alkalmassá tehetők. Azonban a felületkezelő réteg mellett, hogy összetartja a szálköteget és védelmet biztosít a szálaknak a szálgyártást követő feldolgozási lépésekben (pl. szövés), a szál mátrix közötti adhéziós kapcsolatot a legtöbb esetben nagymértékben erősíti, így eltávolítása csökkentheti a kompozit szerkezet teherbírását. Feltételeztem, hogy az erősítő üvegszövet kiválasztott szálkötegeinek előkészítése nélkül (sizing rétegének eltávolítása nélkül), jól megválasztott (kisebb törésmutatójú), általános célú mátrixanyag segítségével a szálon belüli fényterjedést biztosítani lehetne. Amennyiben a szálkötegen átjutó fény teljesítményének megváltozása és a folytonos üvegszál erősítésű polimer kompozit szerkezet mechanikai állapota között összefüggés mutatható ki, akkor ez egy olyan állapotelemzési módszer alapja lehet, amelyhez nem szükséges független szenzor beépítése, hanem maga az erősítőanyag láthatja el ezt a funkciót a kompozit szerkezet mechanikai tulajdonságainak megváltoztatása nélkül. Az erősítő üvegszálak ilyen módon történő felhasználása önérzékelő, multifunkcionális anyagot eredményezne, amelyben a szálak az erősítő funkción túl betöltenék az állapotelemző szenzor szerepét is. Ezen elméletileg lehetséges eljárások alkalmazhatóságát kísérletek útján kívánom bizonyítani.

Fentiek alapján PhD értekezésem célja:

- annak bizonyítása, hogy az üveg optikai szál és a távközlésben használt általánosan elterjedt eszközök (csillapításmérő, OTDR) alkalmazhatóak a kompozit szerkezet állapotvizsgálatához,
- annak bizonyítása, hogy a kompozitot erősítő üvegszálkötegek alkalmazhatóak a kompozit szerkezet állapotvizsgálatához, tönkremeneteli módjainak kimutatásához.

3. A kísérletekben felhasznált berendezések, anyagok

Mindegyik kísérletnél általánosan elmondható, hogy a terhelés mellett szerepelt egy megvilágítás és az átvitt fény valamely paraméterének megváltozását vizsgáló jelkiértékelő műszer, valamint az összekötésre szolgáló jeltovábbító egység.

Az optikai szál méréseknél az optikai szál egyik végénél fényforrás (AFL Telecommunications, OLS7 FTTH UCI illetve FlexScan, USA) segítségével 1550 nm hullámhosszúságú fényt csatoltam be, és a másik végén 0,01 dB felbontású csillapításmérő (AFL Telecommunications, OPM5-4D illetve FLX 380 OTDR, USA) készülékkel vizsgáltam a szálból kilépő fény teljesítményét terhelés alatt. Az optikai szál toldására száltörőt (Fujikura, CT-30, USA) és szálhegesztő berendezést (Fujikura, FSM 12 S, USA) használtam.

Az erősítő üvegszálköteg megvilágításaként - kísérletektől függően - kék, zöld, piros és fehér ledfényt (Cree, XLamp, XP-C LEDs, USA), HeNe lézert (Melles Griot, 25-LGP-193-230, UK), Nd:YAG lézert (Suwtech, dpgc-2250, USA), infravörös tartományú megvilágításhoz csillapításmérő berendezés fényforrását (AFL Telecommunications, OLS7 FTTH UCI illetve OLS7-3, USA) használtam. Az átvitt fény valamely paraméterének megváltozását vizsgáló jelkiértékelő műszerként - kísérletektől függően - USB mikroszkóp kamerát (Bresser, Németország), optikai teljesítménymérőt (Coherent, OP-2VIS, USA) lencserendszerre (Keyence, VH-Z100UR, Japán) csatlakoztatott nagysebességű kamerát (Keyence, VW-600M, Japán) és digitális mikroszkópot (Keyence, VHX-6000, Japán), spektrométert (Ocean Optics, USB 4000, USA), infravörös tartomány vizsgálatához csillapításmérő készüléket (AFL Telecommunications, OPM4-4D illetve OPM5-4D, USA), áramerősség mérővel kapcsolt fotódiodát (Hamatsu, S1133, Japán), illetve hőkamerát (FLIR A325sc, USA) használtam.

Egyes méréseknél a próbatestek erősítő üvegszálkötegét a jelforrással és kiértékelő egységgel az általam fejlesztett optikai csatlakozók segítségével polimer optikai szállal (külső átmérője $1500\pm 90\ \mu\text{m}$, magátmérője $1470\pm 90\ \mu\text{m}$, mag törésmutatója 1,492, Tru Components, VD-1500, Németország), illetve üveg optikai szállal (G.652.D monomódusú, $125\ \mu\text{m}$ külső- és $9\ \mu\text{m}$ mag átmérő, Corning, USA) kötöttem össze.

A próbatesteket szakítógépben (Zwick, BZ020/TN2S illetve BZ050/TH3A, Németország) terheltem. A keresztfej elmozdulásából számolt deformációs értékeket video extenzométerrel (Mercury Monet DIC, MCR050, Sobriety, Csehország) ellenőriztem, és annak szoftverével korrigáltam.

Felhasznált anyagok, próbatestek

Az optikai szálak kísérletekben felhasznált optikai szál G.652.D monomódusú, 125 µm átmérőjű üvegszál (Corning, USA), amelynek jellemzője, hogy 9 µm átmérőjű maggal rendelkezik, deformációra érzékenyebb, mint más típusú szálak, és merőleges szálvég kialakítású. A próbatest készítésénél egy, ill. két réteg [0/90] szövésű üvegszövetbe ($300 \pm 5\%$ g/m², RT 300 N, Kelteks, Horvátország) fűztem az optikai szálakat, és kézi laminálással mátrixanyagként telítetlen poliésztergyantát (AROPOL M105 TB, Ashland S.p.A., Olaszország) használtam, amihez hozzáadtam a gyártás során felhasznált gyanta tömegéhez viszonyított 1,5% iniciátort (PROMOX P200TX, PROMOX SRL, Olaszország), majd 24 órán keresztül térhálósítottam szobahőmérsékleten.

Az erősítő üvegszálak kísérletekhez katalógus szerinti 1,56-1,57 törésmutatójú, 2,62 g/cm³ sűrűségű, bórtmentes E-CR üvegszálköteget (Advantex T30 R25H-1200 TEX roving, Owen's Corning, Belgium), míg a kompozitba épített erősítő üvegszálköteg vizsgálatánál 1,56 törésmutatójú, 2,54-2,60 g/cm³ sűrűségű, E-üveg anyagú [0,90] vászon szövésű (vetülékirány 400 tex; láncirány 300 tex), 320 g/m²±6% területi sűrűségű üvegszövetet (STR 014-320-125, Krosglass, Lengyelország) használtam erősítőanyagként. Mátrix anyagként MR3012 epoxi gyanta (IpoX Chemicals, Németország) és a MH3122 térhálósító (IpoX Chemicals, Németország) 100:25 (törésmutatója 1,505) és 100:40 (törésmutatója 1,520) tömegarányú keverékét alkalmaztam.

A módszert befolyásoló tényezők feltárása érdekében gyantába építve az önálló üvegszálköteget is vizsgáltam, de célom volt olyan (multifunkcionális) kompozit próbatest létrehozása, ahol a szerkezetet alkotó folytonos erősítő üvegszövetből egy tetszőlegesen kiválasztott szálköteget használok fel szenzorként, így a szálköteg szerves része az erősítő szövetnek, nem abba különállóan befűzött elem. Ennek érdekében egy réteg, [0,90] szövésű erősítő üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegének két végét a szövetből kifűztem úgy, hogy a kifűzött részek között a vizsgálandó szakasz szövésben maradjon, és a kifűzött szálköteg mindkét végét általam fejlesztett optikai csatlakozóba vezettem. Az így előkészített, előfeszített szövetet és optikai csatlakozót kézi laminálással gyantával átitattam, szárítókamrában 70 °C-on 4 órán keresztül kitérhálósítottam, majd az elvégzendő vizsgálatról függően befogó fülekkel láttam el, illetve kompozit lemezre ragasztottam AcraLock SA 10-05 BLK (USA) típusú ragasztóval. Az érvéghüvelybe összefogott erősítő szálköteget minden esetben felpolíroztam (30; 6; 3; 1; 0,2 µm finomságú polírozó papírral), míg a szálak felülete optikailag megfelelően sima nem lett.

4. Összefoglalás

A szálerősített polimer kompozit termékek 95%-ánál üvegszál erősítést használnak. 2010 óta a termelés minden évben növekszik. Ennek a termelésnek az 1/3-át már most is a járműipar használja fel. A kompozit alkatrészek elterjedése a járműiparban megköveteli a szerkezeti elemek állapotának nyomon követését. Irodalomkutatásomban feltártam az állapotelemző eljárásokat, és besoroltam őket a direkt, indirekt, beépített és beépített optikai módszerek csoportjaiba. Dolgozatom célja volt polimer kompozit szerkezetek állapotelemzése optikai módszerekkel, ezért a beépített optikai módszereket részletesebben is bemutattam. Ezen állapotelemzési módszerek mikrodeformációk mérésére alkalmasak, de költséges eljárások.

Köszönhetően a nagy mennyiségű felhasználásnak, a távközlési optikai szálak és a hozzájuk kapcsolódó berendezések költséghatékonyra és könnyen elérhetővé váltak. Kutatásom során sikerült azon feltevésemet igazolni, hogy a polimer kompozitba épített monomódusú optikai szál megváltozott csillapításának mérésével következtetni lehet a szerkezet kezdeti, terhelésmentes állapotához képest bekövetkezett nyúlására, amely osztályozható bizonyos kategóriákon belül, még az optikai szál szakadása előtt. Bizonyítottam továbbá, hogy a polimer kompozit szerkezetekben létrejövő deformációk helye, helyei a távközlési hálózatok száltoldásainak ellenőrzésére használt OTDR berendezéssel kimutathatók.

Az optikai szálak beépítésének van egy hátránya: az optikai szál beépítésekor a szál mellett gyantában dús terület alakul ki, amely megbontja a kompozit alkatrész homogenitását, rontja mechanikai tulajdonságait és a tönkremenetel kiinduló pontja lehet. Bár a kompozit alkatrészt felépítő erősítő üvegszálak mind kialakításukban, mind gyártástechnológiájukban eltérnek az optikai szálaktól, de mérésekkel bizonyítottam, hogy megfelelően kiválasztott, általános célú mátrixanyagban és speciális előkészítés nélkül is képessé tehetőek fény továbbítására. Mérésekkel igazoltam, hogy a szálköteg optikai tulajdonságát a fajlagos csillapítással lehet jellemezni. Bizonyítottam, hogy az erősítő üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegének megvilágításával és a szálkötegből kilépő fény teljesítményének vizsgálatával következtetni lehet az igénybevétel irányára, és mérni lehet a terhelés hatására fellépő nyúlást is. Vizsgálatokkal igazoltam, hogy a megvilágított szálköteg alkalmas a kompozit szerkezet károsodásának (szálszakadás, szál-mátrix elválás) kimutatására is. Bemutattam, hogy a kompozit szerkezetet alkotó erősítő üvegszál *in-situ* szenzorként is használható, ami multifunkcionális, önérzékelő kompozitot eredményez, így megtakarítható a szerkezet integritását befolyásoló további állapotelemző szenzor beépítése.

5. Tézisek

A következőkben egy-egy bekezdésben bemutatom és összefoglalom az egyes vizsgálatok során elért eredményeket és azok hátterét, ami alapján általánosítva, tömören megfogalmaztam az eredményekhez kapcsolódó téziseimet.

Kimutattam, hogy a kompozitba épített, távközlésben használatos üveg optikai szál csillapítására, azaz fényáteresztő képességének csökkenésére a kompozit deformációja hatással van. A kompozit nyúlásának növekedésével az optikai szál csillapítása is növekszik. A jelenség felhasználásával és csillapításmérő berendezés segítségével új módszert dolgoztam ki beépített optikai szál tartalmazó üvegszálerősítésű, telítetlen poliészter mátrixú kompozit szerkezetek állapotvizsgálatára. Kimutattam, hogy a kompozitba épített üveg optikai szál csillapításának változása alapján a megnyújtott szerkezet deformációs állapota kategorizálható: (1) megfelelő, (2) kiegészítő vizsgálatra szorul és (3) kritikus. Mérésekkel igazoltam, hogy adott hosszúságú beépített optikai szálszakasz esetén meghatározható az a maximális csillapításváltozás, amelynél a kompozit szerkezet relatív nyúlása nem haladja meg az 1%-ot, míg nagyobb csillapításváltozás esetén a kompozit szerkezet relatív nyúlását célszerű kiegészítő méréssel vizsgálni. 1 dB-nél nagyobb csillapításváltozás esetén a kompozit szerkezet kritikus deformációs állapotba lép. A csillapításváltozás oka, hogy az optikai szál adhéziósan kapcsolódik a mátrixhoz, és így a kompozit alkatrész nyúlásával az optikai szál is nyúlik, ami csökkenti a szál fényáteresztő képességét, azaz növeli a csillapítását. Állításomat telítetlen poliészter mátrixú, üvegszövet erősítésű kompozitba ágyazott, G.652.D egymódusú üveg optikai szállal és beiktatásos csillapításmérővel igazoltam, és az alábbi tézisben fogalmaztam meg:

1. Tézis

A polimer kompozitba beépített egymódusú üveg optikai szál segítségével és a távközlési hálózatok ellenőrzésére használt beiktatásos csillapításmérő berendezés alkalmazásával a kompozitok deformációs állapota a megfelelő, a kiegészítő vizsgálatra szorul és a kritikus kategóriákba besorolható [2, 7, 11].

Kimutattam, hogy erősítőanyagként használt általános üvegszálköteg és epoxi gyanta (amelynek törésmutatója kisebb az üvegszál törésmutatójánál) alkotta kompozitban a szálköteg alkalmas a fény továbbítására. A szálköteget adott gyantarendszerbe építve, adott hőmérsékleten és megvilágítási hullámhosszon az optikai szálakhoz hasonlóan jellemezni lehet fajlagos csillapításával (amely független a szálköteg hosszától és a fény becsatolásának minőségétől), és az alábbi összefüggéssel számolható:

$$\alpha_{(\lambda, T)} = 10/L * \lg (P_2/P_1)$$

ahol $\alpha_{(\lambda, T)}$ [dB/m] a fajlagos csillapítás (adott λ hullámhosszon és T hőmérsékleten), P_2 [W] a szálkötegből kilépő, a szálköteg teljes hosszán mért fénytjeljesítmény, P_1 [W] a visszavágott szálkötegen mért kilépő fénytjeljesítmény és L [m] a szálköteg teljes- és a visszavágott hossza közötti távolság.

Vizsgálataimmal kimutattam, hogy a szálköteg fajlagos csillapítása a különböző hullámhosszokon nagymértékben változik. Az optikai szálakkal ellentétben az erősítő szálköteg fajlagos csillapítása 542 nm hullámhosszúságú (zöld színű) megvilágításnál a legkisebb (~0,14 dB/mm) és az infravörös tartományban nem teszi lehetővé az optikai hálózatok ellenőrzéséhez használható (IR tartományban működő) eszközök alkalmazását.

Állításomat 1,520 törésmutatójú 100:40 tömegarányú, és 1,505 törésmutatójú 100:25 tömegarányú MR3012:MH3122 epoxi gyantarendszerbe ágyazott 1,560 törésmutatójú E-CR üvegszálköteg vizsgálatával és 450-720 nm-es tartományon belül és 1310, 1490, 1550 és 1625 nm hullámhosszon végzett mérésekkel igazoltam, ami alapján az alábbi tézist fogalmaztam meg:

2. Tézis

A polimer kompozitok erősítőanyagaként használt üvegszálköteg nálánál kisebb törésmutatójú általános célú gyantába építve, speciális előkészítés nélkül is (felületkezelő rétegének eltávolítása nélkül) alkalmassá tehető fény továbbítására, és ezen tulajdonsága adott hullámhosszon, adott hőmérsékleten jellemezhető a fajlagos csillapítással [1, 4, 6].

Kifejlesztettem egy eljárást és a hozzá tartozó eszközöket, amelyek segítségével a kompozitok erősítőanyagául szolgáló üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegének végei optikai csatlakozóba foglalhatók és optikai minőségűre felpolírozhatók. Az optikai csatlakozók segítségével a szálköteg végei közvetlenül vagy optikai kábel közbeiktatásával a megvilágítást szolgáltatató fényforráshoz, illetve a jelkiértékelő egységhez ismétlődően kapcsolhatók, így a szálköteg elemi szálai megvilágíthatók, és az elemi szálakból kilépő fény teljesítménye mérhető. Ehhez 542 nm-hez közeli hullámhosszúságú monokróm megvilágítást, 1,5 mm külső átmérőjű polimer optikai kábelt és teljesítménymérő készüléket célszerű alkalmazni. Vizsgálatokkal bizonyítottam, hogy az alkalmazott eljárással kiküszöbölhető a megvilágításból érkező direkt fény zavaró hatása, és csak a megvilágított elemi szálak által továbbított fény befolyásolja a szálkötegből kilépő fény teljesítményért. A kifejlesztett eljárás lehetővé teszi a kompozit szerkezet erősítő szövetéből tetszőlegesen kiválasztott üvegszálköteg megvilágítását, ezáltal ezt az üvegszálköteget alkalmassá teszi szenzorként való felhasználásra, így a kifejlesztett eljárás segítségével multifunkcionális, önérzékelő kompozit hozható létre. Állításomat 100:40 tömegarányú, MR3012:MH3122 epoxi gyantarendszerbe ágyazott üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegének vizsgálatával igazoltam, és az alábbi technológiai tézisben fogalmaztam meg:

3. Tézis

A polimer kompozitokat alkotó erősítő üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegébe a fény becsatlakozható, és a szálköteg elemi szálain kilépő fény teljesítménye mérhető az alábbi lépésekből álló módszerrel:

- az üvegszövetből tetszőlegesen kiválasztott folytonos szálköteg két végét ki kell fűzni úgy, hogy a szálköteg vizsgálandó szakasza a szövetben maradjon.
- a kifűzött szálköteget adott keresztmetszetű optikai csatlakozón belülre kell pozícionálni a fény be- ill. kicsatolásához úgy, hogy a be- és kicsatolásnál a szálköteg tengelye szöget zárjon be egymással (csatlakozóként akár érvéghüvely is alkalmazható).
- a gyantával átítatott, csatlakozón belüli szálköteg elejét és végét optikai minőségűre kell polírozni.
- a csatlakozó belső átmérőjénél nagyobb magátmérőjű, két végén polírozott polimer optikai szál a fényforráshoz, ill. a teljesítménymérőhöz és a szálköteg csatlakozójához elmozdulásmentesen kell rögzíteni [1, 3-5, 12, 13].

Az irodalomkutatásban bemutatott publikációk arról számolnak be, hogy egy mátrixba épített, megvilágított, önálló roving terhelésénél a szálköteg végén kilépő fény teljesítménye maradandóan csökkent. Ezt a jelenséget a kutatók a szálköteg károsodásával, illetve az annak környezetében megjelenő hibahelyekkel magyarázták. Mérésekkel bizonyítottam, hogy a kompozit erősítő üvegszövet bármely tetszőlegesen kiválasztott, megvilágított szálkötegének végén kilépő fény teljesítménye változik a kompozit károsodását nem okozó terhelésnél is, és a terhelés megszűnte után a kilépő fény teljesítménye visszaáll kezdeti, terhelés előtti állapotára. Ebben az esetben nem a szálköteget alkotó elemi szálak és a szálak környezetének károsodása (szakadás, rétegelválás), hanem a terhelés hatására az ép szálakból kicsatolódnó fénymennyiség változása okozza a szálak végén kilépő fény teljesítményének megváltozását. Ennek oka, hogy az üvegszövet megvilágított szálkötegeből a fény nagymértékben ki tud csatolódnani az öt keresztező szálkötegeknél. Ha a keresztező szálkötegek közötti összeszorító erő nő (pl. húzás vagy a szálak tengelyére merőleges nyomás esetében), és ezáltal a távolságuk csökken, a megvilágított szálkötegből a keresztező szálnál kicsatolódnó fényteliesség is nő, ami a szálköteg végén kilépő fényteliesség csökkenését eredményezi. Ezzel ellentétben, ha a keresztező szálkötegek egymáshoz képesti kapcsolata lazul (szálak tengelyével párhuzamos nyomás esetén), akkor kevesebb fénymennyiség tud kicsatolódnani a megvilágított szálkötegből az öt keresztező szálkötegeknél, így a megvilágított szálköteg végén kilépő fényteliesség növekedik.

Állításmat 100:40 tömegarányú, MR3012:MH3122 epoxi gyantarendszerbe ágyazott egy rétegű üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegének vizsgálatával igazoltam, és az alábbi tézisben fogalmaztam meg:

4. Tézis

Polimer kompozitok erősítő üvegszövetének tetszőlegesen kiválasztott és megvilágított szálkötegeből kilépő fény teljesítményének mérésével a kompozit károsodását nem okozó deformáció kimutatható. Ennek oka, hogy terhelés hatására az erősítő szövet egymást keresztező szálkötegeinek távolsága változik, ami befolyásolja a megvilágított szálkötegből a kereszteződésekénél kicsatolódnó, és ezáltal a szálköteg végén kilépő fény teljesítményét [3, 4].

Mérésekkel bizonyítottam, hogy az üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötege nem csak a deformáció, hanem a kompozit test károsodásának elemzésére is alkalmazható. A kompozit szerkezet megvilágított szálkötegének szakadása esetén az elszakadt elemi szálakból a fény kilép a szakadás helyén, ezért a szálak a fényt nem tudják továbbítani, és a szálköteg végén kilépő fény teljesítménye lecsökken nullára. Ez azonosítható a kilépő fény megszűnésével, míg a megvilágított szálköteg részleges szakadása megjelenik a kilépő fény teljesítményének maradék csökkenésében (bár tönkremenetelt okozó terhelésnél jellemzően a szálköteg elemi szálai a másodperc tört része alatt egymás után elszakadnak). Részleges szakadás esetén a szálköteg végéről készült mikroszkópos felvételeken egyértelműen azonosítani lehet olyan elemi szálvégeket, amelyek ragyogása megszűnt a szakadás hatására.

Kimutattam, hogy a szál-mátrix elválást okozó terhelés is a szálköteg végén kilépő fényteljesítmény maradék csökkenését eredményezi. Ennek az az oka, hogy a terhelés hatására megjelenő mikro- és makroszintű károsodások a megvilágított szálkötegből kicsatoló fényteljesítmény növekedését, és ezáltal a szálak végén kilépő fény teljesítményének maradandó csökkenését okozzák. A szál-mátrix elválás hatására a megvilágított szálköteg végéről készített mikroszkópos felvételen az elemi szálak ragyogása nem szűnik meg, de azok erőssége a kezdeti homogén állapothoz képest megváltozik. Megjelennek jobban és kevésbé fénylő szálvégek, ami a mátrixnak a vizsgált szálkötegről való leszakadására, vagy rétegelválásra utal. Állításomat 100:40 tömegarányú, MR3012:MH3122 epoxi gyantarendszerbe ágyazott egy rétegű üvegszövet tetszőlegesen kiválasztott szálkötegének vizsgálatával igazoltam, és az alábbi tézisben fogalmaztam meg:

5. Tézis

A polimer kompozit szerkezetek erősítő üvegszövetének tetszőlegesen kiválasztott szálkötege felhasználható károsodáselemzésre, mivel a terhelés hatására megjelenő mikro- és makroszintű hibák a megvilágított szálköteg végén kilépő fény teljesítményének maradandó csökkenését okozzák. Ez a jelenség a fényvezetőként használt szálvégek mikroszkópos vizsgálatával kiegészítve felhasználható szálszakadás és szál-mátrix elválás kimutatására is [5, 6, 13].

6. Saját publikációk

- [1] Hegedűs G., Sarkadi T., Czigány T.: Analysis of the light transmission ability of reinforcing glass fibers used in polymer composites. *Materials*, 10, 637/1-637/9 (2017). IF=2,467
- [2] Hegedűs G., Czigány T.: Analysis of the applicability of optical fibers as sensors for the structural health monitoring of polymer composites: the relationship between attenuation and the deformation of the fiber. *Sensors and Actuators A: Physical*, 272, 206-211 (2018). IF=2,311
- [3] Hegedűs G., Sarkadi T., Czigány T.: Self-sensing polymer composite: White-light-illuminated reinforcing fibreglass bundle for deformation monitoring. *Sensors*, 19, 1745 p8 (2019). IF=2,475
- [4] Hegedűs G., Sarkadi T., Czigány T. Multifunctional composite: Reinforcing fibreglass bundle for deformation self-sensing. *Composites Science and Technology*, 180, 78-85 (2019). IF=5,160
- [5] Hegedűs G., Sarkadi T., Czigány T.: Self-sensing composite: Reinforcing fibreglass bundle for damage detection. *Composite Structures*, benyújtva, bírálat alatt (2019). IF=4,101
- [6] Czigány T., Forintos N., Hegedűs G.: Health monitoring of high performance polymer composites with multifunctional fibers. In 'ICCM-21: 21st International Conference on Composite Materials, Kína, Xi'an' 3153/1-3153/8 (2017).
- [7] Hegedűs G., Czigány T.: Developing a glass fibre sensor for polymer technology applications. *Institute of Physics (IOP) Conference Series: Materials Science and Engineering*, 426, 012015 (2018).
- [8] Hegedűs G., Czigány T.: Kompozit termékek állapotelemzési módszerei. *GÉP*, 67, 98-103 (2016).
- [9] Péter B., Hegedűs G., Czigány T.: T-RTM eljárással gyártott alkatrészek gyártási folyamatának kihívásai, különös tekintettel az erősítőanyagok kezelésére. *GÉP*, 68, 37-42 (2017).
- [10] Óri Z., Semperger O., Hegedűs G., Molnár P.: Gyártástechnológiai fejlesztés nagy komplexitású, hőre lágyuló mátrixú kompozit előállítására. *Polimerek*, 4, 123-128 (2018).
- [11] Hegedűs G., Czigány T.: Optikai szálak alkalmazása polimer anyagvizsgálatokhoz. in 'XXV. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2017, Kolozsvár, Románia' 175-178 (2017).
- [12] Hegedűs G., Czigány T.: Polimer kompozit termékek komplexitását kihasználó üvegszál érzékelő csatlakozójának fejlesztése. in 'XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2018, Marosvásárhely, Románia' 179-182 (2018).
- [13] Hegedűs G., Czigány T.: Sérülés helyének megállapítása kompozit szerkezetekben az üveg erősítőanyag felhasználásával. in 'XXVII. Nemzetközi Gépészeti Konferencia OGÉT 2019, Nagyvárad, Románia' 189-192 (2019).

Budapest, 2019

