

Rendezett nem folytonos szálakkal erősített, nagy teljesítményű polimer kompozitok
mechanikai tulajdonságai nyomó terhelés esetén
Csallány E. K., Czél G.

Accepted for publication in Polimerek
Published in 2019
DOI:

RENDEZETT NEM FOLYTONOS SZÁLAKKAL ERŐSÍTETT, NAGY TELJESÍTMÉNYŰ POLIMER KOMPOZITOK MECHANIKAI TULAJDONSÁGAI NYOMÓ TERHELÉS ESETÉN

CSALLÁNY ENIKŐ KRISZTINA¹
DR. CZÉL GERGELY²

Kutatásunk célja rendezett nem folytonos szálakkal erősített, nagy teljesítményű polimer kompozitok mechanikai tulajdonságainak vizsgálata nyomó terhelés hatására. Ez a fejlesztés a polimer kompozitok legjelentősebb hátrányának – előre nem jelezhető tönkremenetelüknek – kiküszöbölésére irányul.

1. BEVEZETÉS

A szálerősített polimer kompozitok a mérnöki életben széles körben alkalmazott, nagy teljesítményű anyagok, amelyek kiváló mechanikai tulajdonságokkal és kis sűrűséggel rendelkeznek. A polimer kompozitok mátrix anyaga biztosítja az erősítőanyag védelmét, illetve a terhelés átadását a szálak között. Az erősítőanyag nagy merevséget és teherbírást nyújt. Speciális szerkezetük miatt a kompozitoknak számos előnye van, amelyek közé sorolható a kiemelkedő korrózió- és időjárásállóság, valamint a fáradással szembeni ellenálló képesség. Ezeknek a tulajdonságoknak köszönhetően a polimer kompozitok számos iparág – például az autóipar, repülőgépipar, építőipar – számára fontos szerkezeti anyagok, azonban legjelentősebb hátrányuk, a kiszámíthatatlan, hirtelen bekövetkező tönkremenetel korlátozza az alkalmazási lehetőségeiket. Ez a tanulmány bemutatja, hogy korábbi kutatásokra alapozva hogyan lehet szívós viselkedésre jellemző, nemlineáris feszültség-alakváltozás összefüggést elérni, amely segíti a tönkremenetel előrejelzését. A kutatás céljai között szerepel a rendezett nem folytonos szálakkal erősített, nagy teljesítményű polimer kompozitok nyomó terhelés alatti mechanikai tulajdonságainak, illetve tönkremeneteli módjainak meghatározása is.

2. A SZÍVÓS VISELKEDÉS ELÉRÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

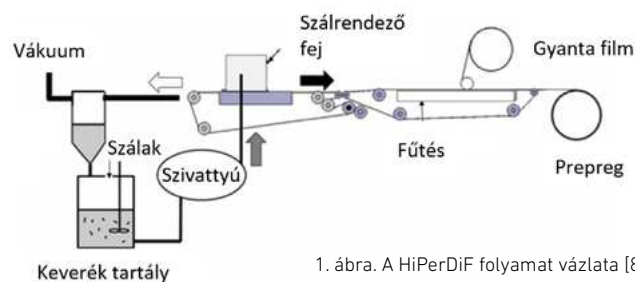
A feszültségek az anyagban deformációhoz vezetnek. A deformáció mechanizmusai különböző típusúak lehetnek, attól függően, hogy milyen anyagról van szó. Ha egy anyag rideg, a feszültség-alakváltozás görbéje általában lineáris egészen az általában váratlanul bekövetkező tönkremenetelig. A szívós anyagok esetében a kezdeti szakaszokon a deformáció reverzibilis, és ezt követően bizonyos mértékű károsodás jön létre, amely a feszültség-alakváltozás diagramokon általában úgy jelenik meg, hogy a görbe jelentősen eltér a lineáristól.

A polimer kompozitok tönkremenetele jellemzően hirtelen következik be anélkül, hogy bármilyen előjele lenne, ez korlátozott felhasználhatósághoz vezet. Azok a kompozitok azonban,

amelyek a terhelés hatására szívós viselkedést mutatnak, nagymértékben szélesíthetik az alkalmazási területeket és általánosságban biztonságosabbá tehetik a kompozit alkatrészeket, szerkezeteket. Korábbi kutatások során több olyan koncepciót fejlesztettek ki, amelyek segítségével növelhető a kompozitok szívóssága. Ezek közé tartoznak a Pimenta és Robinson által tanulmányozott hullámos rétegű kompozitok [1], a Fuller és Wisnom által vizsgált szögben elfordított rétegekből álló kompozitok [2], a szintén Fuller kutatásai közé tartozó szögben elfordított rétegek és töredező 0°-os rétegek kombinációjával gyártott kompozitok [3, 5]. Vékony rétegű hibrid kompozitokkal Czél és munkatársai értek el biztató eredményeket [4-6]. Ugyanezek a szerzők tanulmányozták a nem folytonos vékony rétegű hibrid kompozitokkal és az átfedéssel kialakított nem folytonos kompozitokkal [7] elérhető szívósság mértékét is. Yu és munkatársai rendezett nem folytonos szálakkal erősített kompozitokat és a gyártásukhoz szükséges technológiát fejlesztettek ki [8].

3. RENDEZETT RÖVID SZÁLAKKAL ERŐSÍTETT POLIMER KOMPOZITOK

Az elmúlt évek során Yu és munkatársai nagy hangsúlyt fektettek a rendezett rövid szálakkal erősített, szálak szintjén kevert (intermingled) hibrid kompozitok tanulmányozására [8]. Rendezett nem folytonos szálakkal erősített hibrid kompozitokat gyártottak a szívós viselkedés elérése érdekében. A Bristol Egyetemen kifejlesztettek egy új, áramlással segített módszert, amellyel nagyfokú rendezettséget (a szálak 80%-a $\pm 3^\circ$ -ban áll) lehet elérni nem folytonos erősítőszálak esetén az 1. ábrán bemutatott módon [8, 9].



1. ábra. A HiPerDiF folyamat vázlata [8]

¹ MSc hallgató, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék

² tudományos munkatárs, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék
czel@pt.bme.hu

A módszer főbb lépései [8]:

- szálak vízben történő elosztatása mechanikai keveréssel kis koncentrációban,
- keverék felgyorsítása szivattyú és fúvókák segítségével,
- szál-víz keverék szabad-sugár orientáló fejre irányítása,
- folyadék eltávolítása a mozgásban lévő porózus futószalagon keresztül,
- előgyártmány szárítása a gyantával való átítás előtt.

Yu és munkatársai kutatásaik során egyidejűleg többféle, nem folytonos szálakat rendezett a HiPerDiF (High Performance Discontinuous Fibres) gép segítségével és az előgyártmányok gyanta filmmel történő impregnálásával hibrid kompozit mintákat gyártottak. Ezeket részletesen megvizsgálták húzó terhelés mellett. Kutatásaik során kiderült, hogy a húzó terhelés hatására a rendezett nem folytonos szálak esetén előre jelezhetővé válik a kompozit tönkremenetele, azonban az új anyagok nyomó terhelésre adott szintén lényeges válaszát nem vizsgálták. Ezek alapján kutatásunk célja a rendezett nem folytonos szálakkal erősített kompozit minták nyomó elrendezésű vizsgálatának elvégzése, a mechanikai tulajdonságok meghatározása és a tönkremeneteli formák feltárása volt.

4. MINTADARABOK TERVEZÉSE, GYÁRTÁSA

A kutatás során a próbatetekhez 3 mm hosszú, nagy szilárdságú (HSC) és nagy moduluszú szénszálakat (HMC), valamint E-üvegszál/epoxi és S-üvegszál/epoxi előimpregnált (prepreg) lapokat használtunk fel. A szálak és prepregok főbb jellemzőit az 1. és 2. táblázat foglalja össze.

1. táblázat. Nem folytonos szálak tulajdonságai

Szálak elnevezése	HSC	HMC
Gyártó, típus	TohoTENAX (HTS)	NGF (Granoc, XN90)
Átmérő [µm]	7	10
Hossz [mm]	3	3
Sűrűség [g/cm³]	1.82	2.21
Húzó rugalmassági modulusz	225	860
Húzószilárdság [GPa]	4,3	3,4
Szakadási nyúlás (húzó) [%]	1.93	0.398

2. táblázat. Felhasznált prepregok tulajdonságai [5]

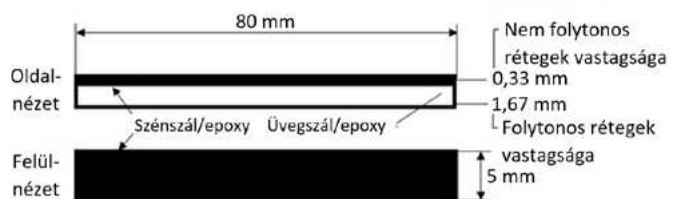
Prepreg típusa	Szálak felületi tömege	Rétegvastagság	Szál térfogat arány	Rugalmassági modulusz	Húzó tönkremeneteli nyúlás	Nyomó tönkremeneteli nyúlás
	[g/m²] (CV [%]) ^a	[µm]	[%]	[GPa] (CV [%])	[%] (CV [%])	[%]
E-üveg/epoxi	192	140	54	40.0 ^b	3.07 ^c	-
S-üveg/epoxi	190	155	51	45.7 (3.2) [5]	3.98 (1.1) [5], 3.56 ^c	2.33 ^c

^a Relatív szórás

^b Adott szál térfogatarányra számítva

^c Gyártói adat 60%-os szál térfogatarányra számítva

4-pontos hajlítással hoztunk létre nyomó terhelést a próbatest nyomott oldalán elhelyezett rendezett rövidszál aszimmetrikus rétegekben. Erre elsősorban azért volt szükség, hogy elkerüljük a hagyományos direkt nyomóvizsgálat során fellépő katasztrofális tönkremenetelt, így nagyobb nyúlásokig követhessük az anyag károsodási formáit. A hibrid minták tervezésének alapjául Cél és munkatársai korábbi munkája [10], valamint a kapcsolódó szabványok szolgáltak. A próbatetek aszimmetrikus kialakításuknak köszönhetően (2. ábra) alkalmasak a nem folytonos szénszál erősítésű kompozit rétegekben fellépő nyomó irányú tönkremeneteli nyúlás meghatározására. A próbadarabok tervezése során a szükséges vastagságot a nem folytonos szál erősítésű rétegek alatt elhelyezett E-üveg prepreg rétegek segítségével értük el. Az E-üveg prepregok alá a próbatest legalsó rétegében egy rétegben nagyobb szilárdságú S-üveg prepreg került az idő előtti tönkremenetel elkerülése érdekében. A 4-pontos hajlításra alkalmas próbatetek rétegrendjét és főbb méreteit a 3. táblázat mutatja be.



2. ábra. Próbadarabok felépítése

3. táblázat. Próbatest típusok

Típus	Rétegrend	Próbadarabok száma	Vastagság [mm]	Szélesség [mm]	Alátámasztás [mm]	Nyomófej távolság [mm]
HSC	[SG1/EG16/ HSC3]	4	1.96	5	60	20
HMC	[SG1/EG16/ HMC3]	4	1.92	5	60	20

A próbatetek gyártása három szakaszra bontható. Az első szakasz az előformák gyártása a HiPerDiF géppel. A második szakasz a kompozit próbatetek gyártása a már elkészült előformák és a méretre vágott prepregok felhasználásával. Ez magába foglalja a részben nyitott szerszámú történő kézi laminálást, a vákuum-zsák elkészítését, valamint az autoklávban történő térhálósítást. A gyártás utolsó lépése a minták utólagos megmunkálása (sorjázás, méretrevágás) a 4-pontos hajlító, illetve mikroszkópi vizsgálatok előtt.

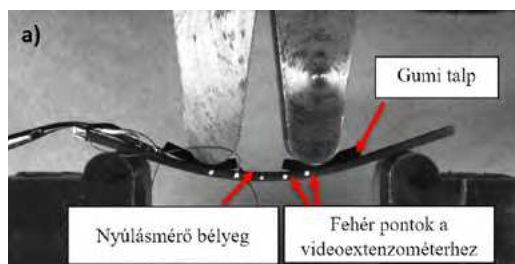
5. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

4-PONTOS HAJLÍTÁS

Valamennyi mintát egy hidraulikus működésű Instron 8872 típusú, 25 kN mérés határú univerzális anyagvizsgáló gépen, 1 kN-kapacitású erőmérő cellával vizsgáltunk a 3. ábrán látható elrendezésben. Egy Imetrum video extenzó méter rendszerrel alkalmaztunk a minta lehajlásának és görbület-változásának követésére, amelyből a nyúlást számoltuk a minta vastagsága mentén lineáris nyúláseloszlást feltételezve. A keresztfej sebessége 3 mm/perc volt a vizsgálatok során. A nyúlást egyidejűleg nyúlásmérő bélyegekkel is mértük.

SEM

A pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) vizsgálatokat a minták 4-pontos hajlító vizsgálatai után végeztük el a minták felületén és oldalélein. Ez utóbbinál a mintákat 4-pontos hajlítókeretben újra deformálva helyeztük az elektronmikroszkópba. A 4-pontos hajlítókeret (4. ábra) ugyanolyan geometriával készült, mint amelyet a hajlításnál a vizsgálógépen alkalmaztunk. A próbadarabokat egy meghatározott lehajlásig terheltek, majd a keretben ugyanezt a lehajlást reprodukálva a SEM vákuumkamrájába helyeztük. A pásztázó elektronmikroszkópos felvételeket egy JEOL JSM 6380LA készülékkel készítettük.



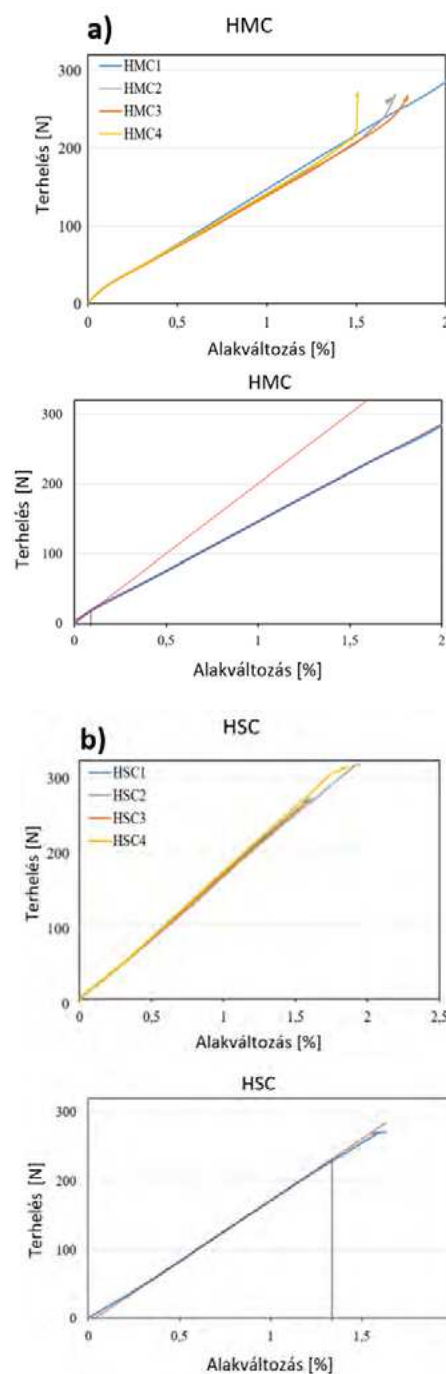
3. ábra.
a) 4-pontos hajlítás elrendezés,
b) Hajlítókeret próbatesttel

6. EREDMÉNYEK

4-PONTOS HAJLÍTÓ VIZSGÁLATOK EREDMÉNYEI

Két különböző típusú 4-pontos hajlító vizsgálat során az első esetben a HSC (nagy szilárdságú szénszál) és a HMC (nagy modulusú szénszál) próbatesteket addig terheltek, amíg a próbatestek nyomott oldalán a nem folytonos szálerősített

rétegek tönkrementek. A második esetben szakaszos méréseket végeztünk. A gépet a próbatest károsodásának kezdete után 25 N terhelésenként leállítottuk, majd felületét nagy felbontással beszkeneltük. Az első esetben a próbatestek nyúlását nyúlásmérő bélyegekkel mértük. Ezek eredményét a 4. ábra mutatja be.

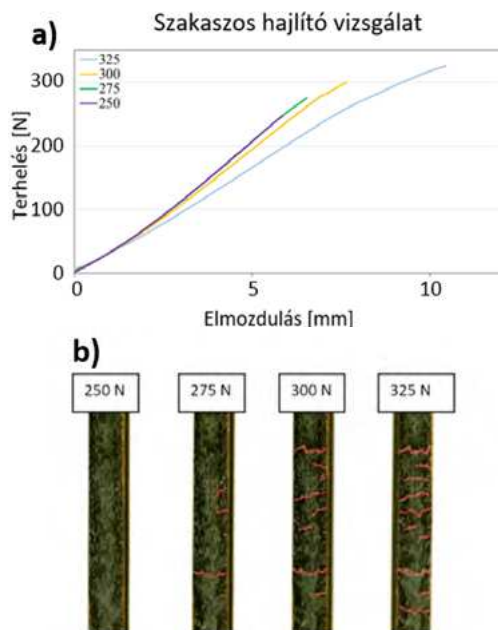


4. ábra. a) HMC és b) HSC terhelés-alakváltozás eredmények

A merevségcsökkenéssel kapcsolatos merevedésváltozás jelzi az aszimmetrikus próbatestek nem folytonos szálszálakkal erősített rétegeinek károsodását, tönkremenetelét. A nem folytonos szálerősített réteg tönkremenetelének fellépő nyúlás pontosabb meghatározása érdekében egyeneseket illesztettünk a vizsgálati görbékhez. A HMC görbéknél két egyenest illesztettünk, az egyiket a 0 és 0,1%-os nyúlás, a másikat a 0,5 és 1%-os nyúlás közé. A HSC minták grafikonján egyenes vonalat alkalmaztunk a 0,5 és 1%-os nyúlások között.

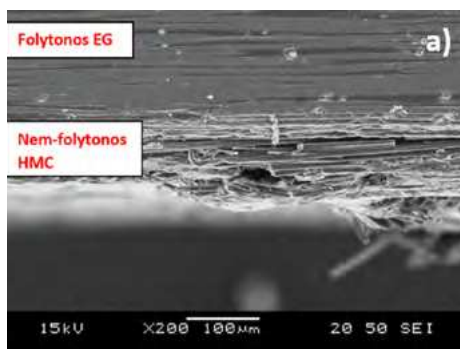
A HMC minták esetében egyértelműen szívós viselkedést figyeltünk meg a nem folytonos szálerősített rétegekben. A terhelés-alakváltozás görbék meredeksége a károsodás hatására egyértelműen csökkent, amely a modulusz csökkenésére utal. A végső tönkremenetelt megelőzően nem volt megfigyelhető terhelésesés, ami azt jelenti, hogy az anyag tönkremeneteli folyamata fokozatos és kiszámítható nem csak húzás, hanem nyomó terhelés esetén is.

A HSC mintánál a meredekség változás nem volt egyértelmű, valószínűleg annak köszönhetően, hogy ez az anyag jóval kevésbé merev, mint a HMC, így nem volt olyan látványos a változás. A tönkremeneteli folyamat megismerése érdekében egy HSC mintát szakaszosan mértünk. A vizsgálat során a terhelést minden 25 N után leállítottuk, és a minták felületét egy nagy felbontású szkennelrel beolvastuk.



5. ábra. Szakaszos hajlító vizsgálat eredményei: a) diagramok, b) szkennelt képek

A vizsgálat után láthatóvá vált, hogy a rendezett nem folytonos szénszálal erősített felületen a töredezés 250-275 N között kezdődött, és a repedések száma a nyomó terhelés növekedésével (5. ábra) nőtt (az ábrán vörös vonalakkal jelölve). A szakaszos vizsgálat eredményei kiegészítették a 4-pontos hajlító vizsgálati eredményeket, és segítettek meghatározni a rendezett nem folytonos HSC réteg közelítő tönkremeneteli nyúlását.



A 4-PONTOS HAJLÍTÁSI EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A 3. táblázat összefoglalja a nem folytonos szálak tönkremenetelkor fellépő nyúlás értékeit. A HMC próbatetek tönkremeneteli nyúlása átlagosan 0,095%, míg a HSC próbatetek tönkremeneteli nyúlása átlagosan 1,43% volt.

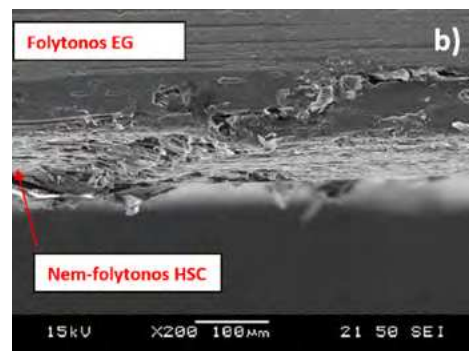
3. táblázat. Nem folytonos szálak tönkremenetelkor fellépő nyúlások

Anyag	Nyomó tönkremeneteli nyúlás [%]
HMC1	0.08
HMC2	0.09
HMC3	0.10
HMC4	0.11
Átlag	0.095
Szórás	0.011
Relatív szórás [rel. %]	11.58
HSC1	1.34
HSC2	1.43
HSC3	-
HSC4	1.52
Átlag	1.43
Szórás	0.073
Relatív szórás[rel. %]	5.10

SEM ANALÍZIS

Mikroszkópi képeket készítettünk a próbatetek oldaláról, hogy láthatóvá tegyük a szálak töredezését. A mintákat a 4-pontos hajlító keretben 5 mm-es lehajlásig újratelítettük, amely a nem folytonos rétegben körülbelül -1,2% -os nyúlásnak felelt meg. Amint a 6. ábrán látható, a HMC mintákban a szálak rétegelválás nélkül töredeztek.

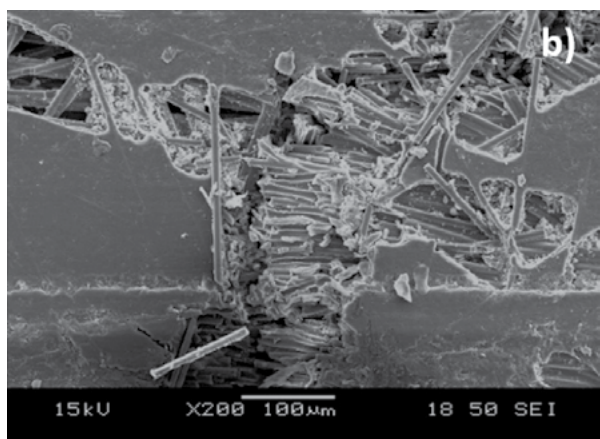
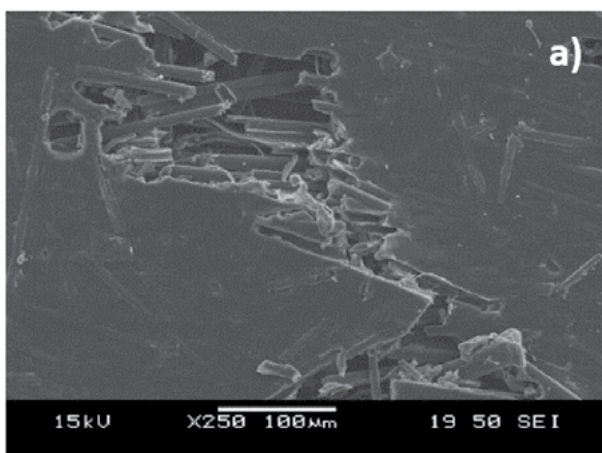
A HSC mintákban a nyomó terhelés nem csak száltöredezést okozott, hanem rétegelválást is. A rétegelválás a rendezett nem folytonos szénszálakkal erősített és a folytonos üvegrétegek között jött létre (6. ábra), közvetlenül a nem folytonos szállakkal erősített rétegek törési helye mellett.



6. ábra. Próbatestek oldalnézete -1.2% felületi nyúlás mellett: a) HMC, b) HSC

VIZSGÁLT MINTÁK FELSZÍNÉNEK ELEMZÉSE SEM SEGÍTSÉGÉVEL

A nem folytonos HSC és HMC rétegek tönkremenetele során repedések keletkeztek a minták felületén. A repedések többsége a minta teljes szélességében folytonos volt. A megfigyelhető törések azt mutatják, hogy a nem folytonos szálerősített rétegekben a szálak töredezték. A rétegtöredezés az eddig bemutatott legeredményesebb szívóssági mechanizmus, amely vizsgálataink alapján a nem folytonos szálerősítésű kompozitoknál nyomó terhelésnél is aktív. A nem folytonos rétegek tönkremenetelének vizsgálatához mikroszkópi képeket készítettünk a minták felületéről (7. ábra). Ezeken az ábrákon látszik, hogy a felszínen található bemélyedések mentén nem csak mátrixszakadás vagy egyedi száltörés történt. A szálak a 4-pontos hajlító vizsgálat során kialakuló nyomó terhelés hatására, jól meghatározott repedések mentén, a szomszédos szálakkal együtt blokkokat alkotva töredezték.



7. ábra. a) HMC és b) HSC próbatest felülete

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A rendezett nem folytonos nagy moduluszú szénzál rétegek nyomó terhelés hatására bekövetkező tönkremeneteli nyúlása körülbelül 0,1%. A rendezett nem folytonos nagy szilárdságú szénzál rétegek nyomó terhelés hatására bekövetkező tönkremeneteli nyúlása körülbelül 1,4%. A nagy moduluszú szénzállal erősített rétegekben a szálak a négy pontos hajítás hatására fellépő nyomó terhelés esetén körülhatárolható repedések mentén töredezték, rétegelválás nélkül. Ez a jelenség a nyomóerő-nyúlás görbéken jól kivehető mereedség változás formájában jelent meg. A nagy szilárdságú szénzállal erősített rétegekben a szálak a négy pontos hajítás alatt fellépő nyomó terhelés hatására szintén töredezték, de ebben az esetben helyi rétegelválások is bekövetkeztek a folytonos és nem folytonos szálak rétegek határfelületén a repedések környezetében. A nagy szilárdságú és nagy moduluszú szénzálak esetén tapasztalt réteg töredezés mint kulcsfontosságú szívóssági mechanizmus, azt mutatja, hogy ezeknek az új anyagoknak nem csak a húzó, hanem a nyomó terhelés során bekövetkező tönkremenetele is fokozatos, szívós módon mehet végbe. Ez további fejlesztési lehetőségeket biztosít az új anyagok számára. Az elvégzett kísérleti munka értékes információkat szolgáltat a rendezett nem folytonos szálakkal erősített kompozitok mechanikai tulajdonságairól és nyomó terhelés mellett bekövetkező tönkremenetelükről, amelyek elengedhetetlenek az új anyag alkalmazása szempontjából.

A kutatás az Egyesült Királyságban az EPSRC EP/I02946X/1 számú pályázat, Magyarországon az NKFIH OTKA K 116070 és OTKA PD 121121 pályázatok támogatásával valósult meg. Cél Gergely köszönetet mond továbbá a Magyar Tudományos Akadémiától a Bolyai János Ösztöndíj formájában kapott támogatásért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Pimenta, S.; Robinson, P.: Wavy-ply sandwich with composite skins and crushable core for ductility and energy absorption, *Compos. Struct.*, 116, 364–376 (2014).
- [2] Fuller, J. D.; Wisnom, M. R.: Pseudo-ductility and damage suppression in thin ply CFRP angle-ply laminates, *Composites Part A. Appl. Sci. Manuf.*, 69, 64–71 (2015).
- [3] Fuller, J. D.; Jalalvand, M.; Wisnom, M. R.: Combining fibre rotation and fragmentation to achieve pseudo-ductile CFRP laminates, *Compos. Struct.*, 142, 155–166 (2016).
- [4] Czél, G.; Wisnom, M. R.: Demonstration of pseudo-ductility in high performance glass/epoxy composites by hybridisation with thin-ply carbon prepreg, *Composites Part A. Appl. Sci. Manuf.*, 52, 23–30 (2013).
- [5] Czél, G.; Jalalvand, M.; Wisnom, M. R.: Design and characterisation of advanced pseudo-ductile unidirectional thin-ply carbon/epoxy-glass/epoxy hybrid composites, *Compos. Struct.*, 143, 362–370 (2016).
- [6] Czél, G.; Jalalvand, M.; Wisnom, M. R.: Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional hybrid composites made of discontinuous carbon/epoxy and continuous glass/epoxy plies, *Composites Part A. Appl. Sci. Manuf.*, 72, 75–84 (2015).
- [7] Czél, G.; Pimenta, S.; Wisnom, M. R.; Robinson, P.: Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional discontinuous carbon fibre / epoxy prepreg composites, *Composites Science and Technology*, 106, 110–119 (2015).
- [8] Yu, H.; Potter, K. D.; Wisnom, M. R.: A novel manufacturing method for aligned discontinuous fibre composites (High Performance-Discontinuous Fibre method), *Composites Part A Appl. Sci. Manuf.*, 65, 175–185 (2014).
- [9] Yu, H.; Potter, K. D.; Wisnom, M. R.: Aligned short fibre composites with high performance. In: *Proceedings of ICCM19-19th International conference on composite materials*, Montreal, Canada (2013).
- [10] Czél, G.; Jalalvand, M.; Wisnom, M. R.: Hybrid specimens eliminating stress concentrations in tensile and compressive testing of unidirectional composites, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* (2015).