

Fúrásindukált delamináció vizsgálata a megtámasztási körülmények figyelembevételével üvegszál erősítésű polimer (GFRP) kompozitokban

Investigation of drilling-induced delamination considering mechanical supporting conditions in glass fibre reinforced polymer (GFRP) composites

LUKÁCS Tamás¹, 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

Due to their excellent mechanical properties, fibre reinforced polymer (FRP) composites are widespread in almost every sector of the industry. However, during the drilling of these materials, a number of undesirable geometrical errors may occur, of which delamination (layer separation) is considered the most severe one, since this phenomenon can lead to a significant decrease in the strength of the composite. The main goal of this study is to explore the relationship between mechanical support conditions and drilling-induced delamination.

Keywords: Delamination, Drilling, Support plate, Digital image processing, GFRP

Kivonat

A szálerősítésű polimer (FRP) kompozitok kiváló mechanikai tulajdonságaiknak köszönhetően az ipar szinte minden területén elterjedtek. Ezen anyagok fúrása során azonban számos nemkívánatos geometriai hiba keletkezhet, amelyek közül a delamináció (rétegleválás) tekintett a legsúlyosabbnak, hiszen ezen jelenség a kompozit jelentős mértékű szilárdságcsökkenésével járhat. Ezen tanulmány fő célja a megtámasztási körülmények és a fúrásindukált delamináció közötti kapcsolat feltárása.

Kulcsszavak: Delamináció, Fúrás, Támasztóelem, Digitális képfeldolgozás, GFRP

1. BEVEZETÉS

A szálerősített polimer (FRP) kompozitok napjaink rendkívül népszerű anyagai, az ipar egyre több területén kerülnek felhasználásra és váltják fel a hagyományos szerkezeti anyagainkat [1]. Legfőbb felvevőpiacai az autó-, repülőgép-, és űripár, azonban számos más területen is használják ezen anyagokat, mint például az építő- és sportiparban [2]. Széleskörű elterjedésük a kiemelkedően jó mechanikai tulajdonságaiknak köszönhető úgy, mint a (i) nagy fajlagos szilárdság, (ii) jó fáradási tulajdonságok, és (iii) jó méretstabilitás [3]. A kompozitok gyártástechnológiája az elmúlt évtizedekben rendkívül magas szintre fejlődött, melynek köszönhetően bizonyos esetekben akár egyetlen műveletben is végleges geometriájú alkatrészek gyárthatók [4]. Azonban a legtöbb esetben ez nem valósítható meg, általában valamilyen utómunkálatra van szükség az esetleges anyagfeleslegek eltávolításához, illetve a túrt méretek biztosításához [4]. Ezen utómunkálat leggyakrabban valamilyen mechanikus forgácsoló eljárással kerül végrehajtásra, amely jellemzően élek, hornyok, zsebek marását, illetve furatok készítését foglalja magában. Tehát a legtöbb esetben elkerülhetetlen az FRP kompozitok forgácsolása, ami viszont számos nehézséget rejt magában. Habár valamelyest támaszkodhatunk a fémek forgácsolástudományában felhalmozott ismeretekre, sok szempontból eltérő a forgácsképződési mechanizmus az FRP kompozitok esetében. A fémekkel ellentétben az FRP kompozitok anizotrop és inhomogén tulajdonságokkal bírnak, továbbá az erősítőszálak jellemzően abrazív koptató hatása is nehezíti a forgácsolhatóságukat. Mindemellett számos geometriai hiba is keletkezhet a

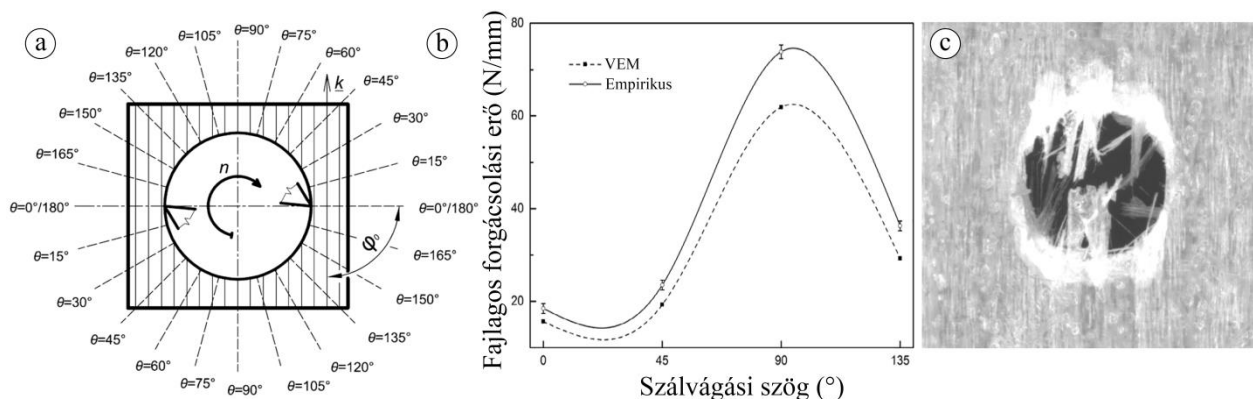
forgácsolás során úgy, mint a forgácsolásindukált delamináció és sorja, szátkihúzóds, mikrorepedések, és mátrixbeégés. A kutatók egyetértenek abban, hogy a legsúlyosabb problémát a forgácsolásindukált delamináció jelenti, hiszen ezen anyaghiba jelentősen csökkentheti a kompozit szilárdságát. Forgácsolásindukált delamináció alatt a forgácsolás során fellépő erők hatására létrejövő rétegekzi elválást értjük, amely lényegében repedésként értelmezhető. Így hát kiemelten fontos, hogy a forgácsolásindukált delamináció mértékének és képződési esélyének minimalizálására törekedjünk. Erre vonatkozóan számos törekvés irányt különböztethetünk úgy, mint a folyamatparaméterek optimalása, szerszám-pálya stratégiák fejlesztése, szerszámok speciális geometriai kialakítása és bevonatok alkalmazása. Ezenfelül a szakirodalomban fellelhetők olyan tanulmányok ([5], [6], [7]) is, amelyek támasztóelemek alkalmazását javasolják a kihajlás mértékének csökkentésére, ezzel minimalizálva a hajlításból származó delamináció-képződés mértékét is.

Habár a támasztóelemek kedvező hatását számos kutató igazolta, a megtámasztási körülmények pontos hatása a delamináció-képződésre nem ismert vagy legalábbis nem dokumentált. Éppen ezért a kutatásunk fő célja a megtámasztási körülmények és a fúrásindukált delamináció közötti kapcsolat feltárása.

2. ELMÉLETI HÁTTÉR

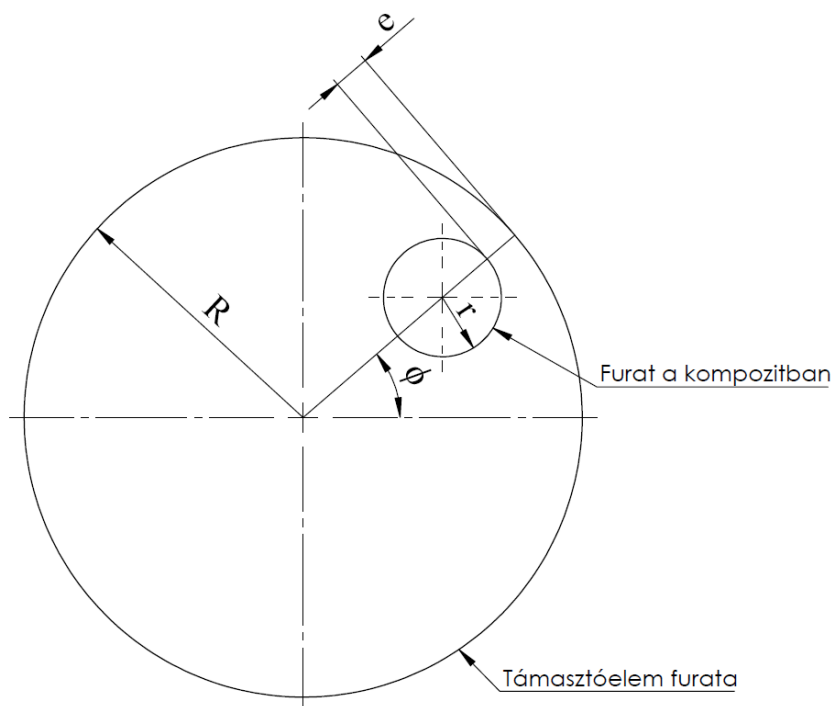
Az FRP kompozitok forgácsolási mechanizmusát erősen befolyásolja az ún. szálvágási szög, amelyet az erősítőszálak irányvektora és a forgácsolási sebességvektor által bezárt szöggént értelmezünk. Fúrás során ezen szálvágási szög folyamatosan változik ahogyan a szerszámél körüljár, ezért a forgácsolási mechanizmus is más és más a furat kerülete mentén (lásd 1. a ábra). Azonban középpontos szimmetria áll fenn a furat középpontjára nézve, tehát α és $\alpha+180^\circ$ esetén ugyanazon forgácsolási mechanizmus a jellemző. Ortogonális forgácsoló kísérleteket végezve több tanulmányban is megállapították a szálvágási szög és a forgácsolási erő közti kapcsolatot, amelyek alapján a forgácsolási erő 0° körül minimális és 90° körül éri el a maximumát (lásd 1. b ábra). Ez jól összeegyeztethető az egyirányban szálerősített polimer (UD-FRP) kompozitok fúrásakor tapasztalt jellemző delaminációs mintázatokkal (lásd 1. c ábra). A furat kerülete mentén haladva jól látható, hogy a delamináció kiterjedése 0° és 180° környezetében minimális, míg 90° és 270° környezetében maximális.

Ezenfelül számos tanulmány foglalkozott a kompozitok fúrás közbeni megtámasztásával is, és minden esetben kedvező határról számoltak be. Az alátámasztási távolság hatása jelentősnek bizonyult, minél kisebb ez a távolság, annál mérsékeltebb a kompozit kihajlása és ezáltal az ebből származó delamináció-képződés esélye is.



1. ábra. (a) szálvágási szögek (θ) a furat kerülete mentén UD-FRP esetén [1] (b) fajlagos forgácsolási erő és a szálvágási szög kapcsolata [8] (c) fúrásindukált delamináció UD-GFRP kompozitban

A fentiek alapján arra következtethetünk, hogy a delamináció-képződés mértékét erősen befolyásolhatja az, hogy a furatot hova készítjük a kompozitban a támasztóelem furatához képest. Ennek vizsgálatára két paramétert vezettünk be: ϕ furatközéppont szöghelyzete és e készülékeltől mért távolság (lásd 2. ábra). Az említett összefüggések tekintetében az várható, hogy minél közelebb kerül a furat a támasztóelem furatának pereméhez, illetve minél inkább a kritikus 90° körüli szálvágási szöghöz tartozó részek kerülnek közel a peremhez, annál kisebb lesz a delamináció mértéke. Tehát $\phi = 90^\circ$ és $e \approx 0$ értékek esetében várható a minimális delamináció-képződés.



2. ábra. Megtámasztási körülményeket leíró paraméterek: R - támasztóelem furatának sugara, r - furat sugara, ϕ - furatközéppont szöghelyzete és e - készülékelemtől mért távolság

3. KÍSÉRLETI KÖRNYEZET

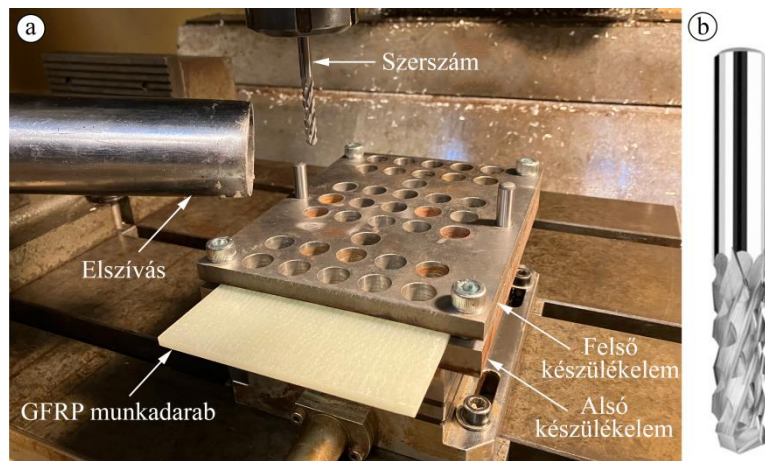
A megtámasztási körülmények és a fúrásindukált delamináció közti kapcsolat vizsgálata céljából fúrési kísérleteket végeztünk GFRP kompozitban. A kísérletterv összeállításához a teljes faktoriális kísérlettervezési módszert alkalmaztuk, és minden kísérleti beállításban négyszer ismételtük meg a kísérleteket. A vizsgált faktorok a készülékelemtől mért távolság (e) és a furatközéppont szöghelyzete (ϕ) volt, előbbi háromszintű, utóbbi hatszintű faktor. A fúrési kísérletek során a forgácsolási paramétereket nem változtattuk, ezen értékeket a szerszámgyártó katalógusában lévő ajánlások alapján választottuk meg. A fúrési kísérletek sorrendjét randomizáltuk, ezzel biztosítva azt, hogy a kísérleti eredményeket ne szisztematikusan terheljék környezeti hatások.

A faktorok és szintjeik

1. táblázat

Faktorok	Szintek					
	1	2	3	4	5	6
Készülékelemtől mért távolság	e	mm	0,5	1,5	2,5	
Furatközéppont szöghelyzete	ϕ	°	0	30	60	90 120 150

A kísérletek során tizennyolcretegű, egyirányban üvegszállal erősített polimer (UD-GFRP) kompozit munkadarabokat használtunk. A munkadarabokat préseléses laminálással állítottuk elő, amely eljárás során egyirányú üvegszövetet (NOVIA, 225 g/m² felületi tömeg) ágyasztunk epoxi mátrixba (IPOX MR1010 gyanta és IPOX MH3124 térhálósító 100:33 arányú keveréke). A laminált munkadarabok a térhálósítási folyamat során $T = 80$ °C hőmérsékletnek és $p = 100$ bar nyomásnak voltak kitéve $t = 20$ percig. A munkadarabok vastagságát $h = 4$ mm-re állítottuk be. A fúrési kísérleteket egy Kondia B640 megmunkáló központon végeztük el. A kísérletek során hűtő-kenő folyadékot nem használtunk, a keletkező forgácsot egy NILFISK GB733 ipari porszívóval távolítottuk el a forgácsolási folyamat közben. A furatokat egy $D = \text{Ø}6$ mm-es FRAISA durva fogazatú bevonat nélküli keményfém szármaróval (azonosító: 20360302) készítettük. A kompozit munkadarabokat egy furatokkal ellátott alsó és felső készülékelem közé rögzítettük, így minimalizálva a kihajlás veszélyét és az ezzel járó delamináció- és sorjaképződés esélyét. A kísérletek során 100 m/min forgácsolási sebességet és 0,16 mm/ford fordulatonkénti előtolást alkalmaztunk. A kísérleti elrendezés és a használt szerszám a 2. ábrán látható.

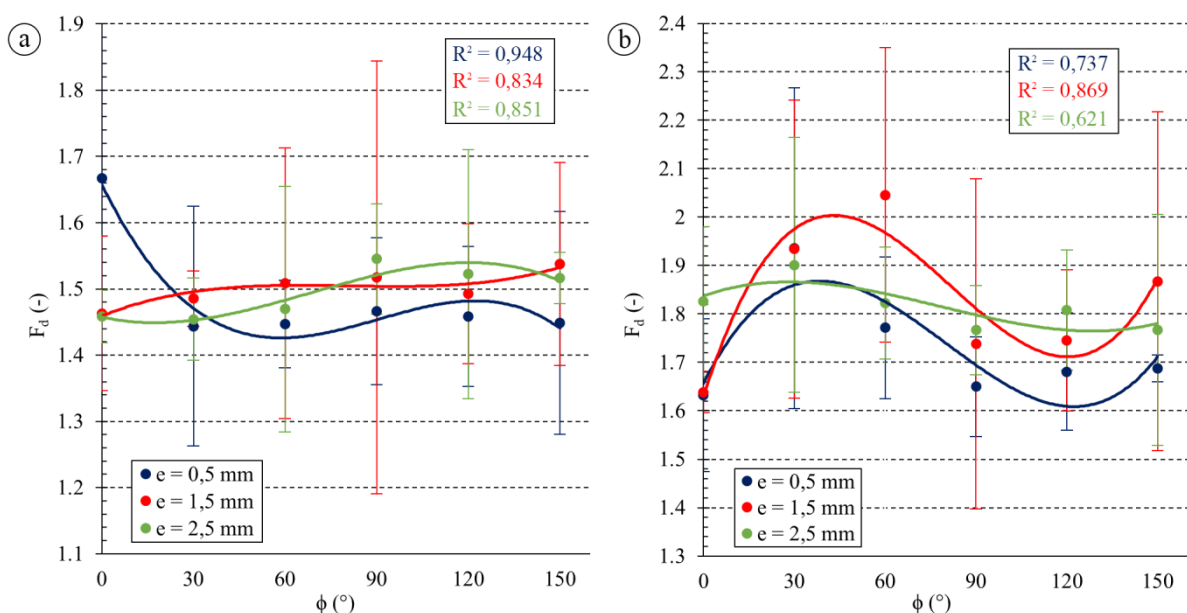


3. ábra. Kísérleti környezet: (a) kísérleti elrendezés (b) bevonat nélküli keményfém szármaró

A furatok környezetéről egy telecentrikus Mitutoyo QIA505 digitális mikroszkóppal készítettünk felvételeket. A mikroszkópot dóm típusú megvilágítási módban alkalmaztuk ötszörös nagyítási tényező és 1280 x 960 képpont felbontás mellett. A furatok be- és kilépő oldaláról egyaránt mikroszkópi felvételek készültek, amelyek ezután kiértékelésre kerültek egy korábban általunk fejlesztett képdifferenciáláson alapuló delamináció-mérési módszerrel. A delamináció mértékének számszerűsítésére a hagyományos delaminációs faktort használtuk, melynek képlete $F_d = D_{max}/D_{nom}$, ahol F_d a hagyományos delaminációs faktor, D_{max} a delaminációs zóna köré írható kör átmérője és D_{nom} a furat névleges átmérője.

4. EREDMÉNYEK

A fúrási kísérletek nem az általunk várt eredményeket hozták. A vizsgált két paraméter (e és ϕ) egyike sem mutat egyértelmű kapcsolatot a delaminációs faktoralal (F_d). A kilépő oldali eredmények alapján az figyelhető meg, hogy $\phi = 120^\circ$ szöghelyzetnél minimális a delamináció-képződés, ezzel ellentmondva az általunk várt $\phi = 90^\circ$ körüli minimumnak. A belépő oldal esetében viszont nem egyértelmű a minimum helye sem. A készülékelemtől mért távolság (e) hatása sem a belépő, sem a kilépő oldali eredmények esetében sem felel meg a várakozásainknak, nem növekszik a delaminációs faktor értéke (F_d) minden ϕ érték esetén az e érték növelésével. Továbbá meglehetősen nagy szórás jellemzi az adatokat, ami tovább nehezíti az eredmények értelmezését és az összefüggések feltárását. A kaotikus eredmények, illetve a nagymértékű szórás feltehetőleg a nem megfelelő készülékezből adódik. Valószínűsíthető, hogy a kísérletek során használt készülék nem biztosított megfelelő megtámasztást a furatok kerülete mentén.



4. ábra. Fúrási kísérletek eredményei: (a) belépő és (b) kilépő oldalon mért delaminációs faktorok (F_d) a furatközéppontok szöghelyzetének (ϕ) függvényében, különböző készülékelemtől mért távolságok (e) esetén

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánk során a megtámasztási körülmények hatását vizsgáltuk a fúrásindukált delamináció képződésére vonatkozóan. Egyirányban üvegszállal erősített polimer (UD-GFRP) kompozitban végeztünk fúrási kísérleteket, amelyek során a furatok pozícióját (szöghelyzet és a készüléktől mért távolság) változtattuk. A furatok környezetéről mind a belépő, mind a kilépő oldalon mikroszkópi felvételeket készítettünk, melyeket ezután digitális képfeldolgozás útján kiértékelünk. A kapott eredmények nem a várakozásainknak megfelelően alakultak, egyértelmű kapcsolat nem határozható meg az eredmények alapján a megtámasztási körülmények és a fúrásindukált delamináció-képződés között. A rendszertelen eredmények feltehetőleg a nem megfelelő készülékezésre vezethetőek vissza. Jövőbeni tervünk a kísérletek megismétlése egy másik készülék alkalmazásával, amely biztosítja a furatok kerülete mentén a megfelelő megtámasztást.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ez a kutatás a Kína és Magyarország tudományos és technológiai együttműködését ösztönző 2021-1.2.4-TÉT-2021-00051 azonosítószámú, a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-BME-201 azonosítószámú „Új Nemzeti Kiválóság Program” és a Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program DKÖP-GPK-7 azonosítószámú támogatásnak köszönhetően valósult meg.

Ez a kutatás az Európai Unió által támogatott EPIC 739592 azonosítójú H2020 projekt támogatásnak köszönhetően valósult meg.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] N. Geier, J. P. Davim, és T. Szalay, „Advanced cutting tools and technologies for drilling carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites: A review”, *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.*, köt. 125, o. 105552, okt. 2019, doi: 10.1016/j.compositesa.2019.105552.
- [2] J. Xu és mtsai., „A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites”, *Compos. Struct.*, köt. 294, o. 115594, aug. 2022, doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115594.
- [3] M. Altin Karataş és H. Gökkaya, „A review on machinability of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and glass fiber reinforced polymer (GFRP) composite materials”, *Def. Technol.*, köt. 14, sz. 4, o. 318–326, aug. 2018, doi: 10.1016/j.dt.2018.02.001.
- [4] M. Aamir, M. Tolouei-Rad, K. Giasin, és A. Nosrati, „Recent advances in drilling of carbon fiber-reinforced polymers for aerospace applications: a review”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, köt. 105, sz. 5, o. 2289–2308, dec. 2019, doi: 10.1007/s00170-019-04348-z.
- [5] B. Luo, Y. Li, K. Zhang, H. Cheng, és S. Liu, „Effect of workpiece stiffness on thrust force and delamination in drilling thin composite laminates”, *J. Compos. Mater.*, köt. 50, sz. 5, o. 617–625, márc. 2016, doi: 10.1177/0021998315580449.
- [6] R. Teimouri és S. Amini, „Analytical and experimental approaches to study elastic deflection of thin strip in ultrasonic-assisted drilling process”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E J. Process Mech. Eng.*, köt. 233, sz. 1, o. 21–34, febr. 2019, doi: 10.1177/0954408917739453.
- [7] E. Capello, „Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates”, *J. Mater. Process. Technol.*, köt. 148, sz. 2, o. 186–195, máj. 2004, doi: 10.1016/S0924-0136(03)00812-4.
- [8] F. Wang, J. Yin, J. Ma, és B. Niu, „Heat partition in dry orthogonal cutting of unidirectional CFRP composite laminates”, *Compos. Struct.*, köt. 197, o. 28–38, aug. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.05.040.