

Fúrásindukált delamináció vizsgálata üvegszállal erősített polimer (GFRP) kompozitokban digitális képfeldolgozással

Analysis of drilling-induced delamination in glass fibre reinforced polymer (GFRP) composites using digital image processing

LUKÁCS Tamás¹, MAGYAR Gergely¹, Dr. GEIER Norbert¹

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki kar, Gyártástudomány- és technológia Tanszék, 1111. Budapest, Műegyetem rkp. 3., T épület 4. em.,
Tel.: 06/1-463-2515, Fax: 06/1-463-3176, E-mail: info@manuf.bme.hu, Honlap: <http://manuf.bme.hu>

Abstract

The use of fibre reinforced polymer (FRP) composites is widespread in the industry due to their favourable mechanical properties and relatively low density. However, drilling these materials is challenging mainly due to their machining-induced delamination formation ability. The main goal of this study is to develop a measurement method based on digital image processing that is well applicable to determine the magnitude of drilling-induced delamination in glass fibre reinforced polymer (GFRP) composites.

Keywords: Delamination, Drilling, Digital image processing, GFRP, Optical microscopy

Kivonat

A szálerősített polimer (FRP) kompozitok alkalmazása széleskörűen elterjedt az iparban, köszönhetően a kedvező mechanikai tulajdonságaiknak és a relatív alacsony sűrűségüknek. Ezen anyagok fúrása azonban számos nehézséggel jár, melyek közül az egyik legjelentősebb a delamináció (rétegleválás) jelensége. Ezen tanulmány fő célja egy digitális képfeldolgozáson alapuló mérési módszer kidolgozása, mely jól alkalmazható a fúrásindukált delamináció nagyságának meghatározására üvegszállal erősített polimer (GFRP) kompozitokban.

Kulcsszavak: Delamináció, Fúrás, Digitális képfeldolgozás, GFRP, Optikai mikroszkópia

1. BEVEZETÉS

A szálerősítéses polimer (FRP) kompozitok használata széleskörben elterjedt az ipar szinte minden területén [1]. Kezdetben főként a tengerészeti alkalmazásokban vették nagy hasznukat, nem csupán kiemelkedő mechanikai tulajdonságaik miatt, hanem azért is, mert nem mágnesezhető anyagok lévén, a radarok ellen is védelmet biztosítanak. Ezenfelül jellemzően jól ellenállnak a környezet káros behatásaival szemben is, így az ádáz tengeri körülmények között is jól alkalmazhatók [2]. Később a járműgyártásban is egyre nagyobb teret hódított használatuk, és egészen odáig vezetett ez a tendencia, hogy ma már a szálerősítéses polimer (FRP) kompozitok túlnyomó hányada ezen iparágban kerül felhasználásra [3]. Hasonlóan nagy népszerűségnek örvendenek ezen anyagok a repülő-, energia-, sport- és űripar területén, illetve az utóbbi időben az építőiparban is egyre nagyobb szerepet kapnak [1, 4]. Széleskörű elterjedésük oka a rendkívül kedvező tulajdonságaikban rejlik: nagy fajlagos szilárdság, jó fáradási tulajdonságok és jó méretstabilitás [1, 5]. Mindemellett sajnos ezen összetett anyagok megmunkálása komplikált, számos nehézséggel kell szembenéznünk az anyag anizotrop és inhomogén tulajdonságai, továbbá az erősítőszálak jellemzően abrazív koptató hatása miatt. A forgácsolás során az anyagban nehezen előre jelezhető geometriai hibák keletkezhetnek: visszamaradó vágatlan szálak, durva felületi érdesség és delamináció. Delaminációnak nevezzük azt a jelenséget, amikor a megmunkálás során az anyag laminált rétegei szétválnak egymástól, melynek detektálása és mértékének csökkentése kulcsfontosságú, hiszen a réteghibák nagymértékben rontják az anyag minőségét és eredő szilárdságát [1, 6].

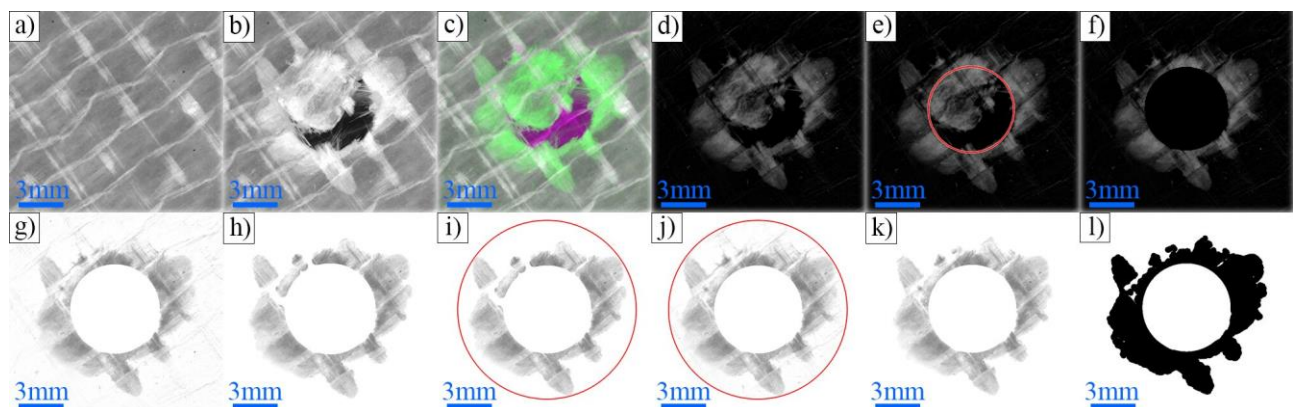
A delamináció mértékének meghatározására léteznek ugyan fénymikroszkóppal készített felvételek digitális képfeldolgozásán alapuló módszerek, azonban ezek jellemzően hiányosan dokumentáltak és

nehezen reprodukálhatók [7, 8, 9]. Kutatásunk célja az üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozitok fúrásakor keletkező delamináció digitális képfeldolgozáson alapuló mérési módszertanának kidolgozása.

2. ÚJSZERŰ DELAMINÁCIÓS MÉRÉSI MÓDSZER

A GFRP kompozitok esetében a fúrás során keletkező delaminált zóna kifehéredni látszik, amely azzal magyarázható, hogy a rétegleválás és az okozott anyagdeformáció következtében az anyag fénytani jellemzői megváltoznak. Ez a jelenség teszi lehetővé, hogy a delaminációt fénymikroszkóp segítségével, képfeldolgozás útján vizsgálni tudjuk. A delamináció mérése azonban nagy kihívást jelent a hagyományos képfeldolgozási módszerekkel, mivel az erősítő szálak –amelyek sűrűn keresztülhálózják a munkadarabot– fényvisszaverődését nehéz megkülönböztetni a delaminált területektől. Ennek okán meglehetősen szubjektívnek tekinthető a hagyományos módszer, és nehezen reprodukálhatóak a mérési eredmények. Ezen probléma feloldására egy új megközelítésű módszert dolgoztunk ki a delaminált terület pontosabb, egyszerűbb és gyorsabb detektálására és mérésére. Ez az új módszer a képdifferenciálás elvén alapul. Ezen elv megvalósítása érdekében fúrás előtt és után is készülnek képek a munkadarabokról, így a fúrás okozta változások a képek összehasonlításával kimutathatók. Az újszerű mérési módszer fő lépéseit az 1. ábra szemlélteti, és a lépései az alábbiak:

- (i) Nagy felbontású kép készítése a munkadarabról fúrás előtt és után is, azonos képalkotási feltételek mellett. (1. ábra (a) és (b))
- (ii) Fúrás előtti és utáni kép egymásra igazítása az intenzitás alapú képregisztráció módszerével. (1. ábra (c))
- (iii) Az egymásra igazított képek (fúrás előtti és utáni) közötti különbség meghatározása. (1. ábra (d))
- (iv) Kör illesztése a furat kontúrájára az előző lépésben meghatározott különbségi képen. (1. ábra (e))
- (v) Az előző lépésben illesztett kör által bezárt terület eltávolítása a képről. (1. ábra (f))
- (vi) A kép invertálása. (1. ábra (g))
- (vii) A kép szűrése az egybefüggő területek nagysága alapján, olyan küszöbérték választásával, amely esetén a delaminált zónán kívül eső zajok épphogy megszűnnek. (1. ábra (h))
- (viii) A delaminált zóna legkisebb befoglaló körének meghatározása. (1. ábra (i))
- (ix) A legkisebb befoglaló körön kívüli pontok eltávolítása a (vi) lépésben kapott képről. (1. ábra (j))
- (x) A (vii) lépés megismétlése, immáron kisebb küszöbértékkel. (1. ábra (k))
- (xi) A kép binarizálása. (1. ábra (l))
- (xii) Delaminációs faktorok (pl. F_d , F_{dmin} , F_a) kiszámítása a befoglaló körök átmérőinek és a delaminált zóna területének (D_{max} , D_{min} , A_{del}) felhasználásával.



1. ábra. A képfeldolgozó algoritmus fő lépései: (a) kép készítése fúrás előtt (b) kép készítése fúrás után (c) képek egymásra igazítása (d) igazított képek különbsége (e) kör illesztése a furat kontúrájára (f) illesztett kör által bezárt terület eltávolítása (g) kép invertálása (h) durva szűrés (i) delaminált zóna legkisebb befoglaló körének meghatározása (j) a legkisebb befoglaló körön kívüli pontok eltávolítása (k) finom szűrés (l) kép binarizálása

3. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

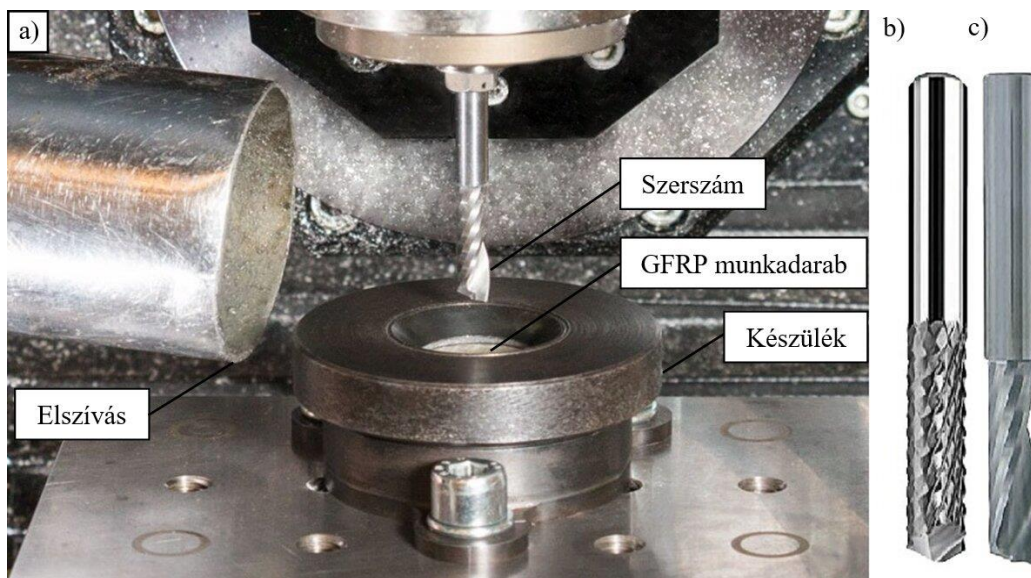
Az újonnan fejlesztett mérési módszer alkalmazhatóságának tesztelése végett fúrási kísérleteket végeztünk GFRP kompozitban. A kísérletterv összeállításakor a Central Composite Face-Centered (CCF) kísérlettervezési módszer szerint jártunk el. A fúrási kísérletek során az előtolás (f), a forgácsolási sebesség (v_c) és az alkalmazott szerszámgeometria (T) hatását vizsgáltuk. Annak érdekében, hogy a környezeti hatások ne szisztematikusan terheljék a kísérleti eredményeket, az elvégzendő kísérletek sorrendje randomizálva lett.

A faktorok és szintjeik

1. táblázat

Faktorok			Szintek		
			-1	0	1
Szerszámgeometria	T	-	T1	T2	
Forgácsolási sebesség	v_c	m/perc	120	160	
Előtolás	f	mm/ford	0,1	0,2	

A kísérletek során nyolc rétegű egyirányban üvegszállal (Novia unidirekcionális üvegszövet, amely 440 g/m² felületi tömeggel rendelkezik) erősített epoxi gyanta mátrixú (IPOX ER1010 gyanta és IPOX MH3124 térhálósító 100:35 keveréke) polimer kompozit munkadarabokat használtunk, amelyek vákuuminjektálási eljárással készültek, majd vízszugaras megmunkálással lettek méretre vágva. A munkadarabok vastagsága $h = 3,5$ mm, az átmérőjük $D_o = \text{Ø}34$ mm. A fúrási kísérletek egy VHTC-130 lineáris öttengelyes mikromegmunkáló központban lettek végrehajtva. A keletkező forgács eltávolítása egy NILFISK GB733 típusú ipari porszívó segítségével valósult meg. A fúráshoz használt szerszámok: egy Ø6 FRAISA (20360302) típusú bevonat nélküli keményfém csigafúró (T1), és egy Ø6 TIVOLY (82329710600) típusú bevonat nélküli egyélű keményfém szármáró (T2). A fúrás közben hűtő-kenő folyadék nem volt alkalmazva. A megmunkálás során egyedi fúrókészüléket használtunk, amely biztosította a munkadarab –körperemén való– szimmetrikus rögzítését, ezáltal minimalizálva a kihajlás veszélyét és az ezzel járó delamináció- és sorjaképződés esélyét. A kísérleti elrendezés és a használt szerszámok a 2. ábrán láthatók.

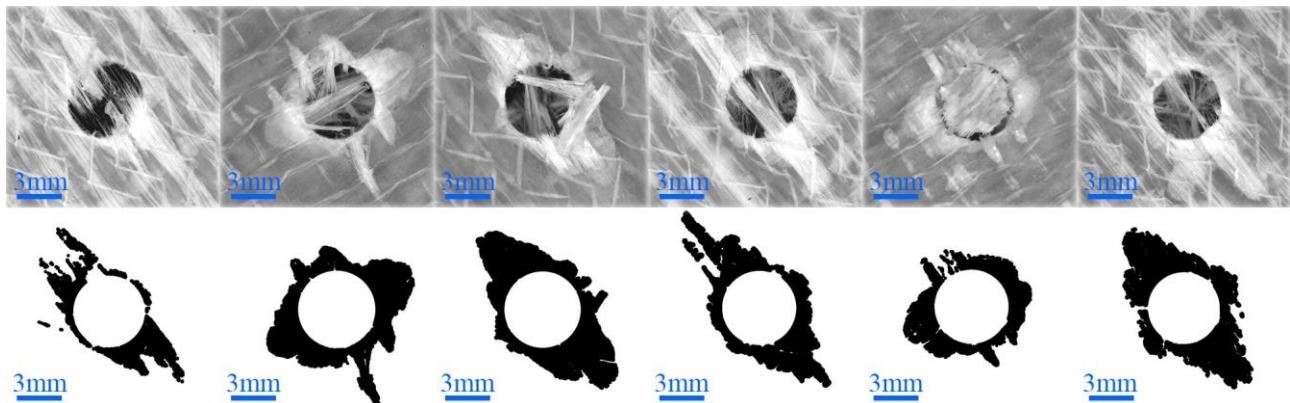


2. ábra. Kísérleti környezet: (a) kísérleti elrendezés (b) bevonat nélküli keményfém csigafúró (T1) (c) bevonat nélküli egyélű keményfém szármáró (T2)

A munkadarabok mindkét oldaláról nagy felbontású képeket készítettünk fúrás előtt és után is egy Mitutoyo Quick Image QI-A505 típusú digitális mikroszkóp segítségével. A mikroszkópot dóm típusú megvilágítási módban használtuk, a megvilágítási teljesítmény értékét a maximális teljesítmény 76 százalékának választottuk. A képek ötszörös nagyítással és 1280 x 960 képpont felbontással készültek. A rögzített képek ezután kiértékelésre kerültek az általunk fejlesztett képfeldolgozó algoritmussal a 2. fejezetben leírtak alapján.

4. EREDMÉNYEK

Az általunk fejlesztett képfeldolgozó algoritmussal kiértékelt képek –a teljesség igénye nélkül– a 3. ábrán láthatók. Az eredeti és a feldolgozott képeket összevetve szemmel látható az algoritmus eredményessége, ami arra enged minket következtetni, hogy az újszerű módszer alkalmazhatósága helytálló, azonban a módszernek vannak bizonyos korlátai. A nagy mértékű sorjásodás a furat kontúrára való automatizált körillesztés során nehézségeket okozhat, ezért szükséges lehet manuálisan közbeavatkozni. Továbbá hátrányként említhető, hogy a képek szűrésekor, ugyan csekély mértékben, de megritkulhat a delaminált zónához tartozó terület, így a területalapú mérőszámok esetén ez hibát vihet a számításba. Ennek okán az algoritmus szűrési lépéseinek továbbfejlesztése indokolt lehet, ami által még pontosabb értékeket kaphatnánk eredményül a területalapú delaminációs faktorok számításánál. Ezenfelül fontos kiemelni, hogy a kifejlesztett algoritmus a háromdimenziós delaminációs faktorok számítására nem alkalmas, így a kapott eredmények az egyes sérült rétegek esetleges átfedési hibáját is magában hordozza. Az újszerű módszer alkalmazhatóságának bizonyításához további munkára van szükség, a módszer validálását C-scannel készített képekkel való összehasonlítás útján tervezzük elvégezni.



3. ábra. Reprezentatív eredmények: eredeti (felül) és az újszerű módszerrel feldolgozott (alul) képek

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során egy új megközelítésű mérési módszert dolgoztunk ki a fúrásindukált delamináció nagyságának meghatározására GFRP kompozitokban. Az újszerű módszer alkalmazhatóságát fúrási kísérletek elvégzésével teszteltük. Üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozitban több előtolási és forgácsolási sebesség mellett forgácsoltunk 6 mm átmérőjű furatokat. A kompozitokról fúrás előtt és után is felvételeket készítettünk egy Mitutoyo Quick Image QI-A505 típusú digitális mikroszkóp segítségével, így a delamináció okozta anyagdeformáció könnyebben detektálható volt. Az általunk fejlesztett mérési módszer automatizáltan és kiváló reprodukálhatósági jellemzőkkel képes a fúrásindukált delamináció nagyságát mérni. Jövőbeni tervünk, hogy a kidolgozott mérési módszert kontrollált körülmények között validáljuk.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezt a kutatást az Emberi Erőforrások Minisztérium ÚNKP-21-2-I-BME-237 azonosítószámú „Új Nemzeti Kiválóság Program”, és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal OTKA-PD20-134430 azonosítószámú projektje támogatta. A szerzők konferencia részvételét a BME Gépészmérnöki Kar NTP-HHTDK-21-0051 pályázata támogatta. Továbbá köszönettel tartozunk Pereszlai Csongor és Poór Dániel István kutatóknak a kísérletek lebonyolításában nyújtott segítségükért.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Geier N., Davim J. P., Szalay T. *Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. Elsevier, 2019, 125, 105552-105566.
- [2] Rubino F., Nisticò A., Tucci F., Carlone P. *Marine Application of Fiber Reinforced Composites: A Review*. Journal of Marine Science and Engineering. MDPI, 2020, 8, 26-53.
- [3] Sarfraz M. S., Hong H., Kim S. S. *Recent developments in the manufacturing technologies of composite components and their cost-effectiveness in the automotive industry: A review study*. Composite Structures. Elsevier, 2021, 266, 113864-113881.
- [4] Dong Z., Han T., Zhang B., Zhu H., Wu G., Wei Y., Zhang P. *A review of the research and application progress of new types of concrete-filled FRP tubular members*. Construction and Building Materials. Elsevier, 2021, 312, 125353-125371.
- [5] Karataş M. A., Gökkaya H. *A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials*. Defence Technology. Elsevier, 2018, 14, 318–326.
- [6] Poór D. I., Geier N., Pereszlai C., Xu J. *A critical review of the drilling of CFRP composites: Burr formation, characterisation and challenges*. Composites Part B: Engineering. Elsevier, 2021, 223, 109155-109171.
- [7] Patel P. és Chaudhary V. *Delamination evaluation in drilling of composite materials – A review*. Materials Today: Proceedings. Elsevier, 2021.
- [8] Panneerselvam T., Raghuraman S., Kandavel T. K., Mahalingam K. *Evaluation and analysis of delamination during drilling on Sisal-Glass Fibres Reinforced Polymer*. Measurement. Elsevier, 2020, 154, 107462- 107472.
- [9] Mohan N., Kulkarni S., Ramachandra A. *Delamination analysis in drilling process of glass fiber reinforced plastic (GFRP) composite materials*. Journal of Materials Processing Technology. Elsevier, 2007, 186, 265–271.