



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

HLIVA VIKTOR

PHD ÉRTEKEZÉS TÉZISFÜZET

KOMPOZIT SZERKEZETEK RONCSOLÁSMENTES
ÁLLAPOTJELLEMZÉSE DIGITÁLIS KÉPKORRELÁCIÓ
SEGÍTSÉGÉVEL

Témavezető:

Dr. Szabó Gábor

Egyetemi docens

BUDAPEST, 2023

1. BEVEZETÉS

A XXI. században a szálerősítésű polimer kompozitok, mint szerkezeti anyagok kutatása és ipari felhasználása növekvő tendenciát mutat, amely főleg azok nagy fajlagos szilárdságának és merevségének köszönhető. Manapság a mindennapi életünk során is találkozhatunk kompozit tömegtermékekkel, tipikus példa erre otthonunkban a fürdőkád, a villamos kötődobozok, az elektromos kéziszerszámok borítása, a nyomtatott áramkörök hordozó lemezei és számos autóiipari alkatrész is.

Nem elvitatva a fent említett tömegtermékek fontosságát, de értekezésemben, a szűk értelemben vett polimer kompozit termékekre koncentrálok, amelyek jellemzően nagy terhelésnek kitett és nagy értékű, főleg végtelenszál erősítésű szerkezetek, mint számos repülő, helikopter, tömegközlekedési és versenysporteszköz teherhordó szerkezete, valamint a tengeri szélerőművek akár 100 méter hosszú lapátjai is.

A kompozitok egyik komoly hátránya, hogy túlterhelés esetén katasztrofális, azaz hirtelen, szinte előjel nélküli, teljes tönkremenetelre képesek. Ezt tovább súlyosbítja, hogy a gyártásból származó tökéletlenségek, valamint az üzemeltetés során felhalmozódó hibák és sérülések csökkenthetik a szerkezet maximális teherbíró képességét, így az eredetileg névlegesnek számító terhelés, akár túlterhelt állapotot is okozhat. Egy ilyen módon bekövetkező baleset nemcsak jelentős anyagi károkkal jár, de emberi életet is követelhet. Ezért elengedhetetlen a biztonság szempontjából kritikus szerkezetek időszakos állapot ellenőrzése. Ezzel azonban az a probléma, hogy a szerkezeti hibák detektálása ugyan lehetséges a rendelkezésre álló technikákkal, azonban a kompozitok összetett tönkremenetele nagymértékben megnehezíti a maradó tulajdonságok és élettartam előrejelzését.

A kompozitok katasztrofális tönkremenetelének elkerülése érdekében jelenleg jelentősen túltervezik a szerkezeteket, ami növeli azok súlyát és gyártási költségeit is. Egy másik megoldás lehet a katasztrofális tönkremenetel elkerülésére a kompozitok szívósságának növelése, amely napjainkban szintén intenzíven kutatott téma. Azonban a túlterhelés továbbra is a szerkezet már visszafordíthatatlan károsodásával járna, amelyet követően elkerülhetetlen a sérült alkatrész cseréje, ami költséges és időigényes. Előnyösebb lenne tehát megelőzni a tönkremenetelt, amelyhez az szükséges, hogy a kritikus szerkezeti sérülések még időben kerüljenek felderítésre és kijavításra, valamint lehetséges legyen a maradó teherbírás nagy pontosságú becslése.

Adott volt tehát az igény az állapotbecslő módszerek fejlesztésére, amelyre válaszul egy digitális képkorreláción alapuló állapotbecslő módszer alapjait fektettem le, amely bizonyos megkötések mellett képes megbecsülni a kompozit szerkezeti integritását és a részleges károsodás után kialakuló maradó tulajdonságokat. Képes továbbá megfelelni a kor követelményeinek: gyors, pontos, automatizálható, az emberi tényező kizárható, skálázható, végeselemes szimulációkkal összehasonlítható és integrálható a meglévő minőségellenőrzési rendszerekbe is.

2. SZAKIRODALOM ELEMZÉSE ÉS CÉLKITŰZÉS

A nagyteljesítményű, végtelen szállal erősített, sűrűn térhálós polimer kompozitokra jellemző károsodási formák áttekintése után arra a következtetésre jutottam, hogy számos hiba elkerülhető megfelelő tárolási és gyártási minőségbiztosítás mellett, ezért értekezésemben nem ezekre kell megoldást találnom. Nem elkerülhető probléma azonban a használat során kialakuló hibák halmaza, azon belül is a rétegelválás jellegű tönkremeneteli formát találtam a legkritikusabbnak, hiszen amellet, hogy számos módon kialakulhat a szerkezetben, nagymértékben csökkentheti annak teherbírását, sőt gyakran teljesen rejtve marad a jelenléte. A mérnöki alapanyagok közül a kompozitok a legnehezebben vizsgálhatók, mert inhomogén, anizotróp, réteges szerkezet jellemzi őket. Az anyagcsalád térnyerése azonban megköveteli, hogy egyre hatékonyabb vizsgálati módszerekkel legyen biztosított a használatuk, a katasztrofális tönkremenetel elkerülése érdekében.

A legelterjedtebb roncsolásmentes módszerek (non-destructive test, NDT) áttekintése alapján kijelenthető, hogy nincs egy univerzális vizsgálati technika, amely az összes típusú hiba kimutatására, minden körülmény mellett alkalmas lenne. Minden egyes módszernek meg vannak az előnyei és a hátrányai a többihez képest. A fejlesztési irány meghatározásához összehasonítottam a kompozitokhoz használt NDT módszereket az általam legfontosabbnak ítélt szempontok alapján (**1. táblázat**). Az egyik vizsgált szempont a módszer flexibilitása, a másik, hogy a hiba milyen szintű jellemzését lehet megvalósítani a módszerrel.

A flexibilitás, több szempont alapján értékelhető, például a vizsgálható tartomány mérete alapján, amely lehet korlátozott vagy skálázható. Itt fontos felmerülő kérdés, hogy a vizsgált terület növelésével romlik-e a pontosság. A flexibilitás jellemezhető azzal is, hogy a vizsgáló berendezés mobilis vagy helyhez kötött.

Az alkalmazás szempontjából fontos, szintén a flexibilitással kapcsolatos tulajdonság, a vizsgált alkatrész hozzáférhetőségének igénye, azaz, hogy hány oldalról kell hozzáférni a vizsgált területhez és szükséges-e azt a vizsgálóeszközzel megérinteni. Hasonlóan fontos megfontolás, hogy használható-e ipari környezetben vagy laborkörülményeket kell biztosítani a működéséhez.

Módszer	Flexibilitás			Hiba kimutathatóság		
	Vizsgált tartomány mérete	Helyszín/mobilitás	Hozzáférhetőség igény	pozíció	alak	súlyosság
SHM szenzorok	skalázható+	beépített	beépített	+	-	-
Röntgen tomográfia	behatárolt terület (kicsi) -	helyhez kötött -	teljes --	++	++	++
Röntgen átsugárzásos vizsgálat	vizsgálati idővel együtt növelhető +	mobilis +	kétoldalról -	+	+	+
Ultrahangos vizsgálat	vizsgálati idővel együtt növelhető +	mobilis +	legalább egy oldalról érintés -	++	++	+
Infravörös termográfia	skalázható ++	mobilis ++	érintésmentes ++	+	+	-
Shearográfia	vizsgálati idővel együtt növelhető +	mobilis +	magát a berendezést hozzá kell érinteni a vizsgálati tárgyhoz -	+	+	-
DIC	skalázható ++	mobilis ++	érintésmentes ++	+	+	-

1. táblázat Az elterjedt NDT módszerek flexibilitásának és hiba jellemzésének összehasonlítása

A második szempontnál, hogy az adott vizsgálati módszer milyen szintű hiba jellemzést biztosít, a felsorolt NDT módszereknél az első szintet, azaz, hogy képes a hiba jelenlétének kimutatására, alapvetésnek vettem. A következő szinteken információ áll rendelkezésre a hiba pozíciójáról, a hiba alakjáról, végül a hiba súlyosságáról, ezek találhatóak meg a táblázatban. A hiba súlyosságának megállapítása kezdődhet azzal, hogy a módszer képes elkülöníteni esztétikai és szerkezeti hibát, de a fejlesztések célja, hogy az adott módszer képes legyen a szerkezet maradó szilárdságának meghatározására, amely alapján meghatározható, hogy az adott alkatrész még elfogadható állapotban van vagy javítani, vagy cserélni kell. Minél pontosabb az állapotbecslő módszer, annál kisebb biztonsági tényezők használata szükséges a szerkezeti hiba veszélyességének és a maradó tulajdonságok megállapításakor. Amennyiben a módszerrel a hibák nagy biztonsággal még azelőtt kimutathatók lennének, mielőtt azok problémát okoznának, akkor a szerkezet tervezése során használt biztonsági tényező is csökkenthető lenne, amely hatékonyabb és fenntarthatóbb szerkezetet eredményezne.

Véleményem szerint az ipari alkalmazás szempontjából az lenne előnyös, ha például egy ütött hiba egy oldali vizsgálatával, a jól hozzáférhető, ütött oldal vizsgálatával, érintésmentes módon, nagy hatékonysággal kimutatható lenne, továbbá a vizsgálati módszer egyúttal képes lenne megbecsülni a hiba súlyosságát is. Az **1. táblázatot** megvizsgálva azt találtam, hogy nagy szükség lenne egy új eljárásra, amely az optikai vizsgálati módszerek előnyeit (érintésmentesség, gyorsaság, mobilitás, skálázhatóság stb.) felhasználva, képes az optikai vizsgálatokra nem jellemző módon, a hiba mélységét, a hiba veszélyességét, a szerkezet maradó szilárdságát is megbecsülni. Erre eddig csak olyan vizsgálatok voltak képesek, mint a lassú, érintést és kapcsoló anyagot igénylő ultrahangos vizsgálat, illetve a drága, helyhez kötött és fix vizsgálotérrel rendelkező komputertomográf (CT) berendezés.

Az optikai vizsgálatokat áttekintve, a digitális képkorreláció (digital image correlation, DIC) módszer keltette fel a figyelmem, mert ez az egyetlen, ahol mind a vizsgálati gerjesztés, mind a vizsgált tárgy gerjesztésre adott válasza mechanikai jellegű. A gerjesztés ismert mechanikai terhelés, például húzás. A válasz, a felületi nyúlásmező változása, amely kapcsolatban van a szerkezet integritásával. A megnevezett gerjesztés és válasz nagy előnyei, hogy egyszerűen értelmezhetőek és vége-selemes szimulációval validálhatók.

A DIC vizsgálatokat legtöbbször pontos nyúlásmérésre vagy a roncsolással járó vizsgálatok esetén a tönkremenetel mélyebb elemzésére használják. Bizonyos kutatásoknak a tönkremenetel szempontjából kritikus helyek meghatározása volt a célja, amelyhez a kiugró nyúlásértékeket és a nyúlásmező hirtelen változásait használták. Más kutatások és ipari alkalmazások során a szimulációs eredményeik validálása volt a cél. Az említett kutatások során a vizsgálatok nagy terhelési szinteken valósultak meg, ahol a hibák már a terjedés szakaszában voltak. Ezzel szemben a DIC vizsgálat, mint a polimer kompozitok roncsolásmentes hibakereső és állapotbecslő alkalmazási formája még gyerekcipőben jár, nincsenek rá szabványok. A kapcsolódó kisszámú szacikket bemutattam a DIC vizsgálatokra vonatkozó fejezetben.

A szakirodalmi elemzés alapján PhD értekezésem fő céljaul egy optikai nyúlásmérés alapú NDT módszer (NDT-DIC) kifejlesztését tűztem ki a végtelenszál erősítő polimer kompozitok rétegelválás jellegű hibáinak kimutatására, pozíciójuk meghatározására (1. tézis).

Ehhez számos alcélt kellett teljesítenem, kezdve a mérés menetének és elrendezésének kialakításától, a vizsgálati paraméterek és a felületi előkészítés optimalizálásán keresztül, a rétegelválás jellegű hibák felületi nyúlásmezőre és a szerkezeti szilárdságra gyakorolt hatásáig.

Céлом volt bebizonyítani, hogy a módszer működik különböző technológiákkal gyártott, különböző alapanyagokból és rétegrenddel készült kompozitok esetén. Céлом volt a különböző rétegelválás-kialakítási technikák és különböző terhelések tesztelése is. Ezeket az előkísérleteim és főkísérleteim során meg is tettem.

A DIC vizsgálathoz mechanikai terhelésre van szükség, amit valamilyen szempont alapján le kellett korlátoznom, annak érdekében, hogy kvázi roncsolásmentes vizsgálatot tudjak megvalósítani. Ennek egyik eleme, hogy nagyon kis terheléseket használtam, például akkorát, mint ami a kezdeti rugalmassági modulus meghatározásához szükséges, ahol elméletileg csak pillanatnyi rugalmas deformáció ébred a térhálós anyagban. Másrészt egy másik NDT módszert, az akusztikus emisszió (AE) módszert is alkalmaztam a DIC kiegészítő vizsgálataként, a roncsolásmentes határ megállapítására. Az alcélok teljesítése, illetve az új vizsgálati módszer alkalmazhatósági feltételeinek és korlátainak a megismerése vezetett az 1. tézishez.

A 4.1-4.5 fejezetekben a fóliainzerttel előidézett tiszta rétegelválás nyúlásmezőre gyakorolt hatását (2. tézis) kutattam. Ez a módszer biztosította ugyanis a legkontrollálhatóbb és reprodukálhatóbb rétegelválás kialakítását, amely elméletileg mentes volt egyéb hibáktól és azok esetleges nyúlásmezőt torzító hatásaitól.

A rétegelválások hatását szükséges volt megismerni, ugyanakkor azok a gyakorlatban általában más tönkremeneteli formákkal együtt jelennek meg, például a nehezen észrevehető ütött sérülés (barley visible impact damage, BVID) esetén. A 4.5 fejezettől már a BVID sérülést tartalmazó kompozitok vizsgálatára fókuszáltam. Ehhez először definiálnom kellett miben különbözik a BIVD a tiszta rétegelválástól (3. tézis), ezután kerülhetett sor a BVID sérülés súlyosságbecslő módszerének kialakítására (4. tézis).

Mind a tiszta rétegelválás, mind a BVID esetén az NDT-DIC vizsgálatot összevetettem egy konkurens optikai technikával is, az infravörös termográfia (infrared thermography, IRT) módszerrel, annak érdekében, hogy bizonyítsam, hogy a fejlesztéssel előre mozdítottam a roncsolásmentes állapotbecslés tudományának jelenlegi állását.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

Ebben a fejezetben felsorolom a kísérleteim során felhasznált kompozitok alapanyagait. Bemutatom továbbá a használt vizsgáló berendezéseket, röviden ismertetem működésüket és megadom a munkám során alkalmazott beállításokat.

3.1. Felhasznált alapanyagok

Erősítő anyagok

- E 220 (Saint-Gobain Vertex s.r.o., Litomyšl, Csehország) biaxiális üvegszövet (zsákszövésű, felületi tömeg: 220 g/m²),
- Sigratex C W200-PL1/1 (SGL Technologies GmbH., Meitingen, Németország) biaxiális szénszövet (zsákszövésű, felületi tömeg: 200 g/m²),
- PX35FBUD030 (Zoltek Zrt., Nyergesújfalú, Magyarország) unidirekcionális (UD) szén kelme (felületi tömeg: 309 g/m²), amely Panex35 50k-s rovingokat tartalmaz.

Mátrix anyagok

- IPOX MR 3012 (IPOX Chemicals, Budapest, Magyarország) alifás epoxigyanta (viszkozitás 25 °C-on: 100–200 mPa·s) és IPOX MH 3124 amin-bázisú térhálósító komponens (viszkozitás 25 °C-on: 80–120 mPa·s). Keverési tömegarány 100:40, a gyártó ajánlása szerint.
- Araldite LY 1564 (Huntsman International LLC, Monthey, Svájc). (viszkozitás 25°C-on: 1200-1400 mPa·s) és Aradur 3487 amin- bázisú térhálósító komponens (viszkozitás 25 °C-on: 30-70 mPa·s). Keverési tömegarány 100:34, a gyártó ajánlása szerint.

Rétegelválás jellegű hiba mesterséges kialakításához felhasznált anyagok

- Politetrafluoretilén (PTFE) fólia (0,1 mm) (PEMŰ Zrt., Solymár, Magyarország),
- PTFE fólia (15 µm) (Airtech International Ltd., California, USA),
- Polietilén-tereftalát (PET) fólia (0,2 mm) (Kovács és Társa Kft., Budapest, Hungary),
- Formula Five Mold leválasztó viasz (Rexco, Conyers, USA).

3.2. Vizsgáló berendezések és alkalmazásuk

Hőkamera

Az infravörös termográfia méréseket a FLIR A325sc (Teledyne FLIR LLC, Wilsonville, Oregon, USA) típusú hőkamerával és a hozzá tartozó FLIR ResearchIR szoftver segítségével végeztem. A berendezésben található vanádium-oxid detektor 14 bites, 320 px × 240 px képek készítésére volt képes, amely a 18 mm-es integrált lencserendszerrel és az alkalmazott 600 mm vizsgálati távolsággal 0,615 mm/px

felbontást biztosított. A hőkamera hullámhossz érzékelési tartománya 7,5 - 13,0 μm , két pixel között a legkisebb megkülönböztethető hőmérséklet-eltérés 50 mK, valamint a hőmérséklet mérés pontosság ± 2 K.

A hőkamerát mérés előtt kalibráltam, ahol figyelembe vettem a labor hőmérsékletét és páratartalmát, a reflexiós hőmérsékletet, az anyagra vonatkozó illesztési paramétert és a kamera távolságát a mért felülettől. A mérendő felületre merőlegesen helyeztem el a kamerát egy állványon. A vizsgálatot úgy végeztem, hogy utótérhálósítást követően, a 80 ± 2 °C-os próbatesteket (min. 4 óra hőntartás kemencében) az elindított kamera elé helyeztem, amely 7 kép/s sebességgel felvételt készített a szobahőmérsékletre való lehűlés folyamatáról. Az eredmények kiértékelése egyrészt összehasonlításos alapon történt, azaz megjelenik-e a kameraképen a referenciától szignifikánsan eltérő, a rétegelválásra jellemző lokális hőmérséklet-különbség. Másrészt kvantitatív módon is történt, amikor a kameraképen szoftveresen elhelyeztem egy, a mesterséges hibán keresztülhaladó mérő egyenest, amelynek minden egyes pixeléhez hőmérséklet adat rendelődik, így egy, a sérülésre jellemző hőmérsékletgörbe nyerhető ki, amelynek az eltérését vizsgáltam a sérülésmentes referencia görbétől.

Univerzális anyagvizsgáló gép

A próbatestek mechanikai vizsgálatait Zwick Z250 (Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Németország) típusú szakítógépen végeztem, amelynek sebességtartománya 0,001 – 600 mm/perc, terhelhetősége pedig 250 kN. A roncsolásmentes mérések során 20 kN-os mérőcellát és 20 kN terhelhetőségű satu befogópofát használtam. A szakítóvizsgálatokhoz 250 kN-os mérőcellát és 50 kN terhelhetőségű ékpályás befogópofát használtam. A húzó vizsgálatokat nyúlásvezérelt módon végeztem. Az eredményeket a berendezéshez tartozó Zwick TestXpert II 3.41 szoftverrel rögzítettem és MS Excelben értékeltem ki. A szakítógépet a DIC által mért próbatest megnyúlás alapján érdemes vezérelni, ezért összekötöttem a két berendezést. Így a szakítógép szoftvere nem a keresztfej elmozdulást, hanem a DIC-szoftverből átvett nyúlásértékeket rendelte az erőértékek mellé. A keresztfej sebességét, a próbatest geometriáját és így a befogási távolságot is többször változtattam a kísérletsorozatok célja szerint, ezért ezeket a paramétereket kísérleti részben közöltem a különböző mérések leírásában.

Optikai nyúlásmérés

Az optikai nyúlásméréshez a Mercury Monet 3D típusú (Sobriety, Kurim, Csehország) optikai nyúlásmérő berendezést használtam. A berendezés 2 db 5 megapixel (Mpx) felbontású, maximálisan 60 Hz képrögzítési frekvenciára képes ipari kamerát, 2 db 25 mm-es objektívet, 2 db nagyteljesítményű fényt kibocsátó dióda (light-emitting diode, LED) fényforrást és egy számítógépet (Intel Core i7-7700K processzor, 32 GB RAM, Patriot Hellfire 480 GB M.2 SSD) foglalt magába, amelyen a Mercury RT-v2.6 szoftver futott. A mérési összeállításához felhasználtam továbbá 2 db

háromlábú kameraállványt. A DIC berendezést kettébontva, 2 db 2D DIC egységként használtam, azaz egy háromlábú állványra egy objektívvel felszerelt kamerát és egy LED fényforrást szereltem fel. A 2 db egységet a szakítógépek két oldalán helyeztem el, úgy, hogy a kamerák a szakítógépek befogópofái közé rögzített próbatestek egy-egy oldalára nézzenek.

Hardveres beállítások: A kamerák a próbatest felületére merőlegesen néztek 340 mm távolságból, a próbatestek geometriai közepére. Az objektívek rekeszméretét f/5,4-re állítottam, amely megfelelő mélységélességet és elég fényt biztosított az érzékelőnek a méréseim során. A fókuszt az objektíveken található fókuszyűrűkkel állítottam be a szoftverben megtalálható fókuszbéllítő algoritmus segítségével.

Szoftveres beállítások: bekapcsolt megvilágítás mellett, szoftveresen állítottam a záridőt, ami 0,25 ms volt, ezáltal éles képet kaptam a terhelés hatására alakváltozó próbatestről. A mintavételi frekvenciát, vagyis a felvételek készítésének sebességét 10 Hz-re állítottam, amely elégségesnek bizonyult az 1-2 mm/perc terhelési sebességű mechanikai vizsgálatok hatásának követésére, ugyanakkor az 1-2 perces vizsgálatok alatt rögzített adatok tárhely igénye és feldolgozási ideje is az elfogadható, 1-10 perces tartományban maradt.

Ezt követően kalibráltam a kamerákat egy szabványos kalibráló lemez és a szoftver utasításainak segítségével. A használt kalibráló lemez osztása 5 mm volt. A kalibrálás során elkészült képsorozatból a szoftver automatikusan korrigálja a lencsék torzítását és kiszámítja az elrendezés felbontását a vizsgálati síkban. A szoftver a felbontást sajátosan jelöli, például 0,194 mm/px, ami azt jelenti, hogy egy pixel oldalhossza 0,194 mm, azaz 5,15 px van egy mm hosszon.

Kalibrálást követően felhelyeztem a próbatest felületére a virtuális vizsgáló szondákat. A szondák egy vagy több vizsgálati pontból állnak. Az egyes vizsgálati pontokhoz a szoftver vizsgáló ablakokat rendel, amely alapján azonosítani tudja azokat a különböző képeken. A vizsgálati pontok egymáshoz képesti távolságát és a vizsgálóablakok méretét lehet beállítani, amely paraméterek változtatásával kísérleteztem. Végül méréseimhez 40 px x 40 px méretű ablakot, a vizsgálópontok közötti 10 mm távolságot használtam.

A következő szoftveres alapbeállítások lényegesen módosítják a képkorrelációs eredményeket, ezért ezeket vizsgálataim során sosem változtattam, az alábbi, az előkísérletek alapján meghatározott beállításokon hagytam minden esetben: 0,2-es konfidencia-intervallum, ami azt jelenti, hogy a talált pont 95 %-os valószínűséggel a vizsgált terület $\pm 0,2$ px-es zónájába esik; teljes affin transzformáció, amely az elmozdulás négy típusát hordozza magában: a translációt, a nyúlást, a nyírást és a forgatást; nagysebességű üzemmód, azaz egy pont keresése csak az eredeti helyzet közvetlen környezetében történik, nem a teljes képen, így gyorsabb a számítás.

AE vizsgálat

Az AE jeleket Sensophone AED404-Streamer (Geréb és Társa Műszaki Fejlesztő Kft. Budapest, Magyarország) eszközzel és két Micros30s (Physical Acoustic Corporation, Princeton Junction, USA) típusú mikrofonnal gyűjtöttem, amelyek működési

frekvenciatartománya 150-400 KHz, csúcs érzékenysége 65 dB. Az adatokat a SENSOPHONE AED64.v19 akusztikus-emissziós szoftvercsomag segítségével értékeltem ki.

A kétmikrofonos elrendezés előnye, hogy nemcsak a terhelés hatására a kompozit próbatestben felszabaduló akusztikus energia időbeli alakulása, de a mikrofonok távolsága és a kompozitban érvényes hangterjedési sebesség tudatában az adott energiaforrás helyzete is meghatározható. Tehát a hiba aktív terjedése mellett, a hiba hozzávetőleges helyzete is meghatározható.

Egy általános mérésre a következőképpen készültem fel: a mérés megkezdéséhez a próbatesteket az anyagvizsgáló gép befogópofái közé rögzítettem, majd csipeszek segítségével a rendelkezésre álló helyet a lehető legjobban kihasználva, rögzítettem a mikrofonokat a próbatesten. (Eltérő méretű próbatesteknél eltérő volt a mikrofonok távolsága, amelyet az adott vizsgálat leírásánál ismertetek.) A mikrofonok és a próbatest közé minden esetben megfelelő mennyiségű csatoló anyagot, Oxett szilikonzsír (T-silox Ltd., Budapest, Magyarország) juttattam. Minden mérés során a maximális 100-400 kHz vizsgálati határfrekvencia tartományt, a minimum 5 ms holtidőt, 25 dB küszöbszintet használtam. A szoftverben rögzítettem a mikrofonok egymáshoz képesti koordinátáit, majd a szoftverbe beépített algoritmus segítségével meghatároztam a próbatestben a hangterjedési sebességet, ami az anyagtól, rétegtől, mikrofonleszorító erőtől is függ, értéke: 2000 - 4000 m/s közöttire adódott. Szintén egy, a szoftverbe épített algoritmus segítségével kimértem a próbatestre jellemző csillapítást is. A SENSOPHONE szoftvert összekapcsoltam az anyagvizsgáló berendezés szoftverével, így a mechanikai mérés elindításával együtt elindult az AE mérés is, így a vizsgálatok időben össze voltak hangolva.

A szakítógépből és befogásból származó zajok kiszűrése érdekében teszteltem a négymikrofonos elrendezést is, ahol két mikrofon a lineáris lokalizációért, amíg a másik két mikrofon őr üzemmódban a vizsgált területen kívülről érkező jelek kiszűréseért felelt. Nem tapasztaltam szignifikáns eltérést a beérkező jelek minőségében és mennyiségében a két-, és a négymikrofonos elrendezés között, ezért a kétmikrofonos elrendezést használtam vizsgálataim során.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A munkám célja egy digitális képkorreláción alapuló, a polimer kompozitok állapotbecslésére alkalmas vizsgálati módszer kifejlesztése volt. Az új módszer sajátossága, hogy az optikai vizsgálati módszerek előnyeit (érintésmentesség, gyorsaság, mobilitás, skálázhatóság stb.) megtartva, a konkurens optikai vizsgálatokra nem jellemző módon, a hiba mélységét, a hiba veszélyességét, a szerkezet maradó szilárdságát is képes megbecsülni bizonyos megkötések mellett. Erre eddig csak olyan vizsgálatok voltak képesek, mint a lassú, érintést és kapcsoló anyagot igénylő ultrahangos vizsgálat, illetve a drága, helyhez kötött és fix vizsgálati térrel rendelkező CT berendezés. Az új módszer további előnye, hogy a DIC, mint optikai nyúlásmérő módszer már régóta ismert és elfogadott technika, általában a pontos nyúlásmérésre és a tönkremeneteli folyamatok elemzésére használják. Azonban a dolgozatban bemutatott új módszer segítségével egy új alkalmazási terület válik elérhetővé, a kompozitok roncsolásmentes állapotbecslése. Minthogy a DIC berendezés alapfelszerelésnek számít az anyagvizsgálatokkal foglalkozó laboratóriumokban, így az új módszer használata gyorsan elterjedhet és a hozzá tartozó tudásbázis gyorsan növekedhet. Megjegyzem, az állapotbecslési problémák komplexitása miatt egyetlen módszer nem jelenthet megoldást minden helyzetben, de a bemutatott új módszer a jövőben kiemelt helyet kaphat a roncsolásmentes hibakereső módszerek között.

Az új vizsgálati módszer alapjainak lefektetéséhez először is kidolgoztam egy reprodukálható módszert a mesterséges, tiszta rétegelválás kialakítására a kompozit próbatestekben, amelyen a DIC méréseket végeztem. A tiszta rétegelválást formaleválasztó viasszal kezelt duplán egymásra helyezett PTFE fóliák segítségével értem el, amelyet az előre meghatározott rétegek közé helyeztem a rétegrend felépítése alatt. Különböző típusú próbatestekben más-más mélységben alakítottam ki a rétegelválást, így megvizsgálhattam a módszerem hibakimutató képességét különböző mélységű hibák esetén is.

Az előkísérletek során kialakítottam az NDT-DIC mérési elrendezést, továbbá meghatároztam a vizsgálati ajánlott hardveres és a szoftveres beállításokat. A legfontosabb szoftveres paraméter a vizsgált felületben elhelyezett vizsgálópontok távolsága volt. A paraméter optimalizálását a végeselemes analízis elemméret konvergencia tesztjének analógiájára végeztem el. Meghatároztam az optimum beállításokat a lehető legnagyobb pontosság eléréséhez, figyelembe véve a számítási időt és az adat tárolási igényt. Azt tapasztaltam, hogy a hatékony és reprodukálható vizsgálat szempontjából nagyon fontos volt a próbatestek felületi előkészítése. Ezért mikroszkóppal megvizsgáltam különböző próbatestek felületi mintázatait. Kimértem a különböző mintázatokra jellemző festékfoltok méret eloszlását, a fehér és fekete területek arányát, és összevettem ezeket a DIC vizsgálatokhoz szükséges beállítási paraméterekkel és a vizsgálat során tapasztalt jelenségekkel. Ez alapján számszerűen meghatároztam, hogy milyen mintázat kialakítást kell használni a további vizsgálatokhoz.

Az NDT-DIC vizsgálathoz alkalmazandó vizsgálati terhelést a roncsolásmentes tartományban kell tartani. Ennek biztosítéka, hogy olyan kis vizsgálati terhelést alkalmazását írtam elő, amely nem eredményez nagyobb nyúlást, mint amely az anyag rugalmassági modulusának meghatározásához is szükséges. Ez egy szakítóvizsgálat esetén a nyúlásgörbék kezdeti, teljesen lineáris szakasza, ahol a térhálós polimernél elméletileg csak a pillanatnyi rugalmas deformáció komponens jelenik meg. Minthogy minden anyag és rétegrend más-más erőterhelést képes elviselni a vizsgált nyúlástartomány eléréséhez, egyszerűbb egyből nyúlásterhelésben meghatározni a vizsgálati terhelési határt. Ez nem jelentett problémát, mivel DIC-val egyébként is nagy pontossággal mértem a próbatest megnyúlását, sőt, ez alapján vezéreltem a szakítógépet is.

A roncsolásmentes terhelési határ ellenőrzésére/bizonyítására AE vizsgálatokat végeztem. Ismert, hogy a kompozitok tönkremenetele alatt nagyon nagyszámú akusztikus esemény detektálható, például egy kompozit próbatest teljes tönkremenetele alatt körülbelül 10 000 eseményt rögzítettem. Ehhez a nagy számhoz képest az NDT-DIC vizsgálat során 0,3 % nyúlásterhelésig 1,5 mm/perc terhelési sebességgel ~300 db esemény, amíg 1 mm/perc terhelősebességgel ~30 db esemény keletkezett, amely a teljes tönkremenetelhez képest elhanyagolható, rendre 3 % és 0,3 %. Amennyiben a tönkremenetelt nem az eseményszámmal, hanem azok kumulált energiájának elemzésével végezném, akkor még kisebb károsodási arányt kapnék, hiszen az egyre nagyobb nyúlástartományokban bekövetkező tönkremenetek általában nagyobb energiát is adnak le, így az általam vizsgált tartomány eseményei még jelentéktelenebbek. Ennek ellenére megvizsgáltam, hogy a roncsolásmentes határ előtt beérkező jelek milyen tönkremenetelből származhatnak, és kísérlettel bizonyítottam, hogy mátrixrepedések és szál-mátrix szétkapcsolódások lehetnek. Nagyon ritkán fordult elő a nagyfrekvenciájú eseményhez kapcsolt szálszakadás, de ilyen terhelési szint mellett az elszakadó szálak egyébként is előre megfeszített vagy gyenge szálak lehettek, amelyek a termék használata során is alacsony terhelés mellett szakadnának el. Fontos kiemelnem, hogy a 0,3 % vizsgálati nyúlásterhelés előtt bekövetkező kisszámú tönkremeneteli események nem azt jelentik, hogy a hiba terjed, hiszen a vizsgálati terhelést szinten tartva a kezdeti események után az események száma nem nőtt, tehát az anyag/szerkezet hosszútávon stabilan elviselte ezt a terhelést. Ezzel szemben például 0,4 % megnyúláson tartva a próbatestet folyamatosan új események jelentek meg az AE vizsgálat során, ami azt jelenti, hogy a hiba terjedt, a szerkezet nem képes stabilan elviselni a terhelést. Ez alapján kijelenthető, hogy sikerült egy olyan vizsgálati terhelési határ definiálása, amely alatt a hibakereső DIC vizsgálat kvázi roncsolásmentesnek tekinthető.

A különböző mélységben a tiszta rétegelválásokat tartalmazó próbatesteket nem csak a valóságban, de végeselemes környezetben is elkészítettem. Kijelenthető, hogy a DIC mérések és a szimulációk jellegre egymáshoz hasonló felületi nyúlásmező mintázatokat eredményeztek. Ez azt jelenti, hogy a DIC vizsgálatokkal minőségileg validáltam a rétegelválás létrehozásának módját a végeselemes környezetben,

másrészt a későbbi DIC vizsgálatok validálhatók és kiegészíthetők a szimulációkkal. Azt tapasztaltam, hogy a rétegelválás mérete és mélységi helyzete nagymértékben módosította a kompozit szerkezet felületére kijutó hiba hatását: mind a nyúlásmező értéktartománya, mind a nyúlásmező mintázata megváltozott. Bemutattam és bizonyítottam egy teóriát a vizsgált és szimulált felületi nyúlásmezők különböző mélységben elhelyezett rétegelvadásokat jellemző mintázatával kapcsolatban. Eszerint, a tiszta rétegelválás azért mutatható ki a nyúlásmező mintázatából, mert a rétegelválás az adott próbatestet lokálisan két aszimmetrikus félre bontja, amelyek nem együtt mozognak a vizsgálati terhelésre. Így feszültséggyűjtő élek alakulnak ki a rétegelválás szélein, valamint az élek közti területre hajlító, csavaró, nyíró igénybevétel jelenhet meg, ami miatt a rétegelválás feletti terület nyúlása is nőhet.

A mért nyúlásmezőket összevetve analitikus számításokkal megállapítottam, hogy tiszta rétegelválás esetén a kapcsoló elemek miatti kialakuló konvencionálistól eltérő deformáció nagysága befolyásolja a hiba kimutathatóságát. A kapcsoló elemekre a rétegrend mellett az anyagi tulajdonságok, valamint a rétegvastagság van hatással, ezért megvizsgáltam ezek hatását a hiba kimutathatósága szempontjából. Az anyagi tulajdonságok szempontjából a nagy merevség és az anyagi modulusok közötti nagy eltérés az előnyös, például kompozitoknál a szén UD kelmével erősített rétegek ilyenek. A rétegvastagság növelése, ugyan növelte a kapcsolóelemek értékét, ellenben a kompozit szilárdságát is, amelyeknek így egymással ellentétes hatásuk volt a hibakimutatás szempontjából.

Megállapítottam, hogy fix beállítási paraméterek mellett az NDT-DIC módszert alkalmazva, a tiszta rétegelválás jelenlétének megállapítására elegendő a nyúlásmező értéktartományát elemezni, hiszen önreferencia vagy referencia próbatest alapján meghatározható egy nyúlásmező-értéktartomány, amelytől való eltérés a hiba jelenlétére utal. A hiba jellemzésére (méret és mélység) azonban a nyúlásmező mintázatát szükséges elemezni.

A tiszta rétegválási hibák vizsgálata után, a használat során keletkező nehezen észrevehető ütött hibák vizsgálatába fogtam, hiszen azok is tartalmaznak rétegelvadásokat, amelyek a további terhelés hatására tovább terjedhetnek, veszélyeztetve a szerkezeti integritást. A mesterséges hibákat műszerezett ejtősúlyos berendezéssel alakítottam ki a kompozit próbatestekben, amelyeken ezután ismét DIC AE és IRT vizsgálatokat végeztem. Ütött próbatestek nyúlásmezőjében a kapcsoló elemek hatása helyett, a sérülés környékén megváltozott teherviselő képesség alakítja dominánsan a felületi nyúlásmező mintázatot. Megfigyelhetők voltak az aktív, azaz a terhelést hordó, áthidaló és az inaktív, azaz a terhelést felvenni nem, vagy csak részben képes területek. Bevezettem két károsodásjelző és -jellemző indikátort. Az X indikátor a nyúlásmező átlag és maximum értékének a különbsége, az Y indikátor a nyúlásmező átlag és minimum értékének a különbsége a vizsgált terhelési szinten. Az indikátorok egymáshoz képesti alakulása vagy egy referencia próbatesten mért indikátorhoz való hasonlítása alapján kimutatható a szerkezeti hiba jelenléte. A terhelés növekedésével az indikátorok értéke is nő, és egyre hangsúlyosabbá válik az indikátorok hiba jelenlétére utaló aszimmetrikus viselkedése. Ez azt jelenti, hogy nagyobb terhelési

szinteken adott hiba jobban detektálható, továbbá azt is, hogy kisebb méretű hiba detektálása nagyobb terhelési szinteken valószínűbb, de természetesen a terhelés nem emelhető a roncsolásmentes nyúlástartomány fölé. Erős korrelációt találtam a bevezetett X indikátor és az ütési energia, illetve a maradó szilárdság csökkenése között. Ez lehetőséget biztosít a hiba súlyosságának jellemzésére, amely kiemelkedővé teszi az NDT-DIC vizsgálatot a konkurens optikai vizsgálatokkal szemben.

Fontosnak tartottam az NDT-DIC mérési eredmények összehasonlítását egyéb, az iparban már elfogadott NDT módszerekkel. A tiszta rétegelválás és az összetett BVID hiba felületi nyúlásmezőre gyakorolt hatásait is nagy hatékonysággal jelezte az NDT-DIC vizsgálat a próbatestek mindkét oldaláról. Az AE alapú lokalizáció működött nagy terhelés mellett a tönkremenetel helyének megbecslésére, azonban ez nem egy roncsolásmentes hibakereső vizsgálat. Abban az esetben, amikor az AE kiegészítő vizsgálat volt az NDT-DIC vizsgálatnak, a kis terhelés miatt szignifikánsan kevesebb jel állt rendelkezésre, ezért az események forrása csak a próbatesteken felvett nyúlástérképekkel összevetve vált értelmezhetővé. Az AE jelek forrása egybevágtott a DIC által kijelölt aktív zónák helyzetével, de önállóan használva ilyen terhelési szinten nem lehetne lokalizálásra használni az AE-t.

Amíg a DIC vizsgálat estén a rétegelválás modellezésére a rétegrendbe beépített fóliát tiszta rétegelválásnak lehetett tekinteni, addig az IRT vizsgálat szempontjából inkább zárványnak számított, amelynek termikus tulajdonságai túl közel állnak az alap kompozit anyaghoz, így a hagyományos IRT nem is bizonyult hatékonynak a hiba kimutatására. A BVID hibák esetén, bizonyos becsapódási energia felett, az ütési energia növelésével nőtt a hiba kimutathatósága is az IRT-vel. Ez a károsodott területen megjelenő repedések, törések által megnövelt hőleadó felület miatt volt. Hátrány viszont, hogy ezek a roncsolt területek általában csak az ütés hátoldalán jelennek meg, amely a gyakorlatban nem mindig hozzáférhető, így véleményem szerint az IRT hibakimutató képessége alulmaradt a DIC módszerhez képest, amely akár alacsonyabb energiával kialakított BVID hibákat is mindkét oldalról beazonosított.

5. TÉZISEK

Ebben a fejezetben főbb tudományos eredményeimet ismertetem négy tézis formájában.

1. Tézis

Kidolgoztam egy digitális képkorreláción alapuló roncsolásmentes szerkezeti hibakereső módszert (NDT-DIC), amely alkalmas végtelenszál erősítésű kompozitokban rétegelválás jellegű károsodások külső terhelés hatására létrejövő kis deformációk (pl. 0,15 % megnyúlás) melletti kimutatására.

A kis deformáció, ami kvázi roncsolásmentes vizsgálatot biztosít, számszerűen eltér a különböző anyagokra ezért meghatározása a mérési módszer része. A károsodás jelenlétének kimutatására és lokalizálására bevezettem egy, a referencia nyúlásmezők maximumaiból képzett nyúlási határértéket. Bemutattam, hogy a határérték feletti nyúlással rendelkező, az átlagos vizsgálati terheléshez képest szignifikánsan túlterhelt, nem teljes szerkezeti integritású felületek kijelölhetők, és ezek egybe esnek az ismert pozíciójú és kiterjedésű mesterségesen beépített hibával. [1-4]

2. Tézis

Bizonyítottam, hogy tiszta rétegelválás mélységi helyzete meghatározható egy ismert rétegrendben az NDT-DIC módszerrel az alapján, hogy a hibával kettébontott lemezek merevségi mátrixainak (ABD mátrixainak) kapcsoló elemeinek nagysága a felületi nyúlásmező értéktartományát, az elemek egymáshoz képesti aránya pedig a nyúlásmező mintázatát befolyásolja.

Azonos rétegvastagság mellett a nagyobb kapcsolóelemek nagyobb nyúlástartományt eredményeznek, azaz nagyobb hiba kimutathatóságot tesznek lehetővé. A rétegvastagság növelése növeli a kapcsolóelemek értékét, ugyanakkor megjelenik egy dominánsabb ellentétes hatás, a kompozit laminátum merevsége nő, ami összességében csökkenti a nyúlásmező értéktartományát, ami csökkenti a hiba láthatóságát. A kapcsolóelemek aránya a nyúlásmező mintázatát alakítja ki, ezzel a hiba mélységi helyzete határozható meg egy ismert rétegrendben. A hibahelyek képi értékelésében segíthet egy referencia képsereg elkészítése, ami a beazonosíthatóságot könnyíti. [5, 6]

3. Tézis

Kísérletekkel bizonyítottam, hogy NDT-DIC módszerrel megkülönböztethető a tiszta rétegelválás és a nehezen érzékelhető ütött sérülés (BVID) a nyúlásmező mintázata és értéktartománya alapján.

A BVID ütött oldalról való vizsgálata egyedi, más hibával nem összekeverhető nyúlásmező mintázatot eredményez. Az ütés helyén a károsodásra utaló nagynyúlású tartomány van, a terhelés irányban a nagynyúlású tartomány két oldalán inaktív, azaz az átlagostól kisebb nyúlást szenvedő részek vannak, hiszen a terhelés átadása csak

részben valósul meg az adott irányba. A terhelésre kereszt irányban pedig a nagynyúlású rész mellett az átlagostól nagyobb megnyúlású zónák figyelhetők meg a BVID-re jellemző nyúlásmezőben, hiszen ezek veszik fel a sérült részre jutó terhelést. Ezzel szemben a tiszta átmenő rétegelválás esetén elsősorban az ABD mátrix kapcsoló elemei felelősek a vizsgálati terhelésre kialakult nyúlás mintázatért. Azonos vizsgálati terhelés esetén a hasonló méretű BVID hibára jellemző nyúlásmező értéktartománya nagyobb, mint ugyanazon típusú kompozit tiszta rétegelválást tartalmazó párjánál. Ennek oka, hogy a BVID-ben összetett károsodási formák jelentősebb hatásúak, mint a tiszta átmenő rétegelválásban a kapcsoló elemek hatása. [5,7]

4. Tézis

Kidolgoztam egy eljárást, ami kapcsolatot teremt a NDT-DIC módszerrel vizsgált próbatest felületi nyúlásmezőjéből származtatott, az ütött hiba súlyosságát jellemző X_y indikátor és a szilárdság veszteség között. Az X_y indikátor a vizsgált nyúlásmező maximum és átlag nyúlásértékek különbsége, ahol az y a vizsgálati nyúlásterhelést adja meg (pl. $X_{0,15}$ a 0,15% nyúlás terhelésre adott indikátor értéket jelenti).

Az eljárás első lépéseként ismert energiájú ütésekkel károsított próbatestek vizsgálatával felállítható egy, az ütési energiákat és szilárdságcsökkenéseket tartalmazó adatbázis, ami a második lépésben ismeretlen energiájú ütést elszenvedett kompozitok szilárdságcsökkenésének becslésére alkalmas az X_y indikátor értéke alapján.

Bemutattam, hogy a vizsgált $[0, 90, 45, -45, -45, 45, 90, 0^\circ]$ kváziizotóp rétegrendű, szénszálalás epoxi kompozit esetén, a bevezetett indikátor értékei és a szilárdságcsökkenés között a roncsolásmentes tartományban (0-0,15% nyúlás) exponenciális összefüggés van, amelynek a korrelációs koefficiense növekszik a vizsgálati terhelés növekedésével 0,1 - 0,15 % tartományban.

A referencia próbatestek szakítóvizsgálata alapján átlagolással létrehoztam a referencia szilárdságot. Ehhez a referencia értékhez képest határoztam meg a sérült próbatestek szilárdságvesztésének értékét. Természetesen ez az összefüggés az adott anyagra és rétegrendre jellemző, tehát egyéb esetekben a szilárdságvesztés vizsgálatához először fel kell építeni az összefüggést, amelynek módját lefektettem. Állításomat Araldite LY 1564 típusú epoxi gyanta mátrixú és PX35FBUD030 típusú UD szén kelme erősítésű, mesterségesen 10, 13, 15, 20, 25 J becsapódási energiával kialakított BVID hibát tartalmazó kompozit próbatestek vizsgálatával bizonyítottam. [8]

6. SAJÁT PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

- [1] **Hliva V.**, Szabényi G.: Kompozit szerkezetek roncsolásmentes anyagvizsgálata. OGÉT 2018: XXVI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia, Marosvásárhely, Románia , 2018.04.26-29. In: OGÉT 2018 (Ed.: Csibi-Vencel J., Barabás I.), 192-195 (2018).
- [2] **Hliva V.**, Szabényi G.: Detection of delamination in composite structures with DIC method In: FEMS - FEMS (szerk.) FEMS JUNIOR EUROMAT CONFERENCE 2018: The Main Event for Young Materials Scientists, Book of Abstracts Budapest, Magyarország: Akadémiai Kiadó (2018) 224 p.
- [3] **Hliva V.**, Szabényi G.: Detection of delamination in polymer composites by Digital Image Correlation - experimental test. *Polymers*, 11, 523-534 (2019). IF=3,164; Q1
- [4] **Hliva V.**, Szabényi G.: Polimer kompozitok roncsolásmentes anyagvizsgálatának lehetőségei. *Polimerek*, 5, 496-500 (2019).
- [5] Szabényi G., **Hliva V.**, Tamás-Bényei P.: Investigation of delaminated composites by DIC and AE methods. ICCM22, Melbourne, Australia, 2019.08.11-16., Proc. of International Conference on Composite Materials (Ed.: Mouritz A.), P2311-7, 1-7 (2019).
- [6] Szabényi G., **Hliva V.**, Magyar B.: Development of interphase engineering techniques for the ductility improvement in CF/EP composites – Comparison of NDT methods for delamination localization In: Zarrelli, Mauro; Meo, Michele (szerk.) 12th International Conference on Composite Science and Technology Amsterdam, Hollandia : Elsevier (2021) pp. 113-116. , 4 p.
- [7] Szabényi G., **Hliva V.**, Magyar B.: Non-destructive evaluation of interfacially engineered composites In: 20th European Conference on Composite Materials (ECCM20)(2022) p. 62011.
- [8] **Hliva V.**, Szabényi G.: Non-destructive evaluation and damage determination of fiber-reinforced composites by digital image correlation. *Journal of Nondestructive Evaluation* (2023). *in Press*, IF= 2.588; Q2