



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

POLIMERTECHNIKA TANSZÉK

KISS BÁLINT

LUKÁCS NORBERT LÁSZLÓ

RÉTEGKÖZI HEGEDÉS VIZSGÁLATA

FFF TÍPUSÚ 3D NYOMTATOTT TERMÉKEKEN

TDK DOLGOZAT

Témavezető:

Dr. Kovács Norbert Krisztián

adjunktus, BME Polimertechnika Tanszék

Konzulens:

Tóth Csenge

doktorandusz, BME Polimertechnika Tanszék

BUDAPEST, 2021

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Tóth Csengének, Dr. Kovács Norbert Krisztiánnak és Dr. Török Dánielnek a félév során nyújtott támogatásért, illetve Horváth Istvánnak a mintagyártásban nyújtott segítségért.

A TDK dolgozat a Magyar Tudományos Akadémia Magyarország-Olaszország kétoldalú mobilitás pályázatának keretein belül készült (NKM2018-42).

A TDK dolgozatot a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA (FK 134336) pályázata támogatta.

A TDK dolgozat a 2018-1.3.1-VKE-2018-00001 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a 2018-1.3.1-VKE pályázati program finanszírozásában valósult meg.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	3
2. Szakirodalmi áttekintés	4
2.1. Hegedés folyamata amorf hőre lágyuló polimerek esetén	5
2.2. Hegedés folyamata részben kristályos hőre lágyuló polimerek esetén	10
2.3. Hegedési minőség javításának gyakorlati megoldásai.....	12
2.3.1. A hegedés javítása hőbevezetéssel	14
2.3.2. A hegedés javítása hőbevezetés nélkül.....	15
2.3.3. Összegzés, célkitűzés.....	16
3. Felhasznált anyagok, alkalmazott berendezések	17
3.1. Felhasznált alapanyagok.....	17
3.2. Additív gyártóberendezések, szeletelő szoftverek.....	17
3.2.1. CraftBot Plus	17
3.2.2. Ender 3.....	18
3.2.3. Slic3r szeletelőszoftver	18
3.2.4. SuperSlicer.....	18
3.3. Mechanikai anyagvizsgáló berendezés – Zwick Z005.....	19
4. Kísérleti/fejlesztési rész	21
4.1. Kísérletterv	21
4.2. Gyártási paraméterek hatása a mechanikai tulajdonságokra	24
4.3. A rétegek közötti hegedés javításának egy módja	29
5. ÖSSZEFOGLALÁS	32
5.1. Magyar nyelvű összefoglaló	32
5.2. Angol nyelvű összefoglaló.....	33
5.3. További megoldásra váró feladatok.....	33
6. Felhasznált források	34
7. Mellékletek.....	37

1. BEVEZETÉS

Az additív gyártástechnológiák már az 1980-as évek óta léteznek, az azóta eltelt negyven év alatt pedig rohamos fejlődésen mentek keresztül. Kezdetben ezeket az eljárásokat prototípusok gyors és költséghatékony létrehozására használták, melyek egyedüli feladata az ötletek, koncepciók valós modellel történő szemléltetése volt, más követelmények szempontjából (például alapanyag, mechanikai tulajdonságok stb.) a prototípusoknak nem kellett egyezniük a végtermékkel [1,2]. Manapság a technológia már funkcionális alkatrészek, késztermékek gyártására is alkalmas, így az ipar több területén is kihasználják a benne rejlő lehetőségeket, mint például az autóipar, a repüléstechnika, vagy az orvostechika. Az additív gyártási eljárásokkal az alapanyagok széles skálája felhasználható, a fémektől és polimerektől kezdve a kerámiákon át egészen a kompozitokig [3].

Az additív gyártástechnológiák működési elvének közös alap gondolata a következő: egy számítógépen, valamilyen CAD szoftver segítségével létrehozott 3 dimenziós modellből kiindulva, a modellt egy erre a célra kifejlesztett szeletelő szoftver segítségével x-y síkbeli rétegekre bontva, rétegről-rétegre haladva építjük fel a kívánt terméket. Érdekes kiemelni, hogy az egyes rétegeket jellemzően síkbeli mozgásokkal alakítjuk ki, majd a következő réteg létrehozásához tovább lépünk függőleges (z) irányban a rétegvastagságnak megfelelő mértékben. Ezeket a lépéseket addig ismételjük, amíg elkészül a termék. A rétegről-rétegre történő felépítés velejárója, hogy az additív gyártással készült termékek mechanikai tulajdonságai is változnak az egyes rétegek között, jelentős anizotrópiát (a csökkenés akár 20-50%-os is lehet) kialakítva ezzel [4,5].

Különösen igaz ez az ömledékrétegzésen alapuló technológiák esetében, melyek a dolgozatunk tárgyát képezik. Az eljárást az angol nyelvben FFF (Fused Filament Fabrication), vagy FDM (Fused Deposit Modeling) mozaikszavakkal rövidítik, a dolgozatunkban mi az eljárásra FDM-ként fogunk hivatkozni a továbbiakban. Bár a technológia hátrányai, mint az említett anizotrópia vagy az egyéb műanyagipari gyártástechnológiákhoz képesti (például fröccsöntés, extrúzió) gyenge termelékenység ismertek, könnyű hozzáférhetősége és a relatív alacsony beruházási, valamint üzemeltetési költségei miatt népszerű mind az iparban, mind a hobbifelhasználók körében. [4,5].

Az anizotrópikus viselkedés ismerete, valamint a jelenség hatásainak csökkentése kulcsfontosságú lehet abban az esetben, ha műszaki funkciókat ellátó alkatrészeket szeretnénk FDM-el gyártani. Munkánkkal választ keresünk arra, hogy a különböző gyártási paraméterek milyen hatással vannak a legyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságaira. További célunk, hogy a lehető legnagyobb mértékben csökkentsük az anizotrópiát.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

A hegedési kapcsolatok szakirodalmi áttekintése előtt a könnyebb megértés érdekében ebben a bekezdésben röviden ismertetjük az FDM technológiát. Ahogy a bevezetésben is említettük, a gyártás során egy CAD modellből indulunk ki, melyet egy szeletelőszoftver segítségével síkrétegekre bontunk. Ezt követően előállítjuk a nyomtatáshoz szükséges parancsokat tartalmazó G-kódot, melynek birtokában megkezdhetjük a nyomtatást. Az FDM technológiához egy polimerszálat, úgynevezett filamentet használunk fel alapanyagként, melyet jellemzően tekercselt formában tárolunk. A filament készülhet részben kristályos, illetve amorf anyagból is. A részben kristályos polimerekről tudjuk, hogy tartalmaznak kristályos részeket, illetve amorf részeket, ezek arányát adja meg a kristályos részarány. Amorf anyagoknál nem figyelhető meg semmilyen rendezettség, a teljes tartományt amorf fázis alkotja. A két típus közötti különbséget gyakorlati szempontból az adja, hogy a részben kristályos alapanyaggal jobb mechanikai tulajdonságokat lehet elérni, míg alaktartás szempontjából az amorf anyagok viselkednek kedvezőbben, a kisebb zsugorodás miatt. A filamentet egy előtoló berendezés segítségével juttatjuk el a nyomtatófejhez, ahol az alapanyag megömlik, majd a fúvókán keresztül kijut a munkatérbe. A berendezés a terméket rétegenként építi fel, vagyis egy rögzített függőleges magasságérték mellett elkészíti a termék adott magassághoz tartozó x-y irányú síkmetszetét. Ezt követően a fej elmozdul függőleges irányban a rétegmagasságnak megfelelő értékkel, majd elkészíti az ezt a réteget jellemző síkmetszetet. Ez a folyamat egészen a termék elkészültéig ismétlődik. [1,4,5].

A rétegről rétegre történő építkezés egyik velejárója, hogy a termékben a függőleges irányú tulajdonságok eltérnek az x-y síkbeli tulajdonságoktól. Ennek oka abban rejlik, hogy mikor egy rétegre elkezdjük rányomtatni a következőt, akkor a kész rétegben az alapanyag már lehűlt. Ebből következik, hogy a szálak két rétegek között nem tudnak olyan mértékben összekapcsolódni egymással, mint rétegen belül. Mindemelett a rétegek között üregek alakulnak ki, amelyek hibahelyeket visznek a termékbe, illetve csökkentik a rétegek közötti kapcsolódó felületek nagyságát, ami (ahogy később látni fogjuk) hátráltatja a megfelelő rétegek közötti kapcsolat kialakulását. A rétegek közötti üregeket, illetve a rétegek között értelmezett hegedés helyét szemlélteti az 1. ábra. A rétegek közötti kapcsolat minőségét befolyásolhatjuk a gyártási paraméterek megfelelő beállításával. Ilyenek például a munkaasztal és a fúvóka hőmérséklete, a termékűtés mértéke, a nyomtatás sebessége, az előtolás mennyiségét jellemző extrúziós mutató értéke, az alkalmazott rétegmagasság, szálszélesség, vagy akár a kitöltés iránya, százalékos nagysága. Ezeken kívül még rengeteg paraméter változtatására van lehetőségünk, azonban nem mindegyik lesz hatással a rétegek közötti hegedésre.

Azért, hogy a rétegek között a lehető legjobb kapcsolatot hozzuk létre, az irodalomkutatásunkban feltérképezzük a rétegek között lejátszódó hegedési folyamatokat, mechanizmusokat mind amorf, mind részben kristályos polimerek

esetére. Ezek ismeretében ki tudjuk választani a hegedés szemszögéből fontos paramétereket, majd kísérleti úton meg tudjuk vizsgálni ezek hatását. A kapott eredmények alapján pedig képesek leszünk a megfelelő beállításokkal a lehető legnagyobb mértékben csökkenteni a termékeink függőleges irányú anizotrópiáját.

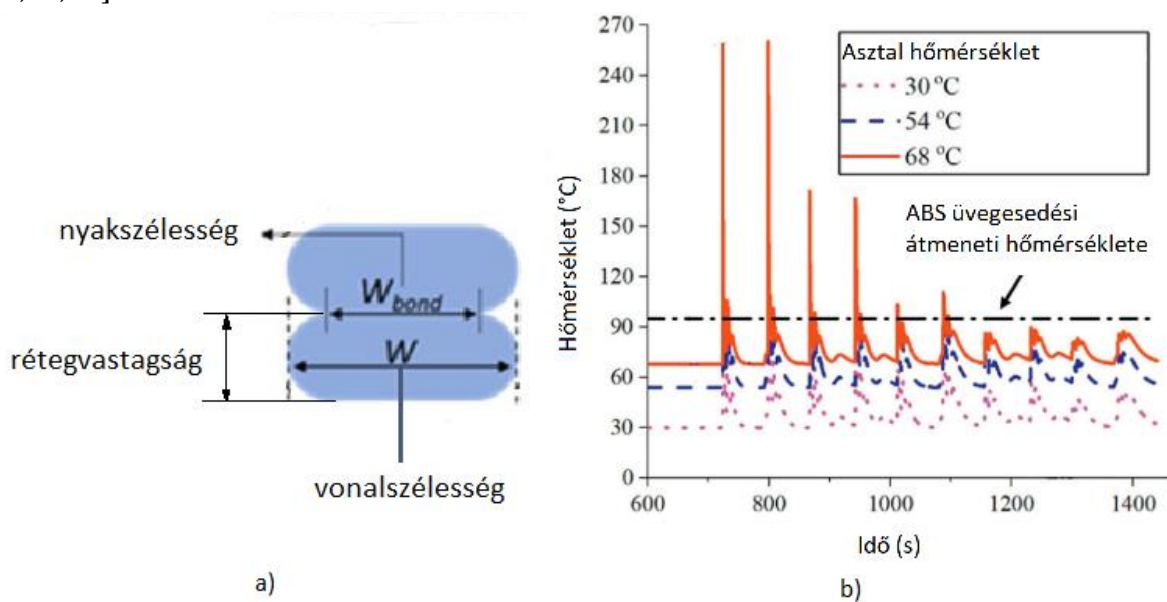


1. ábra a) - Kétfejes FDM nyomtató vázlatos felépítése, b) - Rétegek közötti üregek, rétegek közötti hegedés értelmezése [6]

2.1. Hegedés folyamata amorf hőre lágyuló polimerek esetén

Ebben a bekezdésben az amorf hőre lágyuló polimerekben megfigyelhető hegedési folyamatokat fogjuk ismertetni. A hegedési folyamat FDM típusú 3D nyomtatás esetén alapvetően 5 lépésre osztható, ezek az alábbiak: felületi átrendeződés, felszíni közeledés, nedvesítés, diffúzió, keveredés (gyakran az első kettő és az utolsó kettő lépést egyként kezelik). A hegedés létrejöttéhez először a felületeket kell kellő közelségbe hoznunk egymással, ezt külső erők segítségével tehetjük meg, FDM esetén ez az erő a fűvóka nyomásából ered [7-9]. Itt érdemes kiemelni, hogy a fűvóka nyomása üres térbe való nyomtatás esetén kicsi, míg a korábbi rétegre (vagy a tárgyasztalra) való nyomtatáskor megnő. Ezt a nyomást nevezzük kontakt nyomásnak (P_{kontakt}), melynek értéke a vonalszélességtől, a nyomtatási sebességtől, a hőmérséklettől és a rétegvastagságtól függ (a 2. ábra szemlélteti a vonalszélesség és rétegvastagság jelentését, a kontakt nyomást a két réteg közötti felületen kell értelmezni). Miután rendelkezésünkre áll a megfelelő összenyomó erő, pillanatszerűen játszódik le a felületi feszültség által vezérelt nedvesítés (ezt a folyamatot egyébként a viszkozus erők gátolják). Itt lényegében egy nyakképződési és növekedési folyamat figyelhető meg a szálak között. Mivel az FDM során a kapcsolat létrejöttéhez rendelkezésre álló idő rendkívül rövid, ezért gyakran csak részlegesen játszódik le a nyakképződés, így az egyes szálak között üregek képződnek (a rétegek között így kialakult nyak szélességét számszerűsíteni is lehet). A gyártás folyamán a lerakott szálak határfelületein nem izoterm hőmérsékletprofil alakul ki, hanem a hőmérséklet periodikusan változik az új szálak lerakásának köszönhetően (ezt több módszerrel is bizonyították, pl.: infravörös termográfia, heat transfer analysis). A

hőmérséklet időbeli változását mutatja ABS esetén különböző asztalhőmérsékletekre a 2. ábra, innen is látszik, hogy valóban rendkívül rövid ideig tartózkodik az anyag a T_g üvegesedési hőmérséklet felett. Ez a tény azért fontos, mert az anyagban a rétegek közötti diffúzió csak T_g felett megy végbe. Mielőtt továbbmennénk, ejtsünk néhány szót az üvegesedési hőmérsékletről. Polimerek esetén létezik egy átmeneti hőmérséklettartomány, amely felett az anyag amorf fázisa nagyrugalmas amorf, alatta pedig üveges amorf állapotban van. Ezt az átmeneti hőmérséklettartományt T_g -vel jelöljük és üvegesedési hőmérséklettartománynak nevezzük. A továbbiakban ennek értelmében pusztán T_g névvel fogunk hivatkozni erre a hőmérséklettartományra [7,9,11,13,15].

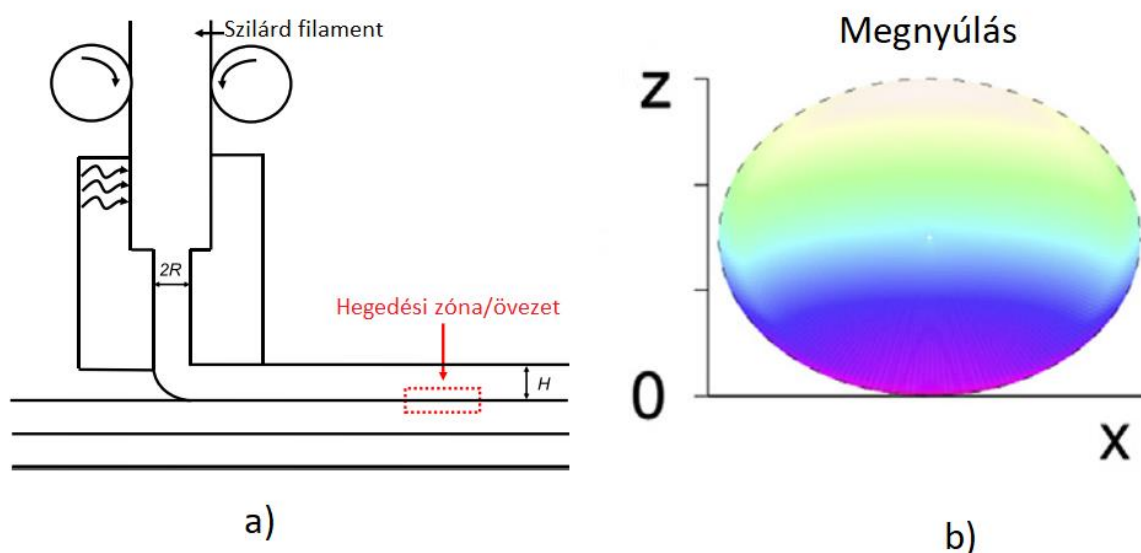


2. ábra a) - Kötés szélesség és vonalvastagság jelentése [11], b) - Egy vizsgált réteg felületének hőmérsékletprofilja (ABS alapanyag) [13].

Az üregeknek és ezáltal a nyaknövekedésnek nagy szerepe van a megfelelő kötés kialakulásában, ugyanis lényegében ez a nyak jelenti a két réteg közötti kontaktfelületet (minél nagyobb a nyak szélessége, annál jobb lehet a kötés erőssége) [7,11]. Az üregsűrűség gyártási paramétereiktől való függésére vonatkozóan az alábbiakat lehet elmondani: a rétegvastagság csökkentésével, a fúvóka hőmérséklet emelésével, illetve a nyomtatási sebesség növelésével is az üregsűrűség csökkenését érhetjük el [12-15].

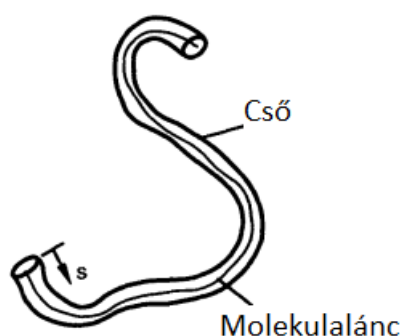
A nyakképződést követően megindul a rétegek között a molekuláris diffúzió, ez kulcsfontosságú a kötés erőssége, minősége szempontjából, így elengedhetetlen a folyamat részletes ismertetése. A kötéskialakulás ezen szakaszának megértéséhez tekintsük át a rétegek létrehozása közben végbemenő folyamatokat. Az anyaglerakás során az anyagáram 90°-ban elfordul, így az ömlédékáram keresztmetszetének alsó részében a molekulák jelentős deformációja figyelhető meg. Ezt a deformációt kiváltó feszültség a későbbiek folyamán részben relaxálódik (a 3. ábra mutatja az anyagáram elfordulását és a deformációeloszlást a keresztmetszet mentén). Mivel a nyomtatás

során az ömledék elég gyorsan lehűl T_g alá, ezért a molekulák relaxációja (a megnövekedett deformációnak köszönhetően) ebben a keresztmetszetrészben nem megy teljesen végbe, aminek hatására egy nemegyensúlyi állapot rögzül a lehűlt rétegben. Amennyiben tárgyhűtést is alkalmazunk, a T_g alá történő hűléshez szükséges idő még rövidebb, még kevésbé tudnak relaxálódni a molekulaláncok. A relaxáció a reptációs idő szerint zajlik, melyet a nyomtatási hőmérséklet, az anyagban jelenlévő áthurkolódás mértéke és a nyírósebesség is befolyásol. A molekulák relaxációjának szerepe tehát azért jelentős, mert a két réteg közötti diffúzió megindulásához és a hegedési zónában az áthurkolódások kialakulásához szükség van a molekuláris szintű deformáció visszaalakulására. Mielőtt továbbmennénk érdemes pár szót ejteni a reptációról: ömledékben a molekulaláncok keresztirányú mozgását a szomszédos láncok akadályozzák, korlátozzák, ez egy csőszerű korlátot jelent (ezt szemlélteti a 4. ábra). A molekulaláncok a „cső”-ben hosszirányban szabadon mozoghatnak, ezt a mozgást nevezzük reptációnak. [9,16,20,21].



3. ábra a) – Anyagáram 90°-os elfordulása nyomtatás során [16], b) – Az anyagáram keresztmetszetében megfigyelhető deformáció (a színek a deformáció mértékét jelölik úgy, hogy az a világostól sötét felé haladva nő) [16]

A következő réteg lerakása következtében a folyási hőmérséklet (T_f) feletti alapanyag felhevíti a korábban lerakott réteget. Mivel a réteg-réteg kapcsolat mentén az anyag lassabban hűl le, emiatt mind a korábban lerakott rétegben, mind a frissen lerakott anyagban van idő a molekulaszervezet teljes relaxációjára, a reptációs idő csökkenésének köszönhetően (ugyanis a reptációs idő a hőmérséklet emelésével jelentősen csökken). Érdemes kiemelni, hogy az imént említett hőmérsékletemelkedés lényegében rétegenként ismétlődik (persze a rétegszám növekedésével a vizsgált réteg hőmérsékletemelkedése egyre inkább kisebb mértékű lesz). A T_g alá történő lehűlés ideje azonban elég rövid, így a frissen lerakott réteg alsó részén megfigyelt deformációtöbblet miatt az egyik deformációkomponens visszaalakulása nem valósul meg teljesen. Ez a jelenség anizotrópiát okoz a rétegek kapcsolódási felülete környezetében [16,18].



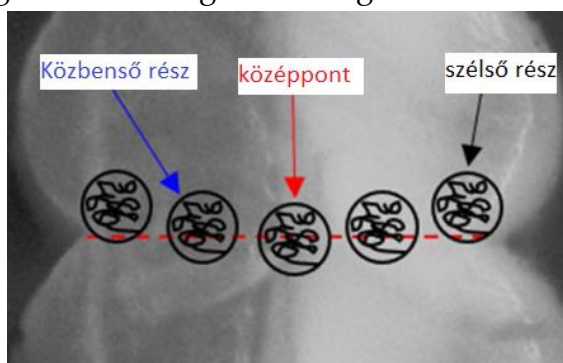
4. ábra Molekulalánc mozgását korlátozó [17]

A rétegek közötti diffúzió hatására az egyik réteg molekulái a másik rétegbe valamekkora mélységig behatolnak, ezt nevezzük behatolási mélységnek, melynek nagyságát 3 módszerrel közelíthetjük. Az izotróp leírás értelmében az épp aktuálisan lerakott rétegben a reptációs idő kicsivel kisebb, mint a korábban lerakott rétegben (köszönhetően a nagyobb hőmérsékletnek és deformációnak), így ezeknek a molekuláknak a behatolási mélysége kissé nagyobb. Az anizotróp megközelítés szerint a behatolási mélységek kisebbek az izotróp esethez képest, de az imént ismertetett aszimmetria itt is megfigyelhető. A harmadik értelmezés az úgynevezett kölcsönös diffúziós leírás, melynek értelmében a 2 réteg közötti diffúzió egy kiválasztott réteg szempontjából nem csak az adott réteg szerkezeti anizotrópiájától, hanem annak a rétegnek a szerkezeti anizotrópiájától is függ, amelyikbe diffundálnak a molekulák. A frissen lerakott réteg nagyobb deformációja miatt ennek a rétegnek a molekulái mozgékonyabbak, vagyis a közeg anizotrópiája nagyobb. Ennek értelmében a korábban lerakott réteg molekulái nagyobb behatolási mélységgel diffundálnak a frissen lerakott rétegbe. Mindezeket összevetve kijelenthető, hogy a molekulák eltérő behatolási mélysége miatt a hegedési zónában a határrétegek mélysége aszimmetrikus [16].

Fontos kiemelni, hogy az anyaghőmérsékletnek és a hőntartási időnek is nagyon intenzív hatása van a diffúzióra és ezáltal a behatolási mélységre. Ahogy korábban is ismertettük, a diffúzió egészen addig zajlik, amíg az adott anyagrész hőmérséklete T_g felett van. Kazmer és társai munkája alapján ismert, hogy a molekulák diffúziójára az alapanyag hőmérséklete jelentősebb pozitív hatást fejt ki, mint a T_g feletti hőntartás ideje. Ebből egyértelműen következik, hogy rövid ideig fenntartott magas hőmérséklet esetén erőteljesebben valósul meg a diffúzió, mint hosszabb ideig fenntartott alacsonyabb hőmérséklet esetén, tehát nyomtatás során a lehető legnagyobb fűvókahőmérsékletet kell elérni a rétegek közötti hegedés javítása érdekében (nyilvánvalóan az lenne az optimális, ha minél tovább tudnánk a magas hőmérsékletet fenntartani).

A korábbiakhoz hasonlóan a szálak keresztmetszetében is aszimmetriát figyelhetünk meg a behatolási mélység tekintetében (ezt mutatja a 5. ábra), a középpontban nagyobb mértékű diffúzió figyelhető meg, mint a széleken (ennek hátterében az az egyszerű tény áll, hogy a szál közepe lassabban hűl, mint a szál széle).

Amint megvalósult a molekuladeformációk (illetve a „cső” deformációjának) visszaalakulása, elkezdenek kialakulni a molekulák közötti áthurkolódások a hegedési zónában. Ez rendkívül fontos folyamat, ugyanis így alakul ki a kellő minőségű kötés. Kismértékű áthurkolódás esetén a hegedés gyenge lesz, a kötés erősség még nagy behatolási mélység esetén sem lesz megfelelő. McIlroy és társai kimutatták, hogy a kötés erősségét nagyobb mértékben befolyásolja a rétegek között a molekulák áthurkolódása, mint azok behatolási mélysége [16-19]. A megfelelő áthurkolódási fok elérése érdekében az ömledékben a hegedés előtt az áthurkolódások csökkenése az előnyös (ez például a fúvókán való átsajtolás miatt fellépő nyírás hatására következhet be), így a hegedés során a két réteg között a hegedési övezetben könnyebben ki tudnak alakulni az áthurkolódások, vagyis erősebb lesz a kötés. Azt is érdemes megemlíteni, hogy a hűlés miatt a molekulák áthurkolódásának kialakulására és újra szerveződésére nincs elegendő idő, mivel az áthurkolódások szintén csak T_g feletti hőmérsékleteken alakulhatnak ki. Ennek következtében a tömör anyagra jellemző áthurkolódási fok 50%-nak megfelelő mértékű áthurkolódottság figyelhető meg a hegedési zónában. Az áthurkolódás kapcsán érdemes szót ejteni a molekulatömegről: nagy molekulatömegű polimer használata esetén a kiinduló alapanyagban sok az áthurkolódás, ez akadályozza a megnyúlást követően létrejövő deformációk visszalakulását, így megnehezíti a megfelelő rétegek közötti kötés létrejöttét [16-19].



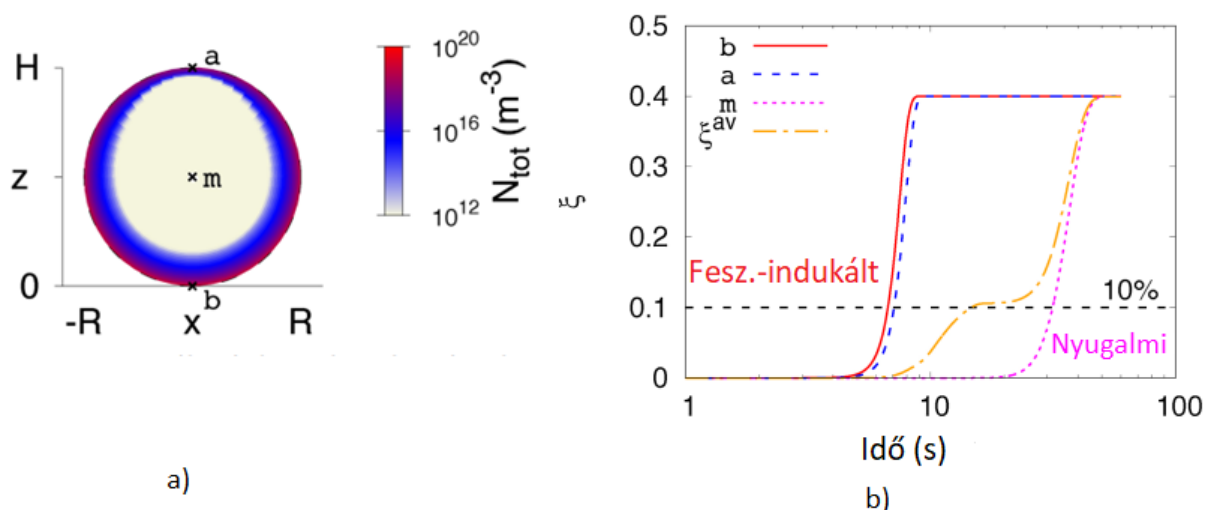
5. ábra Áthurkolódás keresztmetszet menti aszimmetriája, vázlatosan [11].

Összefoglalva az előzőeket elmondható, hogy az FDM technológia jelentősen deformálja az anyagot és csökkenti az áthurkolódás mértékét az anyaglerakást megelőzően. Az anyaglerakás után a molekuláris szintű deformáció visszalakul, amit a reptáció segítségével írhatunk le, illetve megindul a rétegek közti diffúzió. A hűtés gátolja a relaxációt, ezért a kötés anizotróp és kisebb mértékű áthurkolódás jellemzi az egyensúlyi viszonyokhoz képest. A hegedés kapcsán érdemes kiemelni, hogy a megfelelő behatolási mélység nem elegendő a kívánt szilárdság elérésére. Akár megfelelő behatolási mélység mellett is előfordul, hogy a hűtés miatt a molekulák áthurkolódásának kialakulására nincs elegendő idő, ami kulcsfontosságú a mechanikai jellemzők csökkenése szempontjából (az áthurkolódás újra szerveződésének időszükséglete, késleltetése a „cső” - megnyúlás vissza alakulásából ered).

2.2. Hegedés folyamata részben kristályos hőre lágyuló polimerek esetén

Nyomtatás során nemcsak amorf anyagokat használhatunk, gyakran előfordul, hogy részben kristályos alapanyagból készült filament alkalmazása jelenti az optimális megoldást. A részben kristályos polimerekről tudjuk, hogy a 100%-os kristályos részarányt nem érhetik el, vagyis kristályos, illetve amorf részekből állnak. Ennek értelmében a hegedési folyamat kismértékben eltér a korábban leírtaktól, itt ugyanis a kristályosodás folyamata is befolyásolja a kötés kialakulását. Ennek a folyamatnak a lépései a következők: a kristályosodási hőmérséklettartomány alatt megindul a magképződés (kristálycsíráképződés), majd még alacsonyabb hőmérsékletre hűlve megindul a szferolitok (rendezett, gömbszerű képződmények) növekedése. Fontos megjegyezni, hogy az amorf részek az előző bekezdésben leírtaknak megfelelően viselkednek részben kristályos esetben is [25,26]. Most tekintsük át FDM esetében a kristályosodás megvalósulását. Anyaglerakást követően az ömledék hűlni kezd, a korábbiaknak megfelelően megkezdődik a molekuladeformációk visszaalakulása. Magas nyomtatási hőmérséklet használata esetén (mivel a relaxáció gyorsabb) elegendő idő áll rendelkezésre a teljes keresztmetszetben a visszalakulásra, alacsonyabb hőmérséklet használatakor azonban a relaxáció maradéktalanul csak a keresztmetszet középső zónájában tud lejátszódni, ezeken a részekben a nyugalmi viszonyoknak megfelelően játszódik le a kristálycsíráképződés. Az utóbbi esetben a keresztmetszet felületközei övezetében azonban a gyors hűlésnek köszönhetően az anyagáram 90°-os elfordulása által okozott deformáció nem tud megszűnni, így itt a feszültség-indukált kristályosodás valósul meg. A feszültség-indukált kristályosodás folyamata a következőt takarja: mikor a polimerek megnyúlt állapotba kerülnek a magképződés kezdetén, a magképződés sebessége emelkedik, gyorsul a kristályképződés folyamata, ez pedig rövidebb kristályosodási időhöz vezet a nyugalmi állapotban lefolyó kristályosodáshoz képest [23-25]. A 6. ábra a) része jól mutatja, a keresztmetszet mely részeiben játszódik le a feszültség-indukált kristályosodás: a kék és piros részekben jóval magasabb a kristálymagok száma, így itt sok, apró szferolit képződik, szemben a középső (világosabb színű mező) résszel, ahol a kevesebb kristálymag miatt nagyobb kristályok képződnek. Jól megfigyelhető az is, hogy mivel a keresztmetszet alsó részében (6. ábra a) rész, a képen jelölt b pont) nagyobb a deformáció, ezért itt több mag alakul ki. Érdekes emellett kiemelni, hogy annak a kéregnek a vastagságát, ahol a feszültség-indukált kristályosodás a jellemző, a hőterjedés határozza meg (ha kellő sebességgel hűl le az anyag a kristályosodási hőmérséklet alá, akkor jön létre ez a típusú kristályosodási folyamat). A keresztmetszet mentén megfigyelt kristályosodásbeli eltérések magyarázzák a 6. ábra b) részén látható, sárga színnel jelölt görbén a plató megjelenését is (a sárga színű görbe a keresztmetszet egészét vizsgálva mutatja a kristályossági fokot, vagyis magába foglalja a feszültség-indukált és a nyugalmi

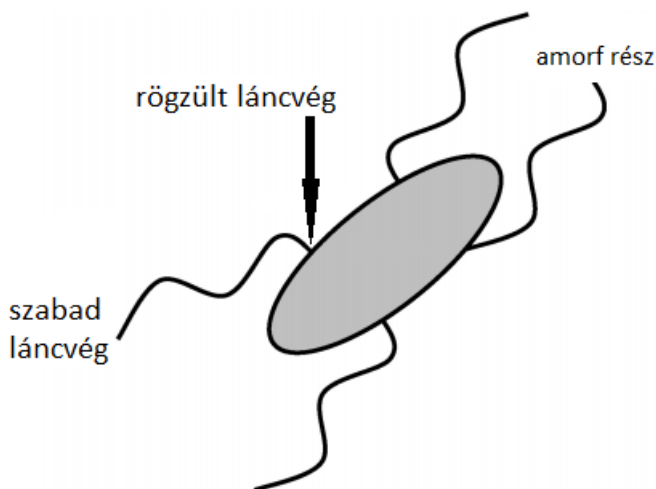
kinetika szerinti kristályosodási folyamatot). A kristályosodás során a feszültség-indukált kristályosodás gyorsan lejártsódik, ez okozza a görbe elején megfigyelhető növekedést a kristályossági fokban. Ehhez képest a nyugalmi viszonyoknak megfelelően végbemenő kristályosodás később indul meg, ez okozza a görbén látható platót. Miután beindul a nyugalmi viszonyoknak megfelelő kristályképződés, a kristályossági fok hirtelen megemelkedik, egészen addig, amíg el nem éri az anyagra jellemző értéket.



6. ábra a) Kristálymagok számának keresztmetszet menti eloszlása (a pont- keresztmetszet felső határpontja, b pont-keresztmetszet alsó határpontja, m pont-keresztmetszet középpontja) [25]. b) Kristályossági fok az idő függvényében, a keresztmetszet több pontjában, illetve keresztmetszet átlagosan ábrázolva [25]. (A mérésekhez PCL anyagot használtak, 30 mm/s-os nyomtatási sebességgel és 90°C-os nyomtatási hőmérséklettel [25])

A kristálynövekedés szakaszában előfordulhat, hogy a polimerláncok egyik vége rögzül a növekvő szferolitok egyikében, így a 7. ábra látható csillagszerű forma képződik. A jelenség alapvetően hasznos, mivel kialakulhat olyan szerkezet a rétegek között, melynél a lánc egyik vége az egyik rétegben, másik vége a másik rétegben rögzül. Ennek köszönhetően gyakorlatilag kötőláncok jönnek létre a rétegek között, vagyis rétegeközi tönkremenetel csak láncszakadással, vagy a kristályok felbomlásával alakulhat ki. Alapvető esetben az amorf részekre jellemző rétegeközi diffúzió még azelőtt lezajlik, hogy a magképződés megkezdődne, azonban, ha már kialakult a kristályhoz rögzülés, az a diffúziót hátráltatja. Ennek értelmében kijelenthető, hogy a feszültség-indukált kristályosodás hasznos a felületközeli kéregben, mivel a nagyszámú kristálycsíra megnöveli a kötőláncok kialakulásának esélyét. Az imént leírtakat McIlroy és Graham kísérletekkel is alátámasztották, méréseikhez PCL-t (polikaprolakton) használtak. Ez az anyag azért előnyös a hegedés megfigyelésére, mert az üvegesedési hőmérséklettartománya jóval szobahőmérséklet alatt van, így könnyen lehet vizsgálni a kristályosodási folyamatot a nyomtatás során. Ezzel szemben más jellemzőkkel rendelkező anyagoknál (például PLA) ezek a folyamatok nem ilyen egyértelmű lefolyásúak, mivel gyártás közben a kristályosodási

hőmérséklettartomány mellett gyakran az üvegesedési átmeneti hőmérséklet alá is leűl az anyag [25].



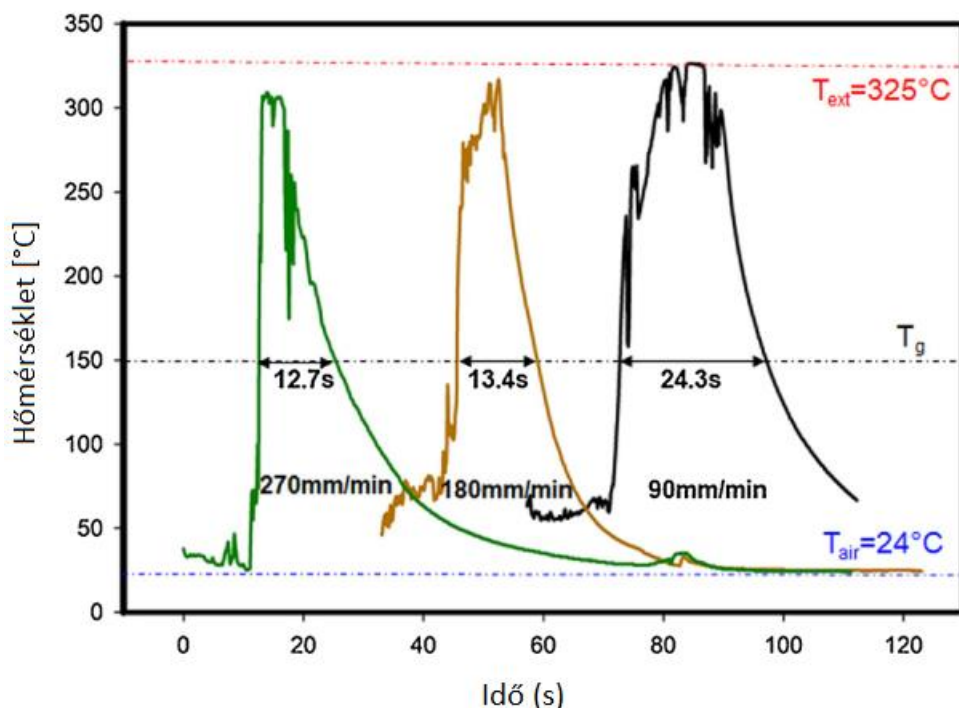
7. ábra Kristály által rögzített láncvégek [25].

2.3. Hegedési minőség javításának gyakorlati megoldásai

Az előző bekezdésben láthattuk, hogy a hegedés minőségét az alapanyag szerkezeti jellemzői és a gyártási változók, ezek közül is elsősorban a hőmérséklet befolyásolja. Munkánk során a bemutatott 3.1 bekezdésben PLA alapanyaggal dolgozunk, tehát a szerkezeti jellemzők minden próbatest esetén azonosak, így a nyomtatási paramétereket tekintjük állapotváltozóknak, melyek hatását ebben a szakaszban ismertetjük.

Először tekintsük át az amorfi hőre lágyuló polimerekre vonatkozó részt. A nyomtatási sebesség emelése a fűvókában és a fűvókából való kilépésnél nagyobb nyírást eredményez. A korábbiak alapján elmondható, hogy ez a megnövelt nyírás nagyobb deformációt okoz, ami csökkenti a reptációs időt, azonban gyakran nem olyan szignifikánsan, hogy a hegedés mélységét növelje. A szakirodalom alapján a nyomtatási sebesség hatása nem egyértelmű a hegedés minőségére, a források gyakran ellentmondanak egymásnak. Így, habár a gyártási idő csökkentése érdekében célszerű lenne a lehető legjobban megnövelni a nyomtatás sebességét, abban nem lehetünk biztosak, hogy ez előidéz-e romlást a rétegek közötti kapcsolatok minőségében [11,13,16]. Ezzel szemben a hegedés folyamata nagyon erősen függ a hőmérséklettől. Ahogy korábban is említettük, a behatolási mélység jelentősen megnő a hőmérséklet emelésével, emellett csökken az üregegyűrtesség (nagyobb nyakszélesség érhető el) és növekedés figyelhető meg az áthurkolódás mértékében is [8,11,24]. Gyakorlati szempontból ügyelni kell arra, hogy a fűvóka hőmérséklete valójában nem egyezik az ömledék hőmérsékletével, ami a fűvóka belső falán ragadt anyag hőátadást akadályozó hatásából ered. Ezt Fang és társai polikarbonát (PC) esetén szenzorozott méréssel kimutatták, az eredményeket 325 °C-os beállított hőmérséklettel három eltérő

nyomtatási sebesség mellett a 8. ábra szemlélteti. Mindezek mellett fontos kiemelni, hogy a túlzott hőmérsékletemelésnek negatív hatásai is vannak, ilyen például a méretpontosság és az alaktartás romlása, vagy szélsőséges esetben az alapanyag degradációja [8,13].

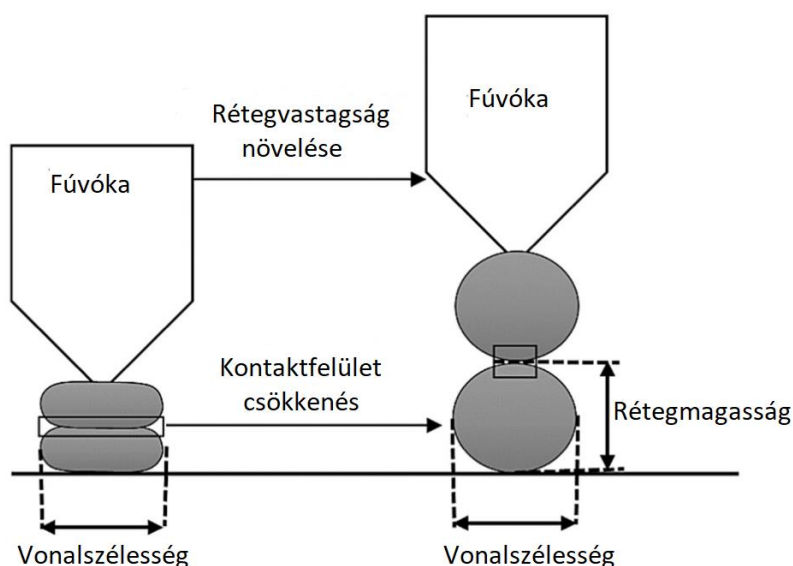


8. ábra Alapanyag hőmérséklete 325 °C-ra beállított fúvókahőmérséklet esetén, 3 különböző nyomtatási sebességre (PC alapanyag) [14]

A hőmérséklet hatásával kapcsolatban van a rétegvastagság és az ezzel összefüggésben levő vonalszélesség is. A nagyobb vonalszélesség következtében a kapcsolódó felületek nagysága nő, ez elősegíti a hegedést, viszont a hőátadó felület megnövekedése gyorsabb hűlést eredményez, ami hátráltatja a hegedési folyamatot. A rétegvastagság esetében nem határolhatók be egyértelműen a hatások. Túl nagy rétegvastagság nem eredményez megfelelő nyomást a fúvókából való kilépésnél, így a felületek közötti kontaktfelület nagyon kicsi lesz. Túl kicsi rétegvastagságot sem célszerű használni, ugyanis amellet, hogy nő a gyártási idő, a lerakott anyag hőátadó felülete túl nagy lesz, így gyorsabban hűl le, ami, mint tudjuk, hátráltatja a hegedést. A rétegvastagság hőátadó- és kontaktfelületekre gyakorolt hatásának értelmezését segíti a 9. ábra. Kísérleti eredmények alapján az figyelhető meg, hogy alapvetően a rétegvastagság csökkentése javítja a rétegek közötti kapcsolat erősségét, melynek háttérében Kazmer és Coogan kutatásai alapján a megfelelő kontakt nyomás és hűlési tulajdonságok állhatnak [15-19,24].

A részben kristályos hőre lágyulóknak esetén a hatások hasonlóak, mint amorf esetben: nagyobb nyomtatási hőmérséklet alkalmazása esetén elég idő áll rendelkezésre a teljes keresztmetszetben a láncdeformáció visszalakulására (a kisebb reptációs időnek köszönhetően), így a kristályosodás a nyugalmi állapotnak megfelelően zajlik. Emiatt

a teljes keresztmetszetben nagyobb szemcsés kristályok képződnek. Alacsonyabb hőmérséklet esetén a keresztmetszet szélén maradó deformáció figyelhető meg a kristályosodási hőmérséklettartomány alá történő hűlés után is, így itt a feszültség-indukált kristályosodás megy végbe. Ennek értelmében ebben a kéregben sok, aprószemcsés kristály képződik, míg a keresztmetszet középső részén továbbra is nagyobb szemcsék jellemzők. A feszültség-indukált kristályosodást maga a deformáció mértéke is befolyásolja, (minél nagyobb deformációt tudunk elérni, annál több mag képződik), vagyis a nyomtatási sebesség növelésével növelni tudjuk a szemcsék számát, ezáltal csökkenthetjük a kristályok méretét [25].



9. ábra Rétegvastagság hatására bekövetkező kontaktfelület és hőátadó felület változása [24].

A rétegek közötti hegedés javítására a gyártási paraméterek optimalizálása mellett több módszer is fellelhető a szakirodalomban. Hatékony megoldást jelentenek a nyomtatás alatti és az azt követő kezelések. Néhány ilyen, már korábban alkalmazott megoldást mutatunk be a következő alfejezetekben.

2.3.1. A hegedés javítása hőbevezetéssel

Hőbevezetéssel járó módszerek használatakor a már lerakott rétegeket valamilyen külső hőforrás segítségével melegítjük fel, melynek hatására a rétegek közötti diffúzió nagyobb mértékben tud létrejönni (ezeket a módszereket korábban már több ízben is alkalmazták).

Ilyen lehet például infralámpa segítségével kivitelezett gyártás közbeni lokális előmelegítés. Az eljárás lényege az, hogy a már kinyomtatott felületet előmelegítjük, segítve a minél nagyobb mértékű molekuláris diffúzió megvalósulását. Ügyelni kell azonban arra, hogy a túlzott előmelegítés a méretpontosságot rontja (a viszkozitás növekedése vagy a degradáció következtében). Az izzítás is elterjedt, mint utómunkálási eljárás, mivel segíti a szálak közötti molekuláris szintű diffúziót, illetve

adott esetben (részben kristályos polimerek esetén) a kristályosodást is. Az utóhőkezelési hőmérsékletet amorf anyagoknál T_g fölé célszerű választani, részben kristályos anyag esetén a választandó hőmérsékletérték anyagtól függ, bizonyos esetekben (pl. szénszálas PLA) T_g és T_{kr} közötti hőfok az optimális, míg máskor (pl. PPS) T_{kr} fölötti hőmérséklet esetén érhetünk el mechanikai tulajdonságjavulást (például szakítószilárdság és merevség terén). Egyéb innovatív utómunkálati eljárás a mikrohullámú lokális hevítés: ekkor a filamentet bevonatoljuk vagy adalékoljuk szén nanocsővel, majd gyártást követően azt rádióhullámokkal gerjesztjük, az így képződő hő segíti a kötések erősödését [13].

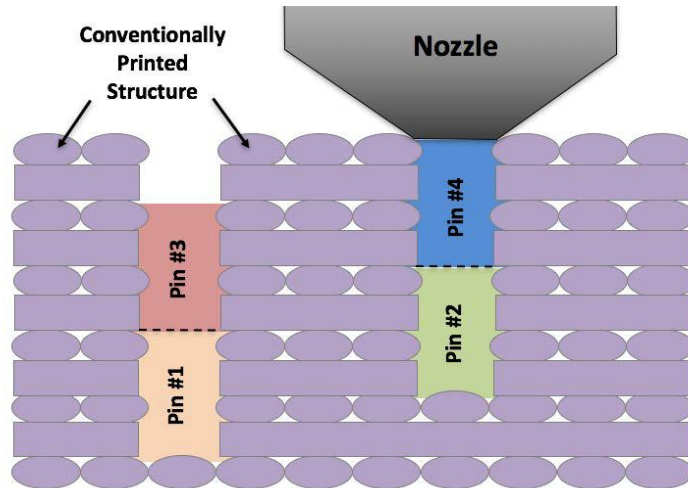
Du és társai egy lézerekkel is felszerelt FDM nyomtatóval kísérleteztek. A lézerek a nyomtató feje mellé voltak felszerelve. Céljuk az volt, hogy a már lefektetett réteget előmelegítsék, mielőtt a következő réteg lefektetése megtörtént. Kísérleteik során arra a megállapításra jutottak, hogy az előmelegítés hatására a diffúzió nagyobb volt a rétegek között, hiszen a próbatestek szakítószilárdsága közel kétszeresére nőtt [27]. Egy másik tanulmányban Ravi és társai a már lefektetett területet melegítették lézer segítségével. Ennek hatására a polimer tovább maradt T_g hőmérséklet fölött, a diffúzió nagyobb mértékben tudott kialakulni a rétegek között [28].

2.3.2. A hegedés javítása hőbevezetés nélkül

Korábban számos tanulmány született olyan módszerekről is, amikor nem hőbevezetéssel próbálták meg javítani a rétegek közötti kapcsolatot. Ezekben az esetekben különböző töltőanyagokkal, kémiai reakciók segítségével értek el javulást a próbatestek mechanikai tulajdonságaiban.

Egy kedvező megoldást jelent az ultrahang használata, ez ugyanis elválaszthatja a termomechanikai hatásokat a reológiai hatástól, ezért elősegíti az erős kötésfelület kialakulását a termékfelületek minőségbeli romlása nélkül [13]. Lederle és társai nitrogénnel töltött kamrában végeztek próbatest gyártást FDM nyomtatókkal. ABS alapanyag feldolgozása során az anyag polybutadién összetevője erősen oxidálódik, ezáltal csökkentve az ABS mechanikai ellenállóképességét. Az oxigén kizárásával eredményeik szerint 30%-os szakítószilárdság növekedés is elérhető [29]. Garg és társai ABS alapanyagot kezeltek aceton gőzben, mely egy már korábban is alkalmazott gyakorlat az ebből az anyagból készült tárgyak felületminőségének javítására. Eredményeik szerint bár a felület minősége tényleg javult, az anyag mechanikai ellenállósága jelentősen gyengült [30]. Nguyen és társai szintén ABS alapanyag felhasználásával hoztak létre kompozitot, mely az alapanyag mellett lignint, akrilnitril-butadién gumit és szénszálat is tartalmazott. Az így létrehozott kompozit tulajdonságai nagyban felülmúlták az alapanyag tulajdonságait, közel kétszer nagyobb rétegeközi adhéziót elérve [31]. Duty és társai egy új módszert dolgoztak ki a rétegek közötti kapcsolatok erősítésére. Ennek lényege, hogy a lefektetett rétegek mindegyikében több darab, kör keresztmetszetű rést szabadon hagy a nyomtató, majd ezekbe utólag tölti ki. A kitöltés hatására szegecs szerű, összefüggő részek alakulnak

ki melyek erősítik a rétegek közötti kapcsolatokat (10. ábra). A mérések igazolták a módszer létjogosultságát, töltetlen PLA esetében 20%-os növekedés érhető el a próbatestek szakítószilárdságában, míg szálerősítésű alapanyagok esetén ez akár 300% is lehet. A módszer további előnye, hogy nem igényel az egyébként is felhasznált 3D nyomtatón kívül más berendezést [32].



10. ábra A rétegek közötti kapcsolat erősítése Duty módszerével [32]

2.3.3. Összegzés, célkitűzés

Az FDM technológia kiválóan alkalmas vizuális modellek, akár felhasználásra szánt alkatrészek gyártására is, de a mechanikai tulajdonságok irányfüggése megnehezíti a felhasználását. A gyártási paraméterek, mint rétegmagasság és nyomtatási hőmérséklet befolyásolhatják az elkészült alkatrész műszaki tulajdonságait, de a nyomtatási sebesség hatására nem találtunk egyértelmű válaszokat. Sok esetben fellelhető az az információ, hogy a nyomtatási sebesség nincs hatással a gyártás minőségére, azonban a nagyobb sebességekkel csökken a tartózkodási idő, ezzel pedig csökkenhet a nyomtatófejben lévő anyag hőmérséklete.

Az irodalomkutatás során számos lehetőséget találtunk a rétegek közötti hegedés javítására, de szinte minden esetben valamilyen külső eszköz alkalmazására volt szükség. A dolgozatunk célja, hogy megállapítsuk a nyomtatási paraméterek hatását az elkészült darabok tulajdonságaira nézve, valamint olyan megoldást találjunk, amellyel segédberendezések nélkül növelni tudjuk a rétegek közötti kapcsolatokat már a nyomtatás közben.

3. FELHASZNÁLT ANYAGOK, ALKALMAZOTT BERENDEZÉSEK

3.1. Felhasznált alapanyagok

A próbatestek gyártásához Filaticum márkájú átlátszó, adalékoltalan PLA alapanyagot használtuk fel, amelynek fontosabb tulajdonságait az alábbi 1. táblázat foglalja össze.

Fizikai paraméterek	Eljárás	PLA
Sűrűség [g/cm ³]	D792	1,24
Deformálódási hőm. (HDT) [°C]	D790	55
Üvegesedési hőm.[°C]	D3418	55-60
Szakítószilárdság [Mpa]	ISO 527	60
Szakadási nyúlás [%]	ISO 527	6
Szakító modulus [Mpa]	ISO 527	3800
Ütésállóság [kJ/m ²]	ISO 180	16

1. táblázat A PLA alapanyag tulajdonságai [33]

3.2. Additív gyártóberendezések, szeletelő szoftverek

Ebben a fejezetben az általunk használt additív gyártóberendezéseket és szoftvereket mutatjuk be, ismertetjük (valamelyik a kettő közül).

3.2.1. *CraftBot Plus*

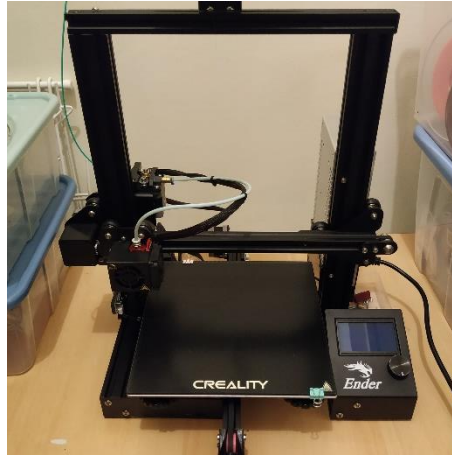
A referencia próbatestek gyártásához az 11. ábra látható CraftBot Plus típusú lineáris FDM nyomtatót alkalmaztunk. A gép 250x200x200 mm munkatérrel rendelkezik, melyben termékeinket 100-300 µm rétegvastagság tartományban tudjuk gyártani. A berendezést 0,2/0,4/0,8/1,0 mm-es fűvókával is használhatjuk, és akár 120 mm/s nyomtatási sebességet is el tudunk érni vele. A géppel hőre lágyuló alapanyagok széles skáláját nyomtathatjuk (például PLA, ABS, HIPS), azonban csak 1,75 mm átmérőjű filamentet alkalmazhatunk [34].



11. ábra CraftBot Plus nyomtató [34]

3.2.2. Ender 3

A fejlesztési rész méréseihez használt próbatesteket egy másik, open source 3D nyomtatón gyártottuk le. Ennek előnye, hogy minden gyártási paramétert megváltoztathattunk, illetve a CraftBot számára értelmezhetetlen kódokkal is működött. A gép munkatere 235x235x250 mm, fúvókaátmérője 0,4 mm. A felhasznált nyomtatót a 12. ábra mutatja be.



12. ábra Ender 3 típusú nyomtató

3.2.3. Slic3r szeletelőszoftver

A mérésekhez gyártott próbatestek G-code fájljait a Slic3r nevű szeletelő szoftverrel készítettük el, mely 2011-es megjelenésével az egyik legrégebben használt nyílt forráskódú szeletelő. Előnye, hogy rendkívül sok funkciót, beállítási lehetőséget tartalmaz, teljesen személyre és nyomtatóra igazítható. A szeletelő kiválasztásánál a legfontosabb szempont (a géppel való kompatibilitás mellett) a kitöltési stratégia volt. A gyártásnál fontos volt, hogy az előgyártmányt ne oda-vissza, hanem egy-egy pontra nézve egyirányú mozgásokkal készítse el a gép (ennek okait a 4.1. fejezetben taglaljuk). A gyártáshoz többféle szoftvert is kipróbáltunk (Craftware, Ultimaker Cura), azonban csak a Slic3r volt az egyetlen, amely teljesítette a kitöltésre vonatkozó követelményeket.

3.2.4. SuperSlicer

A 4. fejezetben ismertetett rétegek közötti hegedés javítására szolgáló rétegenkénti hőkezelés megvalósítása szoftveres oldalról (jelenlegi ismereteink szerint) egyedül a SuperSlicer nevű programmal lehetséges. A szoftver a Slic3r alapjaira épül, azonban a beállítható paraméterek jelentősen kibővültek, köztük van az általunk használt ironing funkció kibővítése is (ennek szerepét a későbbiek folyamán részletesen ismertetjük). Hátránya azonban, hogy a szoftver által generált G-kód fájlok a CraftBot számára

értelmezhetetlen parancsokat tartalmaztak, emiatt a rétegenkénti hőkezeléssel készített próbatestekhez az Ender 3 nyomtatót használtuk.

3.3. Mechanikai anyagvizsgáló berendezés – Zwick Z005

A szakító vizsgálatok elvégzéséhez egy Zwick Z005 típusú berendezést használtunk (13. ábra), a vizsgálatoknál satu befogóval dolgoztunk. A mérési adatokat a Zwick TestXpert II 3.41 programmal dolgoztuk fel [35]. A szakítóvizsgálatokat MSZ EN ISO 527 szabvány szerinti 5A típusú próbatesteken hajtottuk végre 45 mm-es befogási hosszon. A mérések során 1 N nagyságú előterhelést használtunk, ennek eléréséig 1 mm/perc-es sebességgel haladt a keresztfej, ezt követően 5 mm/perc mérési sebességet alkalmaztunk. A vizsgálatok során típusonként 5-5 darab próbatestet szakítottunk el, a mérések az egyes próbatestek töréséig tartottak.



13. ábra Zwick Z005 típusú szakítógép [35]

A mérés során kapott szakítóerők önmagukban nem elégségesek a próbatestek értékeléséhez, azokból különböző mérőszámok számítása szükséges. A mérnöki húzófeszültség (1. összefüggés) megmutatja, hogy mekkora erő szükséges egy 1 mm² keresztmetszet elszakításához. Mértékegysége megapascal [MPa].

$$\sigma = \frac{F}{A_0} [MPa] \quad (1)$$

Ahol:

- F [N] a szakításhoz szükséges erő,
- A₀ [mm²] pedig a próbatest kiinduló keresztmetszete.

A relatív nyúlás (2. összefüggés) megmutatja, hogy a mérés során mekkora alakváltozást szenved a próbatest. Általában %-ban van megadva.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{L_0} * 100 [\%] \quad (2)$$

Ahol:

- Δl a próbatest megnyúlása [mm],
- L_0 a próbatest kezdeti mérési hossza [mm].

A kiértékelés során a húzószilárdságot, húzószilárdsági nyúlást és a húrmodulust vizsgáltuk, mivel ezek az értékek jelentik a termék felhasználhatósági határát, ezt a feszültség- és nyúlásértéket elérve a próbatestek tönkremenetele (azonos terhelőerő mellett, FDM-el gyártott termékek esetén) mindenképpen bekövetkezik. A jellemzők értelmezése a következő: a húzószilárdság a szakítógörbe első lokális maximumánál ébredő mérnöki feszültség. Jele σ_M , mértékegysége [MPa]. A húzószilárdsági nyúlás a húzószilárdsághoz tartozó relatív nyúlásértéket jelenti. Jele ε_M , jellemzően százalékosan értelmezzük [%]. A húrmodulus (3. összefüggés) a szakítógörbe két kezdeti pontját összekötő egyenes meredeksége. A két jellemzően megválasztott pont a 0,05% és 0,25% relatív nyúlásértékhez tartozó pontok.

$$E_h = \frac{\sigma_{0,0025} - \sigma_{0,0005}}{\varepsilon_{0,0025} - \varepsilon_{0,0005}} [MPa] \quad (3)$$

4. KÍSÉRLETI/FEJLESZTÉSI RÉSZ

Az elvégzett mérésekről összefoglaló diagramokat készítettünk, az ezek alapján levont következtetéseket ebben a fejezetben mutatjuk be.

4.1. Kísérletterv

A méréseink során a rétegek közötti hegedést szeretnénk vizsgálni. Ennek érdekében állított orientációjú szakító próbatesteken végzünk szakítóvizsgálatokat, melyek esetén a törésvonal várhatóan a rétegek között fog bekövetkezni (abban az esetben, ha a próbatest nem a rétegek között szakad el, akkor feltételezhetjük, hogy elértük az anyagunk tömbszilárdságát). Az irodalomkutatásban felderített információk alapján az alábbi három fontosnak ítélt paraméter hatását vizsgáltuk:

- nyomtatási hőmérséklet,
- nyomtatási sebesség,
- rétegmagasság

Az előgyártmányok gyártása során a 2. táblázatban látható paramétereket minden előgyártmány esetén konstansnak vettük, értékükön nem változtattunk.

Paraméter neve	Paraméter beállított értéke
Első réteg sebessége	30 [mm/s]
Extrúziós együttható	1 [-]
Fúvóka átmérője	0,4 [mm]
Függőleges falak száma	5 [db]/ 2 [mm]
Asztalhőmérséklet	60 [°C]
Tárgyhűtés	100 [%]
Visszahúzás nagysága	6,5 [mm]
Visszahúzás sebessége	40 [mm/s]

2. táblázat Előgyártmányok konstans gyártási paraméterei

Elvárásaink szerint a fúvóka hőmérséklete jelentős, jól kimutatható hatást fejt ki a mechanikai tulajdonságok tekintetében (például húzószilárdság, húzószilárdsági nyúlás stb.). A rétegmagasság csökkenésétől a megnövekedett kontakt nyomásnak köszönhetően szintén jelentős változást (javulást) várunk az imént felsorolt tulajdonságokban. A szakirodalom alapján nem egyértelmű, hogy a nyomtatási sebesség milyen hatással van a rétegek közötti hegedésre. Több forrás semlegesnek nevezte meg a nyomtatási sebesség hatását, értékének megválasztásához egyetlen határoló tényezőként a gép fizikai képességeit jelölve meg. Véleményünk szerint mivel a nyomtatási sebesség befolyásolja az alapanyag tartózkodási idejét a nyomtató fejében, így közvetve befolyásolhatja a hegedést, az alacsonyabb nyomtatási sebességektől hegedést elősegítő hatást remélhetünk. Emellett termelékenységi szempontból a nyomtatási sebesség a legjelentősebb paraméter, így ebből a szempontból is fontosnak

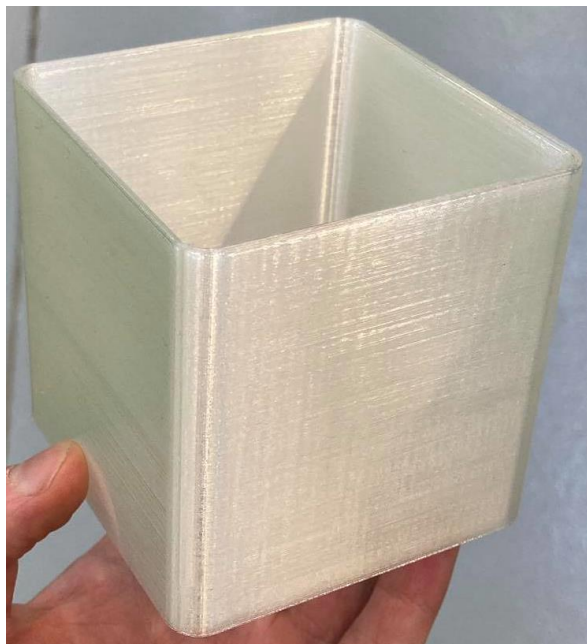
tartjuk hatásának vizsgálatát. A mérésekhez gyártott próbatesteket azonosító kódnevekkel láttuk el, ezek tartalmazták a főbb nyomtatás paramétereit, a 3. táblázat első próbatestének kódneve 200_20_01, mely elnevezés a 200°C-os fűvókahőmérsékletre, 20 mm/s-os gyártási sebességre, valamint 0,1 mm-es rétegmagasságra utalt. A dokumentáció későbbi szakaszában ez az elnevezés fog felhasználásra kerülni. Az egyes próbatesteknél vizsgált beállításokat a 3. táblázat tartalmazza.

Próbatest típusa	Rétegmagasság [mm]	Sebesség [mm/s]	Nyomtatási hőmérséklet [°C]	Gyártási idő [óra:perc]	Filament szükséglet [m]
200_20_01	0,1	20	200	16:33	19,7
200_20_03	0,3	20	200	5:35	18,8
200_50_01	0,1	50	200	6:40	19,7
200_50_03	0,3	50	200	3:18	18,8
200_80_01	0,1	80	200	4:10	19,7
200_80_03	0,3	80	200	1:28	18,8
215_20_01	0,1	20	215	16:33	19,7
215_20_03	0,3	20	215	5:35	18,8
215_50_01	0,1	50	215	6:40	19,7
215_50_30	0,3	50	215	3:18	18,8
215_80_01	0,1	80	215	4:10	19,7
215_80_03	0,3	80	215	1:28	18,8
230_20_01	0,1	20	230	16:33	19,7
230_20_03	0,3	20	230	5:35	18,8
230_50_01	0,1	50	230	6:40	19,7
230_50_03	0,3	50	230	3:18	18,8
230_80_01	0,1	80	230	4:10	19,7
230_80_03	0,3	80	230	1:28	18,8

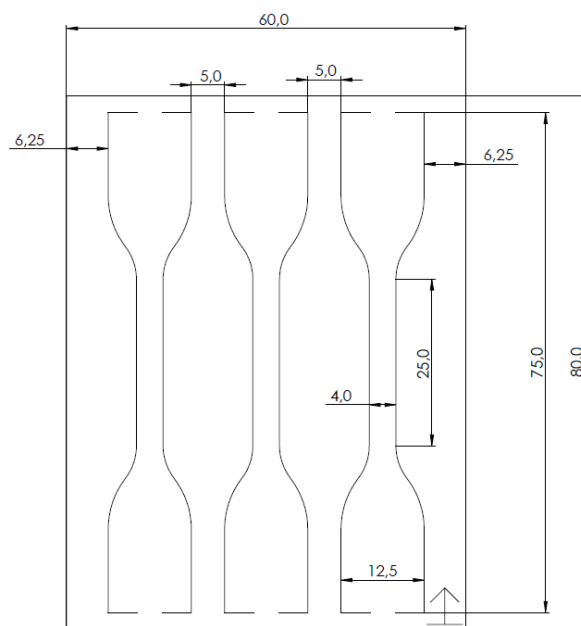
3. táblázat Az előgyártmányok főbb gyártási paramétereit

Méréseink elvégzéséhez adalékolatlan Filaticum PLA [33] alapanyagból gyártottunk lekerekített sarkú, négyzet alapú előgyártmányokat (a geometriát a szakirodalomban fellelhető hasonló célú vizsgálatokhoz használt próbatestek alapján alakítottuk ki) [11]. Az előgyártmányok falvastagsága minden esetben 2 mm, belőlük vízszintes vágás segítségével munkáltuk ki a szakító próbatesteket (14. ábra). A módszer előnye, hogy az előgyártmány teljes keresztmetszete azonos sebességgel készül, a fej mindig ugyanazon irány mentén halad át egy-egy ponton, amely nem mondható el a külön-külön gyártott próbatestekről. (Ezekben az esetekben a nyomtatófej gyorsulása, lassulása miatt az előre beállított sebességek gyakran nem érhetők el, a nyomtató rázkódása is jelentős hatással lehet a rétegek közötti kapcsolat létrejöttére.) A próbatestek kivágása a 14. ábra segítségével bemutatott dobozból történt, melynek befoglaló mérete

79x79x80 mm, falvastagsága 2 mm volt, melynek műszaki rajza a 1. mellékletben tekinthető meg.



a)



b)

14. ábra a) - A próbatestek alapjául szolgáló doboz b) - A próbatestek vágási sablonja

A rétegek közötti hegedés javítása céljából a szokásostól eltérő gyártási stratégiával is készítettünk próbatesteket, a módszer az open-source szeletelőprogramok használatánál ismert ironing funkció kibővített felhasználásán alapszik. Az ironing (magyarul vasalás) a legfelső réteg felületminőséget hivatott javítani. Lényege, hogy a nyomtató fűvókája az utolsó réteg lefektetése után még egyszer elhalad a felső réteg felett úgy, hogy minimális anyag extrudálása történik csak meg. A fej és az utolsó réteg közötti távolság ilyen esetekben nem több, min 0,05 mm. Ennek hatására a felső réteg egy része újra megömlik, a lefektetett szálak összeolvadnak.

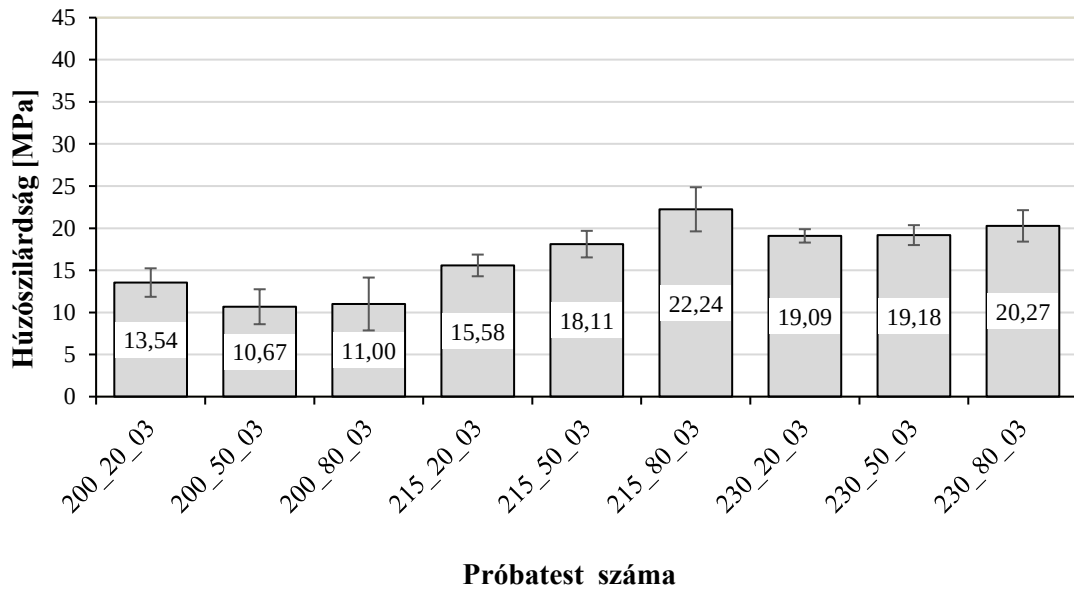
Amennyiben ezt a funkciót minden egyes rétegre felhasználjuk, (lényegében rétegenkénti hőkezelést hajtunk végre, ezért a későbbiekben így hivatkozunk az eljárásra), úgy minden réteg esetében elérhetjük az újbóli megömlést és összeolvadást, ezáltal javíthatjuk a rétegek közötti kapcsolatot. A rétegenkénti hőkezelést szoftveresen az eddigiek során alkalmazott Slic3r szeletelőprogrammal nem tudtuk megvalósítani, ez a funkció jelenlegi ismereteink szerint csak a SuperSlicer programban elérhető. Ebből adódóan a rétegenkénti hőkezeléshez szükséges G-kódot a SuperSlicer használatával generáltuk. Továbbá, hogy a szoftverekből adódó eltéréseket kizárjuk, készítettünk egy referencia próbatestet is a SuperSlicer használatával, a későbbiek folyamán ezzel hasonlítottuk össze a rétegenkénti hőkezeléssel készült minta tulajdonságait.

4.2. Gyártási paraméterek hatása a mechanikai tulajdonságokra

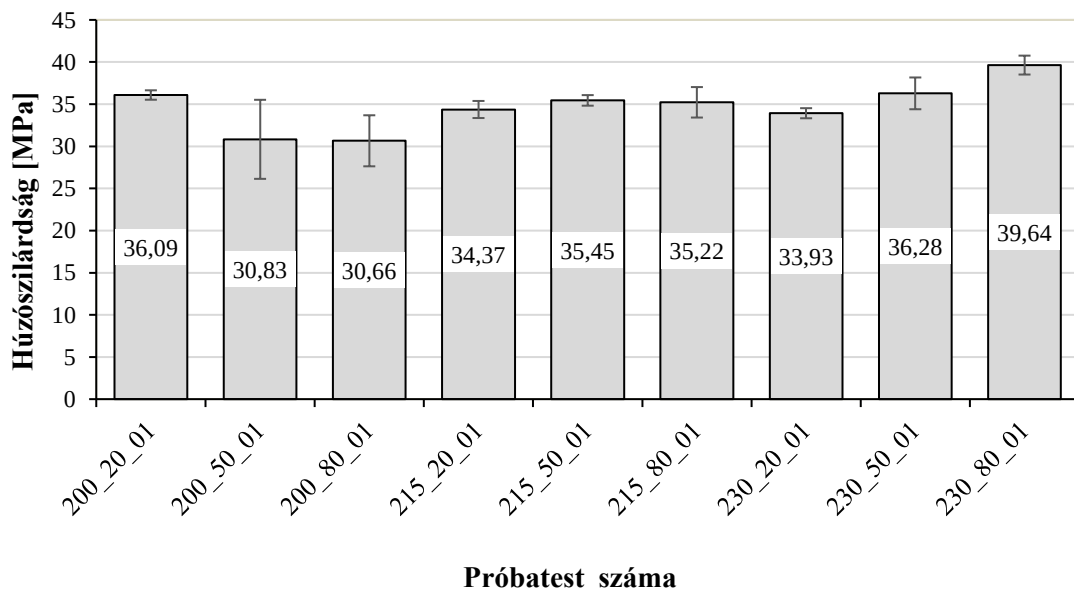
A rétegmagasság hatása nagy mértékben megmutatkozott a szakítóvizsgálatok során. A 0,3 mm-es rétegmagassággal készült próbatestek merevségi, szilárdsági és nyúlás értékei jelentősen alulmaradtak a 0,1 mm-es próbatesteknél mért értékekhez képest. Emiatt az ábrázolásnál (a könnyebb átláthatóság érdekében) két csoportra osztottuk az adatokat rétegvastagság szerint. Ezen kívül a kiértékelésben csak az egyes hatásokat ismertetjük, az azokat kiváltó okokat a kiértékelés végén, egyben összefoglalva tárjuk fel.

A paraméterek hatásának felderítéséhez először is tekintsük át a húzószilárdsági értékeknél megfigyelt változásokat, ezeket az adatokat a 15. ábra 16. ábra szemlélteti. A legszembetűnőbb különbség az eltérő rétegmagasságok esetén figyelhető meg. Az eltérés különösen kisebb nyomtatási hőmérsékleteken volt jelentős, ahol a 0,1 mm-es és 0,3 mm-es rétegvastagságok között akár 270%-os eltérés is fellépett a kisebb rétegvastagság javára.

A nyomtatási sebesség tekintetében (ahogy az előre várható volt) nem fedeztünk fel egyértelmű, független hatást. A 0,3 mm-es rétegvastagságú mintákat elemezve észrevehetjük, hogy 215 °C-os feldolgozási hőmérsékleten a nyomtatási sebesség növelése emeli a húzószilárdsági értékeket, míg 200 °C esetén ellentétes hatást, 230 °C-on pedig semmiféle hatást sem fejt ki. Ezzel szemben 0,1 mm-es rétegvastagságnál a javuló tendencia 230 °C-on figyelhető meg, 215 °C és 200 °C esetén nem fedezhető fel változás a mért értékekben. A szórások tekintetében alapvetően elmondható, hogy nagyobb gyártási sebesség nagyobb szórásmezőt okozott. A feldolgozási hőmérséklet hatása a vártnál kisebb mértékben alakította a próbatestek húzószilárdsági értékeit. A kapott eredményekből kiderül, hogy észrevehető különbséget 0,3 mm-es rétegvastagságnál csak a 200°C-on gyártott próbatestek mutattak a többi próbatesthez képest. A 215°C és 230°C-on gyártott próbatestek húzószilárdsági értékei nagyon hasonlóak voltak, jelentős eltérést nem tudunk megállapítani. Az egyes hőmérséklet értékek nem okoztak jelentős változást a szórásmezők tekintetében.



15. ábra Nyomtatási sebesség és hőmérséklet hatása a húzószilárdságra, 0,3 mm-es rétegvastagságnál



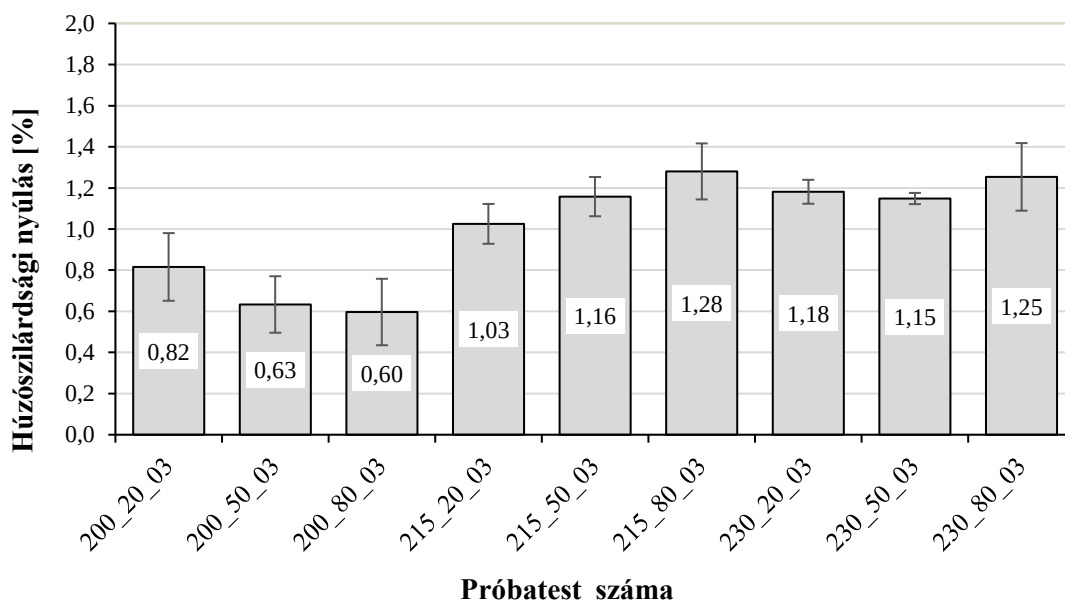
16. ábra Nyomtatási sebesség és hőmérséklet hatása a húzószilárdságra, 0,1 mm-es rétegvastagságnál

A húzószilárdsági nyúlásokat vizsgálva (17. ábra 18. ábra) könnyen megállapítható a rétegmagasság további hatása: a 0,3 mm-es rétegvastagsággal gyártott próbatestek húzószilárdsági nyúlás értékei 15-46% kisebbek voltak, mint a 0,1 mm-el gyártott társaiké. A változás főleg a 200 °C-os alacsony gyártási hőmérséklettel készített mintákon szembetűnő. Emellett kiemelendő, hogy kis rétegvastagságnál, 215°C és

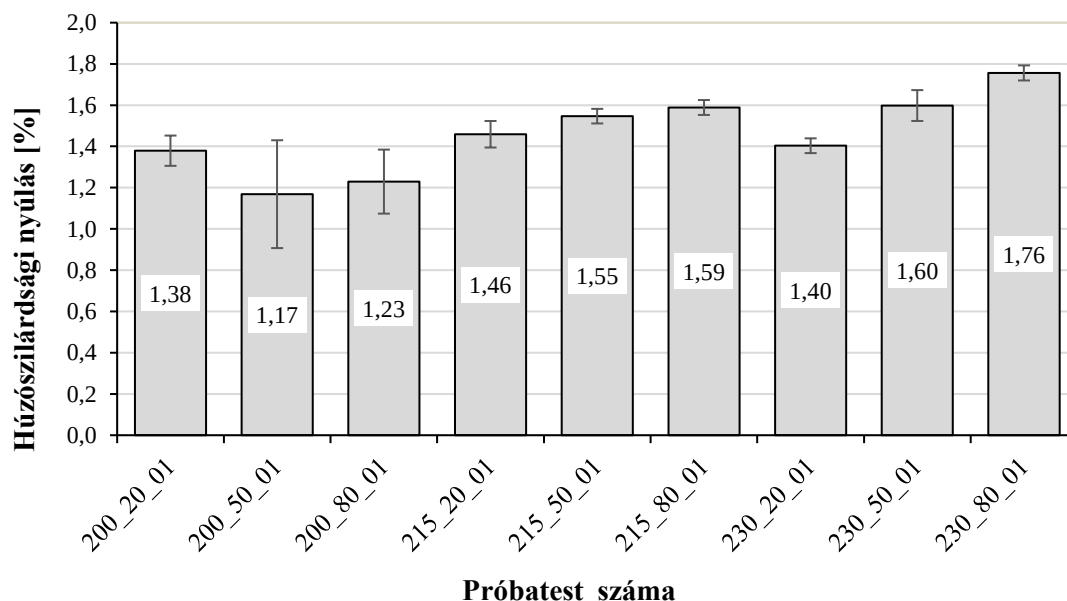
230 °C esetén a szórásmezők csökkentek, a nagy rétegvastagságnál megfigyelt értékekhez képest.

A nyomtatási sebesség hatása a húzószilárdsági nyúlás esetén sem kézenfekvő: 215 °C és 230 °C-on a növekvő sebesség nagyobb nyúlásokat idéz elő, míg 200 °C-nál ennek épp az ellenkezője mondható el. A szórásmezők nagyságára a nyomtatási sebesség egy-egy kivételtől eltekintve nem fejtett ki észlelhető hatást.

A hőmérséklet a húzószilárdságnál megfigyelt tendenciákat okozza a nyúlások tekintetében is. A 200 °C-on gyártott próbatestek kisebb nyúlásokat értek el, mint magasabb hőmérsékleten készített társaik, emellett a szórásmezők növekedése is felfedezhető.

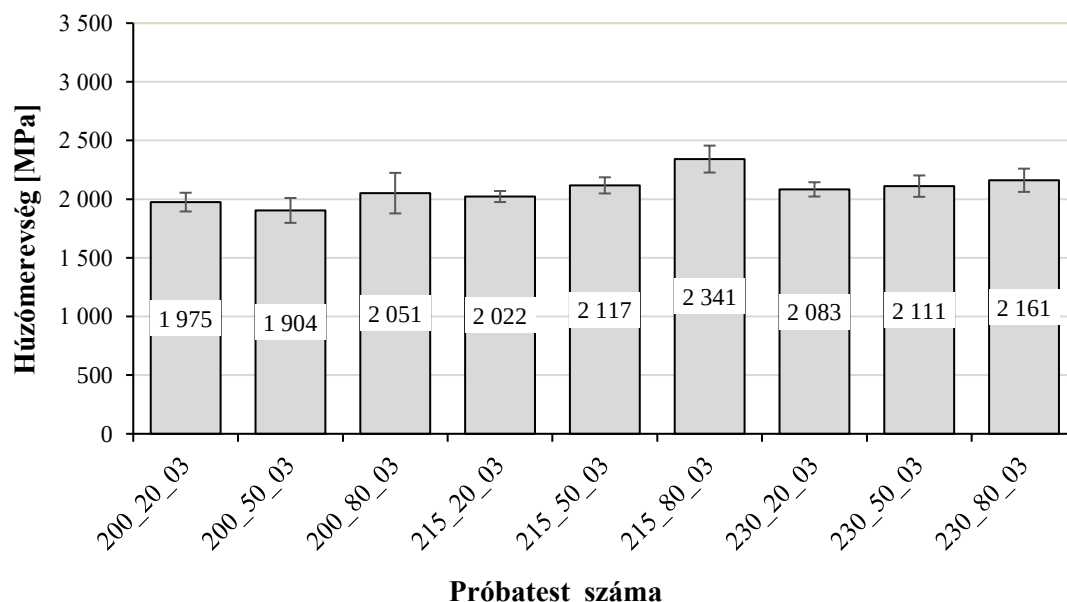


17. ábra Nyomtatási sebesség és hőmérséklet hatása a húzószilárdsági nyúlásra, 0,3 mm-es rétegvastagságnál

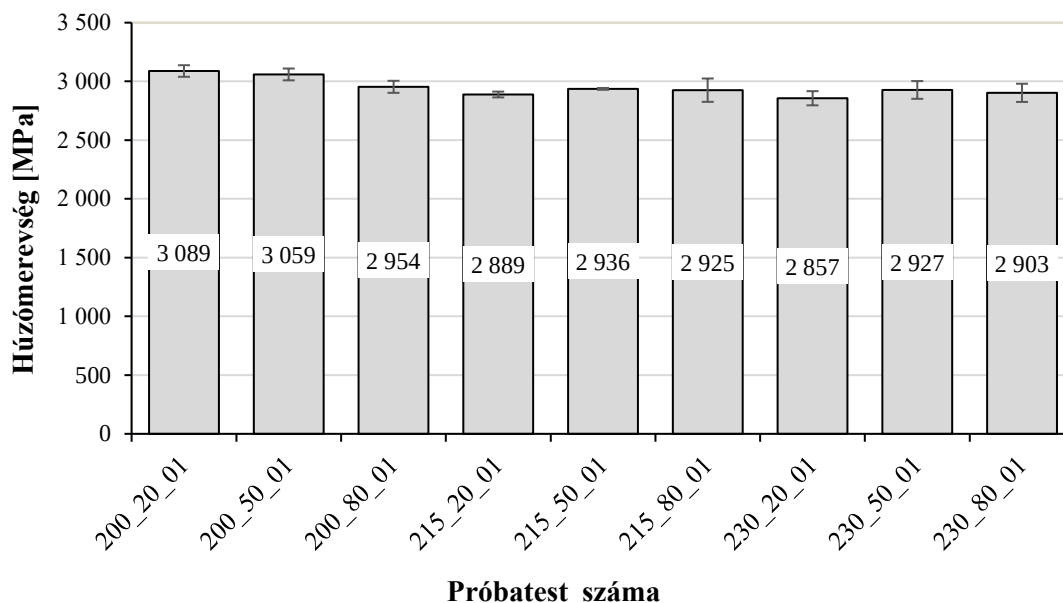


18. ábra Nyomtatási sebesség és hőmérséklet hatása a húzószilárdsági nyúlásra, 0,1 mm-es rétegvastagságnál

A szakítóvizsgálatok során kapott értékek alapján meghatározott húzómerevségeket mutatja a 19. ábra 20. ábra. A nyomtatási sebesség tekintetében nem tudunk a korábbiakhoz hasonló mértékű eltéréseket kimutatni, azonban a rétegmagasság hatása itt is szembetűnő. A tendencia az eddigiek szerint alakult: nagyobb rétegvastagság kisebb húzómerevséget eredményezett.



19. ábra Nyomtatási sebesség és hőmérséklet hatása a húzómerevségre, 0,3 mm-es rétegvastagságnál



20. ábra Nyomtatási sebesség és hőmérséklet hatása a húzóerevségre, 0,1 mm-es rétegvastagságnál

A szakítóvizsgálatok eredményeinek kiértékelésekor mindent összevetve a rétegvastagág hatása volt a legszembetűnőbb: mindhárom jellemző esetében a rétegvastagság csökkentése tulajdonságjavulást idézett elő. Ennek háttérében (a szakirodalomkutatás alapján egyértelműen) a fúvókából kilépő anyagáram kontaktnyomás áll. A kontaktnyomás magasabb rétegvastagságok esetén jelentősen lecsökken, ami a rétegek közti kontaktfelület, vagyis a teherviselő keresztmetszet csökkenését idézi elő. Ebből egyértelműen következik, hogy a rétegek között nagyszámú üreg jelenik meg, amelyek hibahelyként, a törés kiindulópontjaként funkcionálhatnak.

Jól láttuk, hogy a hőmérséklet emelése a húzószilárdság és a húzószilárdsági nyúlás tekintetében kedvező hatást váltott ki, míg a húzóerevség esetén nem okozott észlelhető változást. Emellett szembetűnő volt, hogy az alacsonyabb hőmérsékleten gyártott próbatestek vizsgálata során nagyobb szórást figyelhettünk meg (átlagosan 14,5%), mint a magasabb hőmérsékletű esetekben (6,4% illetve 4,9% a 215°C és 230°C-os próbatesteknél). Ennek elméleti oka a magasabb hőmérsékleten intenzívebben lejátszódó diffúzióban és nagyobb áthurkolódási fok kialakulásában keresendő. Gyakorlati oldalról magyarázatot adhat az a tény, hogy magasabb hőmérsékleteken a fúvókában lévő alapanyag teljes egészében megömlik és megfelelő folyóképességgel rendelkezik a fúvókából való megfelelő kijutáshoz. Ebből adódóan nem alakul ki adagolási probléma, vagyis a gyártás során folyamatosan biztosítva van a megfelelő kontakt nyomás a rétegek között. Itt megemlítenénk, hogy az alapanyagadagolás a 200°C-os hőmérsékleten, 80 mm/s-os sebesség mellett már gondokat okozott, ami ezekkel a beállításokkal gyártott próbatesteknél a tulajdonságok alacsony értékében is megmutatkozik. A húzóerevség esetén a hőmérséklet szakirodalommal ellentétben nem okozott lényeges hatást. Ennek háttérét véleményünk szerint az adja, hogy az

eltérő gyártási hőmérsékletekre jellemző kötésminőség nagyobb terheléseknél okoz eltérést. A felterhelés során a kisebb behatolási mélységgel rendelkező és kisebb mértékben áthurkolódott kötések molekulái is képesek megfelelően „reagálni” a kisebb terhelésekre, a megfelelő merevség biztosítása mellett veszik fel a terhelést. Nagy terheléseknél a kialakult szerkezet a kevesebb áthurkolódás miatt nem képes kellő mértékben megnyúlni, ami az áthurkolódások felbomlását, a termék korai tönkremenetelét idézi elő.

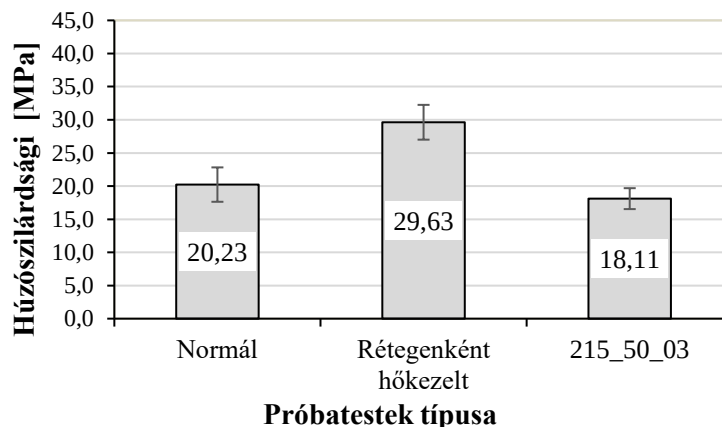
A nyomtatási sebesség a szakirodalommal összhangban nem adott egyértelmű hatást. Korábbi elvárásaink szerint az alacsony nyomtatási sebességnek kedvező hatást kellett volna kifejtenie a vizsgált jellemzőkre, ezt azonban nem tudtuk kimutatni. Ennek egyik magyarázata lehet, hogy az általunk használt alacsonynak választott nyomtatási sebesség nem volt elegendően kicsi ahhoz, hogy az szemmel látható változást fejtsen ki akár a tartózkodási idő, akár a termékfelület egyes pontjainak hőmérséklete tekintetében.

4.3. A rétegek közötti hegedés javításának egy módja

A rétegek közötti kapcsolat erősítésére számtalan megoldást ismertettünk a 2.3. fejezetben. Dolgozatunk részét képezi egy saját megoldás bemutatása is, melynek alapjait a 4.1. fejezet részletezi. A próbatestek legyártásához ahogy korábban is említettük a Craftbot Plus helyett egy Ender 3 típusú 3D nyomtatót kellett használnunk. Ebből kifolyólag a mérések összehasonlíthatóságának érdekében új referencia (normál) próbatesteket készítettünk, melyek főbb paraméterei a következők voltak:

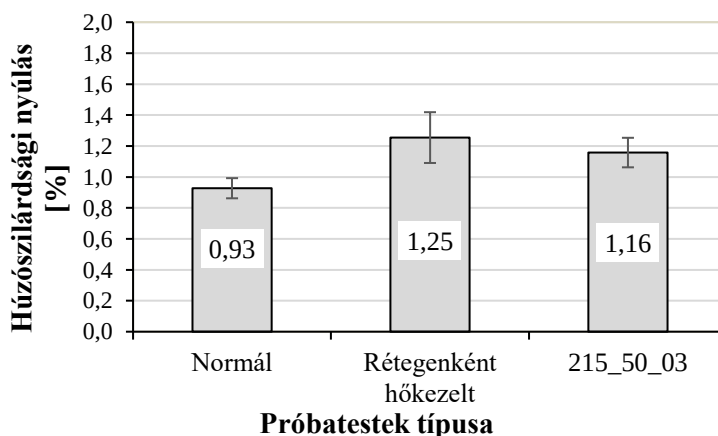
- 215°C-os gyártási hőmérséklet,
- 0,3 mm-es rétegmagasság,
- 50 mm/s-es gyártási sebesség.

Az újonnan elkészített referencia és a rétegenként hőkezelt próbatestek közötti különbséget húzószilárdság és szakadási nyúlás tekintetében mutatja meg a 21. ábra és a 22. ábra. Az így elkészült normál referencia próbatestek átlagos húzószilárdsága $20,23 \pm 2,59$ MPa volt, ezzel szemben a rétegek egyenkénti hőkezelésével legyártott próbatestek átlagos húzószilárdsága $29,75 \pm 2,62$ MPa volt, mely közel 150%-kal nagyobb a normál referencia értéknél, kis szórásmező mellett. Mindemellett a rétegenkénti hőkezeléssel gyártott próbatest 0,3 mm-es rétegvastagságnál megközelíti a 0,1 mm-es rétegvastagsággal gyártott próbatestek eredményeit, ezt az összehasonlítást mintegy kiegészítésképpen a 2. melléklet mutatja be (itt érdemes megfigyelni, milyen kis szórásmezőket eredményezett a módszer).

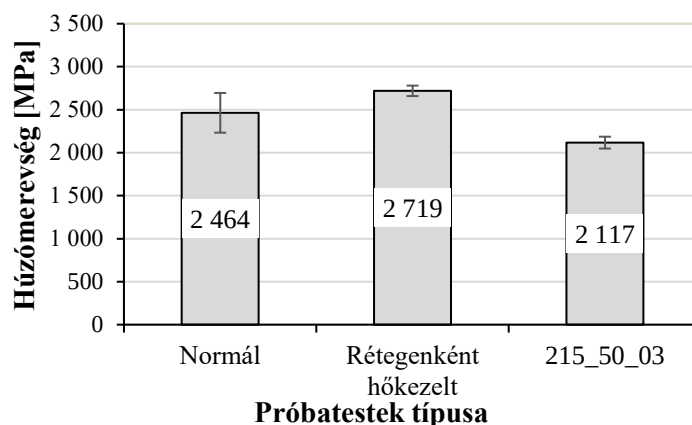


21. ábra A rétegenként hőkezelt próbatest húzószilárdsága a referenciákhoz képest

A rétegenkénti hőkezelés alkalmazásával nemcsak a húzószilárdságban, hanem a húzószilárdsági nyúlásban, sőt, a húzómerevségben is növekedést érhetünk el. Nagyon fontos kiemelni, hogy a módszer használata a merevség és szilárdságbeli növekedés ellenére sem váltotta ki a próbatestek ridegedését. Ezeket a hatásokat szemlélteti a 22. ábra és a 23. ábra. A hatások háttérében a korábban leírtaknak megfelelően a rétegekben megfigyelhető hőmérsékletnövekedés áll, mely megnöveli a rétegek közötti diffúziót, nagyobb behatolási mélységet eredményez, illetve elősegíti az áthurkolódások kialakulását. Azonban megfigyelhető, hogy a hőkezeléssel bevitt hőnek kisebb hatása volt a nyúlásértékekre, mint a rétegmagasság csökkentésének, azaz feltételezhető, hogy a kontaktnyomás nagyobb mértékben befolyásolja a tulajdonságokat, mint a többlet hőbevezetés. A megfelelő mértékben áthurkolódott molekulaláncoknak köszönhetően a próbatestek nem mutatnak rideg viselkedést.



22. ábra A rétegenként hőkezelt próbatest húzószilárdsági nyúlása a referenciákhoz képest



23. ábra A rétegenként hőkezelt próbatest húzóerevsége a referenciákhoz képest

Az eredményeink gyakorlati relevanciáját vizsgálva adódik a kérdés, mennyivel igényel több időt és anyagot a módszerrel létrehozott termék elkészítése? Az előgyártmányok adatait vizsgálva elmondhatjuk, hogy az alapanyag szükségletben arányaiban alacsony, durván 10%-os növekedést okoz a módszer használata (a normál esetben 19,2 m filamentet használtunk fel, a rétegenként hőkezelt esetben 21,2 m-t). Ezzel szemben a gyártás időszükségletében kevésbé kedvezőek az eredmények, a normál előgyártmányok 2 óra 57 perc alatt elkészültek, míg a vasalt minták gyártásához 5 órára és 56 percre volt szükség. Ezek értelmében elmondható, hogy a rétegenkénti hőkezelés (ahogy az várható volt a módszer ismeretében) megduplázza a gyártási időt, így ennek alkalmazása az elérhető jelentős tulajdonságjavulás ellenére csak olyan esetekben ajánlott, ahol a gyártási idő nem számít fontos szempontnak.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

5.1. Magyar nyelvű összefoglaló

Az irodalomkutatás során áttekintettük a polimerek hegedésével kapcsolatos szakirodalmakat. Megállapítottuk, hogy míg a rétegvastagság hatása egyértelműen kimutatható volt, addig a nyomtatási hőmérséklet és nyomtatási sebesség hatása nem egyértelmű, az utóbbi gyakran ellentmondásos is volt. Célul tűztük ki az FDM technológia fő gyártási paramétereinek vizsgálatát, valamint, ha lehetséges, a hegedés minőségének javítását. Elvégeztük a szükséges próbatestek legyártását majd húzóvizsgálatokat végeztünk. A megvizsgált gyártási paraméterek közül a rétegvastagság hatása volt a legjelentősebb, amely csökkentésével csökken a fúvókából kilépő anyagáram, nő a filament tartózkodási ideje és a kilépő anyag kontakt nyomása. A rétegvastagság csökkentésével azonban egyenesen arányosan nő a gyártási idő, ami miatt megfontolandó a paraméter értékének jelentős csökkentése. A nyomtatási hőmérséklet növelésével nem kapunk arányosan jobb mechanikai tulajdonságokat, azonban a 200°C-on, az optimálisnál alacsonyabb hőmérsékleten gyártott próbatesteknél gyengébb húzószilárdság volt megfigyelhető. A nyomtatási sebesség növelésével nem értünk el gyengébb mechanikai tulajdonságokat, de a mérések alapján megnőtt az egyes testek minőségi szórása, bizonytalanabb lett a gyártás. Ez különösen a kis hőmérsékleten és nagy sebességen gyártott próbatesteknél volt megfigyelhető, ahol feltételezhetően az alapanyag adagolása már nem volt optimális. A feltételezés igazolására később tömegmérést szeretnénk elvégezni a próbatesteken. A sebesség növelésével közelebb kerülünk a nyomtató mechanikai korlátjaihoz, ezáltal megnőhet a rezonancia, az adagolás bizonytalanná válhat, melyet tapasztalataink szerint az extruder alkatrész kattogása jelezhet.

A szakirodalomban fellelt információk alapján a hőbevitellel történő szilárdság növelést alkalmaztuk, a rétegenkénti hőkezeléssel nagy mértékben tudtuk javítani a próbatestek mechanikai tulajdonságát, azonban a nyomtatási idő is jelentősen megnőtt.

Összességében tehát elmondható, hogy amennyiben egy adott minőségű termék legyártása a cél, a nagyobb sebesség és kisebb rétegmagasság felhasználásával valószínűleg jobb mechanikai tulajdonságokat érhetünk el, mint kisebb sebesség és nagyobb rétegmagasság mellett.

Amennyiben a nyomtatási idő alacsonyan tartása nem fontos kritérium, a próbatestek rétegenkénti hőkezelése megfelelő lehet a mechanikai tulajdonságok javítására, melynek előnye, hogy nem igényel utólagos hőkezelést vagy utómunkálatokat, de jelentősen megnöveli a gyártási időt.

5.2. Angol nyelvű összefoglaló

During the preparation of our thesis, we gained valuable experience of how FDM technology works. We examined the most important manufacturing parameters, which gave us a comprehensive picture of their effects. Of the manufacturing parameters examined, the most significant was the effect of layer thickness, which, when reduced, reduces the material flow out of the nozzle, increases the filament residence time and the contact pressure of the material exiting the nozzle. However, a reduction in layer thickness leads to a directly proportional increase in production time, which makes it worth considering a significant reduction in the value of this parameter. Increasing the printing temperature does not result in proportionally better mechanical properties, but weaker tensile strength was observed in specimens manufactured at 200°C, a lower temperature than the optimum. Increasing the printing speed did not result in poorer mechanical properties, but the measurements showed an increase in the quality variation of the individual specimens, with more uncertain production. This was particularly noticeable for specimens manufactured at low temperatures and high speeds. Increasing the speed brings us closer to the mechanical limits of the printer, which can increase resonance and lead to unreliable feeding, which in our experience can be indicated by the extruder clicking.

In summary, when the goal is to produce a product of a given quality, using higher speeds and lower layer heights is likely to result in better mechanical properties than lower speeds and higher layer heights. If keeping the printing time down is not an important criterion, layer-by-layer heat treatment of test specimens may be an appropriate way to improve mechanical properties, with the advantage that it does not require post heat treatment or post-processing, but it does increase the production time significantly.

5.3. További megoldásra váró feladatok

A dolgozat elkészítéséhez elvégzett szakítóvizsgálatokon túl további méréseket is szeretnénk végezni. Ilyen például a Charpy-féle ütvehajlító vizsgálat, mellyel egy fontos paramétert, az energiaeinyelő képességet tudjuk vizsgálni. Az építési Z irányban elvégzett méréseken túl a későbbiekben vizsgálatra kerülhetnek a gyártási paraméterek hatásai az építési irányra merőlegesen gyártott próbatestekre..

A dolgozatban bemutatásra került rétegenkénti hőkezelés felgyorsítása nagyban növelhetné a módszer alkalmazása mellett elérhető termelékenységet. Emiatt ki szeretnénk próbálni az eljárást oly módon is, hogy adott nyomtatási sebesség mellett a rétegenkénti hőkezelést nagysebességű mozgásokkal valósítjuk meg, így jelentős csökkenést érhetünk el a gyártási időben. Hosszútávú terveink között szerepel a módszer alkalmazásához szánt célhardver tervezése is.

6. FELHASZNÁLT FORRÁSOK

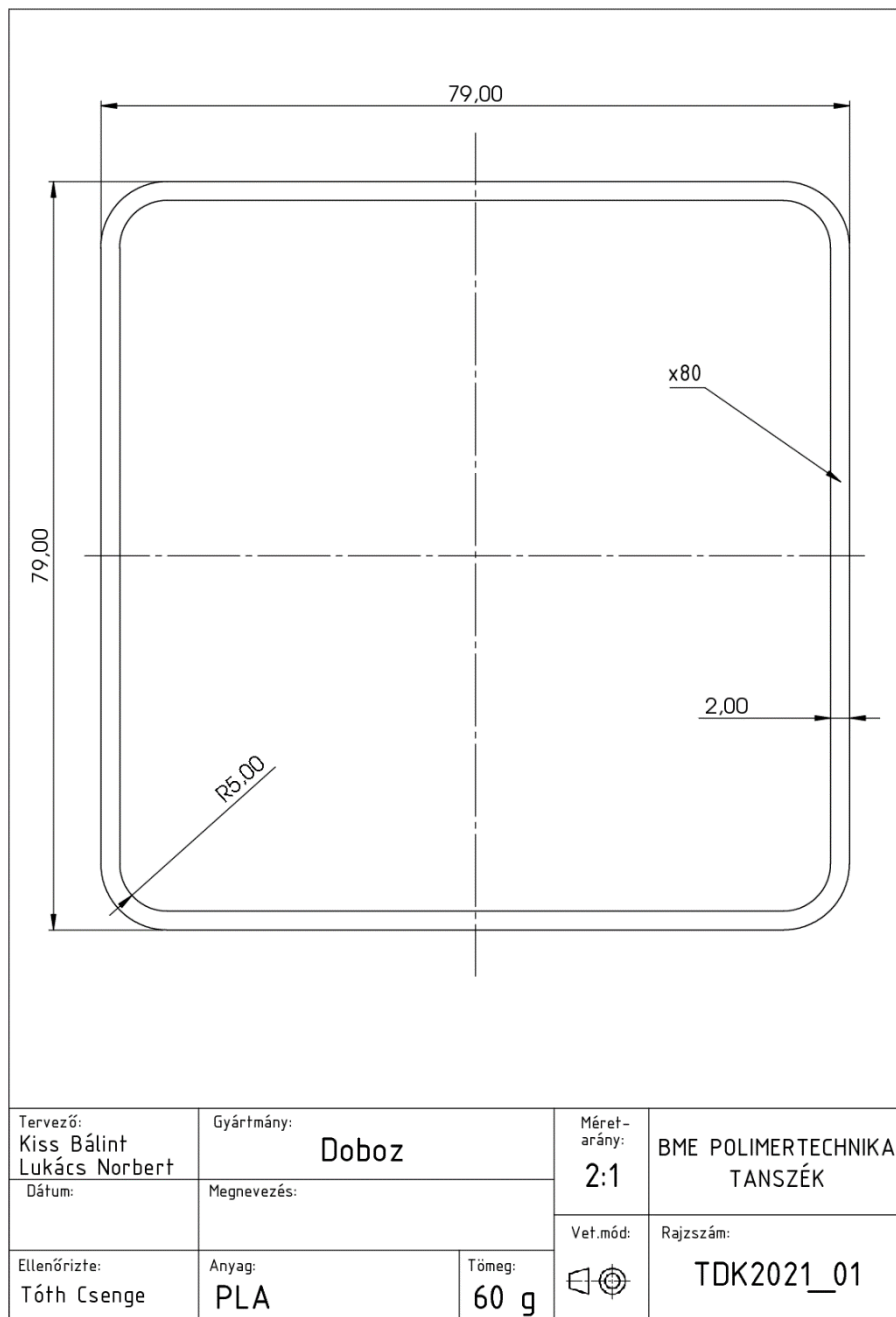
1. Dunai A., Dr. Macskási L.: Műanyagok fröccsöntése. Budapest, Lexica Kft. (2003)
2. Urhal P., Weightman A., Bartolo P. & Diver: Robot assisted additive manufacturing: A review. In L. Wang, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 335-345 (2019)
3. Shahrubudin N., Lee T. C. & Ramlan R.: An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. In Procedia Manufacturing 35, 1286-1296 (2019)
4. L. Jyothish Kumar, Pulak M. Pandey, David Ian Wimpenny: 3D Printing and additive manufacturing technologies. Springer Ltd. (2019)
5. Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker: Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. Springer Ltd. (2015)
6. Nekoda van de Werken, Halil Tekinalp, Pouria Khanbolouki, Soydan Ozcan, Andrew Williams, Mehran Tehrani: Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective. in Additive Manufacturing 31(2020)
7. Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur and P. Gu: Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. in Rapid Prototyping Journal 14/2, 72–80 (2008)
8. Michael E. Mackay: The importance of rheological behavior in the additive manufacturing technique material extrusion. in Journal of Rheology 62 (2018)
9. Y.-Q. Xue, T. Tervoort, P. Lemstra: Welding behavior of semicrystalline polymers. 1. The effect of nonequilibrium chain conformations on autoadhesion of UHMWPE. in Macromolecules 31 (9), 3075-3080 (1998)
10. Brian N. Turner, Robert Strong and Scott A. Gold: A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. in Rapid Prototyping Journal, Vol. 20 Issue: 3, 192-204 (2014)
11. Timothy J Coogan, David O Kazmer: Prediction of interlayer strength in material extrusion additive manufacturing. in Additive Manufacturing 35, (2020).
12. S. Garzon-Hernandez, D. Garcia-Gonzalez, A. Jérusalem, A. Aria: Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. in Materials and Design 188, (2020).
13. Xia Gao, Shunxin Qi, Xiao Kuang, Yunlan Su Jing Li, Dujin Wang: Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond. in Additive Manufacturing, (2020)

14. Fang Peng, Bryan D. Vogt, Miko Cakmak: Complex flow and temperature history during melt extrusion in material extrusion additive manufacturing in. *Additive Manufacturing* 22, 197-206 (2018)
15. L. Wang, W.M. Gramlich, D.J. Gardner: Improving the impact strength of poly(lacticacid) (PLA) in fused layer modeling (FLM). in *Polymer* 114, 242-248 (2017)
16. C. McIlroy, P.D. Olmsted: Disentanglement effects on welding behaviour of polymer melts. during the fused-filament-fabrication method for additive manufacturing. in *Polymer* 123, 376-391 (2017)
17. F. Yang and R. Pitchumani: Nonisothermal healing and interlaminar bond strength evolution during thermoplastic matrix composites processing. in *Polymer Composites* Vol. 24, No. 263-278 (2003)
18. V. Srinivas, C.S. van Hooy-Corstjens, J.A. Harings: Correlating molecular and crystallization dynamics to macroscopic fusion and thermodynamic stability, in fused deposition modeling; a model study on polylactides. in *Polymer* 142, 348-355 (2018)
19. T. Deplancke, O. Lame, F. Rousset, I. Aguilu, R. Seguela, G. Vigier: Diffusion versus cocrystallization of very long polymer chains at interfaces: experimental study of sintering of UHMWPE nascent powder. in *Macromolecules* 47 (1), 197-207 (2013)
20. Shi-Qing Wang: Nonlinear rheology of entangled polymers at turning point. in *Soft Matter* 11, 1454-1458 (2015)
21. F. Snijkers, R. Pasquino, P.D. Olmsted, D. Vlassopoulos: Perspectives on the viscoelasticity and flow behavior of entangled linear and branched polymers. in *Condens. Matter* 27 (2015)
22. H. Zuidema, G.W.M. Peters, H.E.H. Meijer: Development and validation of a recoverable strain-based model for flow-induced crystallization of polymers. in *Macromol. Theory Simul.* 10 (5), 447-460 (2001)
23. R.S. Graham: Modelling flow-induced crystallisation in polymers. in *Chem. Commun.* 50, 3531-3545 (2014)
24. Nahal Aliheidari, Josef Christ, Rajasekhar Tripuraneni, Siva Nadimpalli, Amir Ameli: Interlayer adhesion and fracture resistance of polymers printed through melt extrusion additive manufacturing process. in *Materials and Design* 156, 351-361 (2018)
25. C. McIlroy, R.S. Graham: Modelling flow-enhanced crystallisation during fused filament fabrication of semi-crystalline polymer melts. in *Additive Manufacturing* 24, 323-340 (2018)
26. Bodor G., Vas L.M.: *Polimerek szerkezetana*. Műegyetemi Kiadó, Bp. 2000
27. J. Du, Z. Wei, X. Wang, J. Wang, Z. Chen, An improved fused deposition modeling process for forming large-size thin-walled parts, *Journal of Materials Processing Technology* 234 (2016) 332-341.

28. A.K. Ravi, A. Deshpande, K.H. Hsu, An in-process laser localized pre-deposition heating approach to inter-layer bond strengthening in extrusion based polymer additive manufacturing, *Journal of Manufacturing Processes* 24 (2016) 179-185.
29. F. Lederle, F. Meyer, G.-P. Brunotte, C. Kaldun, E.G. Hübner, Improved mechanical properties of 3D-printed parts by fused deposition modeling processed under the exclusion of oxygen, *Progress in Additive Manufacturing* 1(1) (2016) 3-7.
30. A. Garg, A. Bhattacharya, A. Batish, Chemical vapor treatment of ABS parts built by FDM: Analysis of surface finish and mechanical strength, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 89(5) (2017) 2175-2191.
31. N.A. Nguyen, C.C. Bowland, A.K. Naskar, A general method to improve 3D-printability and inter-layer adhesion in lignin-based composites, *Applied Materials Today* 12 (2018) 138-152.
32. C. Duty, J. Failla, S. Kim, T. Smith, J. Lindahl, A. Roschli, B. Post, L. Love, V. Kunc, Z-Pinning Approach for Reducing Mechanical Anisotropy of 3D Printed Parts, *Proc. The Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2018 (2018).
33. <https://filaticum.com/wp-content/uploads/2021/03/filaticum.com-tds-filaticum-pla-20210316.pdf>
34. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=136&l=m>
35. <http://www.pt.bme.hu/gepadat.php?sorszam=147&l=m>

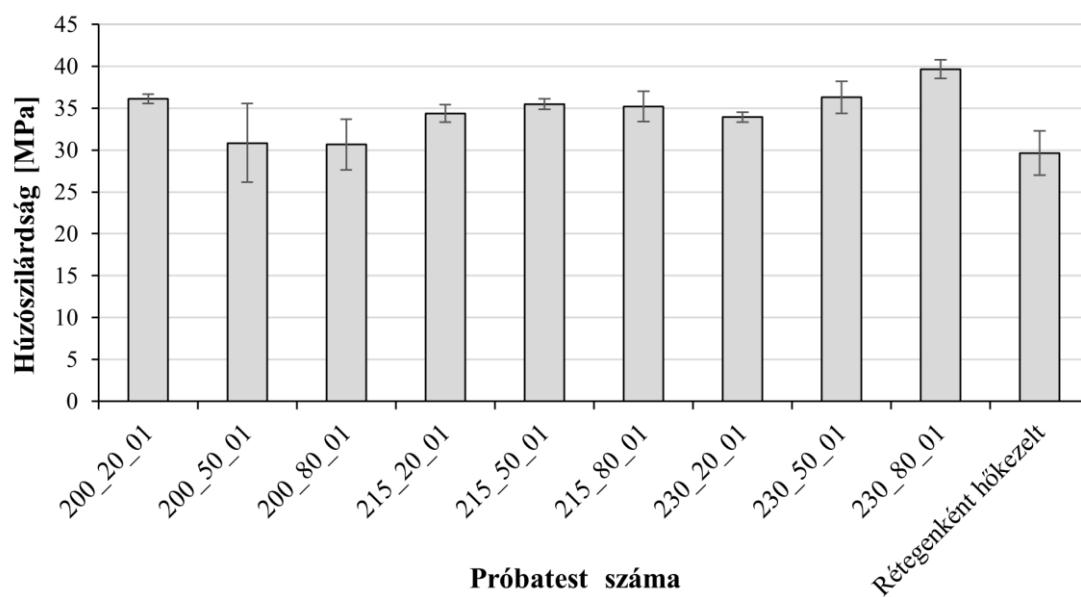
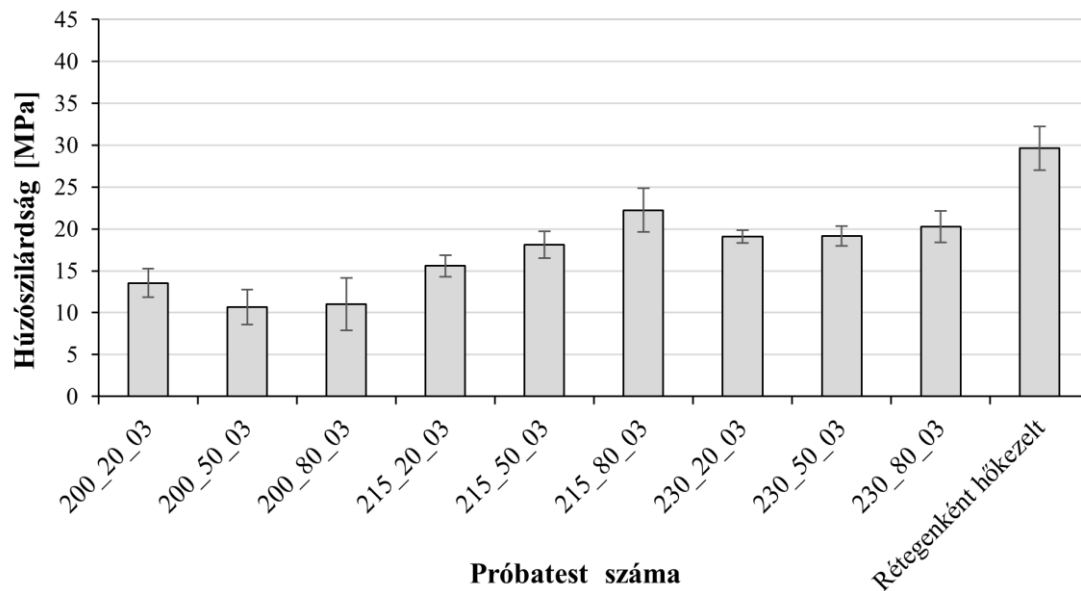
7. MELLÉKLETEK

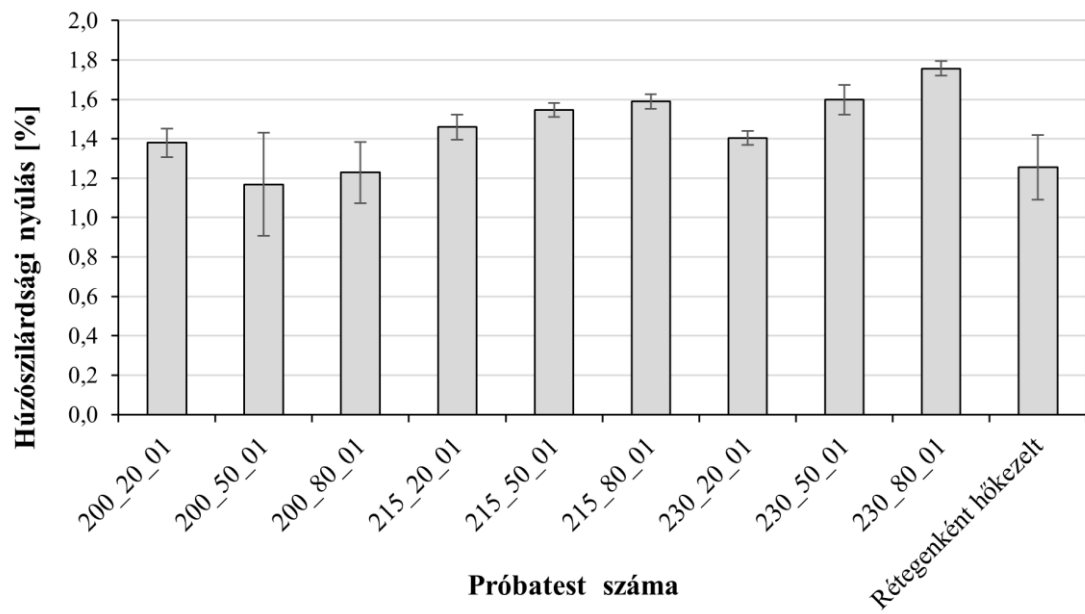
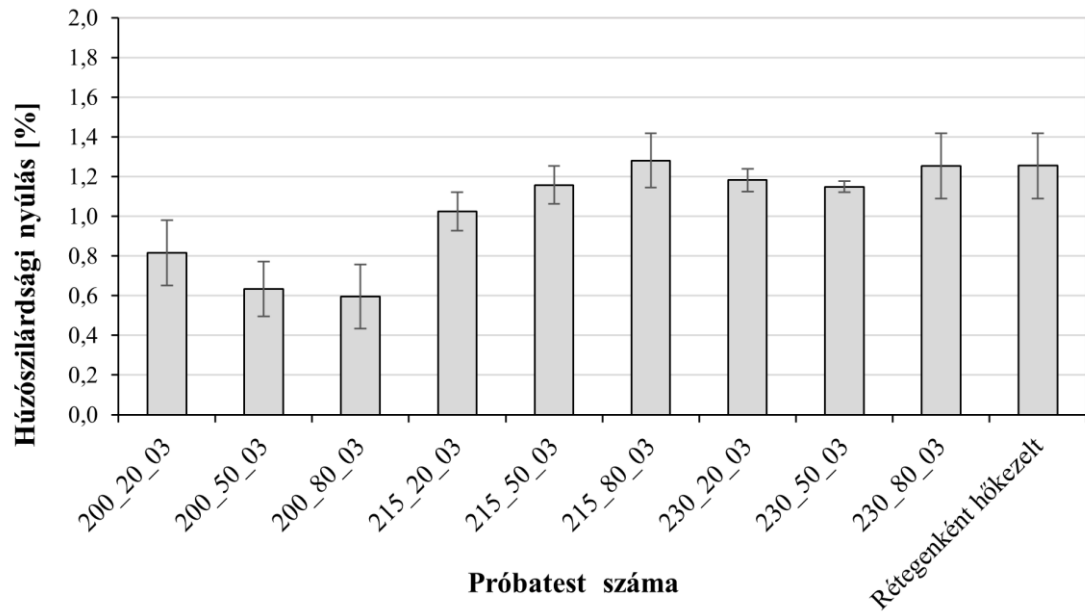
1. Melléklet: Előgyártmány műszaki rajza

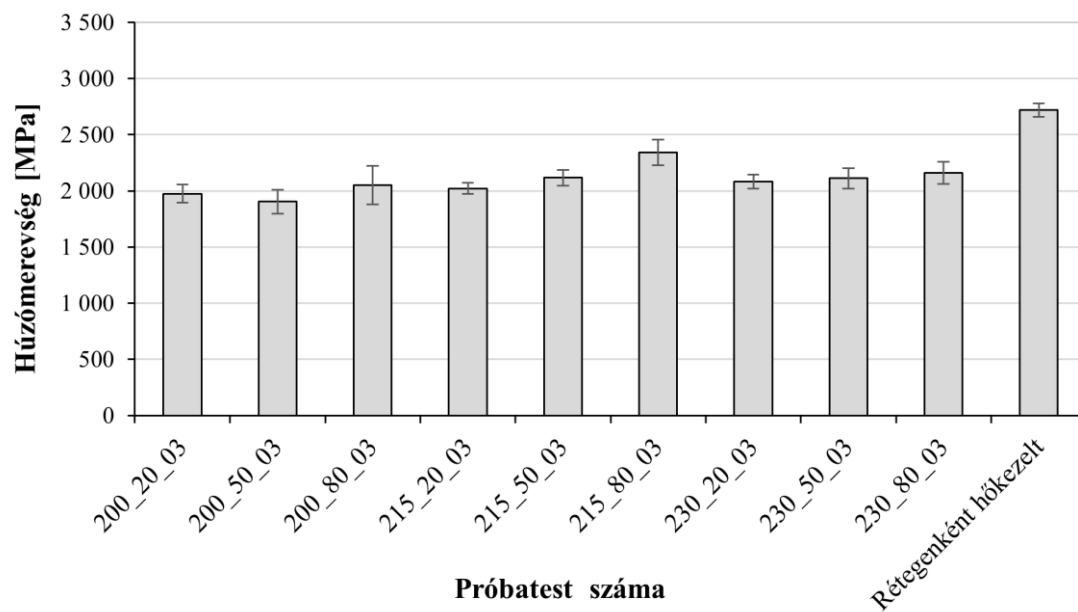


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

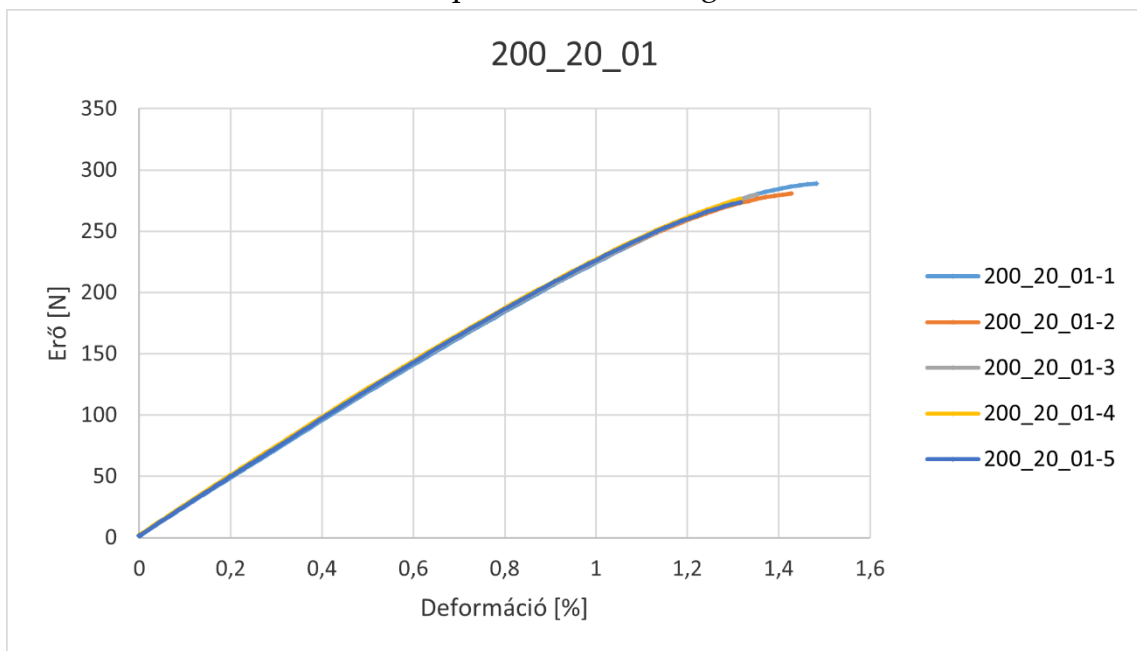
2. Melléklet: Rétegenként hőkezelt próbatestek tulajdonságai a 0,1 mm-es illetve 0,3 mm-es rétegvastagsággal gyártott próbatestekhez képest.



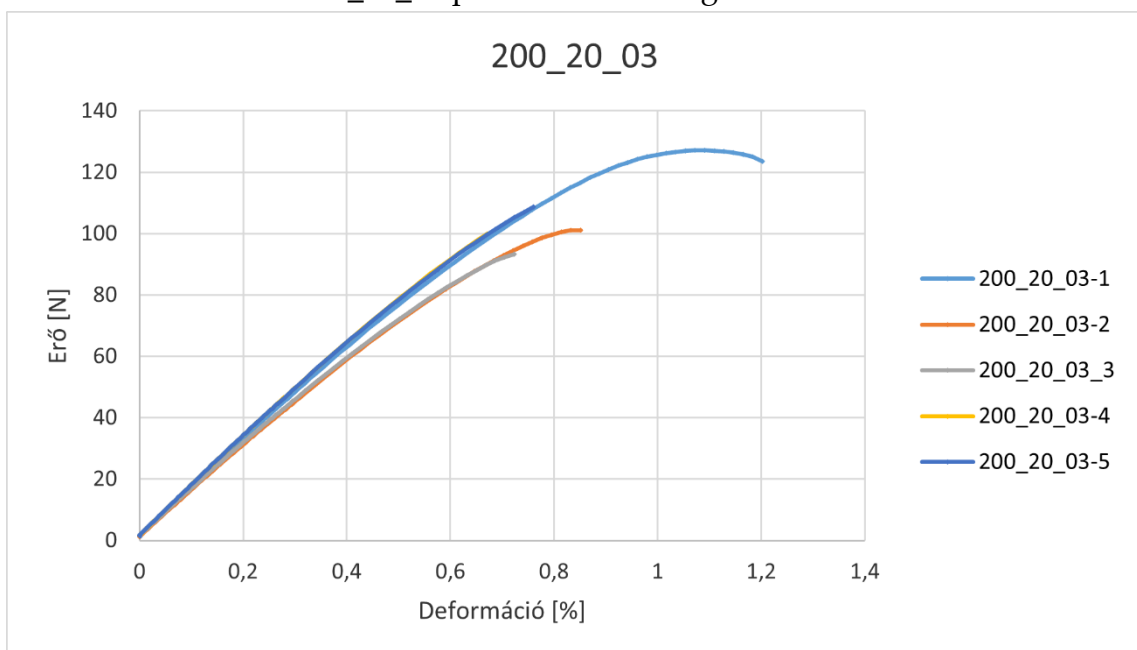




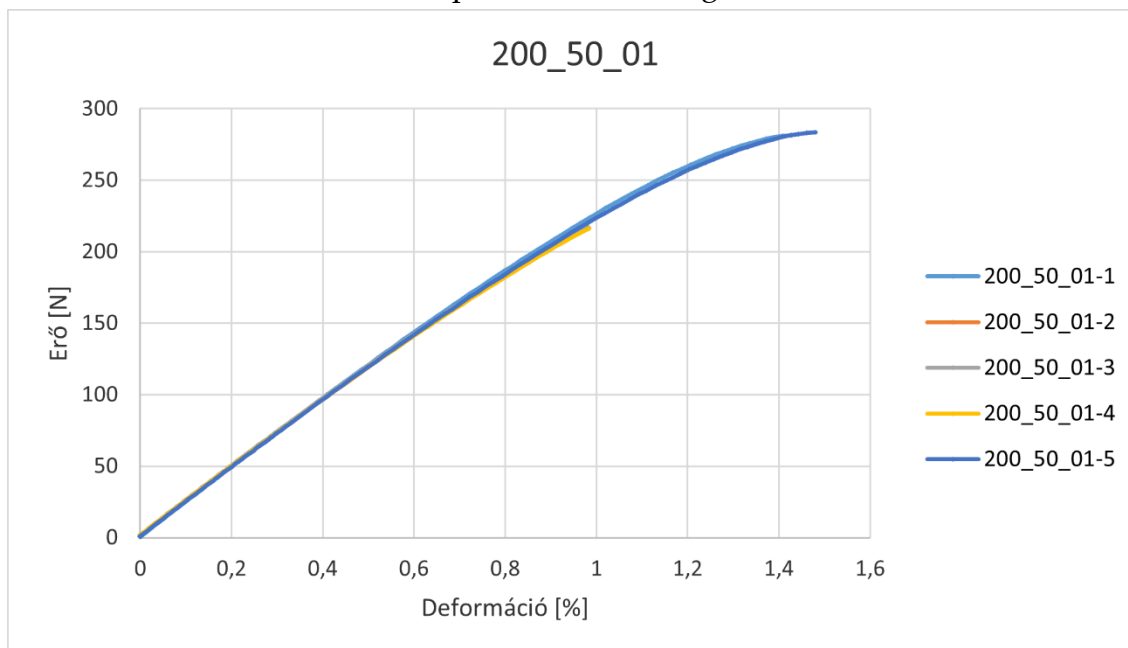
3. Melléklet: 200_20_01 próbatest szakító görbéi



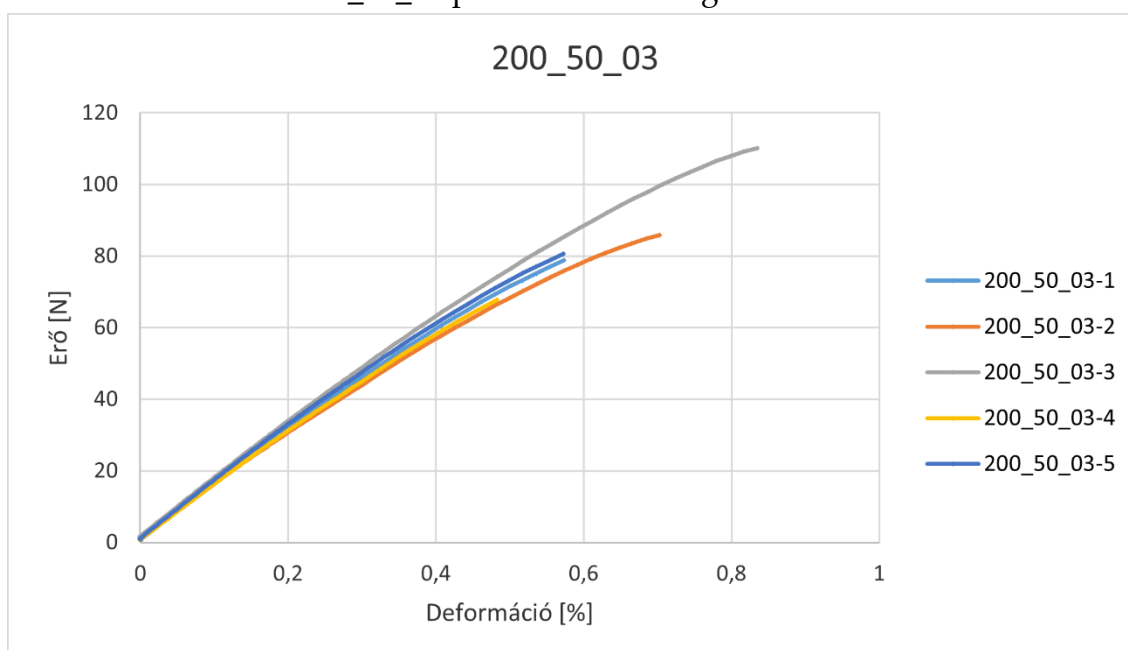
4. Melléklet: 200_20_03 próbatest szakító görbéi



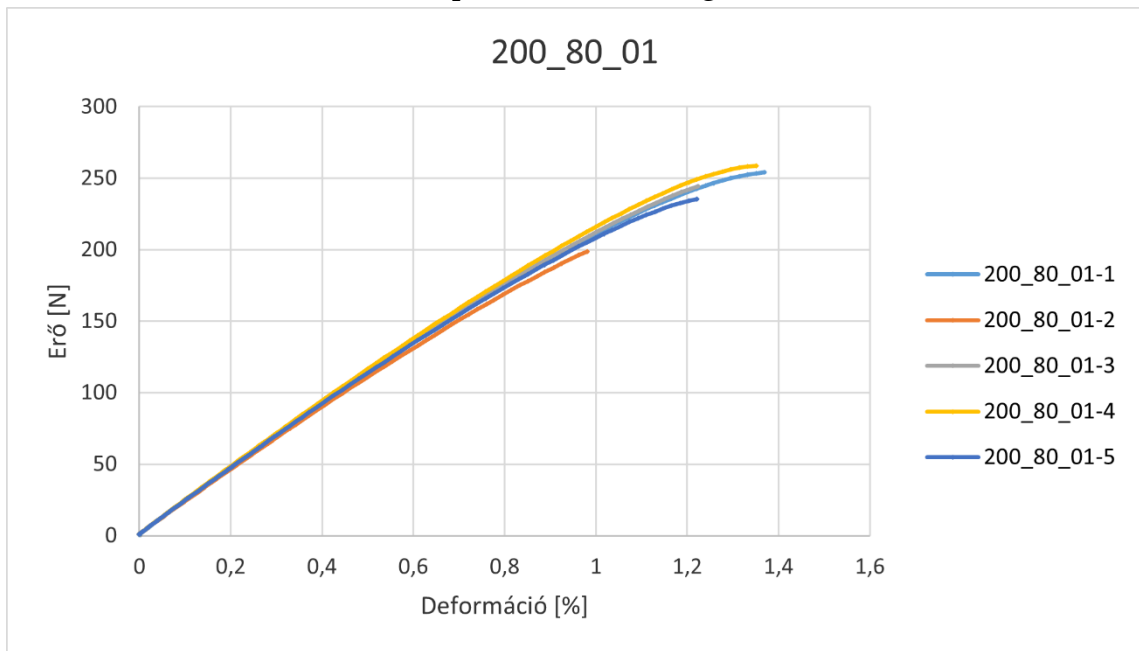
5. Melléklet: 200_50_01 próbatest szakító görbéi



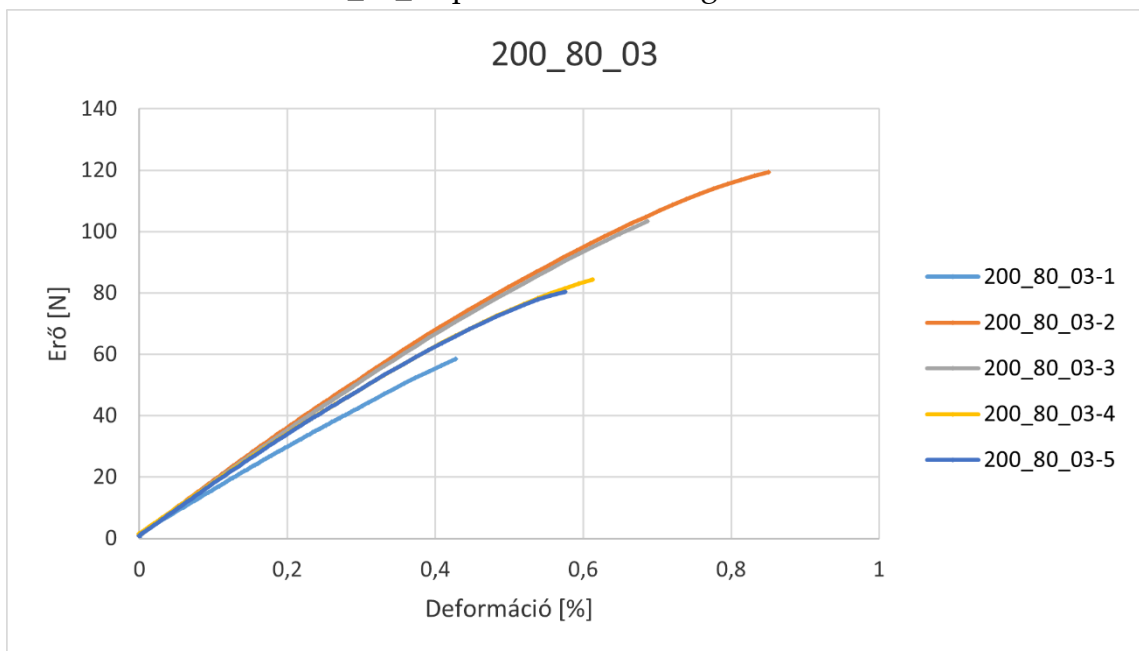
6. Melléklet: 200_50_03 próbatest szakító görbéi



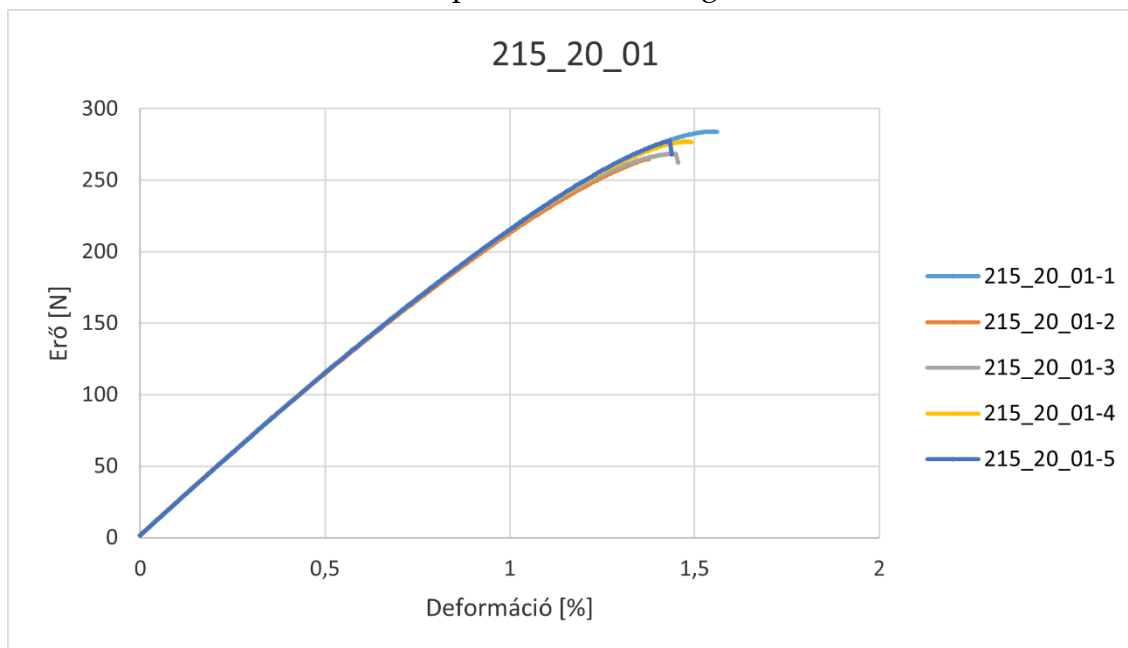
7. Melléklet: 200_80_01 próbatest szakító görbái



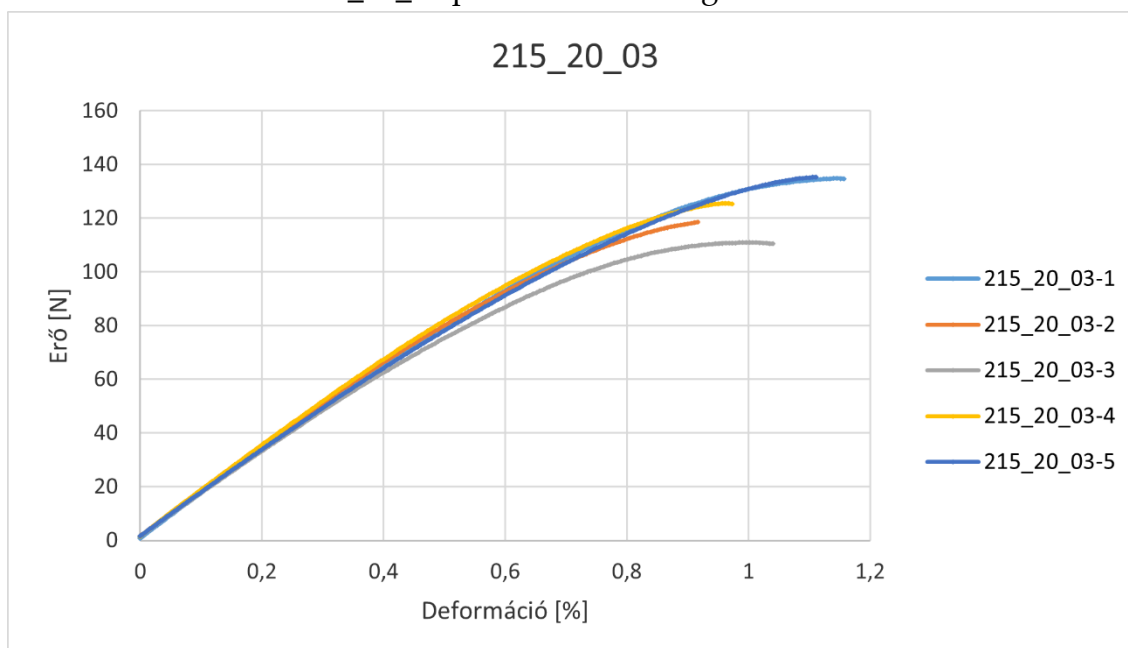
8. Melléklet: 200_80_03 próbatest szakító görbái



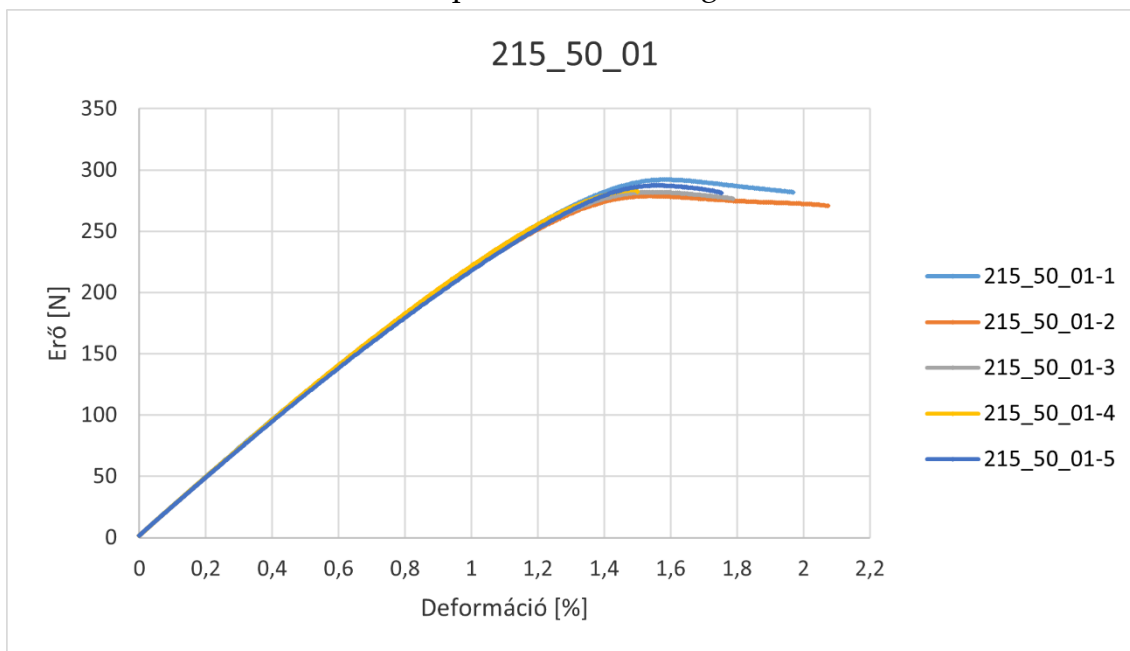
9. Melléklet: 215_20_01 próbatest szakító görbéi



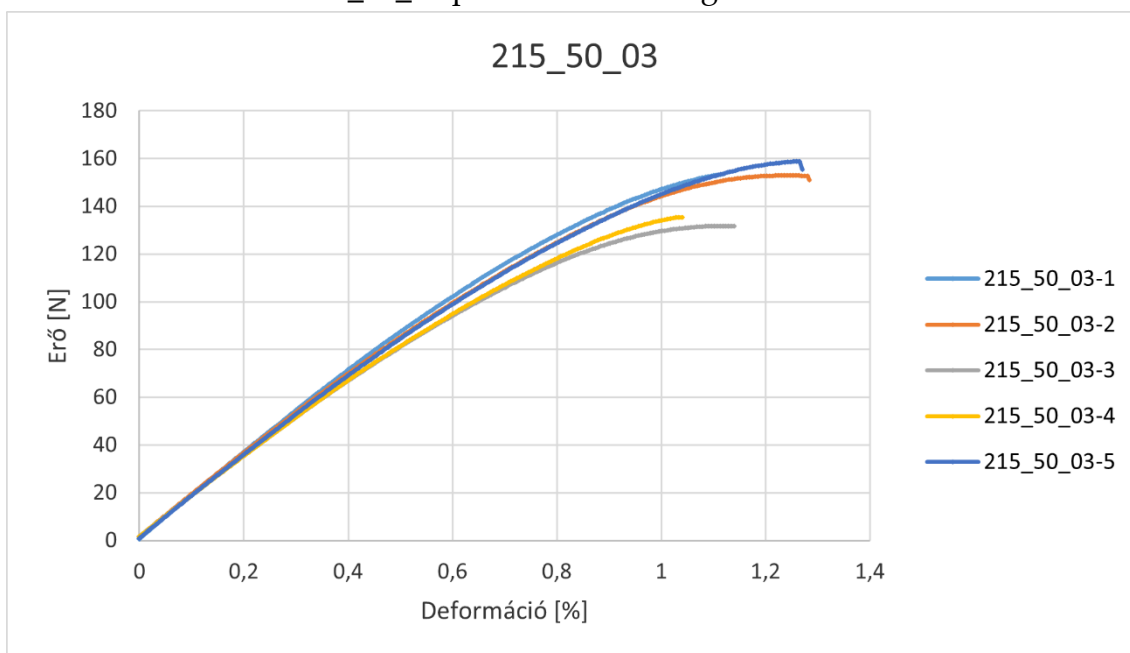
10. Melléklet: 215_20_03 próbatest szakító görbéi



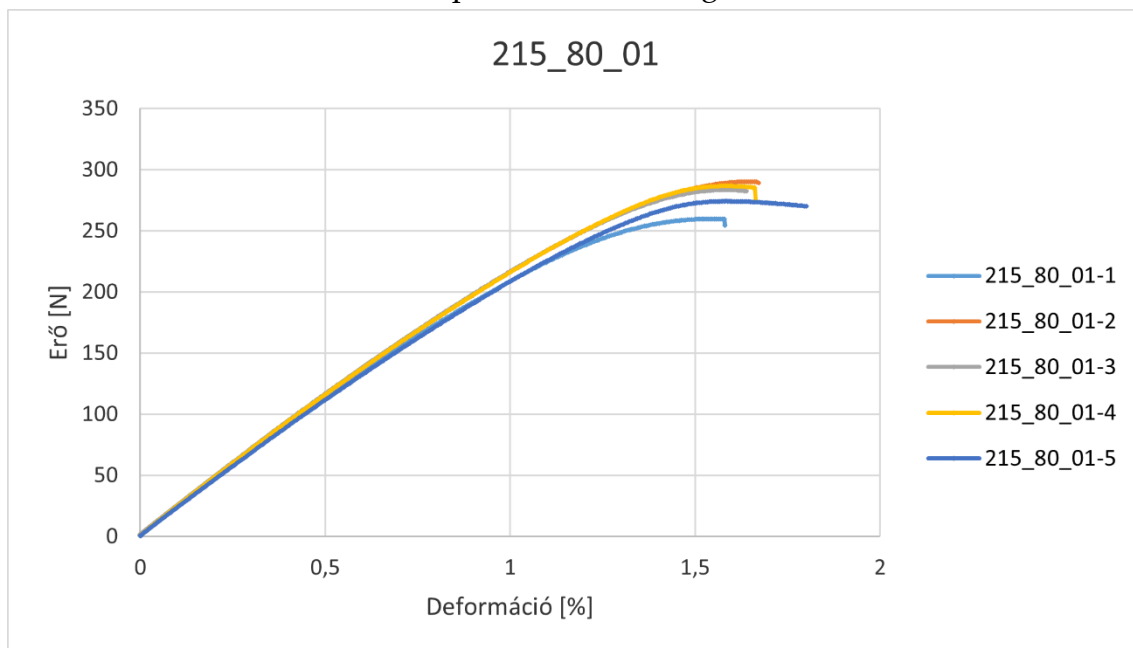
11. Melléklet: 215_50_01 próbatest szakító görbéi



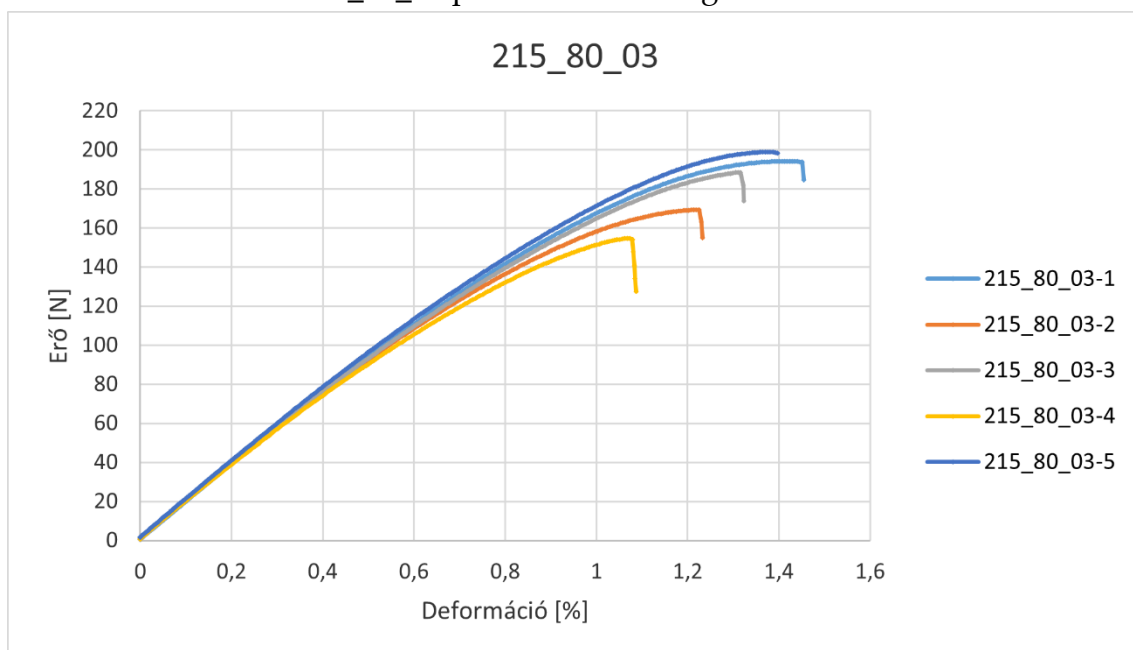
12. Melléklet: 215_50_03 próbatest szakító görbéi



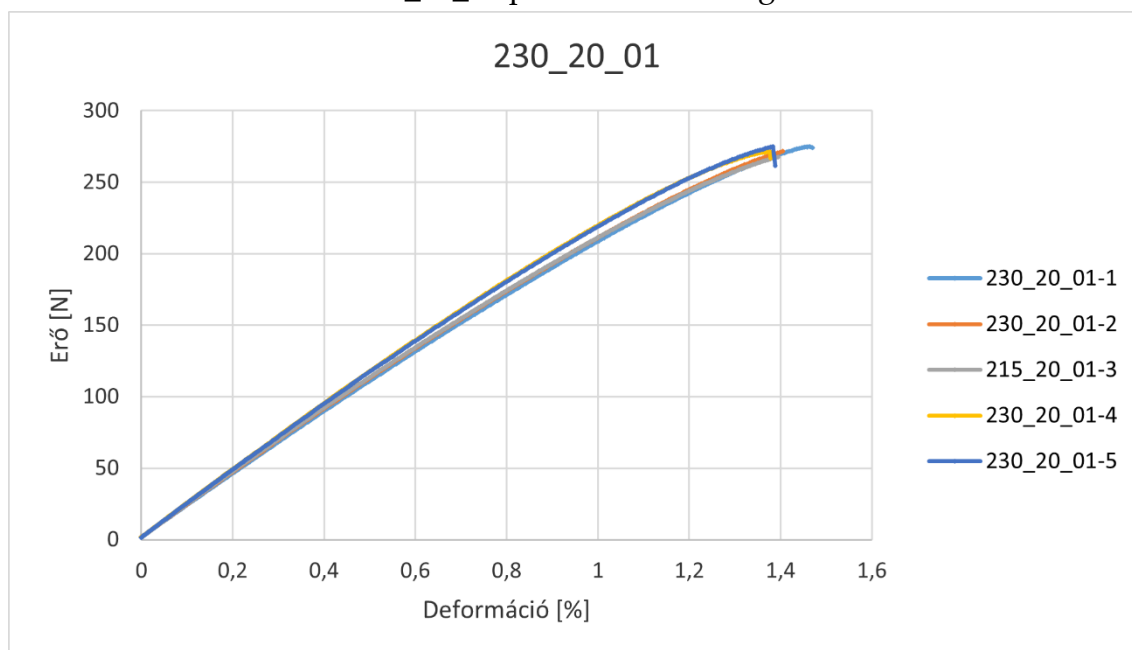
13. Melléklet: 215_80_01 próbatest szakító görbéi



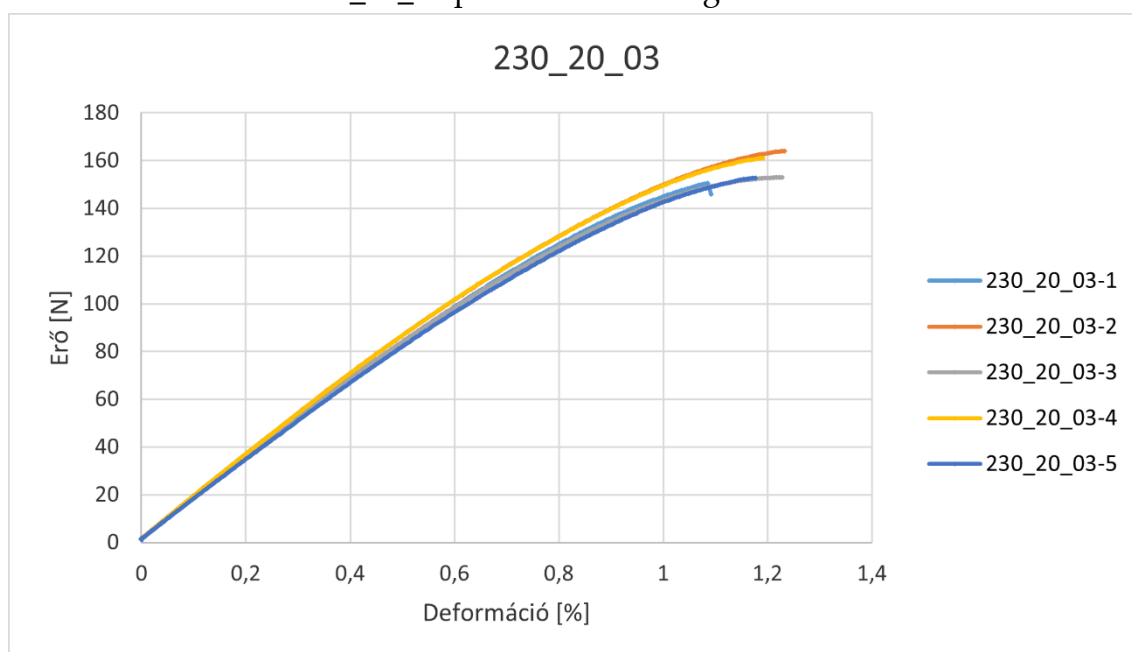
14. Melléklet: 215_80_03 próbatest szakító görbéi



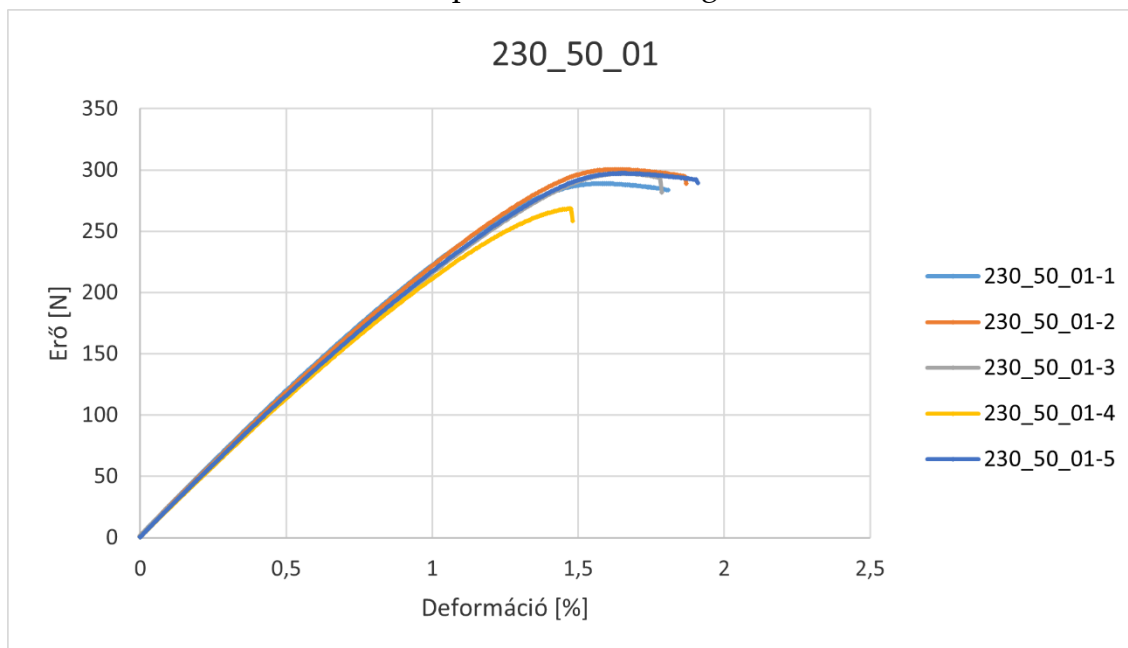
15. Melléklet: 230_20_01 próbatest szakító görbéi



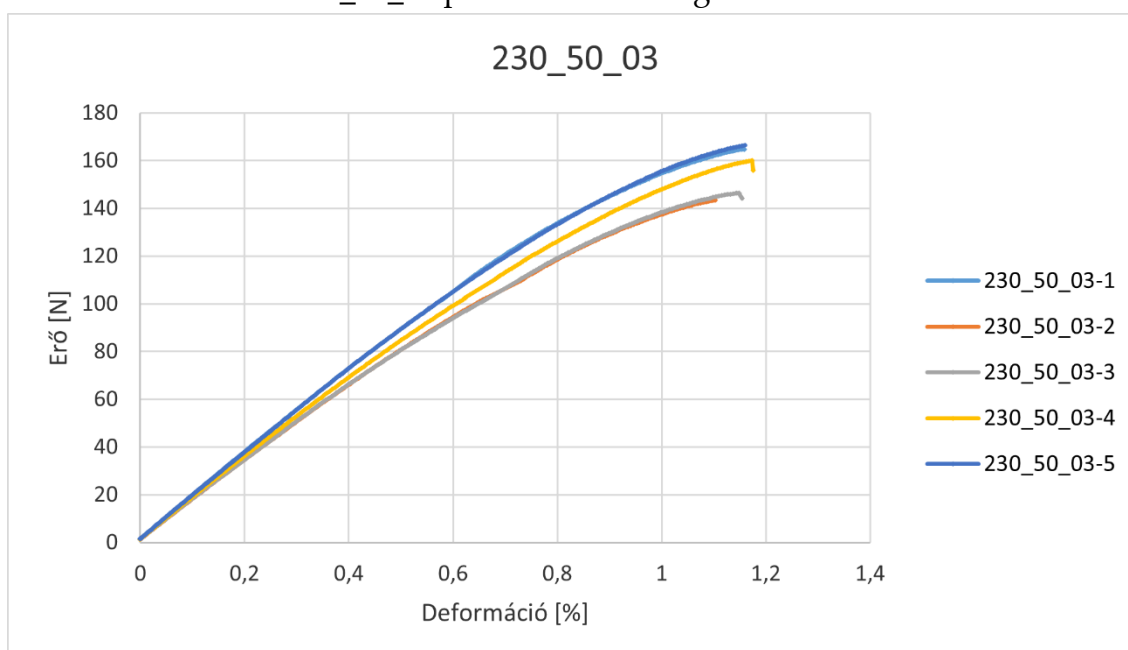
16. Melléklet: 230_20_03 próbatest szakító görbéi



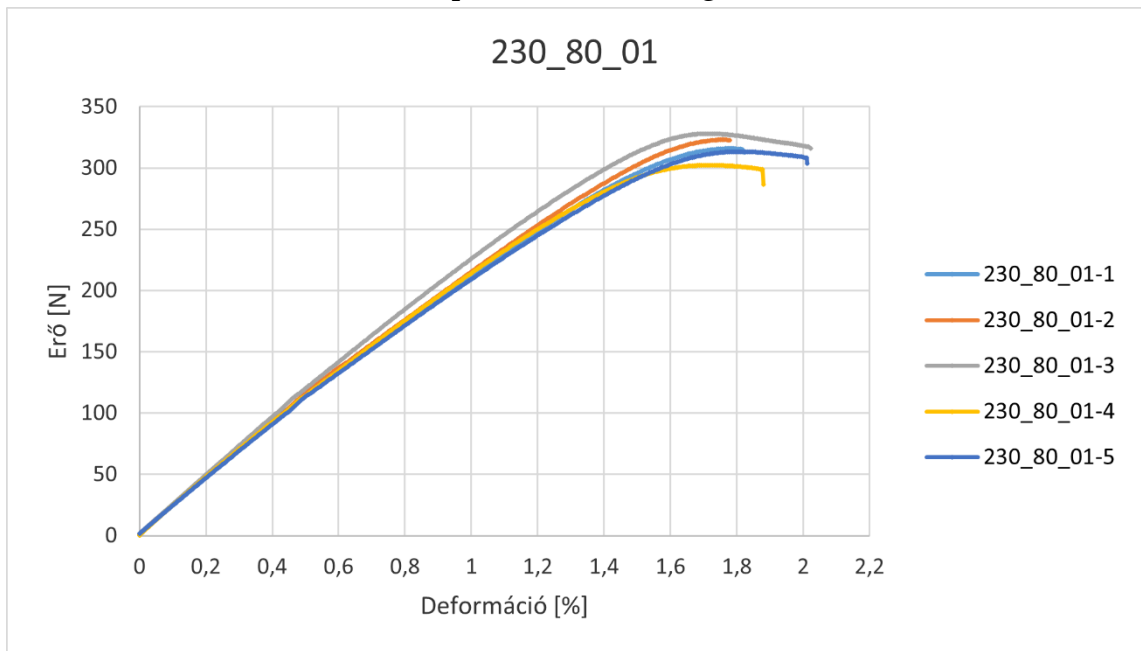
17. Melléklet: 230_50_01 próbatest szakító görbái



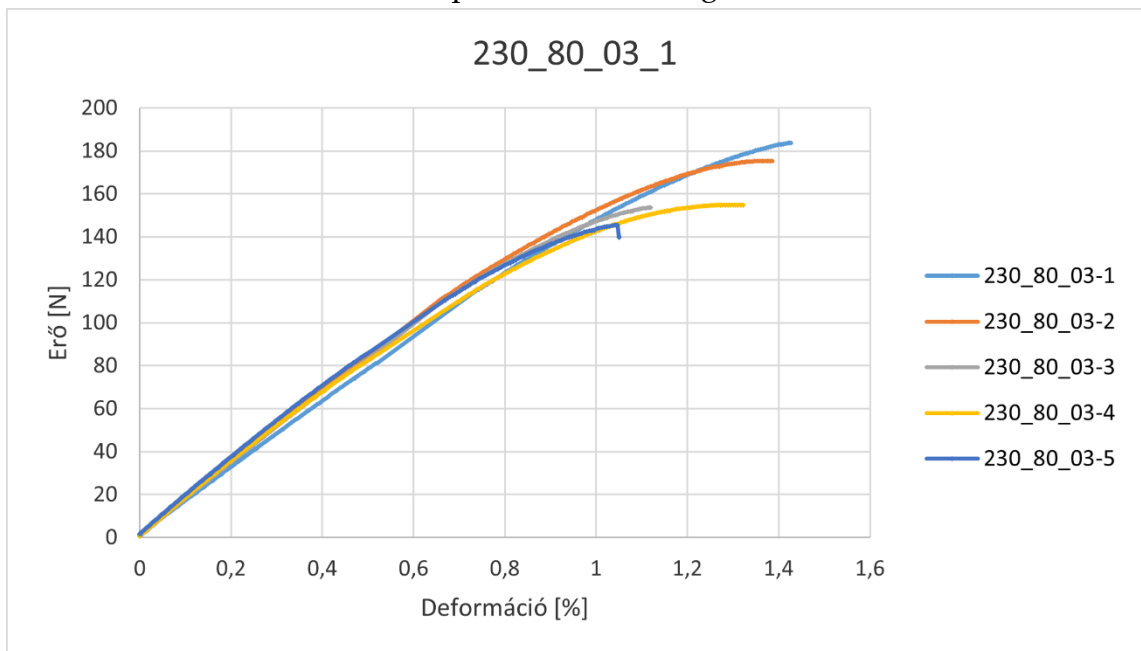
20 Melléklet: 230_50_03 próbatest szakító görbái



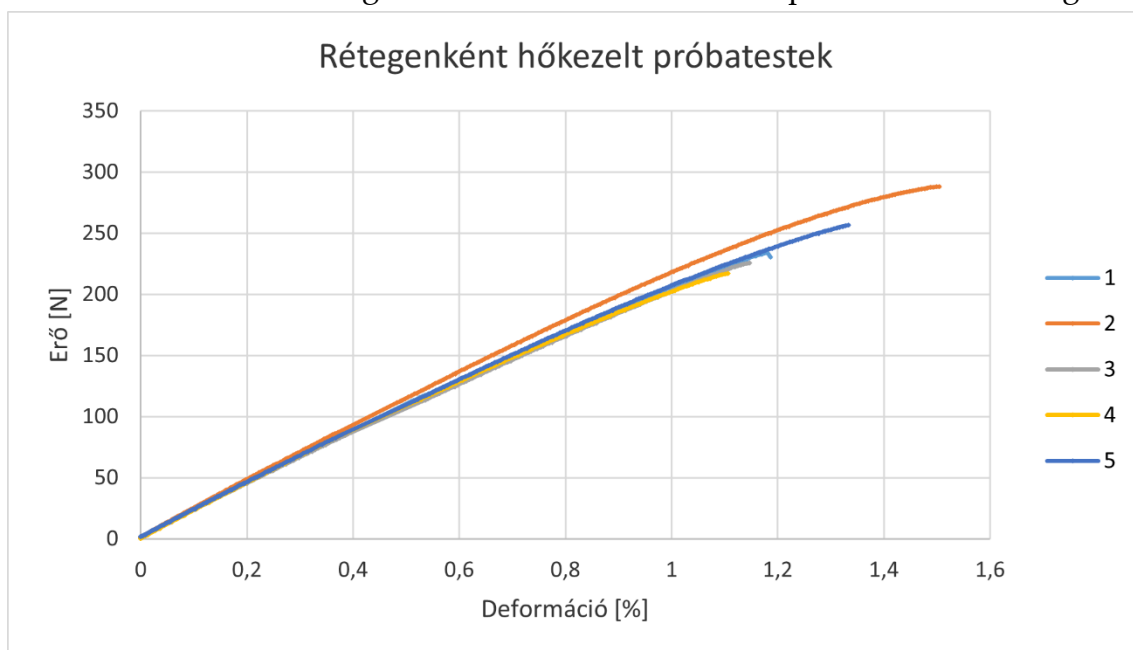
21. Melléklet: 230_80_01 próbatest szakító görbái



22. Melléklet: 230_80_03 próbatest szakító görbái



23. Melléklet: Rétegenként hőkezelt próbatestek szakítógörbéi



24. Melléklet: Superslicer-el készített normál referencia próbatestek szakítógörbéi

