

SZEDERKÉNYI BENCE¹, CZIGÁNY TIBOR^{1,2}

3D NYOMTATOTT POLIMER KOMPOZIT SZERKEZETEK RÉTEGKÖZI MECHANIKAI TULAJDONSÁGAINAK MEGHATÁROZÁSA

DETERMINATION OF INTERLAYER MECHANICAL PROPERTIES IN 3D PRINTED POLYMER COMPOSITE STRUCTURES

A cikk ömledékextrúzióval gyártott, folytonos szálerősítésű kompozitok rétegek közötti tulajdonságait vizsgálja. A vizsgálatokhoz használt próbatestek Markforged Onyx (rövid szénszállal töltött PA12) alapanyagból és folytonos szénszállal erősített, PA12 mátrixanyaggal impregnált szálkötegekből 3D nyomtatással készültek. A célzott anyagjellemzéshez előállított egyedi szakító és nyíró próbatestek alkalmasak az egyes komponensek és a fázishatáron kialakuló kapcsolatok külön értékelésére. A mérések a nyomtatási síkkal párhuzamos és arra merőleges irányokban vizsgálták a rétegek közötti tulajdonságokat, lehetővé téve a rétegtapadás irányfüggő viselkedésének részletes leírását és a numerikus modellek ennek megfelelő kalibrálását. A szimulációs és mérési eredmények 5 százalékon belüli eltérést mutattak.

This paper investigates the interlayer properties of continuous fiber-reinforced composites manufactured with material extrusion-based 3D printing. Specimens were printed with a Markforged Onyx matrix material (PA12 reinforced with short carbon fibers) and continuous carbon fiber bundles impregnated with a PA12 matrix. Custom tensile and shear test specimens were designed for targeted material characterization, enabling the separate evaluation of the individual components and the adhesion behavior at the interfaces between phases. Measurements were conducted parallel and perpendicular to the printing plane to allow for a detailed description of the anisotropic nature of interlayer adhesion and the corresponding calibration of numerical models. The deviation between the simulation and the experimental results remained within five percent.

1. BEVEZETÉS

A rétegről rétegre történő anyagfelépítés lehetőségeinek köszönhetően a 3D nyomtatás, különösen a megszilárdulás közben hűlő polimer olvadékokat alkalmazó eljárások, mint például az anyagextrúziós (Material Extrusion – MEX vagy Fused Deposition Modelling – FDM) technológiák, új távlatokat nyitottak az egyedi geometriájú és optimalizált mechanikai jellemzőkkel rendelkező alkatrészek gyártásában [1]. A szálal erősítéssel kombinált MEX eljárások különösen ígéretesek a szerkezeti alkalmazások szempontjából, mivel lehetőséget biztosítanak a kompozitok szilárdságának és merevségének testreszabására [2, 3]. Mindazonáltal, az eljárás természetéből fakadóan, a MEX eljárással készült alkatrészek heterogén és anizotrop mikroszerkezettel rendelkeznek. A mechanikai tulajdonságok – főleg a szilárdság – jelentős mértékben függenek a rétegek közötti adhézió minőségétől, az alkalmazott nyomtatási paraméterektől, valamint a nyomtatási orientációtól [4, 5].

Számos vizsgálat rámutatott arra, hogy a rétegek közötti tapadás gyenge pontot jelent, főleg akkor, ha a terhelés iránya megegyezik az építési iránnyal (Z irány), azaz merőleges a rétegezés síkjára [6, 7]. Különösen fontos ez a probléma, ha az alkalmazott anyag nem csupán egy egyszerű termoplasztikus mátrix, hanem különböző szállal – például rövid vagy folytonos szénszállal – erősített kompozit [8]. Ezekben az esetekben a mikroszerkezet további összetettsége miatt a rétegek, illetve az eltérő anyagfázisok közötti kapcsolat szilárdsága kulcsfontosságúvá válik a végső szerkezeti viselkedés meghatározásában. A szálas megerősítés

¹ Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Polimertechnika Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rakpart 3.

² HUN-REN-BME Kompozittechnológiai Kutatócsoport, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

ugyan általában javítja a szilárdságot, de csak azokon a részekben belül, ahol az anyagfolytonosság biztosított. Ezzel szemben a mátrixanyag, illetve a rétegek határán kialakuló határfelületek gyakran gyenge láncszemként viselkednek [9]. A hagyományos mechanikai vizsgálatok általában az alkatrészek átlagos szilárdsági jellemzőit célozzák, figyelmen kívül hagyva az orientációfüggő viselkedést. Ezzel szemben egy megbízható numerikus modell, amely képes valósághűen előrejelezni a nyomtatott alkatrészek mechanikai válaszát, megköveteli az ilyen orientációfüggő anyagtulajdonságok részletes jellemzését is.

A cikk célja, hogy kísérleti úton feltérképezze az Onyx mátrixanyag (rövid szénszállal töltött PA12), valamint a folytonos szénszállal erősített rétegek közötti kapcsolatok szilárdsági jellemzőit különböző nyomtatási orientációk mellett. A kísérletek célja, hogy ezen adatok alapján megbízható paraméterekkel szolgáljunk a későbbi numerikus modellezéshez, különös tekintettel az FDM nyomtatás során létrejövő rétegek közötti tulajdonságok szimulációjához.

2. MÓDSZERTAN

Az általunk használt numerikus eljárás során a rétegelválást számító algoritmus a normál és a nyíróerők lineáris kombinációjaként számolt értéket veti össze az anyagra meghatározott megengedhető értékkel és ez alapján dönti el, hogy az adott ponton bekövetkezett-e rétegelválás. Ennek kiszámítása az (1) összefüggésben látható [10]:

$$\left[\frac{\max(0, \sigma)}{FS} \right]^2 + \left[\frac{\tau}{FD} \right]^2 > 1 \quad (1)$$

ahol σ [Mpa] a normál irányú feszültségkomponens, τ [Mpa] a nyíró irányú feszültségkomponens, FS [Mpa] két felület közötti normál irányú szilárdság, FD [Mpa] a nyíró szilárdság. Az FS és FD mérnöki konstansoknak a kimérése és kalibrációja érdekében tehát tiszta húzó (normál) és tiszta nyíró igénybevételnek kell az anyagot alávetni. A vizsgálatok során három eltérő anyagkapcsolatot különböztettünk meg: a mátrix-mátrix (0-0), a

mátrix-szálak réteg (CF-0), valamint a két szálak réteg közti (CF-CF) kötéseket. Minden kapcsolattípust két terhelési mód – húzó és nyíró – mentén értékeltünk, XY- és Z-orientációs mintákkal. Így vizsgálati típusonként összesen 6 különböző próbatést típust vizsgáltunk 4-6 ismételéssel.

A kutatásban vizsgált, FDM technológiára jellemző anizotróp mikroszerkezet felépítését és a különböző orientációk viszonyát a mechanikai terhelésekhez az 1. ábra mutatja be.

A következőkben ezeknek a próbatesteknek az alapanyagát, felépítését, vizsgálati módszereit ismertetjük.

2.1. ALKALMAZOTT ANYAGOK ÉS BERENDEZÉSEK

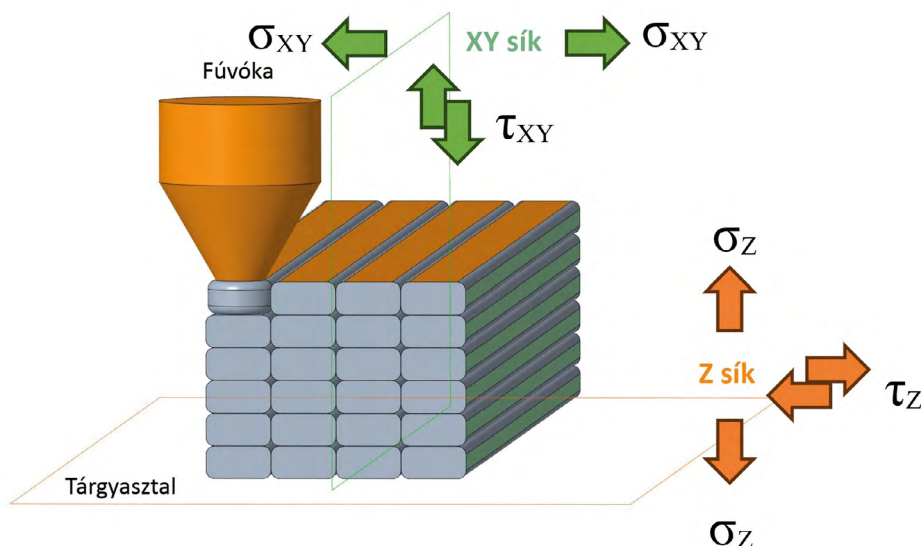
Vizsgálatainkban a Markforged Onyx (rövid szénszálerősítésű PA6) mátrixanyagot és a Markforged által gyártott, előre impregnált 1k szénszál (ezer elemi szál) pászmát használtunk. A próbatestek előállítását Markforged Mark Two nyomtatón végeztük, amelyhez a nyomtatási pályákat az Eiger szeletelőszoftverben készítettük elő.

A kvázi-statiszuszakító vizsgálatokat Zwick Z005 szakítógépen 2 mm/perces terhelési sebességen, szobahőmérsékleten és 46% relatív páratartalomra végeztük 5 kN-os erőmérő cellával. A nyíró paramétereket Zwick Z250 szakítógépen 5 mm/perces terhelési sebességen, 20 kN-os erőmérő cellával, szobahőmérsékleten és 47% relatív páratartalomra mértük. A deformációkat a keresztfejl elmozdulásokból számítottuk.

2.2. RÉTEGKÖZI MECHANIKAI VIZSGÁLATOK

A normál irányú rétegek közötti vizsgálatokhoz 5 mm széles, 2 mm vastag és 100 mm hosszú próbatesteket készítettünk, amelyeket előgyártmányokból vágtunk ki körfűrészrel a végső méreteikre. Erre azért volt szükség, mert a folytonos szálerősítés elhelyezése kisebb keresztmetszetekben nem valósítható meg, így a gyártathatóság csak ezzel a módszerrel volt kivitelezhető. A szakító vizsgálatoknál a befogási hossz 50 mm volt. A mérésekhez használt próbatestek sematikus vázlatát a 2. ábra mutatja.

Az erősítés nélküli próbatestek kialakítása tömör, terhelési irányra merőleges sraffozással történt, a szál-mátrix adhézió

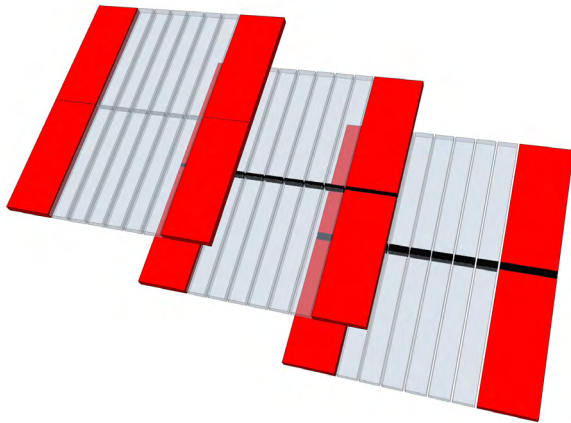


◁ 1. ábra: A vizsgálatokhoz használt próbatestek orientációja a nyomtatási térben: Az „XY” jelölésű próbatestekre a nyomtatási térben elhelyezett XY síkra merőlegesen lett a normál irányú terhelés (σ_{xy}), illetve a síkkal párhuzamosan a nyíró terhelés (τ_{xy}) ráadva. Hasonlóan a „Z” orientációjú próbatesteknél a normál irányú terhelések (σ_z) a Z jelölésű síkra merőlegesen, amíg a nyíró terhelések (τ_z) azzal párhuzamosan hatnak.

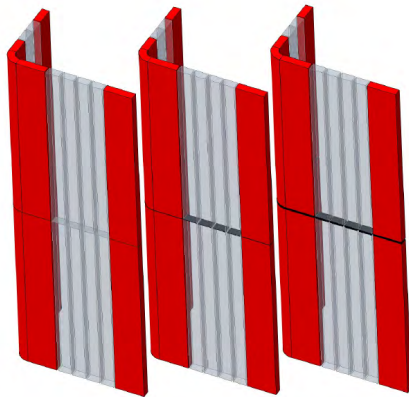
Húzó igénybevétel

Nyíró igénybevétel

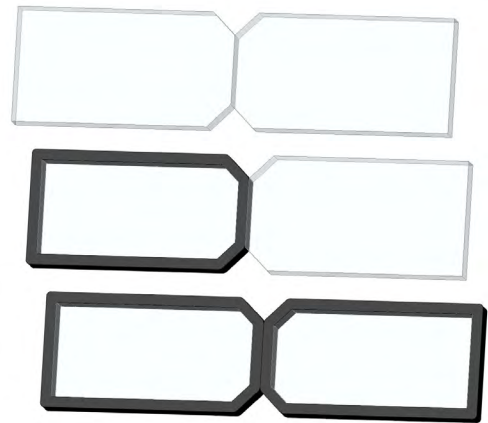
XY próbatest kialakítás



Z próbatest kialakítás



0 10 20 30 40 50 mm



0 10 20 30 40 50 mm

△ 2. ábra: A különböző orientációjú húzó és nyíró próbatestek kialakítása: a húzó próbatesteket előgyártmányból körfűrészsel vágtuk ki, a nyíró próbatesteket egy lépésben állítottuk elő. Az ábrákon a próbatestek elrendezése jobbról balra és felülről lefelé követi a szálerősítés nélküli O-O, CF-O és CF-CF konvenciót. A szürke/átlátszó terület jelzi az Onyx által kitöltött térfogatot, fekete színnel a szálerősítést jelöltük az ábrán. A húzó próbatestek pirossal jelölt részét az élhatások elkerülése érdekében eltávolítottuk az előgyártmányból.

mérésére kialakított próbatest 1, a szálerősített pászmák közötti adhézió mérésére kialakított próbatestek 2-2 egymás melletti rétegben lettek szálerősítve. Korábbi tapasztalataink azt mutatták, hogy a tiszta anyag rétegek közötti adhéziója a legnagyobb, amelyet a mátrix-szálerősített pászma kapcsolata követ és a szálerősített pászmák közötti tapadás esetében számíthatunk a legkisebb adhézióra. Ezzel a feltételezéssel élve mindhárom próbatest típus az aktuálisan vizsgálni kívánt komponensek között megy tönkre.

A Z irányú próbatestek hasonló elven épültek fel, mint az erre merőleges irányba vizsgált XY próbatestek, azonban itt 1 és 6 szálerősített réteg lett elhelyezve a mátrix-szálerősített pászma és a szálerősített rétegek közötti adhézió vizsgálatára kialakított próbatesteknél. A próbatestek továbbá a nagyobb függőleges irányú kiterjedés miatt L alakúra, brimmel ellátva (a geometria kontúrját követő, néhány mm széles, letapadási felületet növelő sáv) lettek nyomtatva, hogy stabilizálják a nyomtatás közben fellépő lefejtő erőket. Ezeket a próbatesteket is utólag vágtuk méretre.

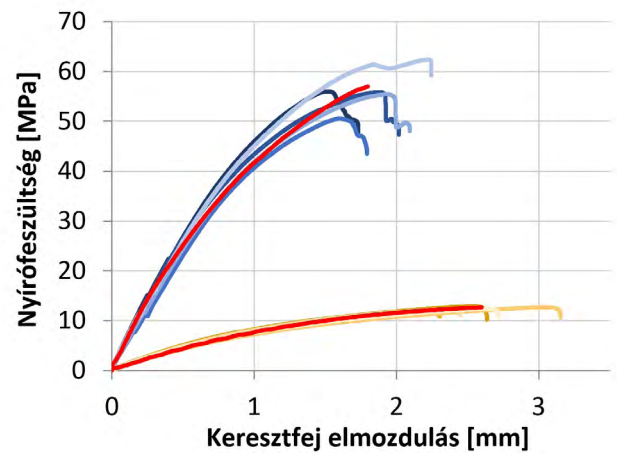
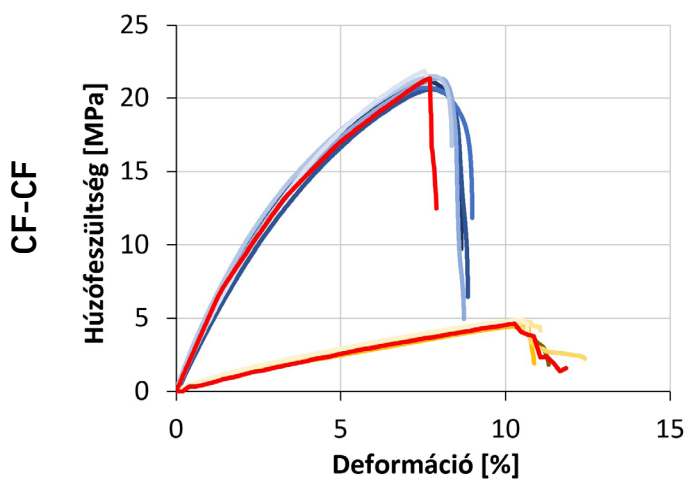
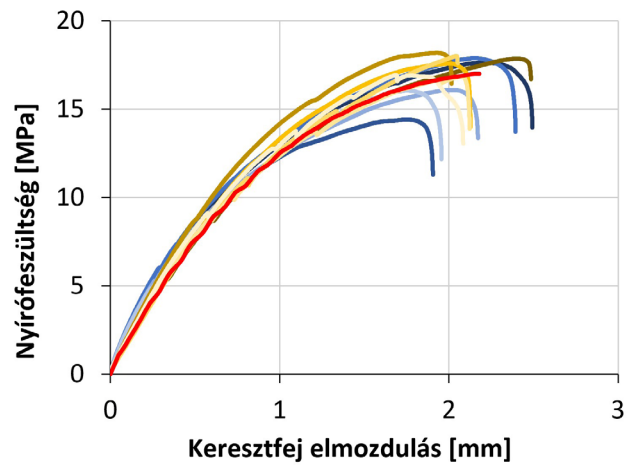
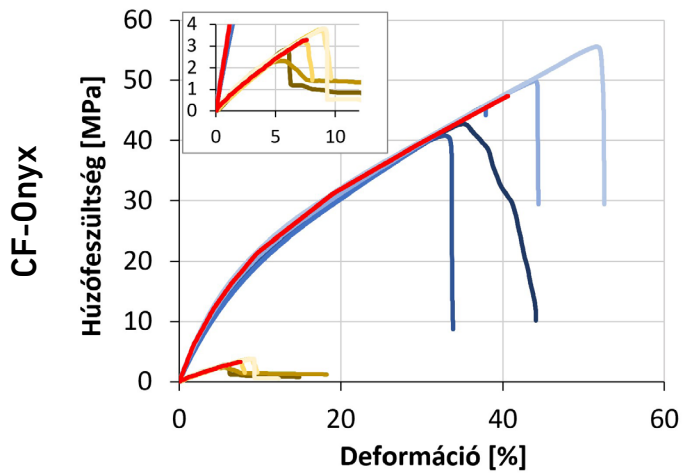
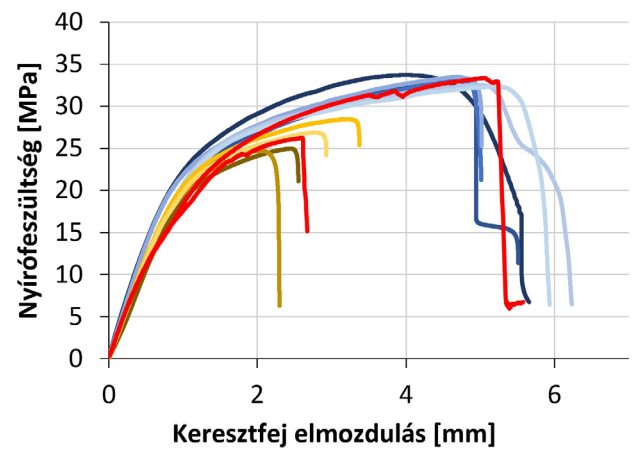
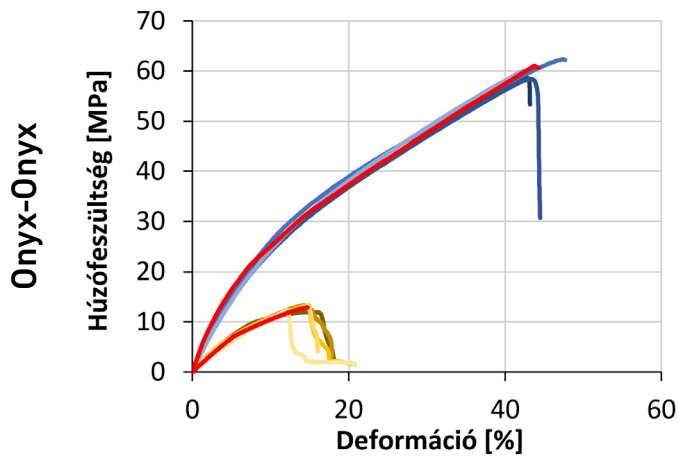
A nyíró vizsgálatokat losipescu (ISO 20505:2023) próbatest geometrián végeztük el, amelynek lényege, hogy a bevágással előre meghatározott, csökkentett keresztmetszeten megy végbe a tönkremenetel.

A nyíró próbatestek kialakítása az Z és XY orientációkban azonos stratégiát követett: a csak mátrixanyagból előállított próbatest a kritikus keresztmetszettel párhuzamos sraffozott térkitöltéssel lett kialakítva, a szálerősített pászma-mátrix kapcsolatot vizsgáló próbatestekbe egy pászma került a kritikus keresztmetszetbe, míg a szálerősített, pászmák közti tapadás vizsgálatára szánt próbatestek Z orientációban 6 egymást követő, teljes keresztmetszetében erősített réteget tartalmazott, az XY orientációban pedig kettő koncentrikus hurokból épült fel.

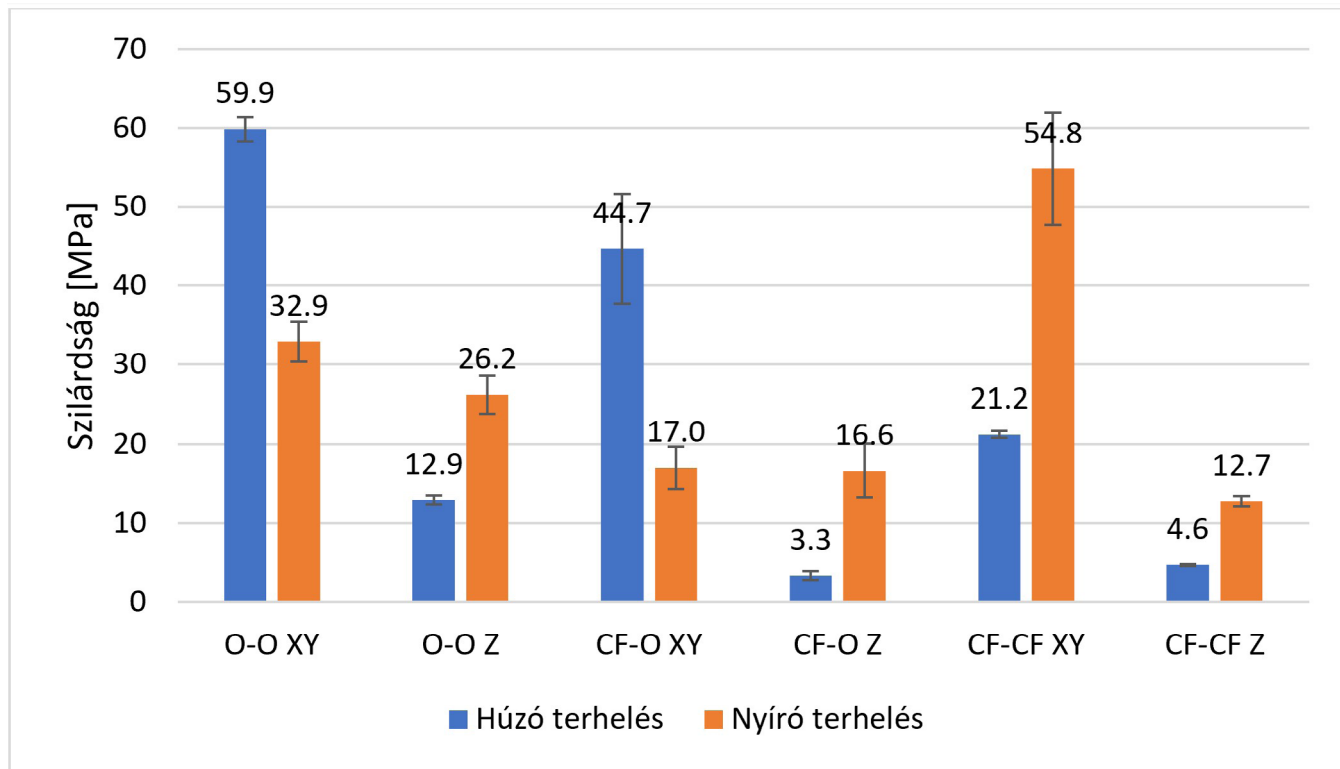
A Z orientációjú próbatesteket is a gyártási kivitelezhetőség érdekében tapadási felületet növelő anyagsávval láttuk el, amit a mérések előtt eltávolítottunk.

Húzó igénybevétel

Nyíró igénybevétel



△ 3. ábra: A különböző anyagkapcsolatokra és terhelési orientációra jellemző feszültség-deformáció lefutásgörbék, ahol a kék árnyalataival az XY orientáció, a sárga árnyalataival pedig a Z orientáció mérési görbéit jelöltük. A kalibrált rétegadhéziós paraméterekkel futtatott szimulációs eredményeket a piros görbék szemléltetik.



△ 4. ábra: A húzó (kék) és nyíró vizsgálatok (sárga) eredményeit összegző oszlopdiagram a próbatest típusokhoz tartozó szórások feltüntetésével.

2.3. SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET BEMUTATÁSA

A számítógépes vizsgálatok az iparban széles körben alkalmazott LS-Dyna végeelem szoftver segítségével készültek, amely különösen jól használható komplex, dinamikus deformációk modellezésére. A szimulációhoz egységesen 0,5 mm-es élhosszú lineáris, téglatest elemeket (Hex8) használtunk. A nyomtatott szerkezet mátrixanyagát korábbi mérések alapján beállított viselkedési modell írta le, amely figyelembe veszi az anyag rugalmas és plasztikus (maradó) alakváltozásait is.

A szimuláció során először a húzási viselkedéshez szükséges anyagparamétereket állítottuk be (FS), mivel ebben a vizsgálati módban tisztábban elkülöníthetők az anyag saját tulajdonságai. Miután a modell jól visszaadta a húzóvizsgálat eredményeit, áttértünk a nyíróterhelés vizsgálatára. Itt már a korábban beállított húzási jellemzőket használtuk kiindulási alapként és ehhez hangoltuk hozzá a nyírásra jellemző tulajdonságokat is (FD).

Erre a sorrendre azért volt szükség, mert a nyíróvizsgálatban – különösen a lágyabb, rugalmasabb anyagok esetében – a próbatest viselkedése nem csak tisztán nyírásból áll, hanem a rétegek közötti kapcsolat normál (merőleges) irányú elemei is beleszólnak a deformációba (lásd (1) összefüggés). Ezért fontos volt, hogy a kétféle vizsgálat eredményeit egymásra építve értelmezzük.

3. EREDMÉNYEK ÉS KIÉRTÉKELÉS

A mért és szimulált eredményeket a 3. ábra szemlélteti, míg a nyomó mérések eredményeit összegző oszlopdiagramokat a 4. ábra mutatja. A számadatokat és a mért, illetve szimulált eredmények közötti eltérést az 1. táblázat összegzi.

A vizsgált anyagpárok és építési orientációk mechanikai viselkedésének összehasonlítása alapján megállapítható, hogy a gyártási irány (Z) mentén kialakított rétegkapcsolatok szilárdsága minden esetben kisebb, mint a nyomtatási síkban (XY) mért értékeké. Az Onyx-Onyx (O-O) kapcsolatnál például a húzószilárdság Z irányban 26,2 MPa, míg XY irányban 59,9 MPa, amely 56%-os csökkenést jelent. Hasonló tendencia figyelhető meg a nyírószilárdság esetén is (Z: 12,9 MPa, XY: 32,9 MPa). A szénszállal erősített kompozit és mátrix anyag határfelülete (CF-O) még kifejezettebb irányfüggést mutat, különösen nyírásnál, ahol a Z irányú szilárdság 3,3 MPa, szemben az XY irányban mért 17,0 MPa értékkel, ami 81%-os csökkenésnek felel meg. Az anyagpárok közötti összehasonlítás alapján az O-O kapcsolatok mutatják a legnagyobb húzószilárdságot XY orientációban (59,9 MPa), míg nyírásra a CF-CF kapcsolatok teljesítménye kiemelkedő (54,8 MPa). Ezzel szemben a CF-O kombináció minden esetben alacsonyabb értékeket mutatott, ami az eltérő mechanikai tulajdonságú rétegek közötti határfelület gyengébb kohéziójára utal. A húzó- és nyírószilárdság aránya szintén jellegzetes mintázatot mutat. Az O-O és CF-O kapcsolatok esetén a húzószilárdság minden orientációban meghaladja a nyírószilárdságot, míg a CF-CF kapcsolatok esetében ennek fordítottja figyelhető meg: az XY orientációjú minták nyírószilárdsága több mint kétszerese a húzószilárdságnak (54,8 MPa vs. 21,2 MPa). Ez a különbség a

szálerősítés nyíró igénybevételre való irányított teherbírását tükrözi, míg húzás esetén a szálak közötti mátrix integritása válik meghatározó tényezővé.

A szilárdsági értékeken túl az egyes anyagpárok jellemző terhelési lefutásgörbéi is lényeges eltéréseket mutattak. A feszültség-deformáció görbék alapján (3. ábra) kijelenthető, hogy a húzó igénybevétel mellett az XY és Z irányban nyomtatott minták felterhelési pályái jelentősen eltértek egymástól. Az XY minták jellemzően meredekebb, kezdetben lineárisabb görbékkel viselkednek, ami nagyobb szerkezeti merevségre és hatékonyabb erőátvitelre utal. Ennek oka a mikroszerkezet orientált, kompakt elrendezése, valamint a rétegen belüli nagyobb, aktív terhelésátadó felület és a húzás irányával párhuzamos extrudátum molekula orientáció. A Z irányban nyomtatott minták esetében a meredekség csökkenése arra utal, hogy az erőátvitel kisebb aktív felületen zajlik le, ami kedvezőtlen a mechanikai válasz szempontjából.

Az O-O és CF-O kapcsolatok nyírási karakterisztikájában a próbatestek feszültség-deformáció görbék alakja és lefolyása meglepő hasonlóságot mutat a két eltérő orientációjú próbatest esetén. A kalibrált szimulációs görbék gyakorlatilag teljes átfedést mutattak, az O-O kapcsolatnál csak a teljes terhelési tartomány feléig, azonban a CF-O kapcsolatnál a teljes tartományon. Ezért a CF-O kapcsolatoknál közös kalibrációs görbe alkalmazása is elegendőnek bizonyult. Ez a jelenség arra enged következtetni, hogy a CF-O anyagpár rétegekapszolatának nyírási viselkedését elsősorban nem a próbatest geometriája vagy orientációja, hanem a heterogén fázishatár tulajdonságai határozzák meg. A hasonló karakterisztika és szilárdságérték annak a jele, hogy ebben a párosításban a mátrix és az erősítő szál közötti tapadás magas deformációs szinteken is megmarad, függetlenül a mikroszerkezet irányultságától.

1. táblázat: A különböző igénybevételi és próbatest típusok mérési és szimulációs eredményeit összegző és összehasonlító táblázat, ahol a mért eredmények átlaga és szórása ($\sigma_{max} / \tau_{max}$ mért), valamint a reakcióerő lefutásból visszszámolt maximum értékek ($\sigma_{max} / \tau_{max}$ szimulált) láthatók.

Próbatestek	$\sigma_{max} / \tau_{max}$ mért [MPa]	$\sigma_{max} / \tau_{max}$ szimulált [MPa]
Húzás (σ)		
O-O XY	59,9±1,5	61,1
O-O Z	12,9±0,6	12,9
CF-O XY	44,7±7,0	47,4
CF-O Z	3,3±0,6	3,3
CF-CF XY	21,2±0,4	21,4
CF-CF Z	4,6±0,2	4,6
Nyírás (τ)		
O-O XY	32,9±0,1	33,4
O-O Z	26,2±2,4	26,2
CF-O XY	17,0±2,6	17,0
CF-O Z	16,6±3,4	17,0
CF-CF XY	54,8±7,1	56,0
CF-CF Z	12,7±0,7	12,7

A szimulációval kapott eredmények általánosságban jó egyezést mutatnak a mért adatokkal, amit az 1. táblázatban látható összevetés is megerősít. A numerikusan számolt és a kísérletileg mért szilárdsági értékek közötti szilárdsági eltérés jellemzően 2% alatti maradt. A szimulált görbék nemcsak a végső szilárdságot, hanem a görbe alakját és a kezdeti merevséget is jól reprodukálták. A legjobb egyezést a CF-CF Z irányú minták esetén tapasztaltuk, ahol a szimulált (12,66 MPa) és mért (12,70 MPa) értékek gyakorlatilag teljesen fedik egymást. Ezek az eredmények megerősítik, hogy a modellezett paraméterek, különösen a kalibrált kohéziós zónák jellemzői megfelelően visszaadják a szál-mátrix kapcsolati viselkedést és jól kezelik a szálirányú nyírás során jelentkező komplex feszültségállapotokat.

Összességében az eredmények rámutatnak arra, hogy a 3D nyomtatással készült rétegekapszolatok mechanikai teljesítménye erősen függ az építési orientációtól, valamint az anyagpárosítástól. A rétegek közti tapadás gyengesége különösen a Z irányú terhelés esetén válik kritikus tényezővé, míg a homogén anyagkapcsolatok (O-O) és a célirányosan alkalmazott szálerősítések (CF-CF) jelentős szilárdság növekedést biztosíthatnak megfelelő terhelési irány esetén.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A vizsgálatok rámutattak arra, hogy a 3D nyomtatott kompozit szerkezetek réteghéziós tulajdonságai jelentős mértékben függenek mind az alkalmazott anyagpártól, mind az építési orientációtól. Az elvégzett kísérleti és numerikus összehasonlítások révén számszerűsítettük az irányfüggő mechanikai viselkedést és azt a szimulációs modellbe integráltuk egy iterációs módszeren alapuló paraméter kalibráció során.

Főbb megállapítások:

- A Z irányú rétegekapszolatok szilárdsága minden esetben alacsonyabb volt az XY síkban mérthez képest, különösen a húzó igénybevétel esetén.
- A CF-O kapcsolatok mutatták a legnagyobb irányfüggést, a nyírószilárdság akár 81%-kal is csökkent Z irányban az XY-hoz képest, jelezve a szál-mátrix határfelület gyenge kohézióját.
- Az O-O kapcsolatok biztosították a legnagyobb húzószilárdságot (59,9 MPa), míg a CF-CF párosítások nyírásra voltak a leginkább ellenállóak (54,8 MPa).
- A CF-CF kapcsolatok esetén a nyírószilárdság meghaladta a húzószilárdságot, ami a szálirányú teherbírás dominanciájára utal.
- A szimulációk mennyiségileg és minőségileg is kellő pontossággal visszaadták a mért eredményeket, jellemzően kevesebb mint 2% eltérés volt megfigyelhető a vizsgált esetekben.

Továbbfejlesztési lehetőségek:

Érdemes lehet mikroszkopikus vizsgálatokkal feltérképezni a szál-mátrix határfelület tényleges adhéziós és károsodási mechanizmusait, hogy ezek beépíthetők legyenek a jövőbeni modellekbe. A vizsgálatok alapján indokolt a nyomtatási stratégia és orientáció tudatos optimalizálása a céltulajdonságok (pl. húzó vagy nyíró igénybevétellel szembeni ellenállóság) figyelembevételével.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A Doktoranduszi Kiválósági Ösztöndíj Program (DKÖP) által támogatott kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közös támogatásával, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatallal kötött támogatási szerződés alapján valósult meg. Az Egyetemi Kutatói Ösztöndíj Program (EKÖP) által támogatott kutatást a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott, a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatási szerződés alapján valósult meg. A kutatást a 2022-2.1.1-NL-2022-00012 – Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium pályázat támogatta. Az eredmények megjelenését a Nemzeti Kutatási és Innovációs Alap OTKA K 138472 számú pályázata támogatta.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Wong K. V., Hernandez A.: A review of additive manufacturing. ISRN Mechanical Engineering, 2012, 1-10 (2012).
- [2] Frketic J., Dickens T., Ramakrishnan S.: Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing. Additive Manufacturing, 14, 69-86 (2017).
- [3] Kabir S. M. F., Mathur K., Seyam A. F. M.: A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties. Composite Structures, 232, Paper ID: 111476 (2020).
- [4] Banjanin B., Vladić G., Pál M., Dimovski V., Adamović S., Delić G.: Production factors influencing mechanical and physical properties of FDM printed embossing dies. 'Proceeding of 9th International Symposium on Graphic Engineering and Design, 225-236 (2018).
- [5] Liu Z., Wang Y., Wu B., Cui C., Guo Y., Yan C.: A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102, 2877-2889 (2019).
- [6] Penumakala P. K., Santo J., Thomas A.: A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites. Composites Part B: Engineering, 201, 108336 (2020).
- [7] Lambiase F., Pace F., Andreucci E., Paoletti A.: Flow rate-dependent interlayer adhesion in FDM: a thermal and mechanical analysis. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 136, 1703-1716 (2025).
- [8] Hu Y., Lin Y., Yang L., Wu S., Tang D. Y., Yan C., Shi Y.: Additive

Manufacturing of Carbon Fiber-reinforced Composites: A Review. Applied Composite Materials, 31, 353-398 (2024).

- [9] Peng Y., Wu Y., Li S., Wang K., Yao S., Liu Z., Garmestani H.: Tailorable rigidity and energy-absorption capability of 3D printed continuous carbon fiber reinforced polyamide composites. Composites Science and Technology, 199, 108337 (2020).
- [10] ANSYS: LS-DYNA Manual, Volume I, R15. Web: https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/web/ls-dyna_manuals/R15/LS-DYNA_Manual_Volume_I_R15.pdf (accessed on Apr 24, 2025)

A POLIMEREK szakmai folyóiratot a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Tudományok Osztálya hazai, lektorált tudományos folyóiratnak fogadja el, a Magyar Tudományos Művek Tárában (MTMT) is magyar nyelvű, lektorált folyóiratként van nyilvántartva.

Ezt jelzi Lektorált tudományos közlemények rovatunk, amelyben az egyetemektől és tudományos kutatóintézetektől kapott tudományos cikkeket a nemzetközi elvárásoknak megfelelően, a Tudományos Szerkesztőbizottságunk (egyetemi tanárok, MTA doktorok) lektorálása után közöljük.

A tudományos cikkeknek külön jelölve van a rovatcímében, hogy *Lektorált tudományos közlemény*, ezek felépítése megfelel a szigorú nemzetközi normáknak, a magyar mellett angol nyelvű absztrakt foglalja össze az eredményeket, a cikk bevezetése tartalmazza a tudomány jelenlegi állását megfelelően alátámasztva hivatkozásokkal. A következő részben modern eszközökkel és módszerekkel elért eredményeket mutatják be a szerzők, az összefoglalás pedig rendszerezi a cikk eredményeit. A cikkek végén a köszönetnyilvánítás és az egyetemes irodalmi hivatkozás szerepel. Mindezek alapján valósulhatott meg, hogy a POLIMEREK az MTMT-ben lektoráltként szerepel mind a PhD, mind az MTA doktori eljárásokban – elismert és elfogadott folyóiratként.