



Doktori (PhD) értekezés

Kovács Sándor Endre

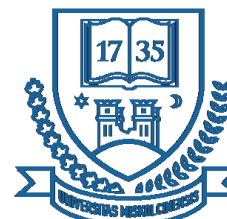
okl. kohómérnök

Miskolc, 2025

Kerpely Antal Anyagtudományok és -technológiák Doktori Iskola

Anyag- és Vegyészmérnöki Kar

Fémelőállítási és Öntészeti Intézet



3D fémnyomtatással előállított acéltermékek tulajdonságainak vizsgálata

Doktori (PhD) értekezés

Kovács Sándor Endre

okl. kohómérnök

Tudományos témavezető: **Dr. Varga László, PhD**

A doktori iskola vezetője: **Prof. Dr. Mertinger Valéria, MTA doktora**

Miskolc, 2025

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés.....	1
2. Szakirodalmi összefoglaló.....	4
2.1. Az additív gyártástechnológia története	4
2.2. Az Additív Gyártástechnológiai folyamatok bemutatása	7
2.2.1. Felületmodellek és forrásfájl generálás	8
2.2.2. A VAT Photo polymerization, vagy SLA technológia bemutatása	9
2.2.3. A Material-, és a Binder Jetting bemutatása	10
2.2.4. A Material Extrusion bemutatása.....	12
2.2.5. A Sheet lamination bemutatása.....	14
2.2.6. A Direct Energy Deposition bemutatása.....	15
2.2.7. A Powder Bed Fusion bemutatása	16
2.3. Additív Gyártástechnológiai folyamatok összefoglalása	19
2.4. Az additív gyártástechnológiai folyamatok kihívásai.....	20
2.4.1. Az egyedi geometriájú és a nagy szériában gyártott termékek gyártása	20
2.4.2. Az építési idő és a felbontás közötti összefüggés	21
2.4.3. Felhasználható anyagok mennyisége, tisztasága és kezelése, valamint a támaszelemek építési stratégiája.....	21
2.5. A 3D nyomtatás során kialakuló maradó feszültségek	22
2.5.1. A maradó feszültségek kialakulása	24
2.6 A 3D nyomtatási orientáció bemutatása	25
3. Feldolgozott irodalom összefoglalása, tudáshiány definiálása.....	27
4. Saját kutatás bemutatása.....	28
4.1. A 17-4 PH rozsdamentes acél ötvözet hőkezelése.....	31
4.2. Nagyobb energiasűrűségű kétszeres átolvasztás	32
4.3. Maradó feszültségek mérése.....	33
4.3.1. Maradó feszültség eredmények bemutatása, rendszerezése	37

4.3.2. Eredmények összefoglalása	43
4.3.3. Maradó feszültség mérő próbatestek egy nyomtatási ciklusban történő gyártása	44
4.3.4. A módosított maradó feszültség próbatestek eredményeinek összefoglalása....	47
4.4. A 17-PH rozsdamentes acél próbatestek szakítószilárdsági vizsgálatai	48
4.4.1. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek	49
4.4.2. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek eredményeinek összefoglalása	50
4.4.3. Az XY orientáción gyártott különböző felületi kiterjedésű próbatestek vizsgálatai	51
4.4.4. XY orientáción elkészített próbatestek eredményeinek összefoglalása	53
4.4.5. Az „YZ” orientáción elkészített darabok szakítószilárdsági vizsgálata	54
4.4.6. Az „YZ” orientáción elkészített darabok eredményeinek összefoglalása	59
4.4.7. A „ZX” 3D nyomtatási orientációban elkészített darabok vizsgálata.....	59
4.4.8. A „ZX” orientációs 3D nyomtatási eredmények összefoglalása	79
5. Összefoglalás	83
6. Summary.....	85
7. Tézisek.....	87
1. Tézis.....	87
2. Tézis.....	88
3. tézis	90
4. tézis	92
5. tézis	94
6. Tézis.....	97
Köszönetnyilvánítás	101
Irodalomjegyzék	102
Ábrajegyzék.....	109

1. Bevezetés és célkitűzés

Az additív gyártástechnológia (AM – „Additive Manufacturing” – angol kifejezésből) az elmúlt harminc év egyik leggyorsabban fejlődő iparága, mely összefoglalja a gyors prototípusgyártást (RP – „Rapid Prototyping” – angol kifejezésből) és a köztudatban leginkább elterjedt 3D nyomtatást. A nevet az ASTM F42 bizottság választotta [1], mely célja, hogy ezt a típusú gyártást elhatárolja a hagyományos gyártástechnológiáktól, például fémöntés, CNC esztergálás, kovácsolás, húzás és hajlítás. Ezeknél az eljárásoknál, az alakadási folyamat, vagy egy formaüreg feltöltésével, vagy egy tömb anyag formára alakításával történik. Mindkét esetben nagy anyagveszteség keletkezik mire a folyamat eljut a kész termékig. Az AM gyártás ezzel ellentétben, kizárólag anyag hozzáadásával éri el a végső állapotát a gyártott testeknek, rétegről rétegre való építési stratégiát alkalmazva [2][3]. Ennek az építési stratégiának köszönhetően lehetőség nyílik topológiaiilag optimalizált, kikönnyített szerkezeti alkatrészek elkészítésére, melyek geometriai módosítása nem von maga után plusz költségeket, mivel nincs szerszám, amit módosítani kell minden egyes változtatást követően. Főleg emiatt a rugalmas karakterisztikája miatt lett egyre keresettebb és így vált napjaink egyik csúcstechnológiájává. Az 1. ábra egy ilyen topológiaiilag optimalizált terméktervezési folyamatot mutat be.

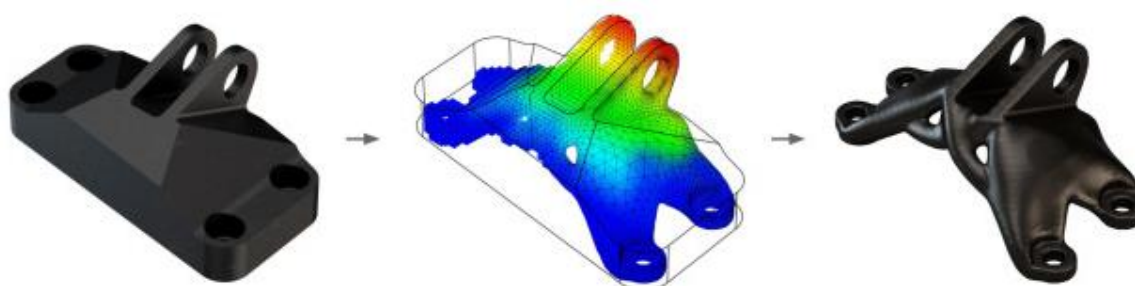


1. ábra, Topológiaiilag optimalizált alumínium tartóelem

Kép forrása: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>

Amit az AM gyártás kínál, a már létező gyártási folyamatokon felül, az egy teljesen új perspektíva. A rétegről rétegre való felépítés megadja azt a tervezési szabadságot, ami a

tervező mérnökök számára szükséges, hogy innovatív és jó teherbírású modelleket készítsenek. Ezeket a modelleket véges elemes módszerekkel (FEM – „finite element method” angol kifejezésből) addig lehet optimalizálni, amíg azt a folyamat kívánja. Ezek az optimalizált elemek jellemzően kisebb összterfoggattal rendelkeznek, így kevesebb alapanyag szükséges az előállításukhoz, mely fenntarthatóbbá teszi a terméket és a folyamatot is. A 2. ábra egy ilyen folyamatot mutat be az 1. ábrához hasonló példa alkatrészén. A folyamat lényege, hogy a szimuláció során kimutatott, terhet nem viselő, vagy elenyésző terhelést elszenvedő részeket el lehet hagyni, így kialakítva egy új, egyedi geometriát.



2. ábra, FEM módszeres elemzése a topológiaiilag optimalizált tartóelemnek

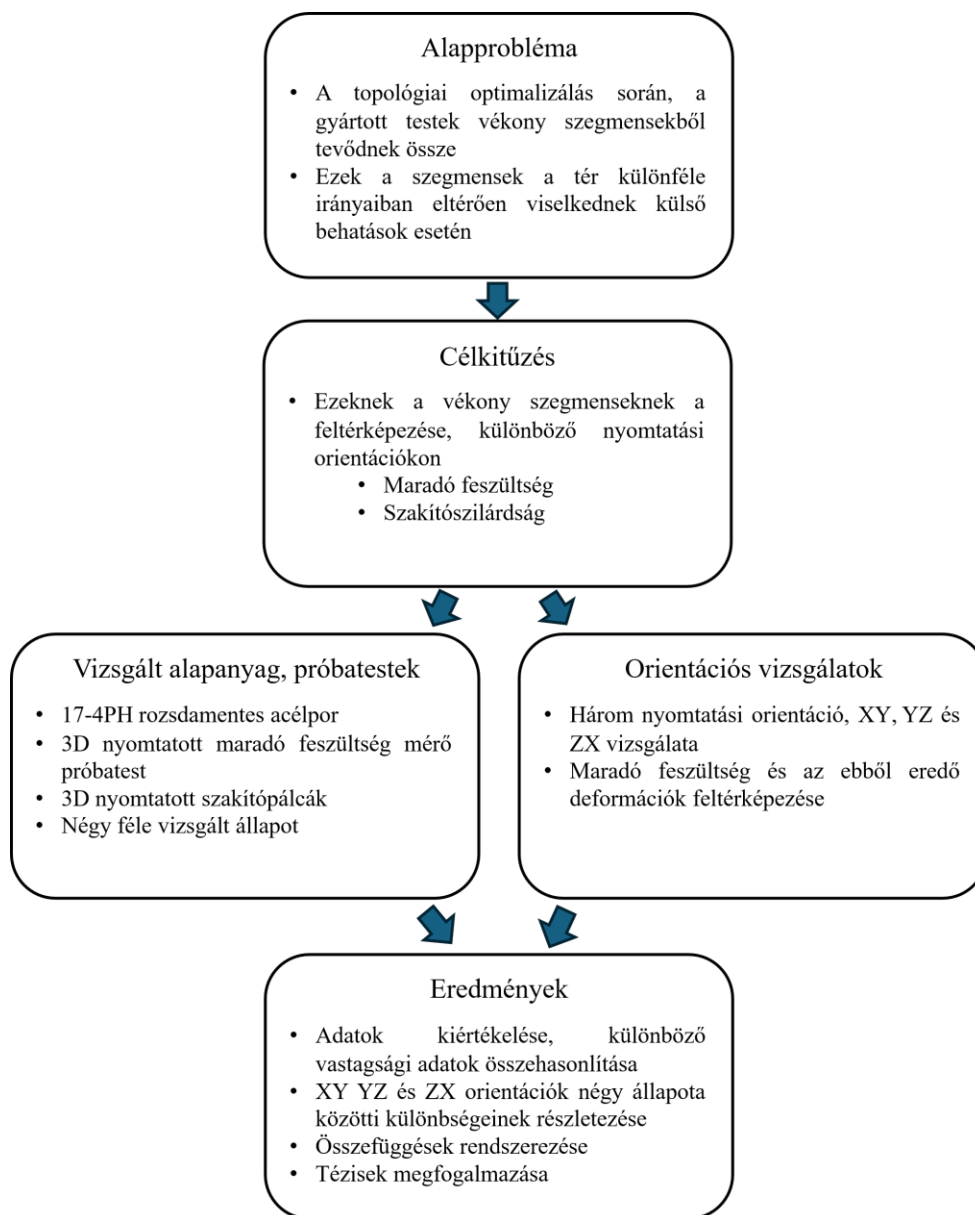
Kép forrása: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>

Ahogy azt a 2. ábra is szemlélteti, ez az újfajta kialakítás vékony szegmensekből áll össze. Ezek a szegmensek a tér különféle irányában helyezkednek el, így különböző keresztmetszetű és eltérő mennyiségű rétegből tevődnek össze, melyek minősége kiemelten fontos. A legtöbb valós gyártási esetben azonban lehetetlen, hogy minden nyomtatott szegmens optimális orientációban helyezkedjen el. Dolgozatom célja, ezeknek a vékony, 2 mm, illetve 3 mm vastag szegmenseknek a vizsgálata a maradó feszültségekre és az egytengelyű húzófeszültségekre fókuszálva, különböző nyomtatási orientációkban. Ezen felül célom, hogy a folyamat során kapott próbatestek szakítószilárdság és maradó feszültség tulajdonságát javítsam. Az I. táblázat mutatja be a kutatásom során vizsgált legfontosabb paramétereket.

I. táblázat, Legfontosabb vizsgálati paraméterek

Vizsgált jelenség	Maradó feszültség	Rögzített állapotban, a maradó feszültség változása a próbatest hosszán
		Oldott állapotban, a felhajlás mértéke a rögzített állapothoz képest
	Szakítószilárdság	Szakítószilárdság értéke
		Nyúlás értéke

A 3. ábra mutatja be a kutatómunkám vázlatos szerkezetét, mely során porágyas, fémpor olvasztásos technológiát használtam, amelyet részletesebben bemutat a 2.2.7. fejezet.



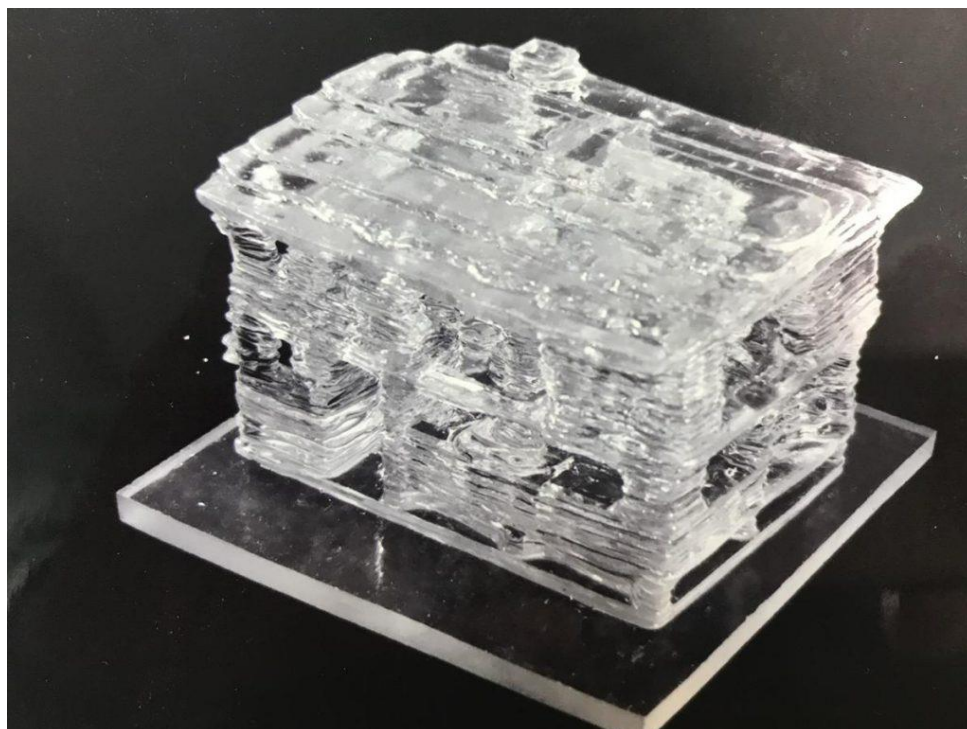
3. ábra, Kutatómunka vázlatos ismertetése

A szakirodalmi ismeretanyagokban a 3D nyomtatott acél alkatrészekben kialakuló maradó feszültséget és a szakítószilárdsági vizsgálatokat széleskörűen tárgyalják, azonban nagyon kevesen vonatkoztatnak el az optimálisnak vélt horizontális nyomtatási orientációtól, valamint nem térnek ki részletesen arra a lehetőségre, hogy folyamaton belül, kétszeresen átolvasztott rétegek alkalmazásával alakítható-e a gyártott alkatrész szerkezeti integritása. A disszertációm során ezekre a jelenségekre fókuszálva készítettem el a kísérleti tervemet és végeztem el a kísérleteimet.

2. Szakirodalmi összefoglaló

2.1. Az additív gyártástechnológia története

Az AM folyamatok egyik legnagyobb mérföldköve, hogy 1981-ben Hideo Kodama és csapata a Nagoya Városi Ipari Kutatóintézetben [4] létrehozták azt a folyamatot, mellyel megalkották a 4. ábrán látható, rétegekből felépített tömör testet. Az eljárásból szabadalom is készült, „JPS56144478A” sorozatszámmal, melyre az utolsó hivatkozás dolgozatom írásával bezárólag 2020 novemberében történt.



4. ábra, A Kodama által készített 3D nyomtatott test, ~50mm magas, 27 rétegből álló, 2 mm rétegvastagságú kikeményített gyanta

Kép forrása: <https://thoracickey.com/history-of-rapid-prototyping/>

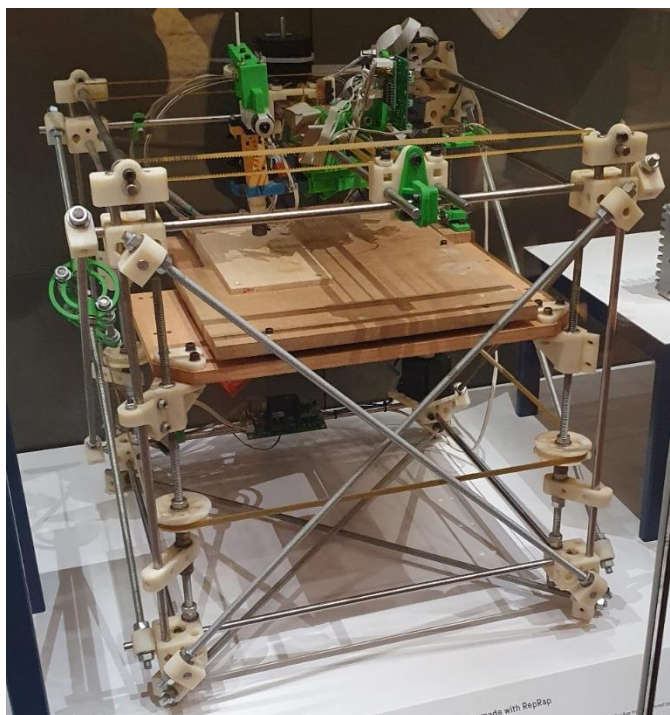
Ezt követően 1984-ben Charles Hull és kutatócsapata írták be magukat a történelembe. Munkájuk eredményeként létrejött az első olyan 3D nyomtatási eljárás, amit sztereolitográfiának (SLA – a „stereolithography” angol kifejezésből) kereszteltek és megszületett az „US4575330A” szabadalom [5]. A legfontosabb eredmény a kutatása keretében, amiért őt tartják a 3D nyomtatás atyjának, hogy megalkotta az „.stl” fájlformátumot. A kifejezés a sztereolitográfia szóból származik, amely a mai napig az egyik legáltalánosabban használt formátuma a különböző 3D nyomtató berendezéseknek. Az 5. ábra mutatja be az első általa nyomtatott SLA testet.



5. ábra, Az első Charles Hull által 3D nyomtatott darab, 1983-ban

Kép forrása: <https://www.3dsystems.com/images/gold-rings-hand>

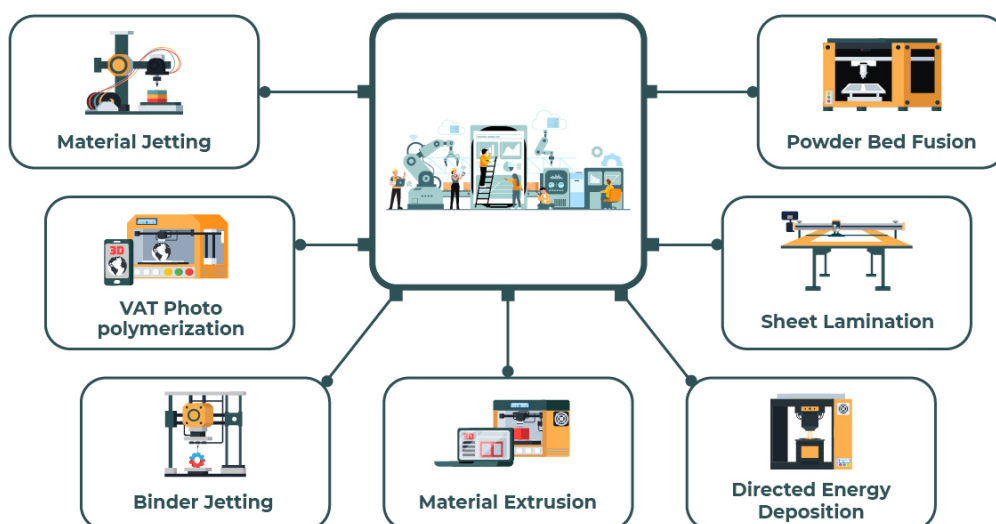
A technológiai ágazat a '80-as években két új eljárással bővült. 1988-ban Carl Deckard megalkotta a szelektív lézeres szinterelés technológiáját [6] (SLS – a „selective laser sintering angol kifejezésből), aminek az újdonsága az volt, hogy egy fókuszált lézer energiaforrás szinterezte össze a por állapotú alapanyagot szilárd testté [7]. 1989-ben Scott Crump megalkotta az első filamentes 3D nyomtató berendezést, ami szálanyagot olvasztott egymásra rétegről rétegre [9] (FDM – a „fused deposition modelling” vagy FFF – „fused filament fabrication angol kifejezésekből) és megalapította a Stratasys céget. A '90-es évek nem hozott technológiai újdonságokat, viszont számos új vállalkozás jött létre és a meglévő kínálat hatalmas fejlődésen ment keresztül. Hatalmas mérföldkönek tudható be a 2006. év, amikor az első SLS berendezés megjelent piaci forgalomban [8]. Ezzel párhuzamosan, a „RepRap” projekt keretén belül nyílt forráskódúvá tették a technológiát [10]. A projekt célja az volt, hogy megalkossák az első saját magát pótolni képes gépet (erre utal a projekt neve: az angol „replicating rapid prototyper” kifejezésből származik), melynek lényege, hogy a berendezés csak olyan alkatrészekből épült fel, melyet saját maga képes kinyomtatni és hasznosítani. Ezzel megalapozták az egyik első „low-cost” 3D nyomtató piaci megjelenését. A 6. ábra mutatja be az első ilyen berendezést.



6. ábra, Adrian Bowyer első saját magát pótolni képes RepRap 3D nyomtatója

Kép forrása: <https://reprap.org/wiki/RepRap>

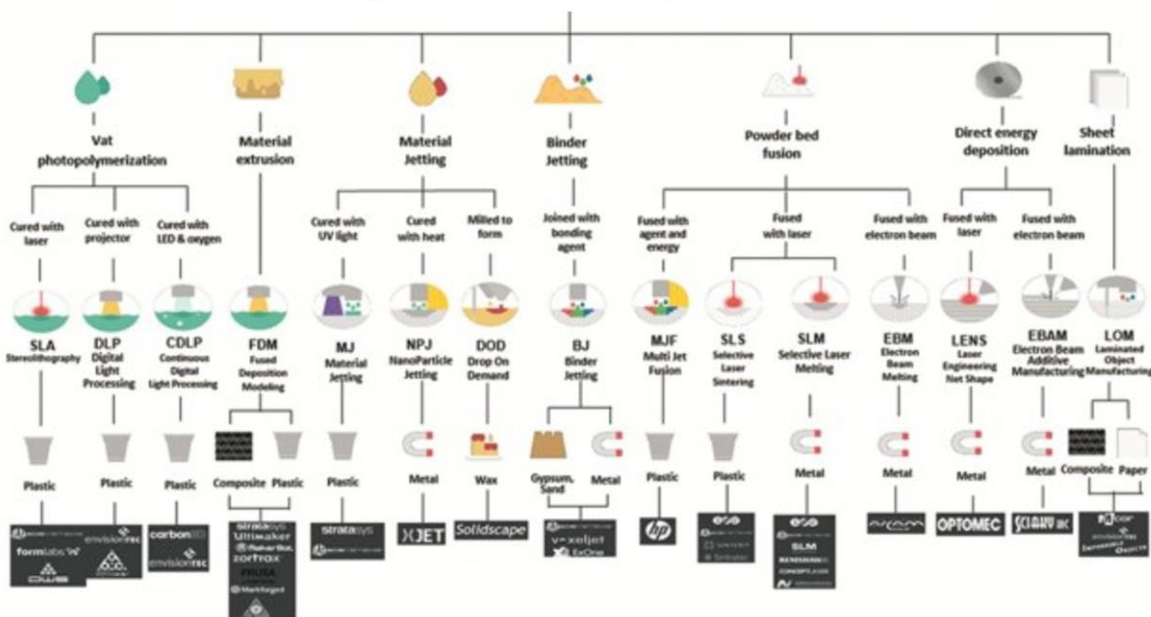
A 2006-os áttörés óta számos kutatócsoport, gyártó és egyetem foglalkozott különféle 3D nyomtatási eljárások létrehozásával és fejlesztésével. A 7. és a 8. ábra ezeket az eljárásokat mutatja be. Az eljárások nevei nem kerültek lefordításra, mivel ezek többségéről hivatalos, egységes döntés még nem született. Ezeknek rövid technológiai ismertetőjét mutatják be a 2.2.2. – 2.2.7. fejezetek.



7. ábra, Az AM folyamatok összefoglalása

Kép forrása: <https://ud-machine.com/sk/blog/additive-manufacturing-process/>

Additív gyártástechnológiák - áttekintés

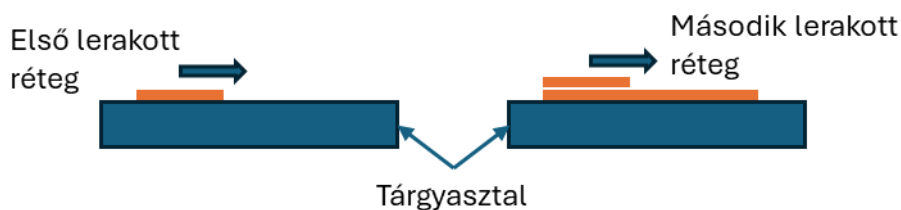


8. ábra, Napjainkban elterjedt additív gyártástechnológiák

Kép forrása: DOI:10.56042/ijems.v27i2.45920 Corpus ID: 231187560

2.2. Az Additív Gyártástechnológiai folyamatok bemutatása

A gyártó berendezés típusától, legyen az folyadék alapú, huzalt alkalmazó vagy por ágyas és a felhasznált alapanyagoktól függetlenül, mely lehet polimer, kerámia vagy fém, minden eljárás ugyanazon az alapelven üzemel, miszerint a felépítés rétegről rétegre történik. A 9. ábra mutatja be az építés elvét, ahogyan az aktuálisan lerakott rétegeket vagy a tárgyasztal, vagy egy korábban lerakott réteg előzi meg [11][12].



9. ábra, 3D nyomtatás rétegeképzési stratégiája

A 3D nyomtatási folyamat addig tart, amíg az utolsó réteg elhelyezésére nem került. A folyamatok legegyszerűbb csoportosítását a 7. ábra szemlélteti, mely a különböző technológiai ágazatokat reprezentálja. Ezen kívül azonban további csoportosítás lehet, az alkalmazott alapanyagok típusa (fémek, kerámiák, polimerek, kompozitok) vagy a felhasznált anyagok fizikai megjelenése (huzal, folyadék, por) illetve, hogy mi alakítja ki a végső kötést (polimerizáció, fémes kötés, kötőanyag alkalmazása) [13]. Kész termékként

minden alkalmazott anyag és kötés párba állítva egymással másfajta szerepet képes betölteni. Ezért amennyiben nem csak egy prototípust szeretnénk elkészíteni, hanem szerkezeti elemként, vagy működő alkatrészként kívánjuk alkalmazni a gyártott darabot, óvatosan kell megválasztani az alkalmazandó eljárást. Továbbá ahhoz, hogy a 3D nyomtatás, mint folyamat megvalósuljon, szükség van egy beprogramozott pályagörbére. Ez alapján kontrollálja a berendezés az alapanyag adagoló egységet, valamint definiálja a megfelelő kötés kialakításának helyét. A kötés kialakítása eljárástól függően lehet polimerizáció, kötőanyag bejuttatás, szinterelés, illetve olvasztás.

2.2.1. Felületmodellek és forrásfájl generálás

Az az általános kijelentés, hogy mindent, amit egy 3D tervező szoftveren belül megrajzolunk alkalmas 3D nyomtatásra, az általában az esetek 90%-ában állja meg csak a helyét [14]. A maradék 10% erősen kötődik az adott folyamat specifikus paramétereire. Sem folyékony alapanyagot felhasználó, sem porágyas rendszereknél nem szabad úgy megtervezni a nyomtatni való térfogatot, hogy a nem feldolgozott alapanyagot a szilárd test közrefogja, ezzel csapdába ejtse [15][16].

Minden esetben a folyamatok kiindulási pontja egy felparametrizált 3D geometria. Ennek megvalósítására a klasszikus tervező szoftvereken kívül, számos 3D nyomtatásra specializált alkalmazás is elérhető a piacon. Ahhoz azonban, hogy tovább lehessen vele dolgozni, a 3D tömör testet felületmodellé, általában STL fájlá kell alakítani. Ez a kiterjesztés az egyik legelterjedtebb, valamint minden egyes berendezés által támogatott formátum [17]. Elérhetőek a piacon ennek alternatívái is, melyek hasonló megközelítést alkalmaznak, azonban az a tulajdonságuk, hogy egy közvetítő eszközként szerepelnek a folyamatban, egy és ugyanaz. A generált felületmodell, jellemzően háromszögekből építi fel a megrajzolt testet. Az a tulajdonság, hogy mennyi a háromszögeknek az összmennyisége nagyban befolyásolja a 3D nyomtatás végkimenetelét. Ezt hívjuk felbontásnak [18]. A 10. ábra ennek egy példáját mutatja be.



10. ábra, Felületmodell, különböző mennyiségű háromszög elemekből felépítve

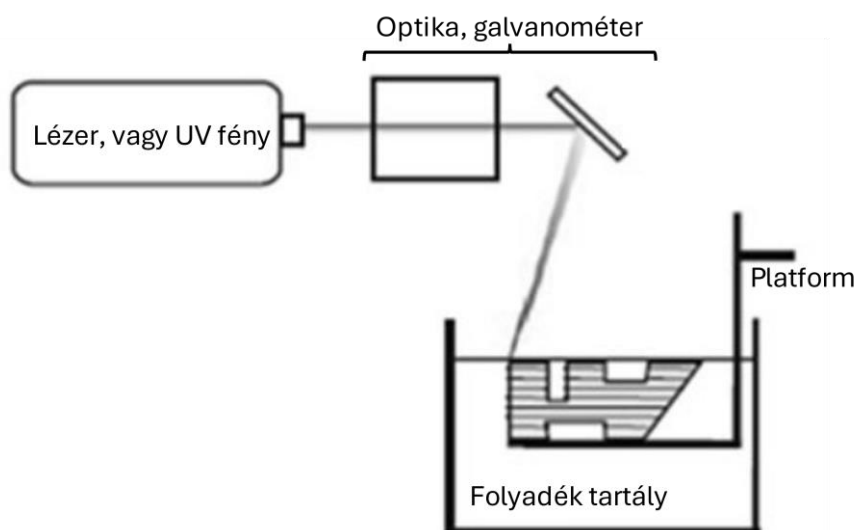
Kép forrása: <https://www.3dnatives.com/en/researchers-integrate-dna-instructions-into-a-3d-part-to-facilitate-its-duplication-241220194/>

Minél nagyobb a felbontás, annál részletesebb lesz a generált felületmodell, azonban lényegesen lassabb a konverziós folyamat is. Arra azonban figyelni kell, hogy nagyobb felbontású 3D modellből lehet nagy és kis felbontású fizikai testet nyomtatni, azonban a kis felbontású 3D modell nem lesz alkalmas részletgazdag végterméket előállítani. A kívánt minőségű felületmodell elkészülte után megkezdhető a szeletelési folyamat. A szeletelés abból áll, hogy a felhasználó által betáplált rétegvastagságnak megfelelően a 3D nyomtató berendezés szoftvere ezt a felületmodellt az általános „XYZ” koordináta rendszer „Z” irányában, a rétegvastagságnak megfelelő vastagságú szeletekre vágja, majd ezeken a szeleteken belül, felrajzolja a megmunkáló egység pásztázásának útvonalt [19]. Ezt minden egyes rétegre kötelező legenerálni, mely folyamatból meghatározza a szoftver az alkalmazott pályagörbét. Ennek a pályagörbének a bonyolultsága attól függően változhat, hogy hány nyomtatott darab készül egyszerre és ezeknek mennyire különbözik a nyomtatott keresztmetszetük, valamint, hogy milyen geometriai minta szerint történik a pásztázás. Amennyiben a pályagörbe helyes, elkezdődhet a 3D nyomtatás.

2.2.2. A VAT Photo polymerization, vagy SLA technológia bemutatása

Az AM folyamatok kiinduló pontjaként ismert folyamat, működésének alapelve, hogy rétegről rétegre épül fel, minden esetben megegyezik. Az SLA technológia esetében egy tartálynyi (angolul VAT, fordítható kádként is, amiről a nevét is kapta az eljárás) folyékony halmazállapotban lévő, specifikus sugárzásra szilárduló gyantát használ alapanyagnak, amit jellemzően UV, vagy hasonló hullámhosszú fény segítségével keményít ki. A gyanta a

sugárzás hatására kémiai változáson megy keresztül, mely során megszilárdul. Ezt a folyamatot nevezzük fotopolimerizációnak [21]. A 11. ábra ennek a vázlatos kialakítását mutatja be, valamint a 12. ábra szemléltet egy ilyen eljárással készített testet.



11. ábra, SLA rendszer sematikus ábrája



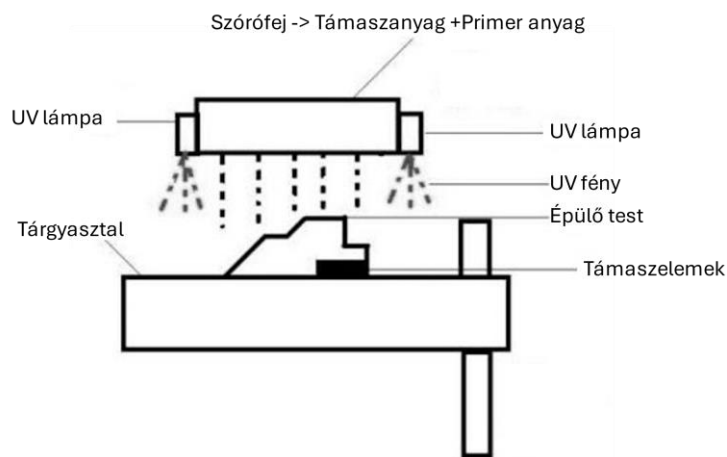
12. ábra, SLA technológiával nyomtatott benchmark hajó

Mivel a folyadékok alapvető karakterisztikája, hogy bármilyen alakzatot képesek felvenni, így ahogyan az a 12. ábrán is látható, a kapott eredmény felbontása teljes mértékben visszaadja az alkalmazott felületmodell részleteit.

2.2.3. A Material-, és a Binder Jetting bemutatása

A material-, és binder jetting általában egy kategória alá sorolandó, mivel nagyon hasonló elven működő folyamatokról van szó. A klasszikus 2D-s nyomtatás harmadik dimenzióba való kiterjesztéseként is értelmezhetők. Lényegük, hogy material jetting esetén, minden tárgyasztalra juttatott alapanyag a nyomtatófejből kerül felszórásra és UV fény

közreműködésével alakul ki a test tömörre alakítása [22], binder jetting esetében, a nyomtatófej kötőanyagot szór a tárgyasztalon elterített por alapanyagra [23]. A 13. ábra a material jetting sematikus felépítését mutatja be, ezt követően a 14. ábra egy ilyen eljárással készített kész terméket szemléltet.



13. ábra, Material jetting sematikus ábrája

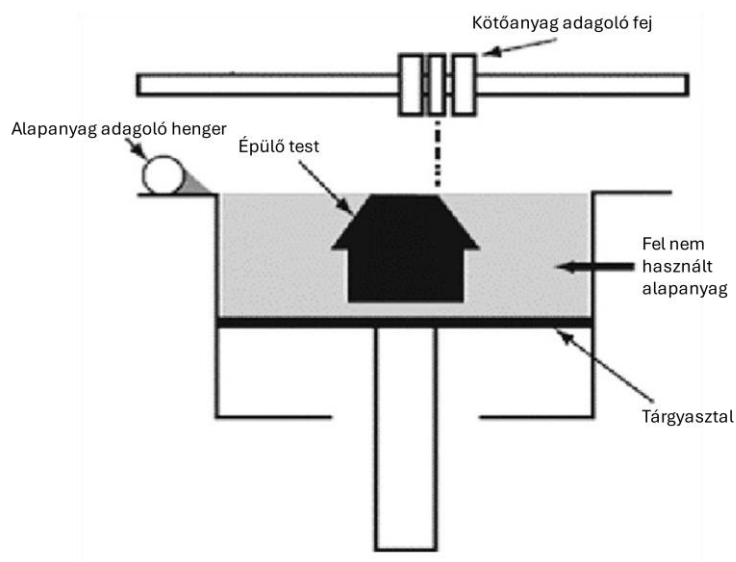


14. ábra, Material jetting, kész termék

Kép forrása: <https://www.3dnatives.com/en/polyjet100420174>

A material jetting fő előnye a binder jettinghez képest, hogy „drop-on-demand” módon képes működni, ami azt jelenti, hogy csak annyi alapanyag kerül a rendszerbe, ami az építkezéshez feltétlenül szükséges. Ez azt jelenti, hogy a rendszerbe bejuttatott alapanyag 100%-ban hasznosul, nincs olyan többlet alapanyag, ami fizikailag, vagy kémiaiilag degradálódni tudna a folyamat közben. Hátránya, hogy felhasználása jellemzően lekorlátozódik a fotopolimerekre [22][24][25][26].

Binder jetting esetében a 3D nyomtatás egy kiterített porágyból indul ki. A folyamat által használt por állapotú anyagok esetében a kötést valamilyen kötőanyag alakítja ki, így bármilyen alapanyagból képesek testeket gyártani. A 15. ábra ennek a sematikus rajzát ábrázolja.



15. ábra, Binder jetting sematikus ábrája



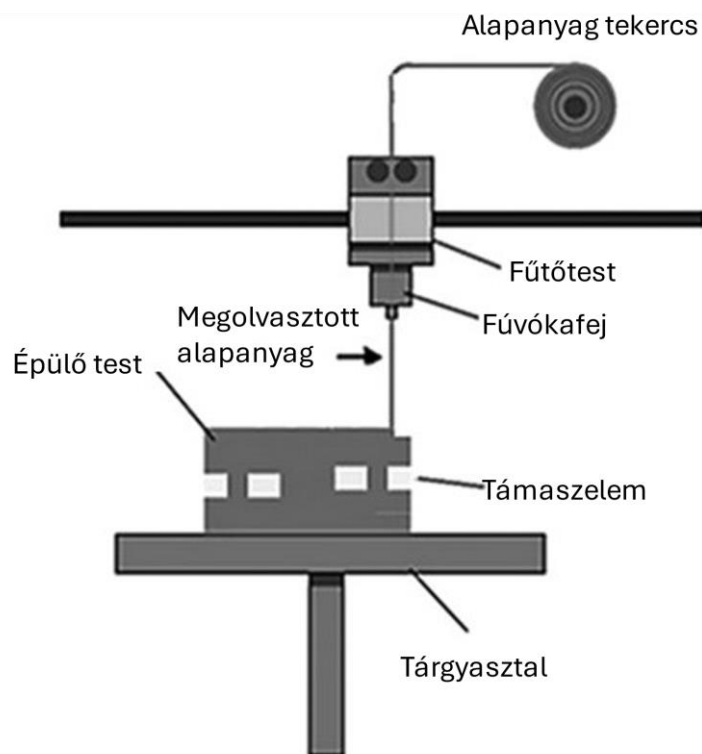
16. ábra, Binder jetting eljárással készített kész termék

Kép forrása: <https://amfg.ai/2018/03/13/3d-printing-binder-jetting-short-guide/>

A 16. ábra ennek a folyamatnak a potenciális alkalmazását mutatja be. További felhasználása öntészeti homokformák és egyéb vizuális prototípusok készítése [23].

2.2.4. A Material Extrusion bemutatása

A material extrusion, vagy szálhúzásos technológia a legelterjedtebb 3D nyomtatási eljárás. Kis méretű, asztalra tervezett verzióit otthon is bárki alkalmazhatja. A folyamat lényege, hogy egy tekercsre felhelyezett szálanyagot a berendezés befűz, majd megolvaszt, valamint egy fúvókafejen keresztül a tárgyasztalon elhelyez, majd egyenletesen végighalad a kijelölt keresztmetszeten. A 17. ábra ennek a sematikus rajzát mutatja be, valamint az ilyen technológiával gyártott darabokat a 18. ábra mutatja be.



17. ábra, Material extrusion sematikus ábrája



18. ábra, Material extrusion technológiával elkészített termék

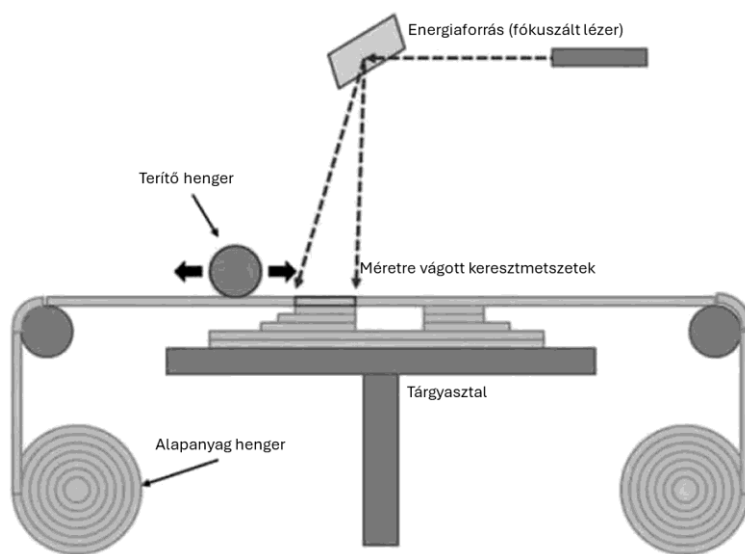
Kép forrása: <https://purpleplatypus.com/part-of-the-month-fdm-elephant/>

Támaszanyag kialakítások a folyamaton belül eltérhetnek. A legegyszerűbb megoldás, ha a saját, fő nyomtatott anyagból készül a támasz geometria, ilyenkor a szoftveres szeletelést úgy kell megvalósítani, hogy ezeket a kapcsolódási pontokat könnyen lehessen fizikailag oldani, azonban tartsa annyira erősen a darabot, hogy ne deformálódjon el. Egy fejlettebb verziója ennek, ha a támaszgeometria egy külön, erre specializált anyagból áll, amit a folyamat végén valamilyen oldószer segítségével el lehet távolítani. Ebben az esetben a berendezésnek több fúvókefejjel kell rendelkeznie. Léteznek olyan verziói a technológiának, ami nem csak külön támaszelem lerakó fejjel rendelkezik, hanem több fő

építő anyagot lerakó fejjel is rendelkezik. Ezek általában arra hivatottak, hogy más színű szekciókat alakítsanak ki a testen belül [27][28].

2.2.5. A Sheet lamination bemutatása

A sheet lamination 3D nyomtatási eljárás áll legszorosabb kapcsolatban a hagyományos CNC megmunkálással. Az épülő darabokat egy megmunkálófej, ami általában kés, lézer vagy vízszugár, vágja méretre. Ezek a méretre vágott elemek felelnek meg egy-egy meghatározott felületi keresztmetszetnek. Ezt mutatja be a 19. ábra, és egy ilyen technológiával gyártott darabot a 20. ábra.



19. ábra, Sheet lamination sematikus ábrája



20. ábra, Sheet lamination technológiával előállított darabok

Kép forrása: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/sheet-lamination/>

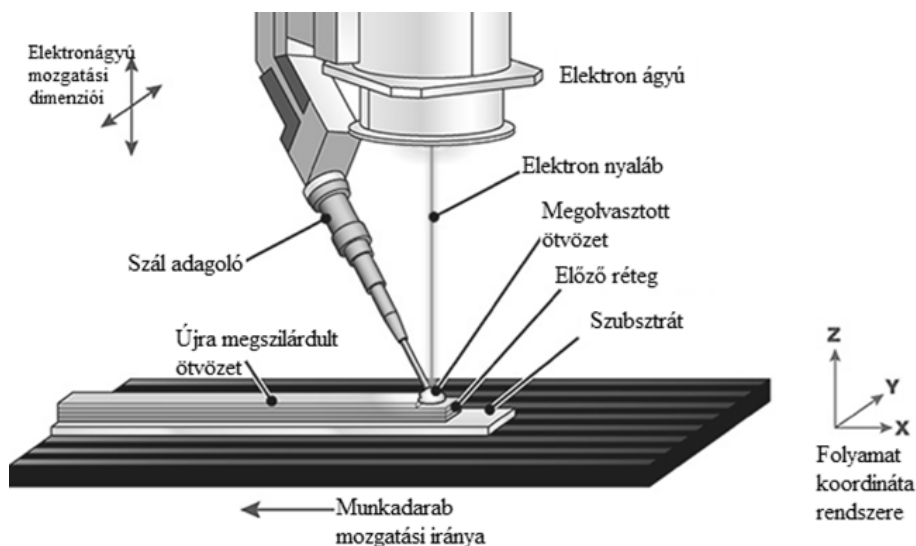
A levágott elemek között valamilyen kötési kapcsolat fogja kialakítani a tömör szerkezetet, mely leginkább ragasztás. Azonban ez nem korlátozza le a folyamatot csak papír vagy polimer anyagokra, fémeket, kerámiákat és kompozit anyagokat egyaránt képes

megmunkálni. Támaszgeometriára nincs szükség az építkezés során, mivel a nem megvágott elemek elég tartást biztosítanak a darabok helyben tartásához [29][30].

2.2.6. A Direct Energy Deposition bemutatása

A Direct Energy Deposition (DED) típusú rendszerek a material jettinghez hasonlóan, drop-on-demand technológiát alkalmaznak. Annak ellenére, hogy polimer, kerámia és fém alapanyagokkal egyaránt alkalmazható, a legtöbb esetben kizárólag fémeknél használják. A DED egy fókuszált energianyalábot alkalmaz annak érdekében, hogy felmelegítse, valamint megolvassza, azt az anyagot, ami beadagolásra kerül. Ennek megfelelően kialakul egy pillanatnyilag létező olvadék medence, mely az energia forrás túlhaladtával megszilárdul. A porágyas technológiákkal ellentétben ebben az esetben nem előre felvitt porral operál a rendszer, hanem folyamatos alapanyag adagolással.

A hőmérséklet forrása rendszerint lézer vagy elektron sugár, aminek elég nagy teljesítményűnek kell lennie ahhoz, hogy a beadagolt alapanyagot képes legyen olvadék állapotba vinni. Ebből a szempontból nagyon hasonlít a felépítési elve a kihúzásos technológiákra. A 3D nyomtatás pásztázási vonalak mentén történik, minden ilyen vonal mentén készít a berendezés egy megszilárdult útvonalat és ezek az egymás mellé tett sorok alakítják ki a rétegeket [31]. Ezt mutatja be a 21. ábra és egy ilyen darabot a 22. ábra.



21. ábra, Direct Energy Deposition sematikus ábrája

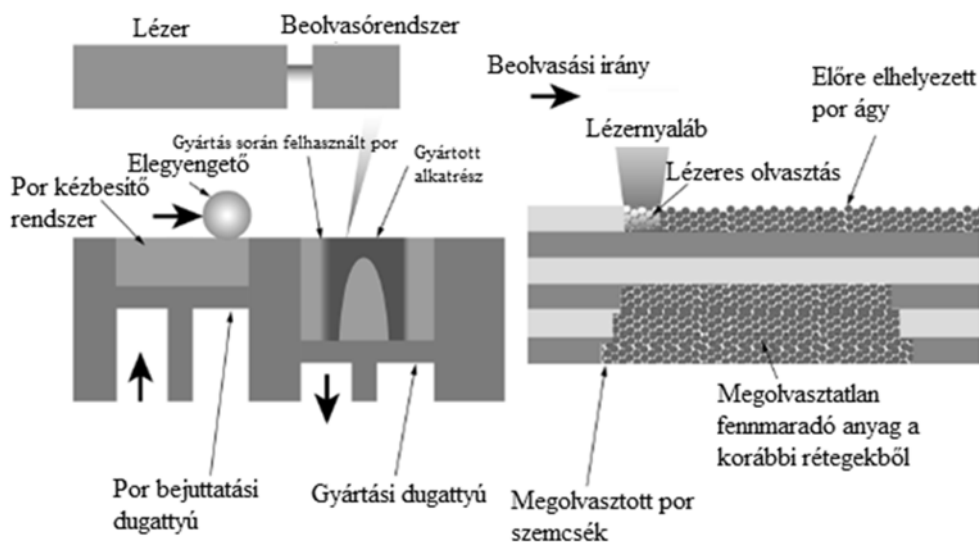


22. ábra, DED technológiával gyártott test

Mivel a megmunkálási és az adagolási folyamat egy időben zajlik, így ezt nem csak kizárólag építésre, hanem javításra is lehet használni. A folyamat különböző alcsoportjai esetében, az általános folyamat megközelítés megegyezik, fő különbségek ezek között a lézer erősségben, lézerpont nagyságában, lézer típusában, por adagolási metódusban, inert gáz adagolásban, visszacsatolásokban, illetve a nyomtató fej mozgásának kivitelezésben vannak. Ezen folyamatok mindegyike tartalmazza a beadagolt pornak a lerakását, mint építési részfolyamatot, valamint olvasztását és megszilárdulását. Az építési folyamat minden esetben egy vándorló olvadék medencében fog zajlani [31]. Ez legegyszerűbben a hagyományos felrakó hegesztéshez hasonlítható.

2.2.7. A Powder Bed Fusion bemutatása

Az általános 3D nyomtatási tulajdonságokon kívül, minden porágyas kategóriába tartozó 3D nyomtatási folyamat osztozik megadott karakterisztikákon, melyek magukba foglalják a különböző energiaforrásokat, porok kezelését, beadagolási és elsimítási eljárásokat, a tárgyasztal mozgását, valamint a fel nem használt alapanyag kivezetését a folyamatból. A legjellemzőbb energiaforrás kialakítás melyet ezeknél a berendezéseknél alkalmaznak, az valamilyen szilárdtest lézer [32][33]. A 23. ábra mutatja be ennek a sematikus szemléltetését és a 24. ábra mutat be egy ilyen módon gyártott testet.

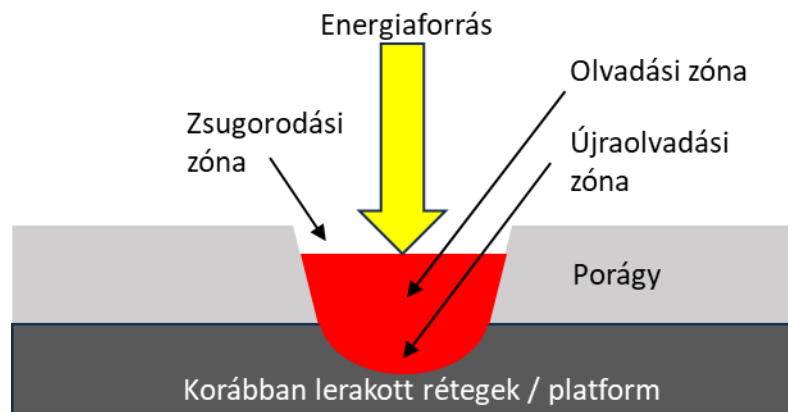


23. ábra, Powder Bed Fusion sematikus ábrája



24. ábra, PBD (SLM) technológiával előállított test

A por a rendszerben, opcionálisan, emelt hőmérsékleten van jelen, mely hőmérsékletet infravörös fűtőegységek biztosítják. Ez az előmelegítés csökkenti az esetleges folyamat közben bekövetkező deformációt, mely visszavezethető a technológia egyedi termikus ciklusára [34]. A 3D nyomtatási folyamat közben, a berendezés egy folyamatos sebességgel haladó megmunkáló energiaforrással pásztázza végig a meghatározott keresztmetszetet. A folyamat során minden esetben támaszelemeket kell alkalmazni, hogy a gyártott testek a folyamat során ne legyen képesek elmozdulni. Ezeken a támaszelemen keresztül a tárgyasztal irányába hővezetés is történik. Ahogy az a 25. ábrán is látható, azt lehetetlen elkerülni, hogy az energiaforrás ne hatoljon be a korábban lerakott rétegekbe, és így akár közvetlenül, akár hővezetés útján is kifejtsse a hatását [35].



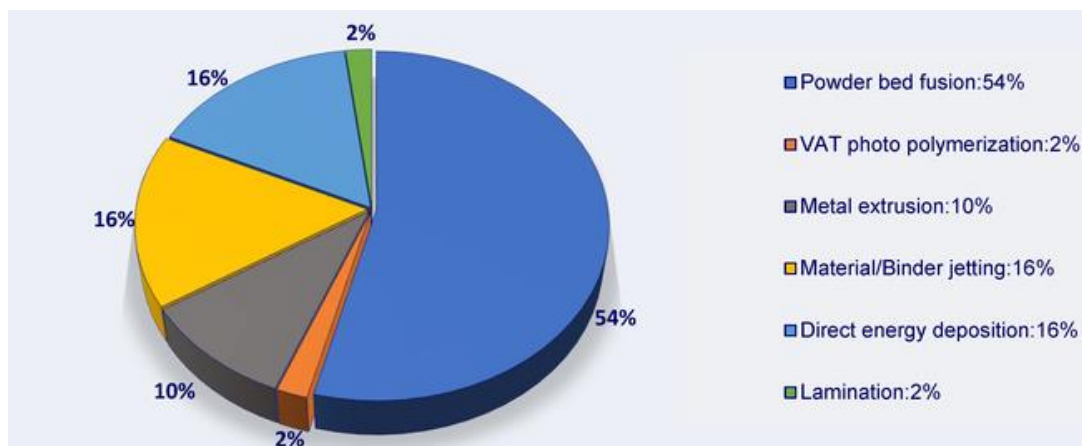
25. ábra, 3D nyomtatás olvasztásának karakterisztikája

A beáramló energia hatására, a porszemcsék megolvadnak, illetve az energia intenzitásának hatására a korábban lerakott rétegekben egy bizonyos mélységig újraolvadás és újraszilárdulás megy végbe. Ennek a zónának a mélységét befolyásolja a hőforrás teljesítménye, illetve a pásztázás sebessége. Az újraolvasztott zónák kontrakciója kritikus pontja az SLM gyártási folyamatnak. Lassabb pásztázási sebesség esetében ugyanakkora hőenergia is mélyebbre tud haladni a már korábban lerakott térfogatban. Ezen a jelenségen kívül, mivel az energianyaláb középpontja minden esetben a legintenzívebb, azok a porszemcsék, amik ennek az útvonalába esnek még optimálisan beállított folyamat paraméterek mellett is átléphetik a forrás hőmérsékletét, így gázhalmazállapotba kerülhetnek [35]. A túl intenzív lézer hatására az apróbb porszemcsék a védőgáz atmoszférájába kerülve lebegő helyzetükben érik el ezt a halmazállapot változást, mely defókuszálós jelenséget eredményezve csökkenti a lézer porágyba jutó intenzitását, így rontva a nyomtatás minőségét.

Amikor egy adott réteg kiterítésre kerül, az optikai rendszerrel fókuszált energiaforrás elkezd a működését, mely során végig pásztázza a teljes gyártandó keresztmetszetet. A környező por, mely nem került letapogatásra, a rendszerben marad, így másodlagos támaszként szolgál. A felesleges por a gyártás végén visszajáratható és újra felhasználható. Egy réteg elkészültével a berendezés a tárgyasztalt egy magassági szinttel lejjebb, a portároló egységet pedig ennek megfelelően egy szinttel fentebb mozgatja. Így teszi a rendszer lehetővé az adagoló rendszernek, hogy azt a pormennyiséget, ami szükséges a folyamatos porágy felszínének fenntartásához, biztosítani tudja. Ez a folyamat addig folytatódik, amíg a geometria minden rétege felrakásra nem kerül [36][37][38].

2.3. Additív Gyártástástechnológiai folyamatok összefoglalása

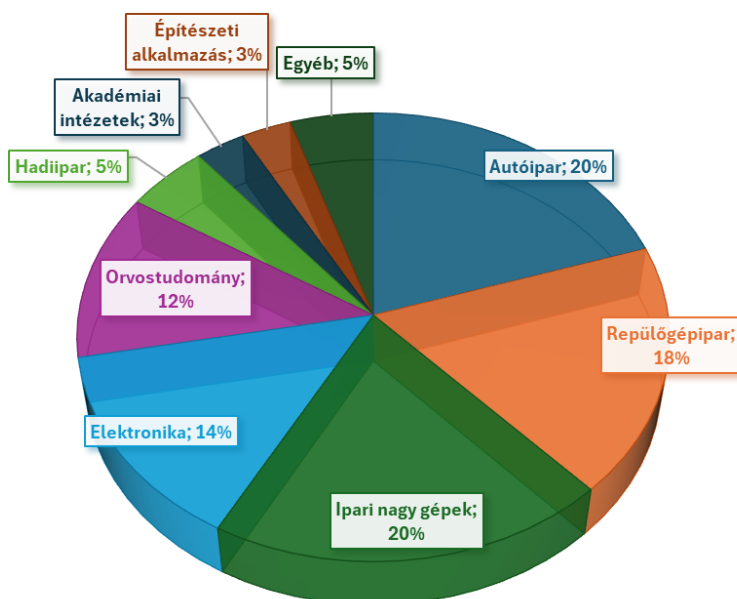
A különböző AM technológiák egymástól függetlenül, de nagy ütemben fejlődtek, kialakítva az aktuális piaci helyzetüket. A „Wohler’s Report” 2021-es számában a 26. ábra alapján mérték fel az alkalmazott folyamatok eloszlását.



26. ábra, AM folyamatok piaci értékesítési aránya 2020-ban

Kép forrása: Wohler’s Report, 2021

Ez az eloszlás azt mutatja, hogy az ipari folyamatok közül, a powder bed fusion technológia fedti le az alkalmazás több mint 50%-át, a material extrusion, material-, és binder jetting illetve direct energy deposition pedig az eloszlás maradék részét osztja fel egymás között. Másik perspektívaként, a 27. ábra azt mutatja be, hogy az iparágak, milyen arányban használják fel a 3D nyomtatási eljárásokat.



27. ábra, AM technológiák ipari eloszlása

Ez az eloszlás minden anyagtípust magába foglal [39]. Azonban, ami leginkább az ipari fejlesztések és akadémiai kutatások fókuszában van, az a fém termékek additív gyártása. A fémek 3D nyomtatásánál, a kevesebb selejt és forgácsmennyiség, valamint a darabok utómunkálásának és tisztításának minimalizálása jelentősen csökkenti a környezetszennyezési mértékét a gyártásnak, valamint mindig csak annyi alapanyagot használ fel a folyamat, amennyire ténylegesen szükség van. Ennek köszönhetően az ellátási lánc is jóval fenntarthatóbbá válik [40][41][42]. Azonban nem csak az alapanyagok ellátási láncára van hatással, hanem a termékekre is. Abban az esetben, ha az alkatrészek egy részét fizikailag nem kell tárolni, elég, ha egy digitális terv létezik belőle és ezeket az alkatrészeket csak akkor készítik el, ha arra valóban szükség van, így csökkentve az egy termékre vonatkoztatott raktározási és kiszállítási költséget, ami ugyancsak pozitív hatással van a globális káros anyag kibocsátás csökkentésére [43][44].

A nyomtatási tulajdonságokat vizsgálva számos szempontot figyelembe kell venni, mivel nem minden AM eljárás képes ugyanazt az eredményt biztosítani. Ilyen szempont az építési idő, a 3D geometriák felbontása, a felületi minőség, rögzítő és támasz geometriák elhelyezése, valamint az utómunkálás.

2.4. Az additív gyártástechnológiai folyamatok kihívásai

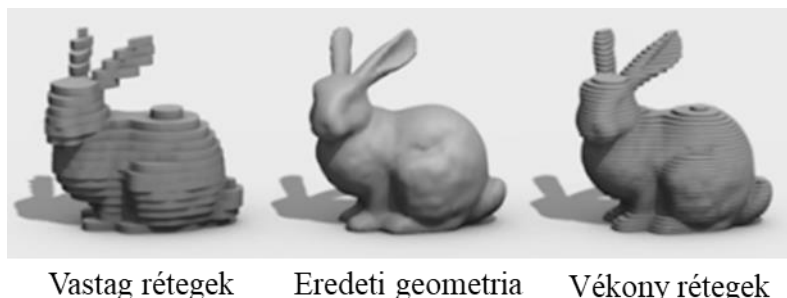
Ahhoz, hogy maximálisan ki lehessen használni egy adott AM folyamat előnyeit, úgy kell kiválasztani a használni kívánt technológiát, hogy ne kelljen kompromisszumokat kötni egy alkatrész tervezése során. Egy prototípus gyártásra specializálódott eljárás nem lesz képes sosem teljes értékű szerkezeti elemek gyártására, viszont fordítva ez igaz lehet. A helyes gyártási eszköz kiválasztása nagyban segíteni tudja a gyártás sikerességét és az elvárások beteljesülését.

2.4.1. Az egyedi geometriájú és a nagy szériában gyártott termékek gyártása

Az AM eljárások jelenlegi állapotukban, leginkább kis darabszámú, vagy kis szériamennyiségű, nagy komplexitású termékek gyártására alkalmasak. A nagy szériás termékek gyártását továbbra is lefedi a nyomásos öntés, illetve CNC esztergálás. Ahogyan azt a 27. ábra is bemutatja, legjellemzőbb célcsoportjai az autóipar és a repülőgép ipar. Mindkét esetben akkor alkalmazzák, amennyiben nem lehet gazdaságosan tömeget csökkenteni, vagy egyedi alkatrészek gyártására van szükség. Mivel a nyomtatási idő legtöbbször a vertikális kiterjedéstől függ, mindenféleképpen úgy kell megtervezni a munkateret, hogy minél több darab legyen elhelyezve a tálcán [45][46].

2.4.2. Az építési idő és a felbontás közötti összefüggés

Az AM tervezés során legfontosabb szempont a rétegek maximális mennyiségének meghatározása, ami összefügg a testek „XYZ” koordináta rendszerbeli Z kiterjedésével. Egy kevesebb rétegmennyiségből kialakított test rövidebb idő alatt elkészül, azonban kisebb felbontása rontja a felületi minőséget és a szerkezeti integritást. Egy 25 mm magas test esetében, ha 1 mm vastag rétegből építkezünk, ez 25 réteget jelent, ha 0,1 mm, akkor 250-et. Erre egy példát mutat, hasonlóan a 10. ábrához, a 28. ábra.



28. ábra, Vastag és vékony rétegek közötti felbontásbeli különbség

Kép forrása: <https://www.fabbaloo.com/2016/11/variable-layer-slicing-for-the-ember-3d-printer-good-idea-or-not>

Amennyiben azonban a nyomtatási idő a szűk keresztmetszete egy folyamatnak, utómunkálással az esztétikai hibák kiküszöbölhetők. Léteznek olyan, egybeépített funkciókkal ellátott gyártó berendezések, melyek a nyomtatási folyamat befejeztével, a gépen belül munkálják készre a gyártott darabokat.

2.4.3. Felhasználható anyagok mennyisége, tisztasága és kezelése, valamint a támaszelemek építési stratégiája

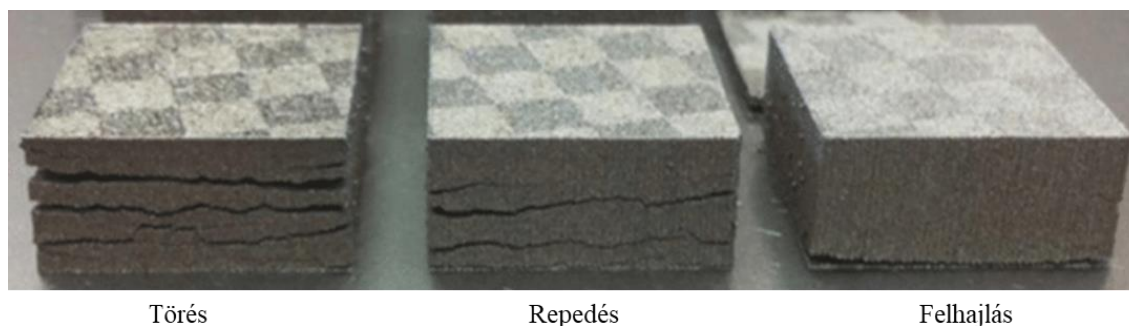
A kereskedelmi forgalomban kapható termékek jellemzője, hogy az anyagok széles skáláját tartalmazzák, melyeknek megvan a maga helye és funkciója. Ez AM eljárások esetében erőteljesen korlátozott. A legtöbb AM berendezés, ami nem csak prototípust gyárt csak egyféle anyagtípust képes egyszerre kezelni. Ez különösen igaz porágyas rendszerekre. Abban az esetben, ha két különböző por alapanyag keveredik, az 3D nyomtatásra többé nem alkalmazható. Ilyen gyakorlati eset, amikor egy laboron belül többféle por alapanyagból készítenek kísérleteket és az anyagtípusok váltásánál nem megfelelően történik meg a berendezés tisztítása, valamint a szűrőegység cseréje. Hasonló probléma adódik a támasz geometriákkal kapcsolatban is. Azoknál a folyamatoknál, ahol csak egy anyagtípus szerepel, fizikailag kell megoldani ezeknek az elemeknek a bontását. Ezek eltávolíthatóságát úgy kell

megtervezni, hogy a tárgyasztalon tartsák az épülő darabokat és ezek a darabok a folyamat közben önmaguktól a tárgyasztaltól ne váljanak el. Minden olyan esetben kötelező a támaszelemek használata, ahol a geometriában túlnyúlások, alávágások vannak, vagy mozgó alkatrészeket egy időben készítünk el [46]. Támaszelemek alkalmazásával könnyebb a darabok eltávolíthatósága a tárgyasztalról. Amennyiben a darabok nem közvetlenül a tárgyasztalra épülnek, abban az esetben ezek a támaszelemek gondoskodnak a tárgyasztal felé történő hővezetés kialakításáról is.

A fémek nyomtatása jelentősen lassabb és drágább folyamat [47], mivel nagyobb teljesítményű hőforrást kell alkalmazni, ami jellemzően lézer, vagy elektronágyú, valamint rendkívül érzékeny az anyagok tisztaságára, legyen az a felhasznált alapanyag, vagy a nyomtatási folyamat során jelen lévő atmoszféra [48]. A védőatmoszféra használata kötelező, mivel ellenkező esetben oxidáció indulna el a folyamat közben keletkező olvadékcsepp felületén, így jellemzően nitrogén és argon gáz jelenléte mellett történik a nyomtatás [49].

2.5. A 3D nyomtatás során kialakuló maradó feszültségek

Az AM folyamatok legnagyobb negatív tulajdonsága, hogy építés közben a folyamatos halmazállapot változásból eredendő térfogatváltozásból nagy mértékű maradó feszültség tud kialakulni a gyártott testben, mely feszültség eloszlása nem egyenletes [50]. A 29. ábra mutatja be ezeknek a maradó feszültségeknek a hatását, melyek vezethetnek olyan térfogati változásokhoz, mint vetemedések, repedések vagy törések.

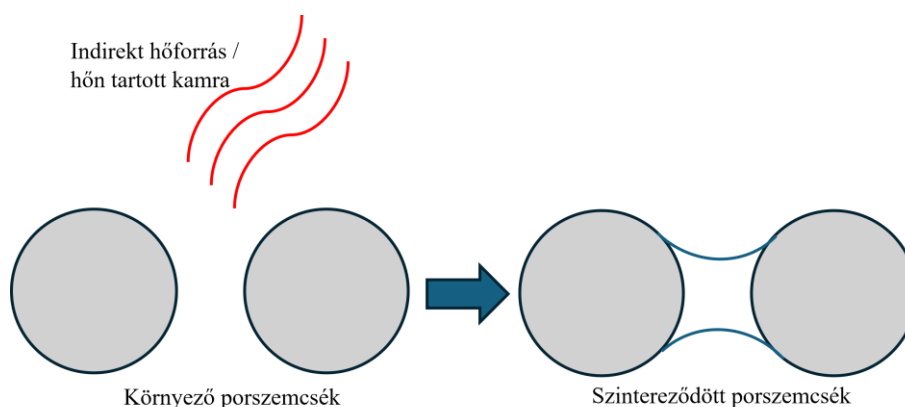


29. ábra, Maradó feszültség okozta geometriai roncsolódás

Ez minden olyan technológiánál jellemző, ahol a folyamatban magas hőmérséklet gradiens alakul ki. Amennyiben a berendezés megmunkáló egysége valamilyen hőforrás, lézer vagy elektronágyú, az intenzív hőbevitel egységnyi felületen a másodperc törtrészéig van jelen. Ezalatt az idő alatt az átolvasztott térfogatban kialakul a kellő kötés, és ahogy ez a hőforrás tovább halad, lehűl, majd megszilárdul. Ahogyan azonban a 25. ábra is bemutatta,

lehetetlen csak egy adott réteget hozzáépíteni az azt megelőző anyaghalmazhoz anélkül, hogy ez az építési folyamat ne befolyásolja a korábban lerakott rétegeket. Az, hogy a hőátadási folyamat a rétegek között mennyire intenzíven játszódna le, függ attól, hogy mekkora az alkalmazott energiasűrűség, valamint, hogy milyen az alapanyag hővezetési tényezője. Az SLM technológia esetében, ahol egy szilárdtest lézer, vagy elektronágyú a megmunkáló egység, teljes olvasztás történik, így a rendszerbe vitt energiának elegendőnek kell lennie ahhoz, hogy az adott térfogatot olvadási állapotba vigye, majd ahogy az energiaforrás tovább halad, ez a pillanatnyilag létrejövő olvadáscsepp megszilárdul. Az a térfogat, amit közvetlenül nem érint a fókuszált energianyaláb, hővezetés hatására szintén felmelegedik. Attól függően, hogy ez a hővezetés a porágyon belül, vagy a már megszilárdult rétegeken belül történik, különböző mértékű lehet, így előfordulhat, hogy azonos pillanatban az energianyaláb-porágy kontakt ponthoz közeli zónában az olvadás közeli hőmérséklet alakul ki, míg az ettől távolabbi, főleg porágy alkotta zónákban, az alapanyag szobahőmérsékleten van jelen. Ez hatalmas hőszokkot jelent a gyártott testnek.

Az újraolvasztott zónák kontrakciója kritikus pontja az SLM gyártási folyamatnak. Egy nem jól megtervezett modell mindenképpen találkozni fog, ilyen jelenségre visszavezethető hibával a gyártás során. Az egyik leggyakrabban alkalmazott megoldás ennek elkerülésére a munkatér emelt hőmérsékleten tartása. Ez az emelt hőmérséklet képes a maradó feszültségek több mint 85%-át eltávolítani a rendszerből [51]. Azonban ez az emelt hőmérsékleten tartott rendszer hatással van a porágy tulajdonságaira is. Miként a 30. ábra bemutatja, az emelt hőmérséklet hatására az energiának nem, vagy nem közvetlenül kitett szemcsék is változhatnak, ami során nem kívánt szinterelődés alakulhat ki. Ez a jelenség növeli a porágy átlagos szemcseméretét [52].



30. ábra, Környező porszemcsék nem kívánt szinterelődése

A munkatérben lévő hőmérséklet normál esetben is folyamatosan növekszik, mivel a lézer által bevitt energiát a korábbi rétegek, a tárgyasztal, illetve a porágy hővezetés formájával közvetíteni fogja. Ennek a hővezetésnek a mértéke a folyamat előrehaladtával egyre nagyobb, így akár egy pár órás nyomtatás során is 30-40°C hőmérséklet különbség mérhető a munkatérben, valamint a korábban lerakott rétegekben ennél jóval nagyobb hőmérsékleti változások jöhetnek létre. Ez azonban erősen függ a nyomtatott anyag hővezetési képességétől [53][54].

2.5.1. A maradó feszültségek kialakulása

Definíció szerint, maradó feszültség alatt azokat a mechanikai feszültségeket értjük, melyek valamely munkadarabban, illetve szilárd testben keletkeznek úgy alkotva egyensúlyi rendszert, hogy a darabra semmilyen külső erő vagy nyomaték nem hat [55]. Ezek a feszültségek mértéküktől függően többféle módon képesek kifejteni a hatásukat, szemcsék szintjétől egészen a teljes struktúráig. Szemcseszinten mikromechanizmusokat fog befolyásolni és az ebből eredő hibák nem, vagy ritkán befolyásolják közvetlenül a testek tulajdonságait. Nagyobb volumenű megjelenései képesek hatni az anyagfolytonosságra, mely hosszú repedésekben, törésekben, vetemedésekben jelenik meg [56]. Jellemző az is, hogy a mikro szinten ható feszültségek apró repedései indukálják a makro és nagyobb nagyságrendű repedések megjelenését. Három fő fajtája fordul elő [57]:

1. Makrofeszültség: Nagy alakváltozásokhoz vezethetnek és nem egyenletes rugalmas alakváltozás folytán alakulnak ki.
2. Szemcse szintű feszültség: Az egyik megjelenése annak köszönhető, hogy a termomechanikai tulajdonságok az orientációtól függően változnak, mely feszültségekhez vezet. A másik, mely jelentősebb, a különböző fázisátmenetekre és ezek mechanikai tulajdonságaira vezethető vissza.
3. Molekuláris feszültség: Ezeknek a forrása a molekuláris struktúrára és diszlokációs feszültségmezőre vezethető vissza.

Kialakulásuk szerint szintén három fő fajtába lehet sorolni, mely közül az SLM technológia esetében a hőmérsékleti gradiens alapján kialakuló csoport jelentős. A másik két ok, a mechanikai feszültség alapján kialakuló maradó feszültség, ami például egy csavart fémrúd alakváltozására vezethető vissza, a harmadik pedig a kémiai úton indukált feszültség, mely fázisváltozások, csapadékképződés, vagy kémiai reakciók miatt is létrejöhet.

A hőmérsékleti gradiens miatt kialakuló maradó feszültség lényege, hogy az SLM folyamat során a gyors felhevítés és lehűlés a feszültség indukáló jelensége [58]. Az energiának közvetlenül kitett, felhevített zóna tágulása nagyobb, mint azé, amely hővezetésen keresztül kap energiát. Ennek megfelelően a mélyebben lévő rétegek korlátozzák a térfogatváltozást, ezzel nyomófeszültséget indukálnak az új rétegben és húzófeszültséget a korábban lerakottakban. A gyors olvasztás és újra szilárdulás ciklusok hatására rétegenként épül be a maradó feszültség a térfogatba. Valós anyagokban a rugalmas alakváltozás sosem teljesen homogén. A deformáció atomi léptékben vonalhibák, diszlokációk, mozgása révén történik [56].

A geometriai viszonyok szoros összefüggésbe hozhatók a maradó feszültségek mértékének felépülésével. Amennyiben a támasz geometriák nem elég erősek és azok elválnak az építés alapját képző tárgyasztaltól a folyamat közben, ez befolyással lehet a terelőegységre, mely a por beadagolásért felel és a nyomtatás sikertelen lesz. Azonban minden esetben a támasz és nyomtatott darab kapcsolat nagy maradó feszültségeket fog magában hordozni. Ez bizonyos mértékben valamennyi folyamat paramétértől függ. Szerepet játszik a nyomtatási orientáció, a lézer teljesítmény, valamint ennek mozgási sebessége. Különböző alapanyagok között ez a kapcsolat eltérő mértékben változhat [59]. Az általános szabály az, hogy minél rövidebb a megmunkáló egység által megtett út, egy réteg pásztázása közben, annál kisebb mennyiségű maradó feszültség alakul ki a pásztázás során [60]. Ezeket az okokat foglalja össze vázlatosan a II. táblázat.

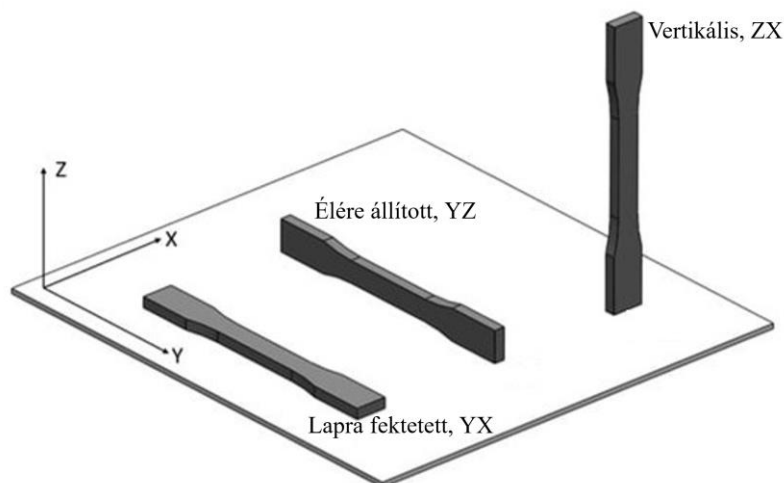
II. táblázat, A maradó feszültségek kialakulásának fő befolyásoló tényezői 3D nyomtatott fém termékek esetében

Maradó feszültségek kialakulása		
Befolyásoló tényezők	Fizikai jelenség	Magyarázat
Nyomtatási orientáció	Nyomtatott darabok térbeli elhelyezkedése	A különböző orientációkon gyártott, geometriailag azonos darabok esetében, a pásztázási távolságok változnak
Átolvasztási pásztázási utak hossza		
Lézer teljesítmény	Energiasűrűség	Nagyobb energiabevitel nagyobb hőmérséklet gradienst képez a térfogatban
Lézer mozgási sebessége		

2.6 A 3D nyomtatási orientáció bemutatása

Az AM technológiák esetében legyárthatósági értelemben, a gyártandó testek relatív helyzete a térben elhanyagolható fontosságú [61], mivel a tárgyasztalon való különféle elhelyezésnek nincsenek járulékos nehézségei. Ez azonban nem jelenti azt, hogy egy adott

termék legyártása bármilyen térbeli elhelyezésben ugyanolyan minőségű eredményhez fog vezetni. Általános megfogalmazásban, nyomtatási orientáció alatt a testek elhelyezkedését értjük egy „XYZ” koordináta rendszerben. Egy test X, Y vagy Z tengely orientáltsága azt takarja, hogy melyik tengely irányában van a legnagyobb kiterjedése [62][63]. A 31. ábra szemlélteti ennek egy leegyszerűsített rendszerét [64].



31. ábra, Egy szakítópálca lehetséges nyomtatási orientációi

A jelölés lényege, hogy az „XYZ” koordináta rendszer első tengelye jelöli a darabok hosszát, ezzel megjelölve a domináns dimenziót, a második tengely jelöli a szélességet, vagyis a másodlagos kiterjedési dimenziót. Ez az orientáció direkt összefüggésben állhat a próbatestekben kialakuló maradó feszültségekkel [65]. Ez annyit jelent, hogy kizárólag a tér minden irányába egyenlő kiterjedéssel rendelkező test nyomtatása esetén, például egy gömb vagy kocka, nem számít a nyomtatási orientáció, azonban hosszúkas, vékony profilokkal rendelkező darabok esetében már bele kell kalkulálni a tervezésbe ezt is. A nyomtatási orientáció ezen felül különféle lehetőségeket nyújt arra, hogy optimalizálni lehessen a nyomtatási időt, valamint könnyíteni az alkatrész eltávolíthatóságát a tárgyasztalról [66]. Fémek 3D nyomtatásánál, ha nem elegendő az alkalmazott támaszelemek mennyisége vagy minősége, abban az esetben ezek nem tudják biztosítani a megfelelő hővezetést, illetve az alkatrész rögzítését. A rögzítési pontok elégtelenségének hatására, a 3D nyomtatott darabokban kialakuló belső feszültségek miatt, ezek a félkész termékek a folyamat közben önmaguktól is felválhatnak a tárgyasztaltól. Ha ez bekövetkezik, az a 3D nyomtatási folyamat azonnali sikertelenségét jelenti. A túlnyúló geometriai elemek, minden esetben kerülendők, mivel nem elég, hogy kedvezőtlen felületi minőséghez vezetnek, a mechanikai tulajdonságai is lényegesen gyengébbek lesznek [67]. Amennyiben elkerülhetetlenek, abban az esetben támaszelemekkel kell ellátni.

3. Feldolgozott irodalom összefoglalása, tudáshiány definiálása

A feldolgozott szakirodalom összefoglalása alapján arra a megállapításra jutottam, hogy valóban létezik a szakirodalomban is tárgyalt optimális nyomtatási orientáció. A szakirodalom továbbá kimondja, hogy egytengelyű húzófeszültség esetében, kedvezőbb szakítószilárdsági eredményeket fog mutatni a próbatest, ha a lerakott rétegekre párhuzamosan történik a húzóerő bevitele, mint ha ezekre a rétegekre merőlegesen [68][69]. Lapos szakítópálcák esetében a szakirodalomban megfogalmazottak alapján, kétféle nyomtatási irány preferált, a lapra fektetett („YX”) orientált, illetve a hosszanti élére állított („YZ”). Erre a fő indok az, hogy kevés rétegből felépülnek a testek, és a hosszan lefektetett rétegekre párhuzamos fog érkezni a terhelés, így maximalizálva a mechanikai tulajdonságokat. Azonban, ez a megállapítás nem számol a testekben ébredő maradó feszültségekkel. Lapos, vékony testek nyomtatásánál, ha a hosszanti rész horizontálisan („YX”) tájolt, akkor a támaszgeometriák oldása után nagymértékű maradó alakváltozáson megy keresztül a gyártott test, így sok esetben nem alkalmas szakítószilárdsági mérésre. A felhajlás mértéke függ a falvastagságtól, illetve a nyomtatott test hosszától is. A Z tengely irányába orientált, vertikális, próbatestek esetében ez a maradó alakváltozás elhanyagolható, így ezek kivétel nélkül alkalmasak további tesztelésre. A szakirodalom erre a problémára kevés megoldást kínál. A legelterjedtebb megoldás, hogy hőkezeléssel oldják a maradó feszültségeket, majd csak ezután oldják a gyártó platformmal kialakított kapcsolatot.

Ezek alapján a következő tudáshiányt fedeztem fel:

- Nem minden esetben alkalmazható a szakirodalom által ajánlott optimális „YX” orientáció és a vertikális, „Z” orientált próbatestek tulajdonságainak fejlesztésével kevés munka foglalkozik
- Dolgozatom írásával bezárólag, nem találtam olyan kétszeres átolvasztást alkalmazó nyomtatási stratégiát, mely a primer folyamattól nagyobb energiasűrűségű hőbevitellel olvasztja újra a már lerakott rétegeket, valamint ennek a szakítószilárdság és nyúlás változását vizsgálja.
- A próbatestekben kialakuló maradó feszültség mértéke és a támaszelemek tárgyasztaltól való oldása után történő maradó alakváltozás során kialakuló felhajlás mértéke változik a különböző vizsgált vastagságok esetében.

4. Saját kutatás bemutatása

A kutatási munkám során SLM 3D nyomtatási eljárással foglalkoztam, mivel ez a technológia képes készre gyártott alkatrészeket gyártani, ami azt jelenti, hogy a támaszelemek bontása után a kapott termék funkcionális és beépíthető állapotban van. A gyártást a 32. ábrán látható Orlas Creator SLM 3D nyomtató berendezés biztosította, a III. táblázat pedig nyomtatás paramétereit a mutatja be.



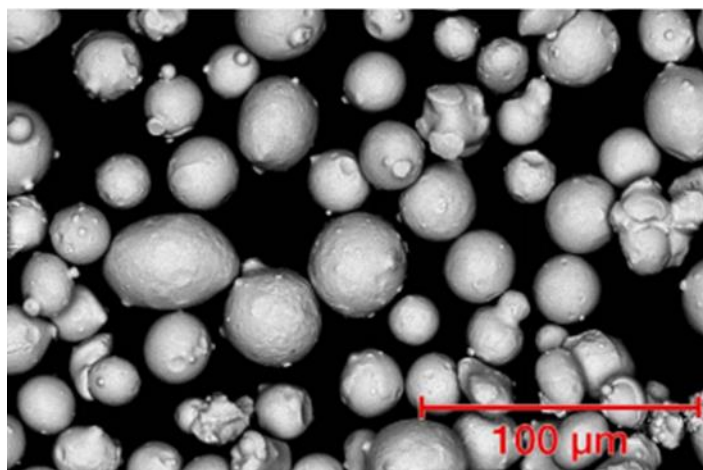
32. ábra, Orlas Creator 3D fémnyomtató berendezés

III. táblázat, A 3D nyomtató berendezés paramétereit

Gyártási paraméter:	Érték:
Lézer energia típus	Yb: szál, 250 W
Lézer hullámhosszúság	1070 nm
Tárgyasztal méretei	100 mm átmérő, 110 mm magasság
Részletpontosság	x=80 μ m, y=80 μ m, z=20 μ m
Általános pontosság	40 μ m
Adagoló rendszer	Simító lapát, 200%-os adagolási ráta
Védőgáz	Nitrogén

A 3D nyomtatási folyamat során alkalmazott alapanyagként a 17-4PH rozsdamentes acél port választottam, mivel kiváló mechanikai tulajdonságai és kedvező anyagszerkezeti jellemzői alkalmassá teszik az additív gyártástechnológiai (AM) alkalmazásokhoz. Kiváló mechanikai szilárdsággal rendelkezik, ami alkalmassá teszi szerkezeti alkalmazásokhoz. Korrózióállósága miatt ideális űr-, repülőgép-, és autóiipari felhasználásokra. A mechanikai

tulajdonságai jól módosíthatók hőkezeléssel. A 3D nyomtatási tulajdonságaira az alacsony hibaarány és a jó méretpontosság a jellemző. A 33. ábra mutatja be a 17-4PH rozsdamentes acél por morfológiáját, a IV. táblázat pedig az összetételét.

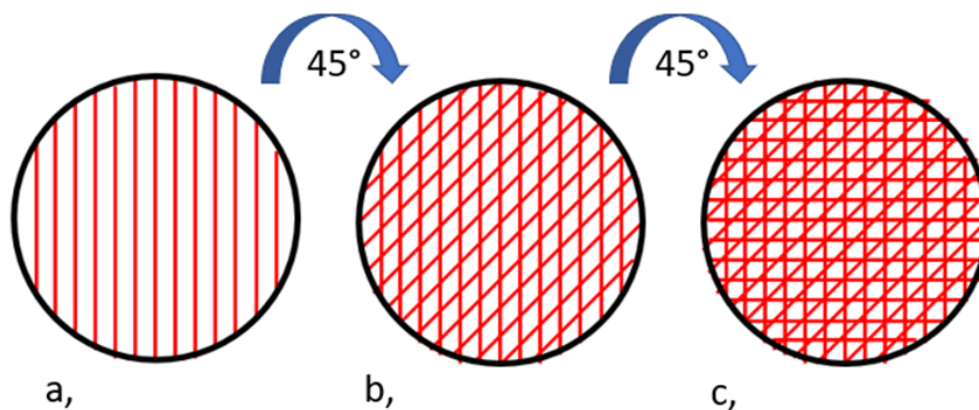


33. ábra, 17-4PH acélpor SEM felvétele

IV. táblázat, 17-4PH acélpor kémiai összetétele

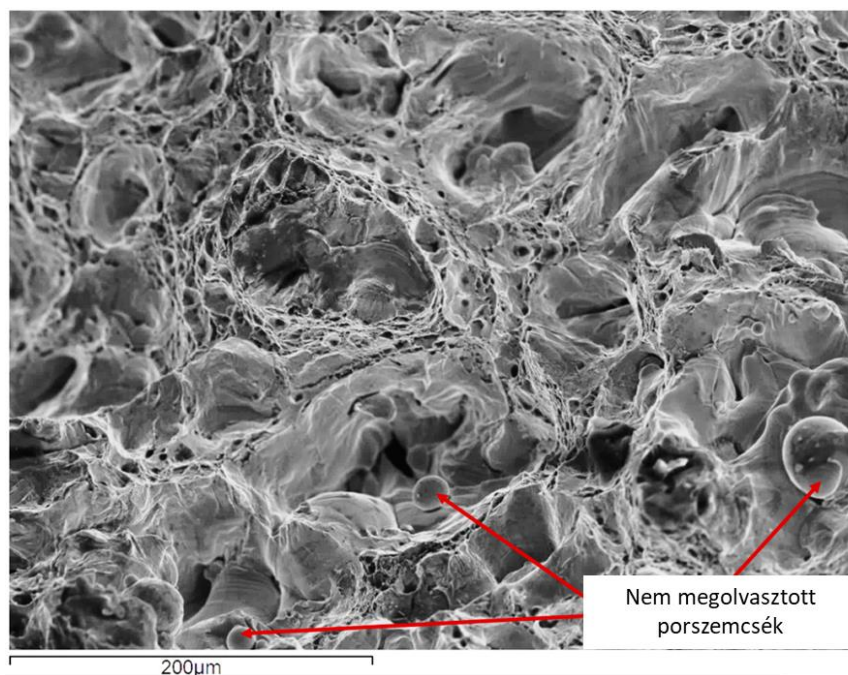
Összetétel	Karbon	Króm	Réz	Nikkel	Nióbium	Mangán	Szilícium	Vas
Tömegszázalék (m/m%)	0,02	16,52	3,94	4,47	0,3	0,04	0,43	74,28

A por alapanyag gáz atomizációs eljárással készült, szferoidikus morfológiával. Erre a gömbszerű kialakításra azért van szükség, mert a por kiterítésének során, a gömb alakú szemcsék elgördülnek egymáson és nem hagynak csíkot a porágy felületén. A porágy tökéletes terítése elengedhetetlen fontosságú a pontos nyomtatás véghezviteléhez. A kiindulási állapot minden esetben egy 1200 mm/s-es pásztázási sebességű, 107W teljesítményű olvasztás volt, mely iránya minden egymást követő réteg esetében 45°-os szögben, óramutató járásával megegyezően változott. Ezt mutatja be a 34. ábra, ahol az „a” a kiinduló réteg, a „b” és a „c” pedig az egymást követő lerakott rétegeket szimbolizálja.



34. ábra, Pásztázási szög változása lerakott rétegenként 45°-os rotációval

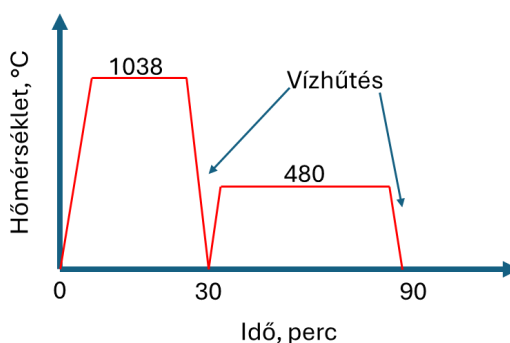
Ez a rotáció jobb szerkezeti felépítést biztosít a nyomtatott daraboknak, ezzel csökkentve a delaminációt, mely egy olyan jelenség, ahol a rétegek nyomtatás közben elválnak egymástól és a maradó feszültségek hatására szabad alakváltozáson mennek keresztül [70]. Az alapnyomtatáson elkészített mintáknak az átlagos térkitöltése 97% volt, ez $7,75 \text{ g/cm}^3$ sűrűségértéknek felel meg. Ez részben azért alacsonyabb, mint a hagyományos eljárással, fémöntéssel, kovácsolással, CNC esztergálással készült próbatestek esetében, mert miként azt a 34. ábra is szemlélteti, a nyomtatás során minden esetben a darabok peremére egy kontúr réteg kerül, mely réteg és a belső pásztázott felület között hézagok alakulhatnak ki. A másik fő ok, melyet a 35. ábra szemléltet, a 3D nyomtatási folyamat során visszamaradó, nem megolvasztott porszemcsék.



35. ábra, Nem megolvasztott porszemcsék az alapnyomtatás térfogatában

4.1. A 17-4 PH rozsdamentes acél ötvözet hőkezelése

A 3D nyomtatási folyamatok esetében az egyik legelterjedtebben alkalmazott utókezelési eljárás a hőkezelés, amely jelentős mértékben hozzájárul az anyagszerkezeti stabilitás növeléséhez, valamint a 3D nyomtatás során keletkező maradó feszültségek minimalizálásához. Az eljárás célja a mechanikai tulajdonságok optimalizálása és a szerkezeti integritás javítása, ezáltal biztosítva a végső alkatrészek hosszú távú teljesítményét és megbízhatóságát. Mivel a 17-4PH rozsdamentes acél ötvözet nevéből adódóan kiválóan keményedő („PH” az angol „precipitation hardening” kifejezésből), ezért a hőkezelés elengedhetetlen ahhoz, hogy optimális mechanikai tulajdonságait elérhesse. Vizsgálataim során kétféle hőkezelési állapotot alkalmaztam. A maradó feszültség mérő próbatestek alapvizsgálatának esetében az alkalmazott hőkezelés 1 órás, 500°C-os feszültségoldás volt a tárgyasztalhoz rögzített állapotban. Ez azért fontos, mert így a támaszelemek oldása előtt redukálódik a maradó feszültség a térfogatban, így kisebb mértékű alakváltozáson megy keresztül a támaszelemek oldása után. Hátránya azonban, hogy a folyamatos hőkezelési ciklus a tárgyasztalt degradálja, a hőciklus hatására repedések indulnak el a térfogatában. Ha a repedések túl nagy mértékűek lesznek, az hatással lesz a 3D nyomtatási folyamatra is, ahol a tárgyasztal egyik fontos szerepe, hogy kivezesse a támaszelemekeken keresztül a hőt az épített testből. A szakítószilárdságot mérő próbatestek esetében a 36. ábra által bemutatott H900-as öregítési ciklust alkalmaztam.



36. ábra, A H900-as hőkezelési ciklus sematikus bemutatása

A hőkezelési folyamat egy 30 perces oldó hőkezeléssel kezdődik, melyet vízhűtés és egy 60 perces 480°C-os öregítés követett, mindez argon atmoszféra alatt lett végrehajtva. A darabok ez esetben a tárgyasztaltól el lettek távolítva.

4.2. Nagyobb energiasűrűségű kétszeres átolvasztás

A lézeres megmunkálású porágyas 3D nyomtatási folyamatok esetében, jellemző hiba jelenség, hogy a megmunkáló lézer túl nagy teljesítményének hatására a kisebb frakciójú porszemcsék az atmoszférába kerülhetnek. Ennek az a hátránya, hogy ezek a lebegő szemcsék a lézer energiáját képesek elnyelni és kis méretüknek köszönhetően ebben az állapotukban kiéghetnek, vagy plazma állapotba kerülnek. Ez a jelenség defókuszálhatja a lézert, mely következtében kisebb teljesítményű olvasztási energia hasznosul a porágy felszínén. Ennek egy fajta kiküszöbölési módja az általam alkalmazott kétszeres átolvasztás. A kétszeres olvasztás lényege, hogy miután a primer olvasztási folyamat átolvaszt egy nyomtatási réteg-keresztmetszetet, a nyomtatás nem egy következő réteg felvitelével folytatódik, hanem a már megszilárdult réteget olvasztja át nagyobb energiasűrűséggel. Az V. táblázat mutatja be ezeket az olvasztási paramétereket, a VI. táblázat pedig a nyomtatási energiasűrűségeket.

V. táblázat, 3D nyomtatási olvasztási stratégiák

Olvasztási stratégia neve	Pásztázási sebesség, mm/s	Lézer teljesítmény, W
Primer olvasztás	1200	107
Második olvasztási ciklus	800	175

VI. táblázat, 3D nyomtatási energiasűrűségek

	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Alapnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

Az energiasűrűséget az 1. egyenlet alapján határoztam meg:

$$E_V = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad \text{1. egyenlet [84]}$$

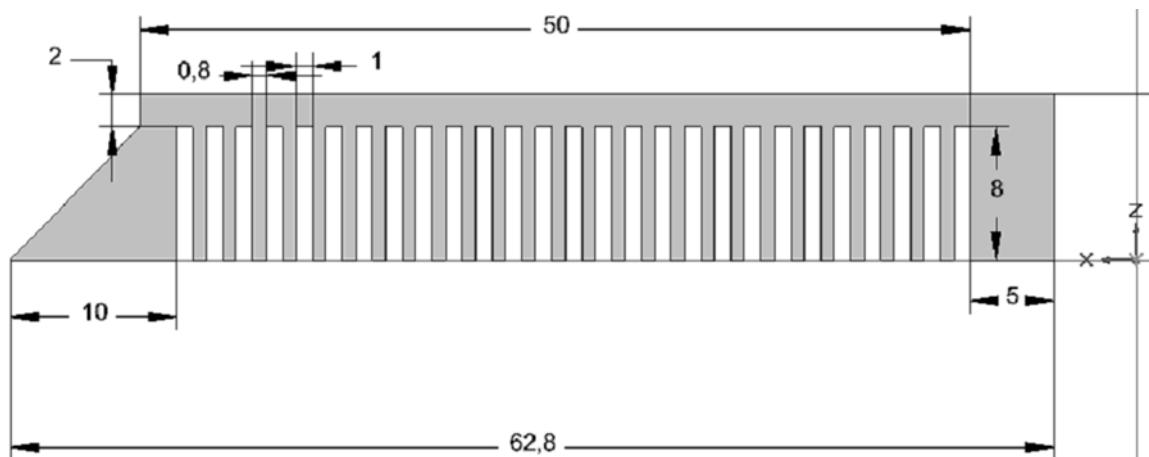
ahol „P” a lézer energia wattban számítva, „v” a pásztázási sebesség mm/s-ban, „h” a pásztázási vonalat távolsága egymástól, mm-ben, valamint „t” a rétegvastagság, szintén mm-ben. Az emelt energiasűrűségű átolvasztás, mivel egy nem porágyon végbemenő folyamat, nem okoz felporzási jelenséget, így az energia teljes mértékben a felületen hasznosul. Az ezt megelőző alacsony energiasűrűségű primer nyomtatás pedig azért kedvező, mert az

alacsonyabb energiabevitel által atmoszférába vitt porszemcséket a berendezés keringető rendszere eltávolítja, mire a nagyobb energiasűrűsége térne át a nyomtatási ciklus.

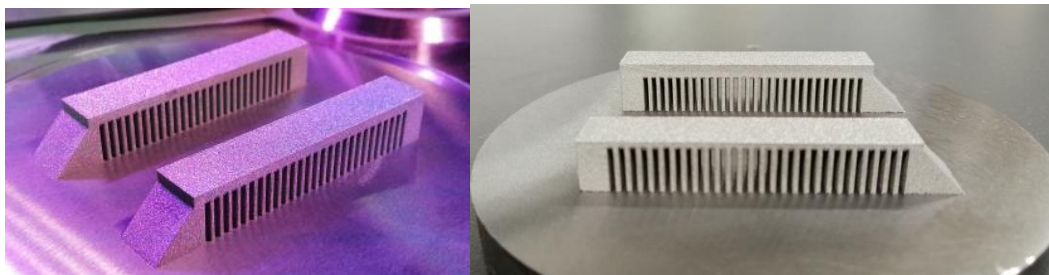
A nyomtatási folyamatokat ezen paraméterek szerint végeztem el és értékeltem ki, mind a maradó feszültségek mérése, mind a szakítószilárdsági vizsgálatok esetében.

4.3. Maradó feszültségek mérése

A rétegtépcsés során kialakuló maradó feszültségek mérésére leginkább reprezentatívabb próbatestek az „YX” orientáción helyezkednek el, mivel ezen az orientáción a legnagyobb a nyomtatott darabok maradó alakváltozásának mértéke. Mivel az SLM technológiával csak tömör testeket lehet előállítani, így ez a rétegek közötti kapcsolat kulcsfontosságú szerepet fog játszani az építkezés során. Ennek megfelelően, a maradó feszültségek által okozott nyomtatási hibák folyamat közbeni előfordulási esélyének csökkentésére a 34. ábrán bemutatott rotáció egy rendszerbe épített megoldás. Ennek megfelelően, Chao Li próbatestei mintájára [60] elkészítettem egy maradó feszültség mérő próbatestet, aminek a méretei alkalmasak kisebb munkaterű berendezésekben történő gyártásra. Ennek a méreteit mutatja be a 37. ábra és a kész próbatesteket a 38. ábra. A feltüntetett értékek milliméterben értendők.

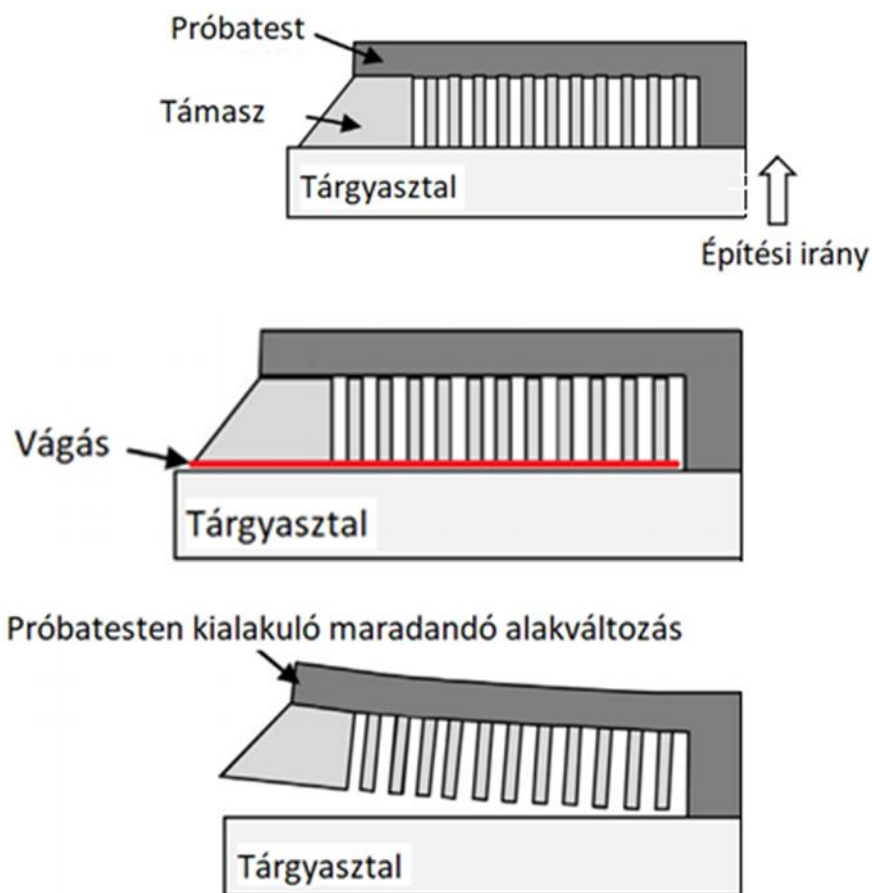


37. ábra, A Maradó feszültség mérő próbatest fő méretei



38. ábra, Kinyomtatott maradó feszültség mérő próbatestek

A próbatestek gyakorlati lényege, hogy megvastagított támaszelemekkel közvetlenül a tárgyasztalra kerül kinyomtatásra, majd a támaszok egy horizontális vágással eltávolításra kerülnek. Ennek következtében a test engedni fog a maradó feszültségeknek és maradó alakváltozáson megy keresztül. A 39. ábra mutatja be ezt a folyamatot.



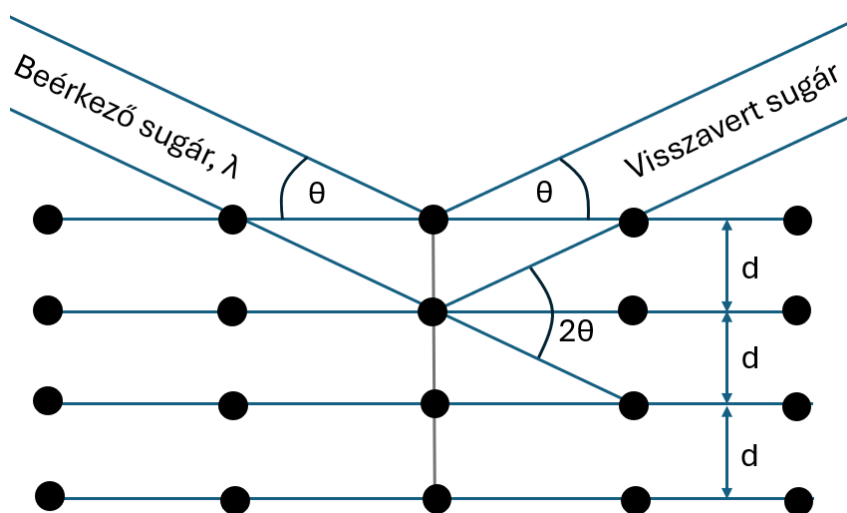
39. ábra, Az AM gyártásnál alkalmazott maradó feszültség próbatest vágásra, majd az emiatt létrejövő maradó alakváltozás

A geometria fő tulajdonsága, hogy különböző rétegvastagságok alkalmazásával nyomon lehet követni, hogy a különböző vizsgálati vastagságú darabok felhajlási értékei között mennyi az eltérés. Ezáltal kimutatható, hogy „YX” orientáción, adott szélességi és hosszúságú darabok esetében melyik vastagság számít kedvezőnek és melyik használata nem ajánlott. A 40. ábra ezt a maradó alakváltozást mutatja be.



40. ábra, Maradó feszültség mérő próbatest feszültségeinek oldása során kialakuló maradó alakváltozás

Maradó feszültségek mérésére rendelkezésre állnak roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati lehetőségek. Az egyik legegyszerűbb és az egyik legelterjedtebben alkalmazott ilyen módszer, a roncsolásmentes röntgendiffrakciós analízis (XRD, az „x-ray diffraction” angol kifejezésből). Az XRD eljárás a kristálysíkok közötti távolságot használja feszültségmérési alapnak. A deformációk hatására a rácssíkok távolsága a feszültségmentes értékükről egy új értékre változik, amely megfelel a maradó feszültség nagyságának. A Poisson-tényező szerint, ha húzófeszültséget alkalmazunk, a rácsháló távolsága a feszültség irányára merőleges síkok esetében nő, a feszültség irányával párhuzamos síkok esetében pedig csökken. Ez az új távolság az alkalmazott feszültséghez képest minden hasonlóan tájolt síkban azonos lesz, ezért a módszer csak kristályos, polikristályos és félkristályos anyagokra alkalmazható. A diffrakciós szög, 2θ , kísérletileg kerül megadásra, majd a rácstávolságot ebből a diffrakciós szögből és az ismert értékekből számítják ki a Bragg-törvény segítségével [71][72]. Ezt mutatja be a 41. ábra és a 2. egyenlet.

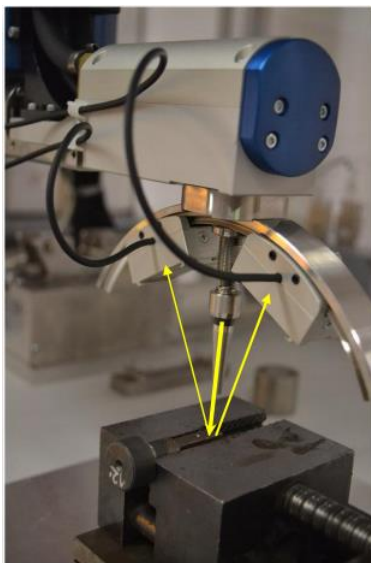


41. ábra, A röntgendiffrakció elvi ábrája

$$m\lambda = 2d \cdot \sin\theta$$

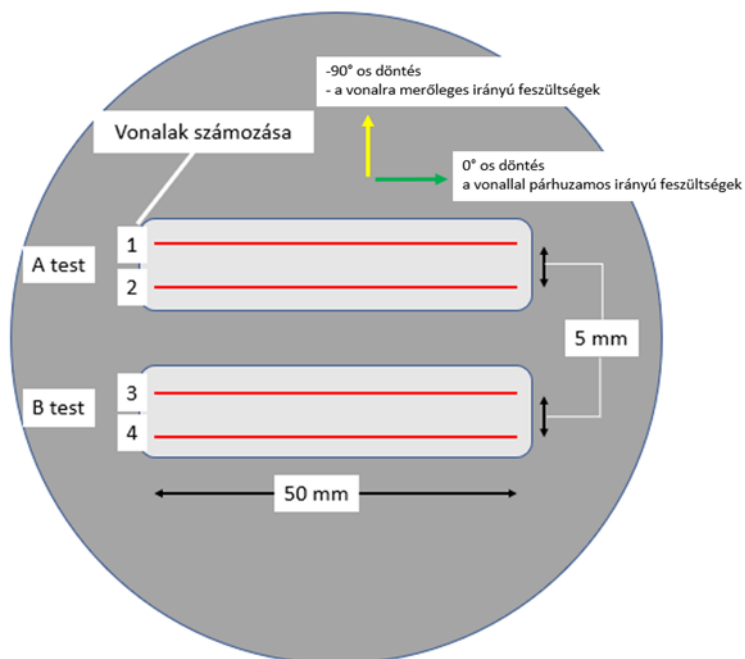
2. egyenlet

Ahol „ m ” a diffrakció rendje, „ λ ” a beérkező sugár hullámhossza, „ d ” a rácssíkok közötti távolság és „ θ ” a diffrakciós szög. A 42. ábra mutatja be annak a gyakorlati alkalmazását.



42. ábra, XRD maradó feszültség mérés a gyakorlatban

Hogy átfogóbb képet lehessen feltérképezni a testekben kialakuló maradó feszültségekről, minden próbatesten két párhuzamos vizsgálati vonalat vettem fel a 43. ábra alapján, egymástól 5 mm távolságra.



43. ábra, XRD vizsgálatokhoz, a próbatesteket felvett mérési vonalak

4.3.1. Maradó feszültség eredmények bemutatása, rendszerezése

A 43. ábra alapján, a próbatest 50 mm-es hosszán, 11 mérési pontot határoztam meg, egymástól 5 mm távolságra, két mérési vonalon, mely vonalakat szintén 5 mm választotta el egymástól. A 3D nyomtatási folyamatot a VI. táblázat szerinti alapnyomtatási beállításon végeztem el. A vizsgálati paramétereket a VII. táblázat mutatja be. Az alkalmazott hőkezelés egy 30 perces, 500°C-os hőntartás volt, melyet levegőn való lehűtés követett.

VII. táblázat, Maradó feszültség mérő próbatestek vizsgálati darabjai

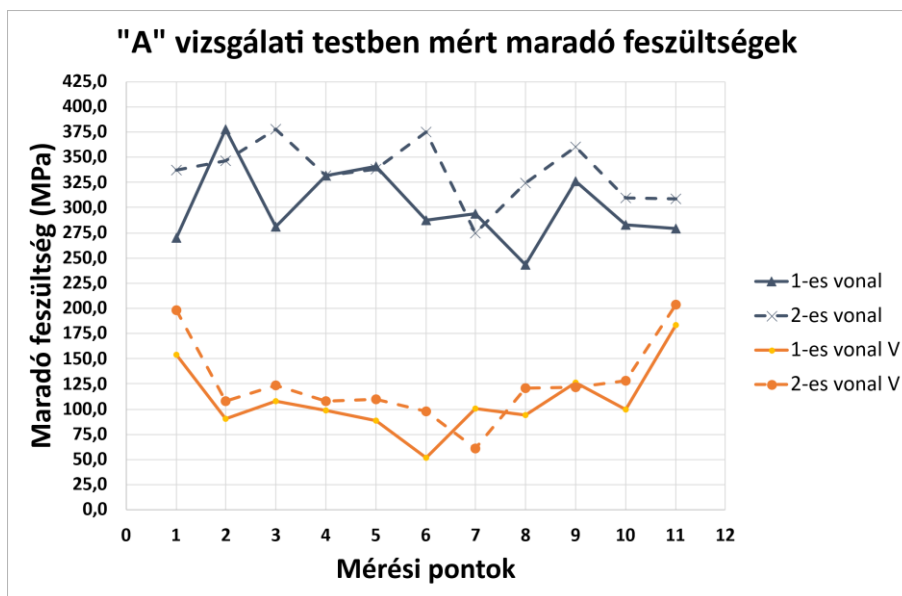
Próbatest jelzése	Vizsgálati rész vastagsága	Vizsgált állapot		
		alapnyomtatás	hőkezelt	oldott támaszelemek
A	1 mm	X		X
B	1 mm	X	X	
C	2 mm	X		X
D	2 mm	X		X
E	2 mm	X	X	
F	2 mm	X	X	
G	3 mm	X		X
H	3 mm	X	X	

A vizsgálatok során a különböző jelölésű próbatestek az alábbi párokban lettek elkészítve:

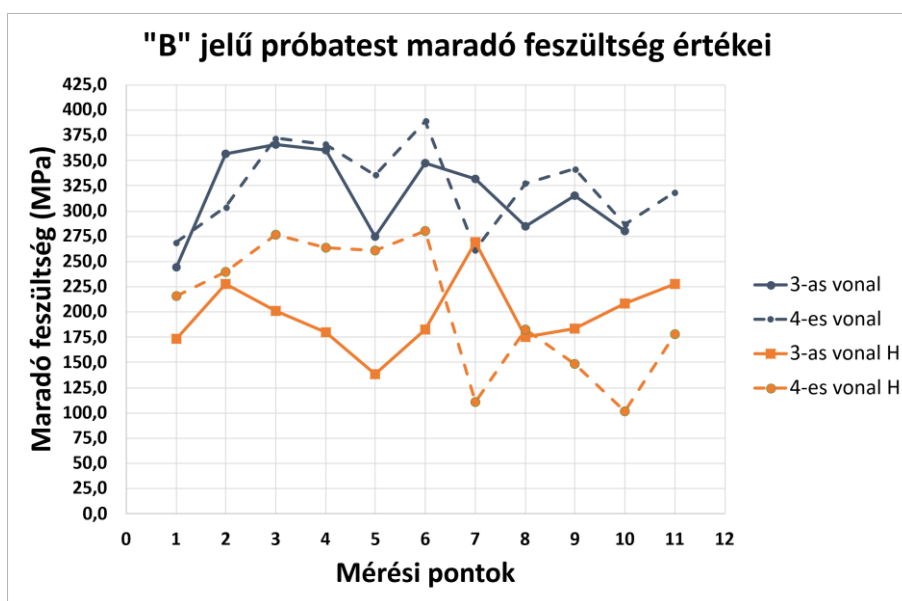
- A-G
- B-H
- C-D
- E-F

A nyomtatási folyamatok szempontjából fontos megjelölni, hogy mely darabok készültek azonos nyomtatási ciklusban, mivel a 3D nyomtatás egyik hátrányos tulajdonsága, hogy a külön ciklusban gyártott darabok maradó feszültség eredményei között nagy szórás lehet. A maradó feszültség görbék a 44-51. ábrákon láthatók. Az eredmények diagramjain szereplő rövidítések:

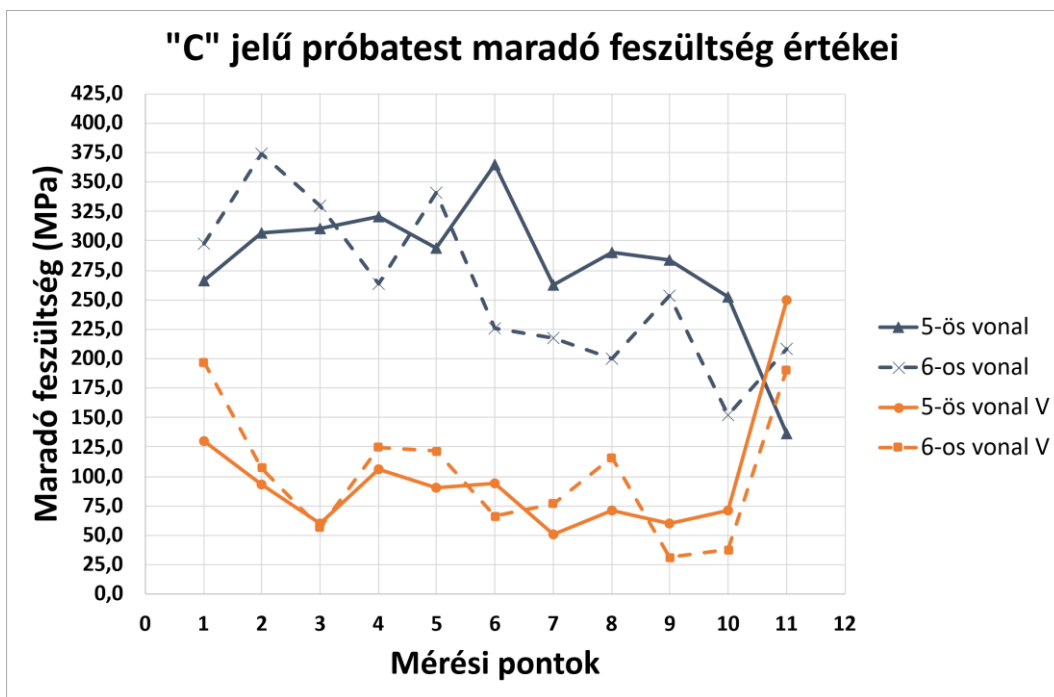
- R: tárgyasztalhoz rögzített, minden próbatest
- H: hőkezelt, B, E, F, H próbatestek
- V: tárgyasztalhoz rögzítő támaszelemek feloldva, elvágva, A,C,D,G próbatestek



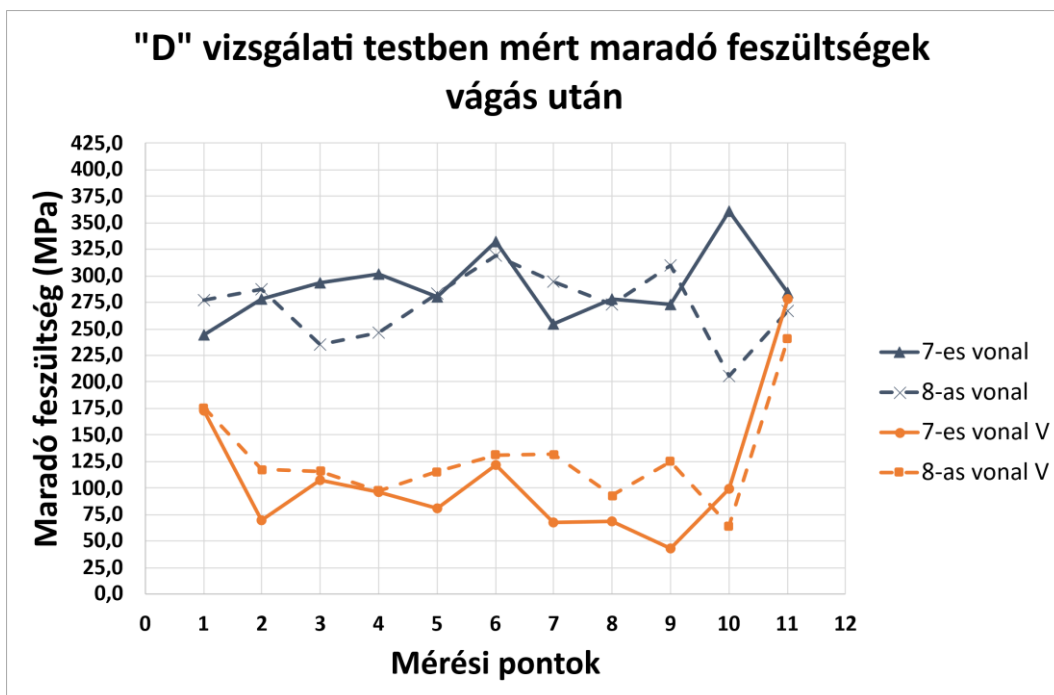
44. ábra, „A” jelű, 1 mm vastag próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



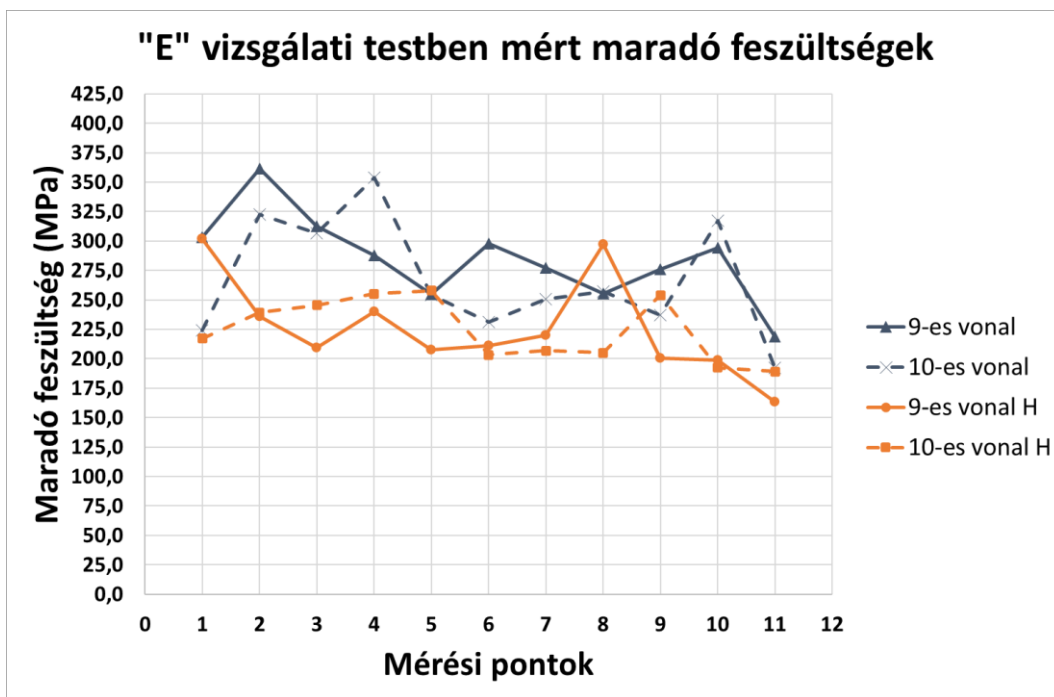
45. ábra B jelű, 1 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve



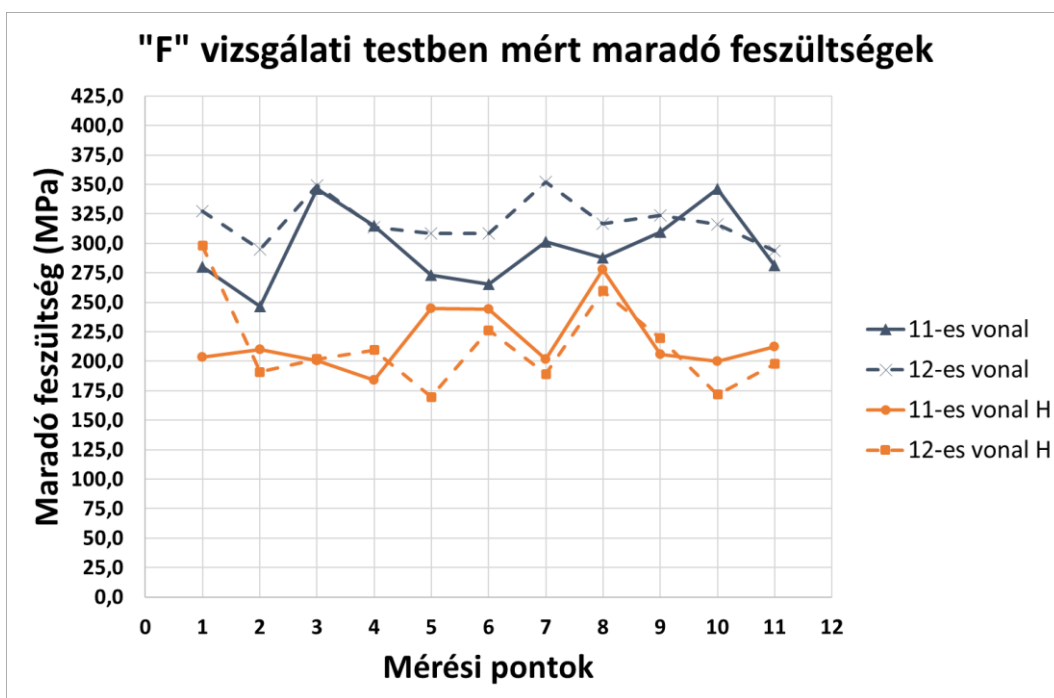
46. ábra C jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



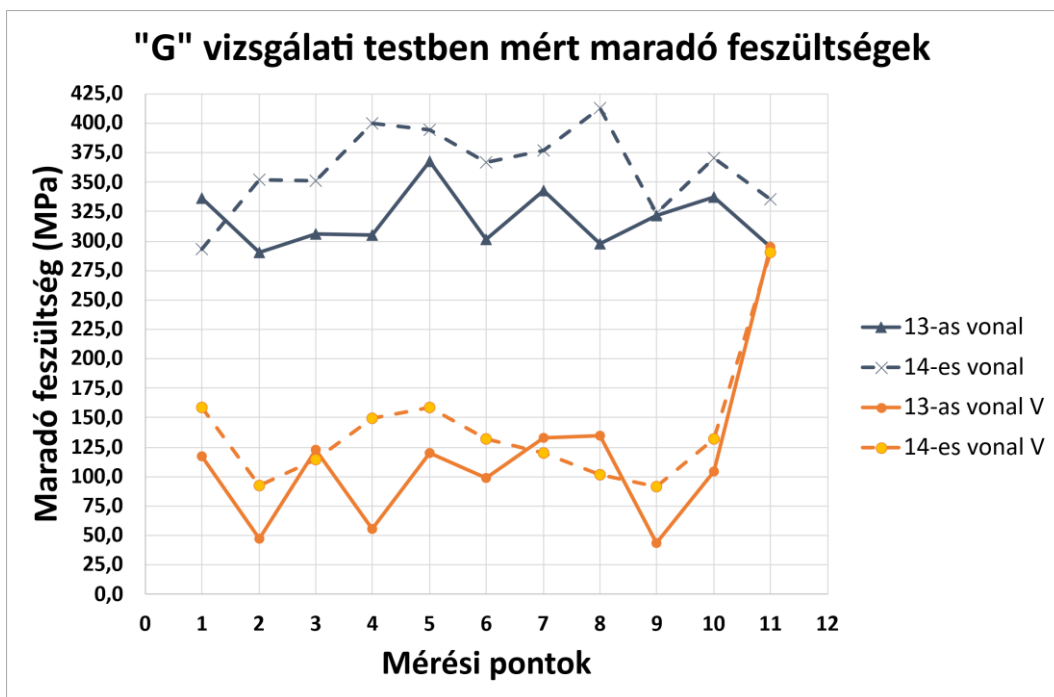
47. ábra, D jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



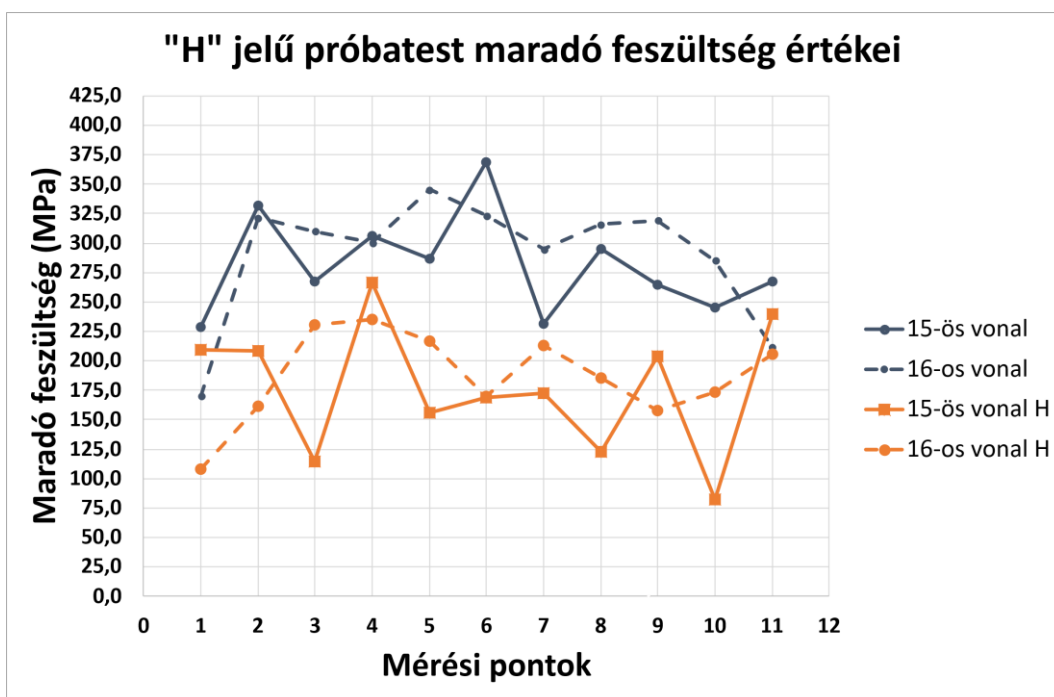
48. ábra, E jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve



49. ábra, F jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve

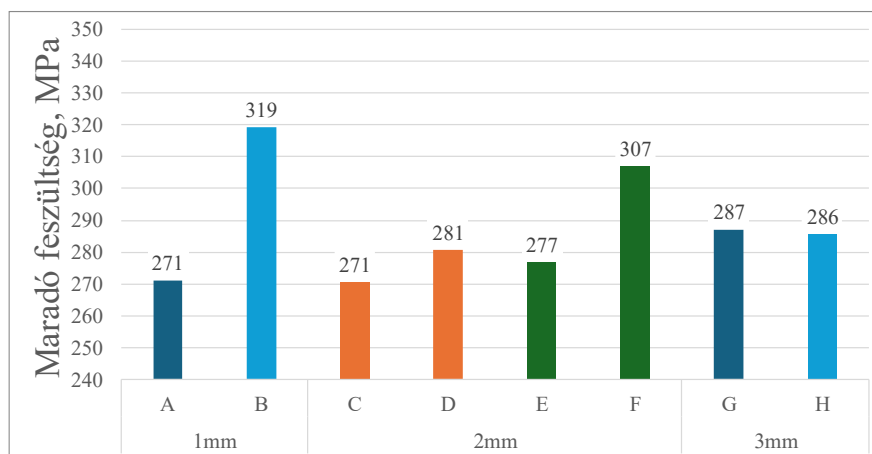


50. ábra, G jelű, 3 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



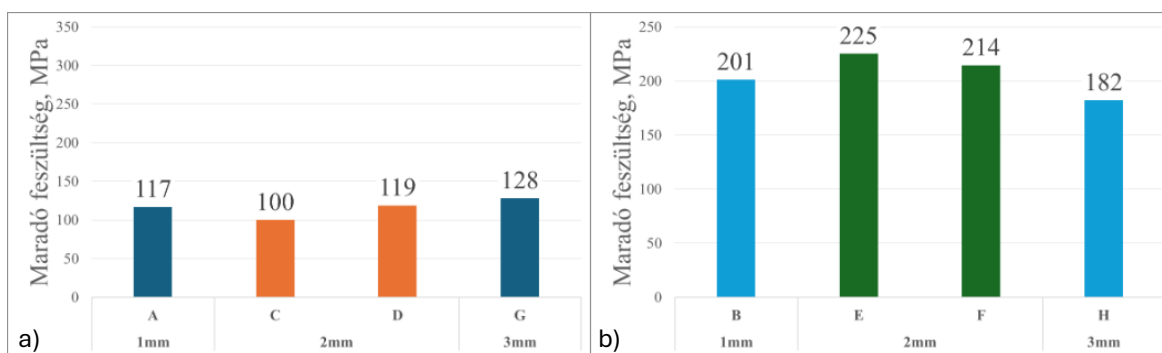
51. ábra, H jelű, 3 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve

Az 52. ábra mutatja be a vizsgálati vonalak mentén meghatározott 11 mérési pontban kialakuló maradó feszültség számszerű értékeinek átlagát. Az azonos ciklusban nyomtatott darabok azonos színnel lettek ábrázolva.



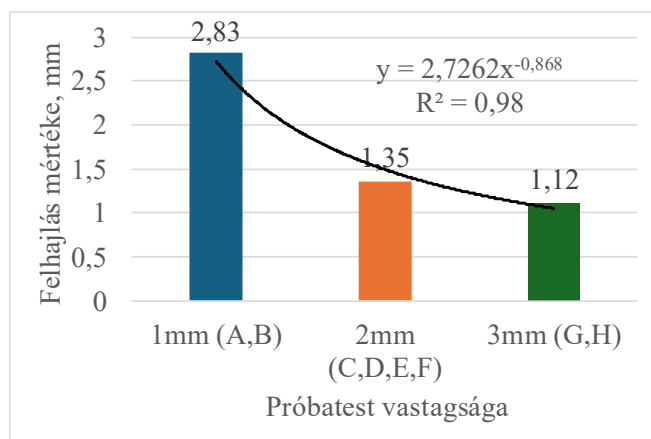
52. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1 mm A) és B); 2 mm C), D), E) és F); valamint 3 mm G) és H) jelű darabok maradó feszültség átlag értékei

Az 53. ábra a) része mutatja be az A), C), D) és G) jelű darabok tárgyasztaltól oldott állapotban mért maradó feszültség értékeit, b) része a B), E), F) és H) jelű darabok hőkezelt állapotban, tárgyasztalra rögzített eredményeit. A darabok színekódjai a könnyebb összehasonlítás érdekében megegyeznek az 52. ábrával.



53. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott maradó feszültség próbatestek átlag értékei, a): A,C,D,G jelű darabok esetében tárgyasztaltól oldott állapotban, valamint b): B,E,F,H jelű darabok esetében hőkezelt állapotban

Azoknak a daraboknak, melyeknek tárgyasztallal való kapcsolatát oldottam, ezzel támaszelemeit elvágtam, így engedve, hogy a maradó feszültségek hatására maradó alakváltozást szenvedjenek, a „Z” irányú felhajlásának mértékét megmértem, aminek átlagát az 54. ábra mutatja be.



54. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1mm vastag (A,B - átlag), 2mm vastag (C,D,E,F - átlag) és 3mm vastag (G,H - átlag) próbatestek Z irányú felhajlási értékei

A felhajlások átlag értékére trendvonalat rögzítettem, mely segítségével az alábbi egyenletet határoztam meg:

$$y = 2,7262x^{-0,868}$$

Ahol „y” a felhajlás mértéke, „x” a próbatestek vizsgálati vastagsága. Ez az egyenlet alkalmas az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 50 mm vizsgálati hosszúságú 17-4PH darabok, az $1 \leq X \leq 3$ értelmezési tartományon belüli felhajlási értékének előjelzésére.

4.3.2. Eredmények összefoglalása

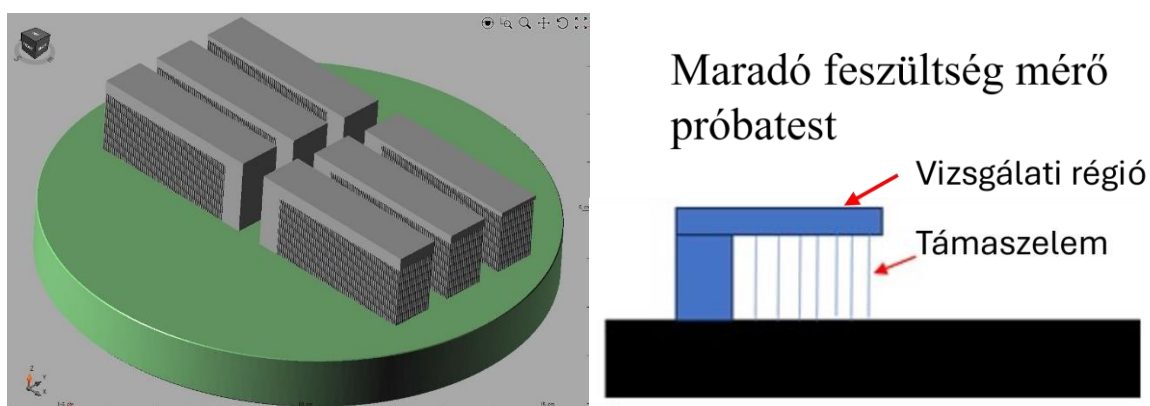
Az 1, 2, és 3 mm vastag, azonos nyomtatási ciklusban elkészített maradó feszültség mérő próbatestekben ébredő maradó feszültség mértéke 30 perces 500°C-os hőkezeléssel az alapállapotban nyomtatott darabokhoz képest az alábbiak alapján változik:

- A maradó feszültségek mértéke az alkalmazott hőkezeléssel a következőképpen változott:
 - 1 mm vastag daraboknál 37,01%-kal
 - 2mm vastag darabok esetében 18,63%-kal, illetve 30,31%-kal
 - 3 mm vastag darabok esetében 36,33%-kal csökkentette

A 38. ábrán bemutatott próbatestek feszültségeloszlása a 3D nyomtatási hőciklusának tulajdonsága következtében, a 44-51. ábrák alapján, rövid távon is igen változó volt

4.3.3. Maradó feszültség mérő próbatetek egy nyomtatási ciklusban történő gyártása

Az alapján, hogy a maradó feszültségek okozta alakváltozásokat közvetlenül tudjam összehasonlítani, a próbatetekben módosítottam, annak megfelelően, hogy több darabot lehessen egy nyomtatási ciklus alatt legyártani. Ez azért fontos lépés, mivel a 44-51. ábrák eredményei és az 52. ábra grafikonja alapján, a különböző ciklusokban készült darabok eredményei nagyobb eltéréseket képesek mutatni, mint az azonos ciklusban készültek. A 37. ábrán bemutatott próbatest vizsgálati hosszát 50 mm-ről 40 mm-re csökkentettem, illetve a 10 mm-es megerősített rögzítési pontot elhagytam. Az 55. ábra ezeknek a daraboknak a nyomtatási elhelyezkedését mutatja be.



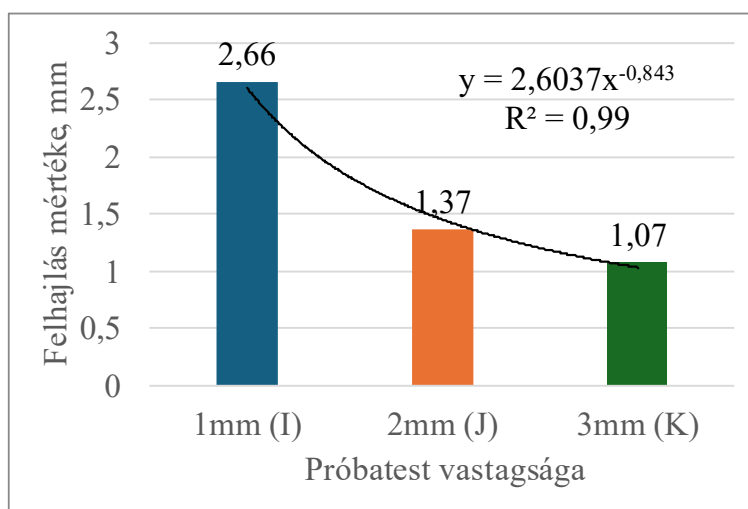
55. ábra, Módosított maradó feszültség mérő próbatetek, a 3D nyomtató tárgyasztalán, illetve vázlatosan

A 3D nyomtató berendezés lehetővé teszi, hogy a lézer az aktuálisan átolvasztott, megszilárdult réteget, egy második, nagyobb energiasűrűségű pásztázással újra átolvassza. Ez a kétszeres átolvasztás csökkenti a felporzás jelenségét, ami a nagy energiasűrűség hatására a nyomtatási atmoszférába juttathatja az kisebb méretű por frakciókat. Ennek pozitív hatása, hogy a folyamat közben ezek a szemcsék nem defókuszálják a lézert. A defókuszálódási jelenség kiküszöbölésével az alkalmazott lézer teljesítmény hatásfoka nem csökken a folyamat során, valamint így el lehet kerülni, hogy a folyamatos hőkezelések hatására a tárgyasztal degradálódjon. A VIII. táblázat a vizsgálati paramétereket sorolja fel a különböző vizsgálati vastagsággal nyomtatott darabok esetében. Az alapnyomtatás és kétszeres átolvasztás a VI. táblázatban meghatározott energiasűrűségeken készültek el.

VIII. táblázat, Módosított maradó feszültség mérő próbatestek vizsgálati darabjai

Próbatest jelzése	Vastagság	Vizsgált állapot	
		alapnyomtatás	kétszeres olvasztás
I	1 mm	X	
J	2 mm	X	
K	3 mm	X	
L	1 mm	X	X
M	2 mm	X	X
N	3 mm	X	X

Ebben az esetben a 3D nyomtatást követően hőkezelést nem alkalmaztam. A vizsgálat célja az olyan különböző vizsgálati vastagságú és nyomtatási állapotú darabok összehasonlítása, melyek egy nyomtatási ciklusban készültek el. Az 56. és 57. ábra. mutatja be ezeket a felhajlási értékeket alap nyomtatott állapotban, illetve kétszeres átolvasztott állapotban.



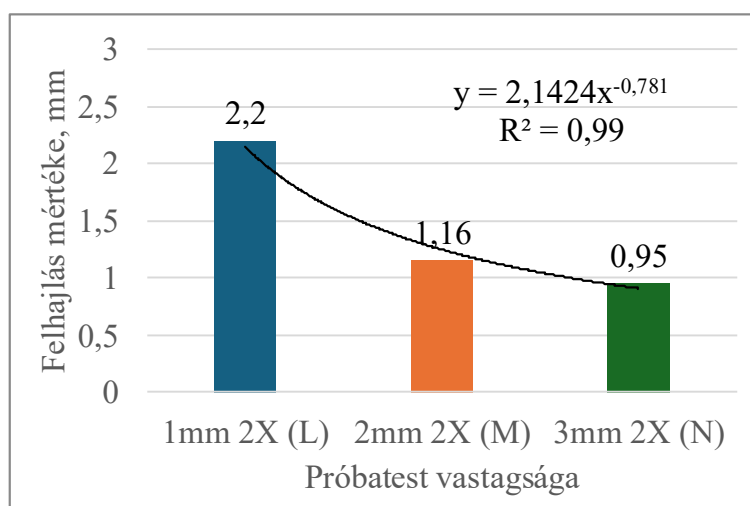
56. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlása, a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint alapállapotban (I, J, K)

Az alapnyomtatással elkészített darabok felhajlásának értékei alapján a 3. egyenletet határoztam meg:

$$y = 2,6037x^{-0,843}$$

3. egyenlet

ahol „y” a felhajlás mértéke, mm-ben, „x” pedig a próbatest vastagsága, szintén mm-ben.



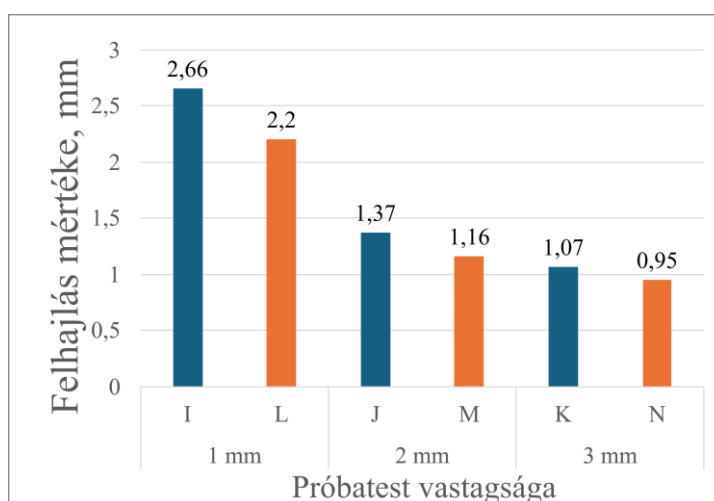
57. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlása, a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint 2X olvasztott állapotban (L, M, N)

A kétszeres átolvasztással gyártott darabok felhajlásának értékei alapján a következő egyenletet határoztam meg:

$$y = 2,1424x^{-0,781}$$

4. egyenlet

ahol „y” a felhajlás mértéke, mm-ben, „x” pedig a próbatest vastagsága, szintén mm-ben. Ezek az egyenletek alkalmasak az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 40 mm vizsgálati hosszúságú, 17-4PH darabok, az $1 \leq X \leq 3$ értelmezési tartományon belüli felhajlási értékének előjelzésére. Az 58. ábra ezeket az eredményeket mutatja be, felhajlási mérték szerint sorrendbe téve.



58. ábra, Alapbeállításon és kétszeres olvasztással nyomtatott darabok felhajlási mértékének sorba állítása

4.3.4. A módosított maradó feszültség próbatestek eredményeinek összefoglalása

Az 1, 2, és 3 mm vastag, azonos nyomtatási ciklusban elkészített maradó feszültség mérő próbatestekben ébredő maradó feszültség mértéke a kétszeres átolvasztással az alapállapotban nyomtatott darabokhoz képest az alábbiak alapján változik: A 40 mm vizsgálati hosszú darabok felhajlási mértéke kétszeres átolvasztás hatására az alapállapothoz képest a következőképpen változott:

- Az 1 mm vastag darabok esetében 2,66 mm-ről 2,2 mm-re, mely 17,29%-os csökkenést,
- A 2 mm vastag darabok esetében 1,37 mm-ről 1,16 mm-re, mely 15,33%-os csökkenést,
- Valamint a 3 mm vastag darabok esetében 1,07 mm-ről 0,95 mm-re, mely 11,22%-os csökkenést eredményez.

Az 1, 2 és 3 mm darabok esetében a két vizsgált állapotban, „YX” nyomtatási orientáción, az alábbi egyenleteket határoztam meg:

- Az alapnyomtatással elkészített próbatestek felhajlási értékei alapján:

$$y = 2,6037x^{-0,843}$$

- A kétszeres olvasztással elkészített próbatestek felhajlási értékei alapján:

$$y = 2,1424x^{-0,781}$$

ahol „y” a felhajlás mértéke, mm-ben, „x” pedig a próbatest vastagsága, szintén mm-ben.

Ezek az egyenletek alkalmasak az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 17-4PH darabok, az $1 \leq X \leq 3$ értelmezési tartományon belüli felhajlási értékének előjelzésére.

4.4. A 17-PH rozsdamentes acél próbatestek szakítószilárdsági vizsgálatai

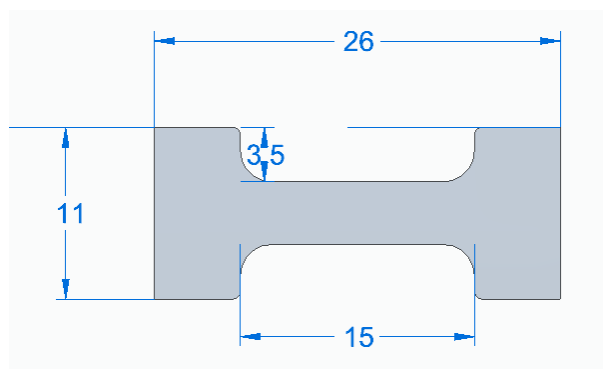
A szakítószilárdságot mérő próbatestek gyártása azért előnyös, mert egyszerűen kivitelezhető és gyors, egyértelmű eredményt szolgáltat a próbatestekről, valamint egyértelműen nyomon lehet követni a különböző geometriai változások hatását a kapott diagramokon [73]. Ez 3D nyomtatás során hatványozottan előnyös, mivel a geometria bármikor szabadon módosítható. A fémekre vonatkozó összefoglaló szabványt az ASTM E8/E8M és az ISO 6892 tartalmazza, mely pontosan definiálja a különböző méreteket, geometriai jellemzőket, illetve vizsgálati körülményeket. A vizsgálat célja, a maximális húzófeszültség, a folyáshatár, valamint a rugalmassági modulus meghatározása. Az 59. ábra mutatja be a vizsgálathoz alkalmazott berendezést, mely egy Instron 5982 típusú szakítógéppel volt. A kísérletek a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében készültek.



59. ábra, Instron 5980-as szériájú, 600kN erő kifejtésre is alkalmas szakító gép

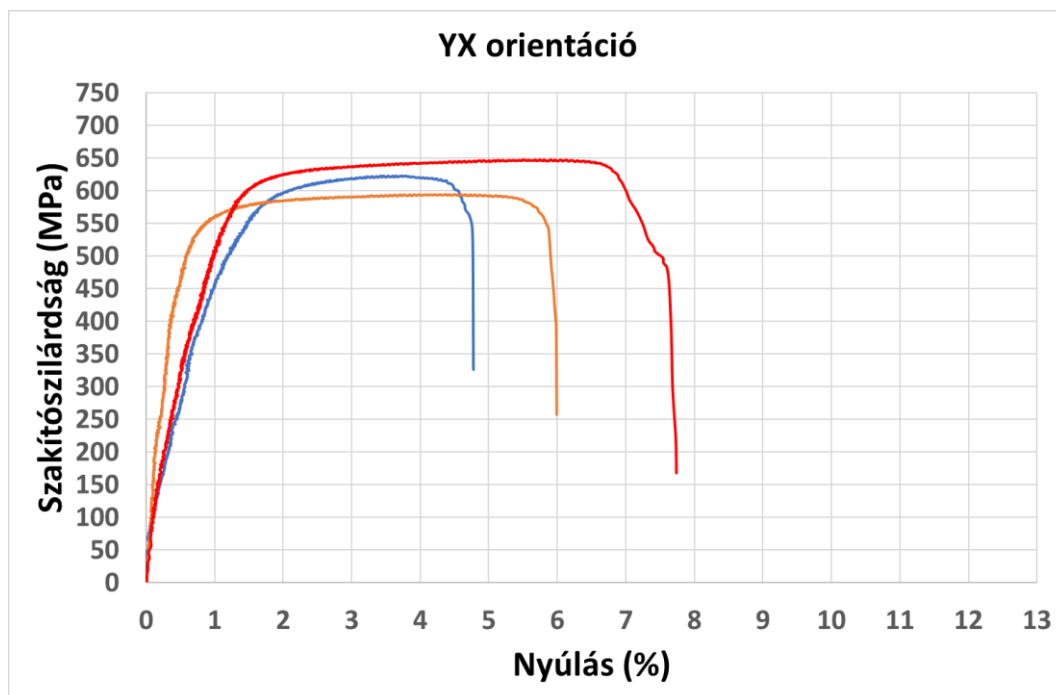
4.4.1. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek

A 60. ábrán bemutatott próbatestekkel orientációs különbségeket vizsgáltam. Ezeknek a daraboknak a vastagsága 1 mm volt. Méretükből adódóan, egy nyomtatási cikluson belül többféle orientáción tájolt darab helyezhető el a tárgyasztalra, a teljes nyomtatási időt kis mértékben befolyásolva.

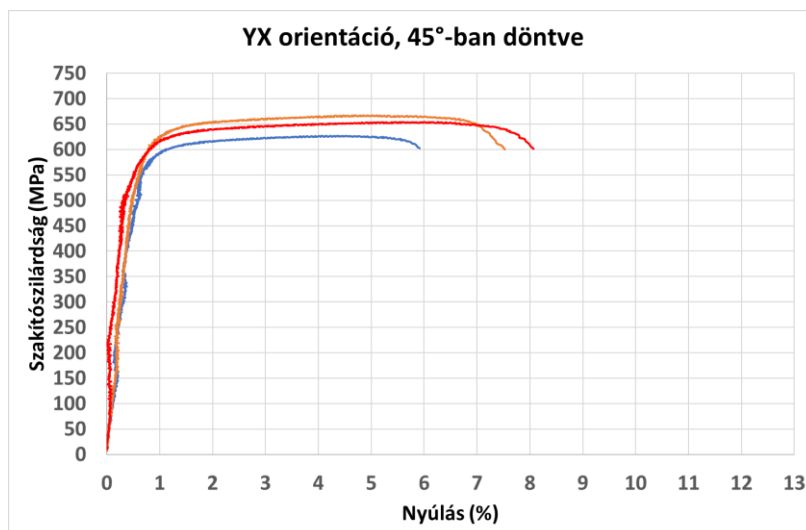


60. ábra, Orientációs különbségeket vizsgáló szakítópálcák méretei

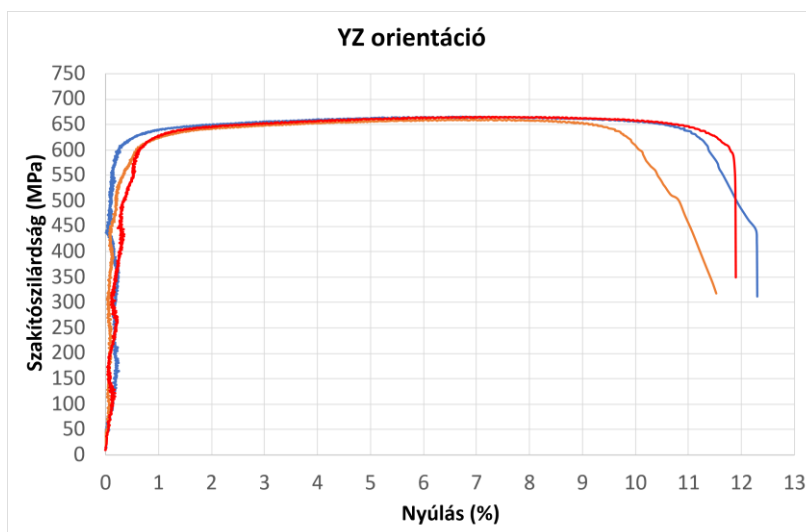
A nyomtatási orientációknak a 31. ábra által bemutatott „YX”-et és „YZ”-t választottam, valamint, a kettő között a tárgyasztalhoz viszonyítva 45°-ban döntve is végeztem szakítószilárdsági vizsgálatot. A 3D nyomtatott darabok a VI. táblázat alapján alapnyomtatási beállítással készültek el. A 61., 62. és 63. ábra ezeknek a szakítószilárdságnylás diagramjait mutatják be.



61. ábra Az „YX” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatest eredményei



62. ábra, Az „YX” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló, a tárgyasztalra 45°-ban döntött próbatestek eredményei



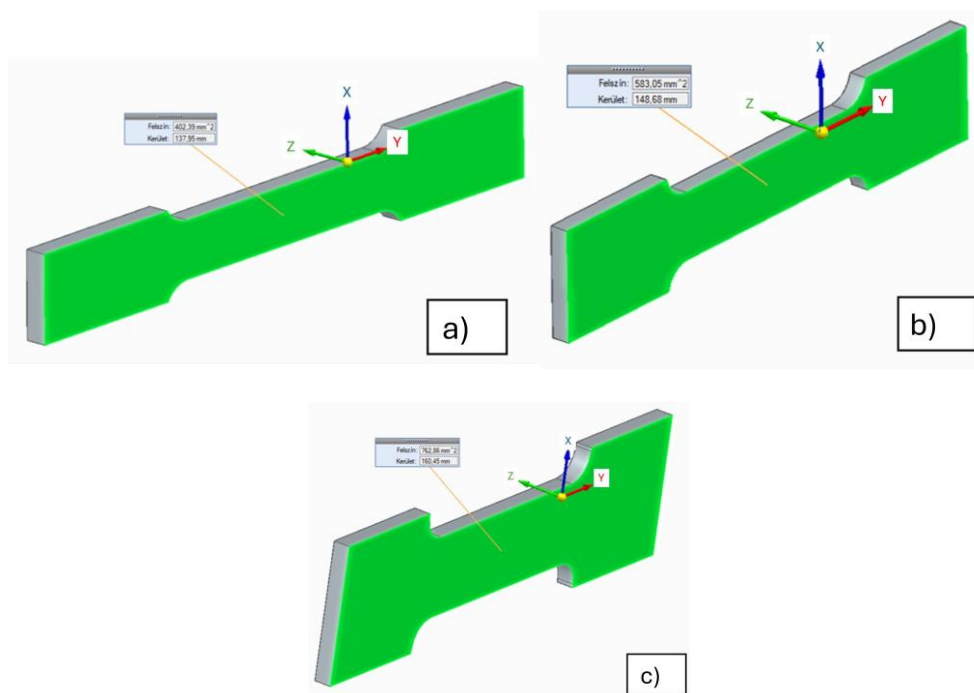
63. ábra, Az „YZ” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatestek eredményei

4.4.2. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek eredményeinek összefoglalása

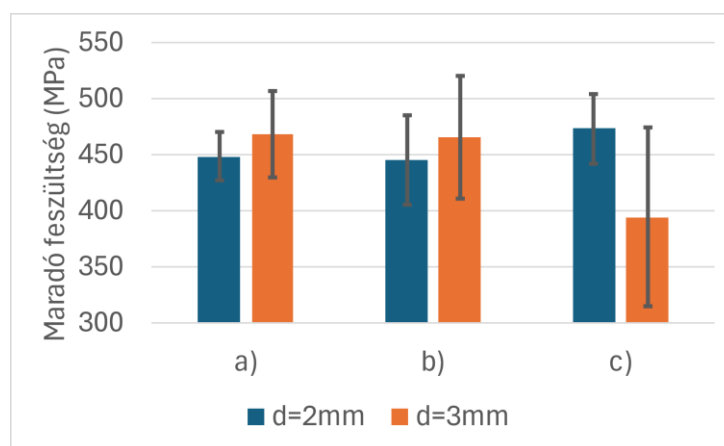
Az eredmények alapján azt a következtetést vontam le, hogy a nyomtatási platformra párhuzamos rétegek felületének csökkentésével a nyúlás értéke akár 50%-kal növekedett. Ez a jelenség párhuzamba állítható azzal a kijelentéssel, hogy minél rövidebb távokat kell végig pásztáznia a lézernek, annál kisebb maradó feszültség alakul ki a térfogatban [60].

4.4.3. Az XY orientáción gyártott különböző felületi kiterjedésű próbatestek vizsgálatai

A pásztázási távolságok változásának további vizsgálatára hoztam létre a 64. ábrán látható próbatesteket, melyeket „YX” orientáción a VI. táblázat alapján alapnyomtatással készítettem el, így alkalmasak voltak XRD maradó feszültség mérésre is. A 65. ábra. mutatja be ezeket a mérési eredményeket.



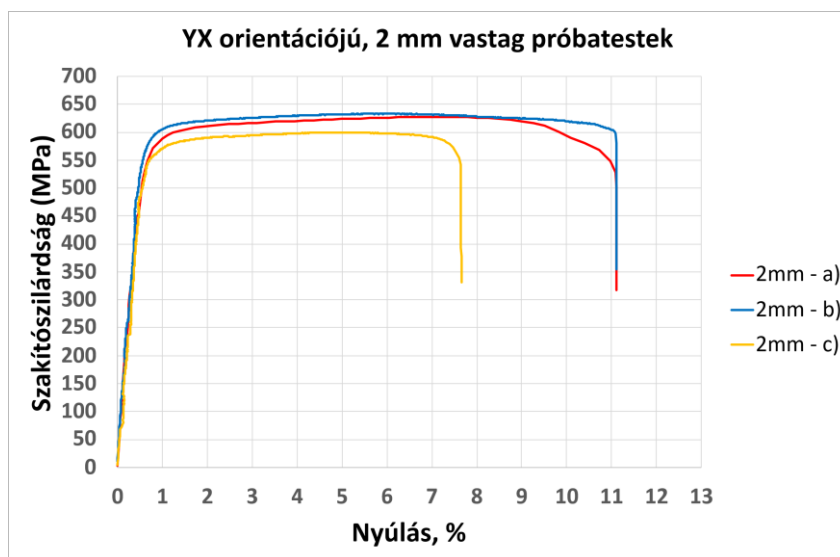
64. ábra, A vizsgált szakítópálcák felületei értékei: a) 402,39 mm²; b) 583,05 mm²; c) 762,86 mm²



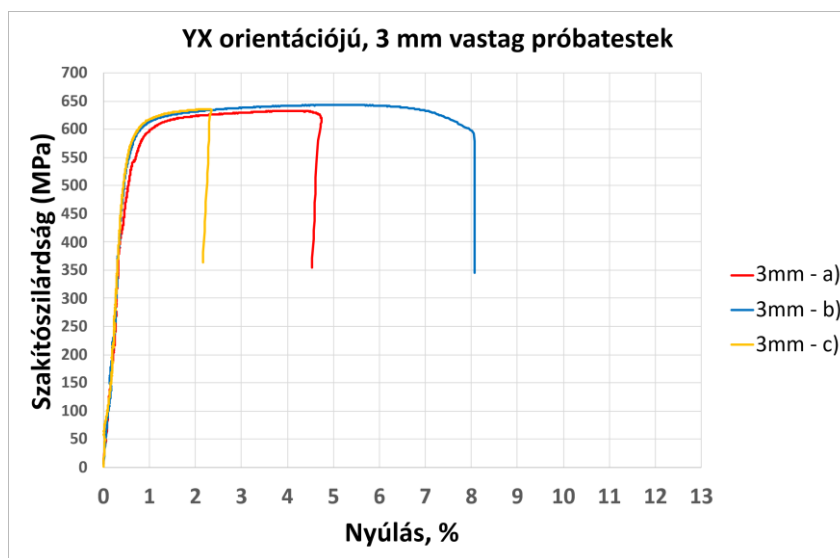
65. ábra, Maradó feszültségek a különböző felületi kiterjedésű szakítópálcákban

A 65. ábra két fontos információval szolgál. Az egyik, hogy a 2 mm és a 3 mm vastagságú próbatestek egymáshoz képest más tendenciát mutatnak. A felületi kiterjedés növelésével, a 2 mm vastag próbatestek maradó feszültsége növekszik, míg a 3 mm

vastagságúak esetében ez csökken. A másik fontos információ, hogy a vastagság növelése során, a feszültség értékek szórása is növekszik. Ez visszavezethető az olvasztási karakterisztikára, mivel egy 3 mm vastag test esetében a rétegek hosszabb ideig vannak kitéve hőhatásnak, mint a 2 mm vastag próbatestek, így folyamat közben a gyártott különböző vastagságú testek hőegyensúlya eltérő lesz. A 66. és 67. ábra. ezeknek az „YX” orientációjú daraboknak szakítószilárdsági és nyúlási értékeit mutatja be.

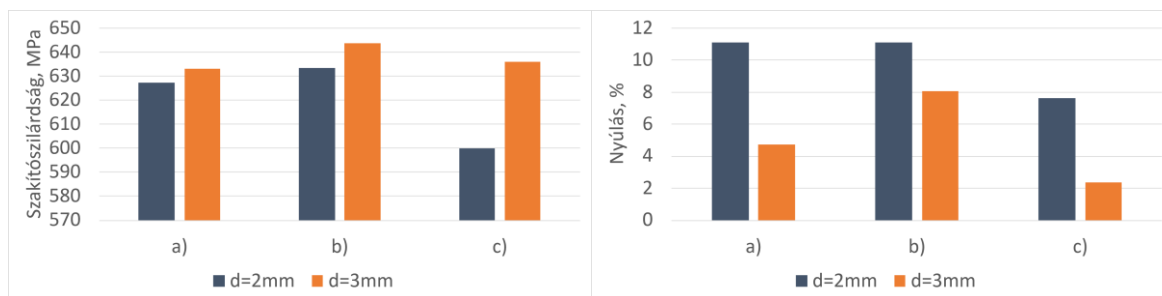


66. ábra, Az „YX” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei



67. ábra, Az „YX” orientációjú, 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei

A vizsgált darabok „YX” felületi kiterjedésének 402,39 mm²-ről 583,05 mm²-re növelése emelte a szakítószilárdsági értéket és a nyúlást, majd ennek 762,86 mm²-re további növelése ezeket az értékeket csökkentette. Ezt részletezi a 68. ábra és a IX. táblázat.



68. ábra, Az „YX” orientációjú, a) 402,39 mm²; b) 583,05 mm² és c) 762,86 mm² felületi kiterjedésű próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási értékei

IX. táblázat, Az „YX” orientációjú, különböző felületi kiterjedésű próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási maximum értékei

	a) 402,39 mm ²		b) 583,05 mm ²		c) 762,86 mm ²	
	Rm, [MPa]	Nyúlás, %	Rm, [Mpa]	Nyúlás, %	Rm, [Mpa]	Nyúlás, %
d=2mm	627	11,10	634	11,11	600	7,65
d=3mm	633	4,742	644	8,07	636	2,36

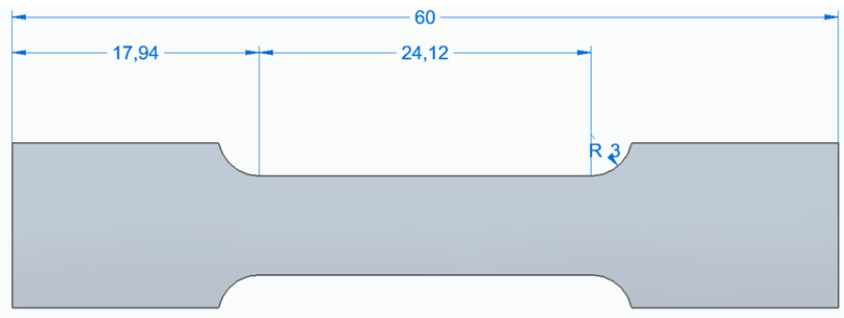
A tárgyasztalhoz rögzítő támaszelemek oldása után a vizsgált darabok minden esetben, a maradó feszültség hatására, maradó alakváltozáson mentek keresztül.

4.4.4. XY orientáción elkészített próbatestek eredményeinek összefoglalása

Az eredmények azt mutatják, hogy a 3 mm vastag próbatestek nagyobb szakítószilárdsággal rendelkeznek, mint a 2 mm vastag párjaik. Ez mindhárom geometriai paraméternél hasonlóképp jelentkezik. Továbbá azt állapítottam meg, hogy a vizsgálati darabok „YX” felületi kiterjedésének 402,39 mm²-ről 583,05 mm²-re növelése emeli a szakítószilárdságot és a nyúlást, majd ennek 762,86 mm²-re további növelése ezeket az értékeket csökkenti. Ezen felül a tárgyasztalhoz rögzítő támaszelemek oldása után a vizsgált darabok minden esetben, a maradó feszültség hatására, maradó alakváltozáson mentek keresztül.

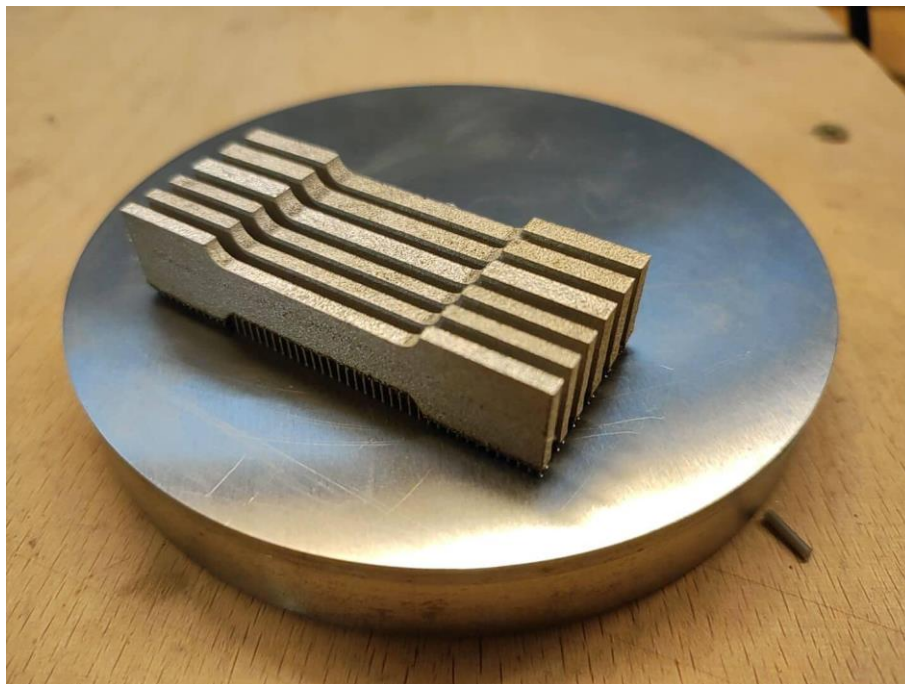
4.4.5. Az „YZ” orientáción elkészített darabok szakítószilárdsági vizsgálata

A maradó feszültségek okozta alakváltozás csökkentése érdekében [65] elkészítettem a 64. ábrán szemléltetett b) jelű darabot „YZ” nyomtatási orientáción a 31. ábra szerint, mely fő méreteit a 69. ábra szemlélteti.



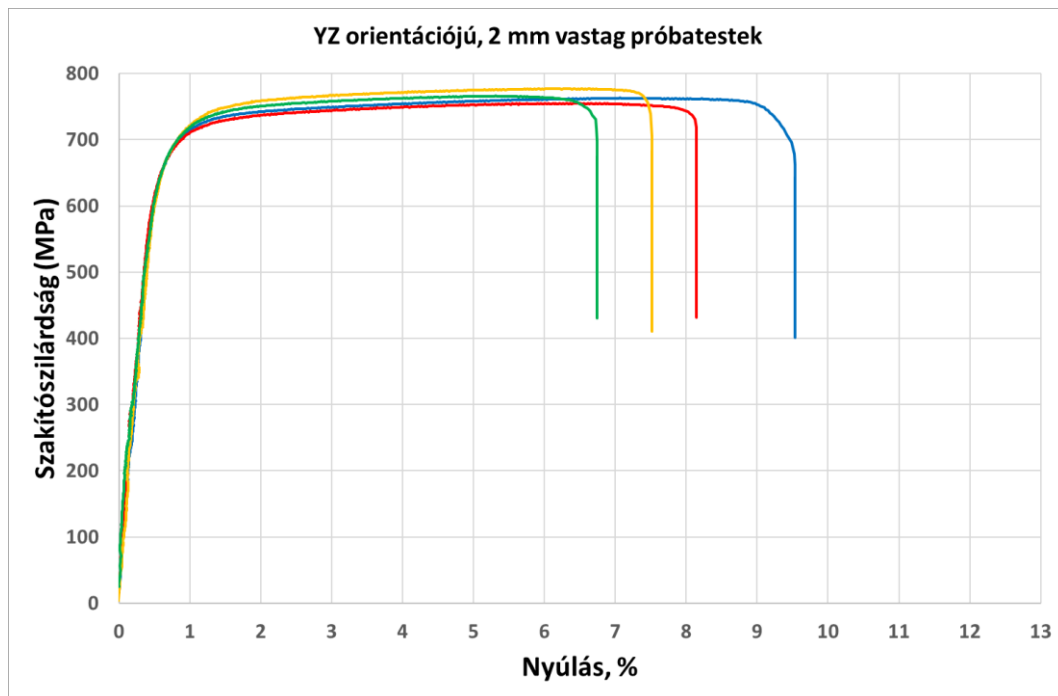
69. ábra, Fő vizsgálati szakítópálcák méretei

A 70. ábra mutatja be a darabok egy lehetséges nyomtatási elrendezését. A darabok ebben az esetben alapnyomtatási beállításon készültek el a VI. táblázat alapján.

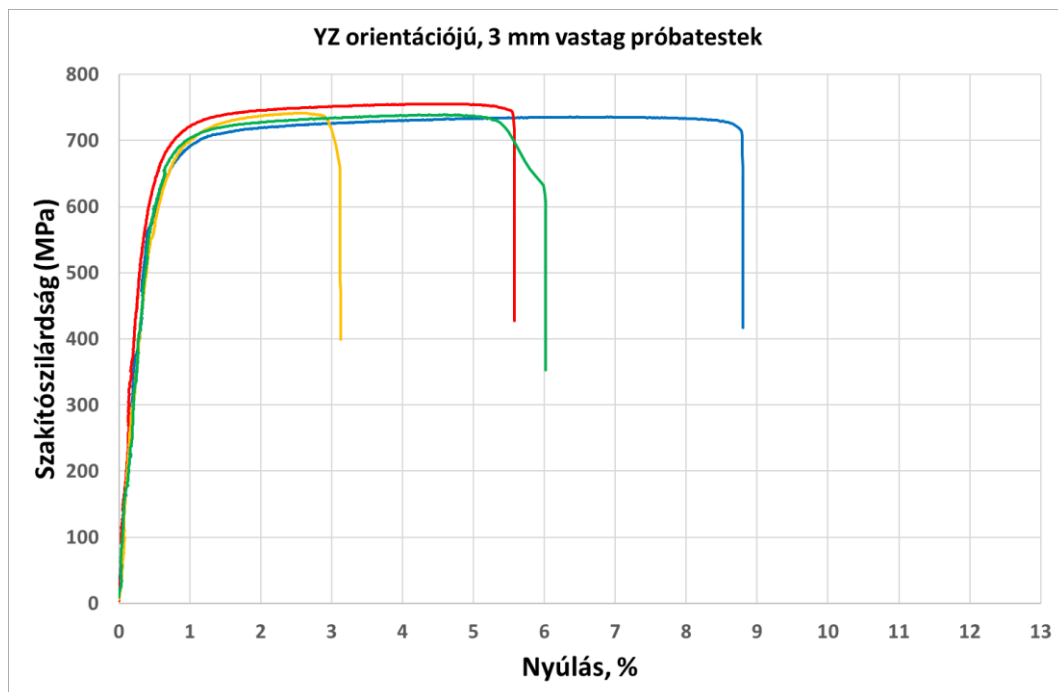


70. ábra, Az „YZ” orientációban 3D nyomtatott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcák

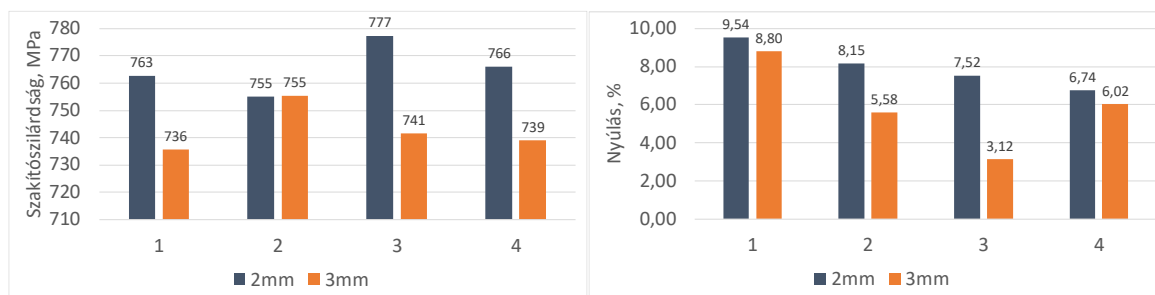
Az „YZ” nyomtatási orientációban elkészített 2 és 3 mm vastag darabok szakítószilárdsági és nyúlási értékeit az 71., 72. ábra szemlélteti, valamint ezek összefoglalását a 73. ábra.



71. ábra, Az „YZ” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági eredményei



72. ábra, Az „YZ” orientációjú, 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági eredményei



73. ábra, Az „YZ” orientációjú, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási értékei

Az „YZ” orientációban nyomtatott próbatestek esetében a 2 mm vastag próbatesteknek a szakítószilárdsága és nyúlása is jellemzően nagyobb volt a 3 mm vastag darabokénál. Ezeknek a számszerű értékeit mutatja be a X. táblázat.

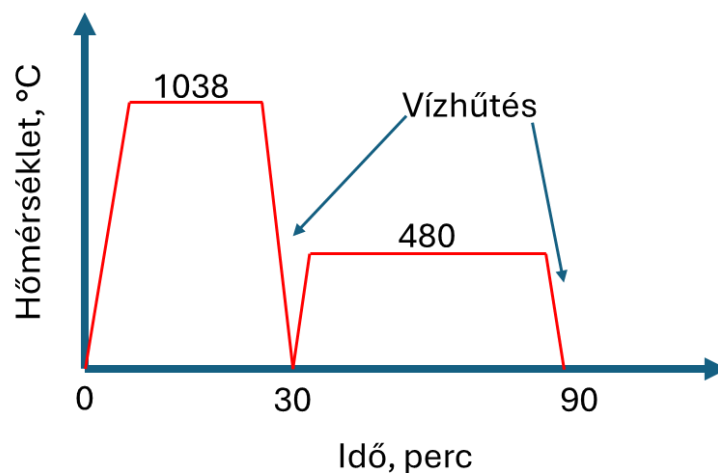
X. táblázat, „YZ” orientációjú, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági értékei

	1		2		3		4	
	Rm, [MPa]	Nyúlás, %	Rm, [MPa]	Nyúlás, %	Rm, [MPa]	Nyúlás, %	Rm, [MPa]	Nyúlás, %
2mm	763	9,54	755	8,15	777	7,52	766	6,74
3mm	736	8,80	755	5,58	741	3,12	739	6,02

A szakítószilárdság, a darabok „YX” orientációról „YZ”-re váltásával akár 22%-kal növelhető volt, azonban a rugalmassági értékek átlagosan 28%-kal csökkentek, tehát a darabok ridegebben törtek el. Az „YX” orientált próbatestek esetében azonban a nyúlási érték tartalmaz egy hiba tartományt is, mivel az így orientált darabok a nagyobb maradó feszültség miatt nagyobb maradó alakváltozáson mennek keresztül, mint az „YZ” orientált darabok. Így a nyúlás százalékos értékhez hozzáadódik az, amikor a húzóerő hatására a darabok kiegyenesednek.

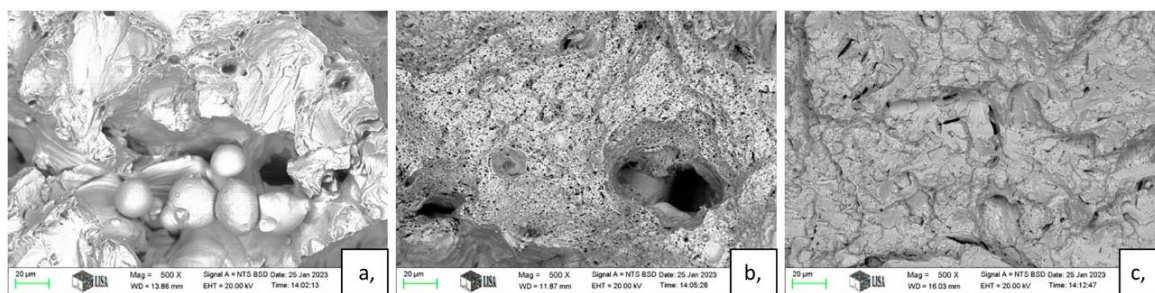
4.4.5.1. Az „YZ” orientált darabokon alkalmazott H900-as hőkezelés hatása

A szakítószilárdság növeléséhez, a H900-as öregítési hőkezelési eljárást választottam, mivel a 17-4PH alapanyaghoz ez az egyik leggyakrabban használt eljárás, valamint, mivel a 17-4PH egy kiválóan keményedő acél ötvözet, így az öregítés hatására éri el a maximális szakítószilárdsági értékét. A 74. ábra ennek a H900-as hőkezelésnek szemlélteti a vázlatos ismertetését.



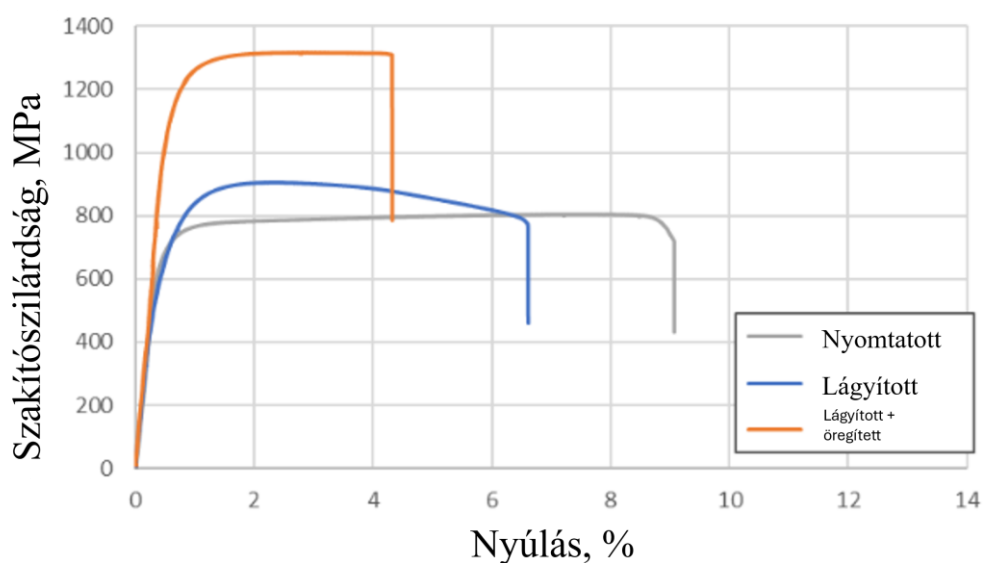
74. ábra, Utókezelésként alkalmazott H900-as öregítési hőkezelési program

A hőkezelési folyamat egy 1038°C-os, 30 perces lágyításból áll, melyet vízhűtés követ, majd 60 perces öregítés 480°C-on, amit ismét vízhűtés zár, mindez argon atmoszféra alatt. Annak érdekében, hogy a nyomtatott és hőkezelt állapotok különbségeit megvizsgáljam, pásztázó elektronmikroszkópos (SEM – az angol „scanning electron microscopy” kifejezésből) felvételeket készítettem a darabok töretfelületéről. A 75. ábra mutatja be a nyomtatott, lágyított és az öregített próbatestek töretfelvételeinek SEM felvételeit.



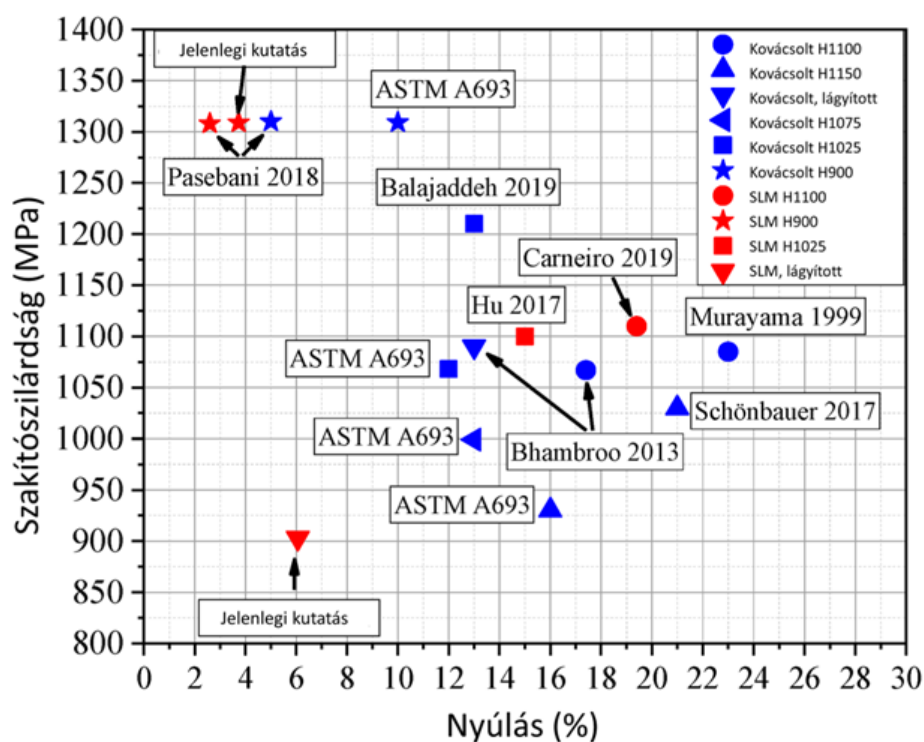
75. ábra, Töretfelületek SEM felvételeinek különbségei az a) nyomtatott; b) lágyított; és c) öregített darabok között

A nyomtatott állapotban a 35. ábrához hasonlóan, jelen vannak visszamaradó porszemcsék, azonban ezek a hőkezelt állapotokban kisebb mértékben, vagy nem észrevehetőek. A 76. ábra ezeknek az állapotoknak a szakítószilárdsági különbségeit szemlélteti.



76. ábra, A nyomtatott, lágyított és öregített állapotok közötti szakítószilárdságbeli különbség

Az öregített darabok szakítószilárdsági értéke 1310 MPa volt, ami vetekszik a különböző hőkezelési programokkal kezelt kovácsolt darabok értékeivel. A 77. ábra egy ilyen összehasonlítást mutat be.



77. ábra, Jelenlegi kutatás értékei összehasonlítva különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [74]-[83]

4.4.6. Az „YZ” orientáción elkészített darabok eredményeinek összefoglalása

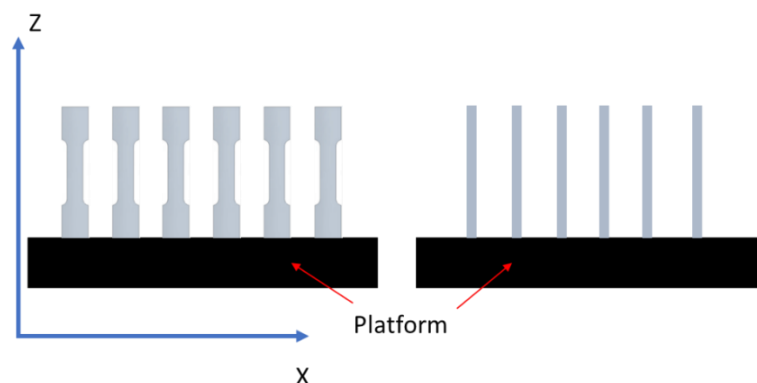
Ahogyan az a 77. ábrán látható, a kutatásom során kapott eredmények szakítószilárdságban elérik az ASTM A693 szabvány kovácsolt és öregített próbatestének értékeit, valamint vetekszik Pasebani és szerzőtársai 3D nyomtatott és kovácsolt darabjainak eredményeivel is [76]. A különbség a saját eredményeim és a Pasebani által 3D nyomtatott darabok között a nyúlási értékek és az gyártás során alkalmazott lézer energiasűrűség voltak. Ebből azt a következtetést vontam le, hogy a kisebb, $44,58 \text{ J/mm}^3$ -es energiasűrűséggel való 3D nyomtatással, valamint H900-as öregítő hőkezelés alkalmazásával gyártott darabok, kedvezőbb nyúlási értékeket képesek elérni, mint Pasebani által az ugyanezzel az öregítő hőkezeléssel kezelt, de nagyobb, 104 J/mm^3 -es energiasűrűséggel nyomtatott darabok. A nagy energiasűrűség alkalmazása során, porágy felületén lejátszódhat felporzási jelenség, miszerint a porágy felületén elhelyezkedő, jellemzően kisebb frakciójú szemcsék az inert atmoszférába jutnak, mely defókuszálhatják a lézer forrást, ezzel akadályozva a magasabb energia megfelelő hasznosulását [85].

4.4.7. A „ZX” 3D nyomtatási orientációban elkészített darabok vizsgálata

A 4.3.4. fejezet vizsgálatához hasonlóan, ahhoz, hogy a kapott mérési eredményeket kellően össze lehessen hasonlítani, a gyártott darabokat egy nyomtatási ciklus alatt készítettem el, vertikálisan, ZX 3D nyomtatási orientációjú próbatesteken. Ennek az orientációnak a használata lehetővé teszi több darab egy ciklusban való kinyomtatását, valamint ebben az esetben a legkevesebb a tárgyasztaltól eltávolított állapotban tapasztalható maradó alakváltozás mértéke [65]. A 78. ábra mutatja be ennek megfelelően a négy szett próbatest elhelyezkedését a tárgyasztalon. A vizsgálati állapotok a következők voltak:

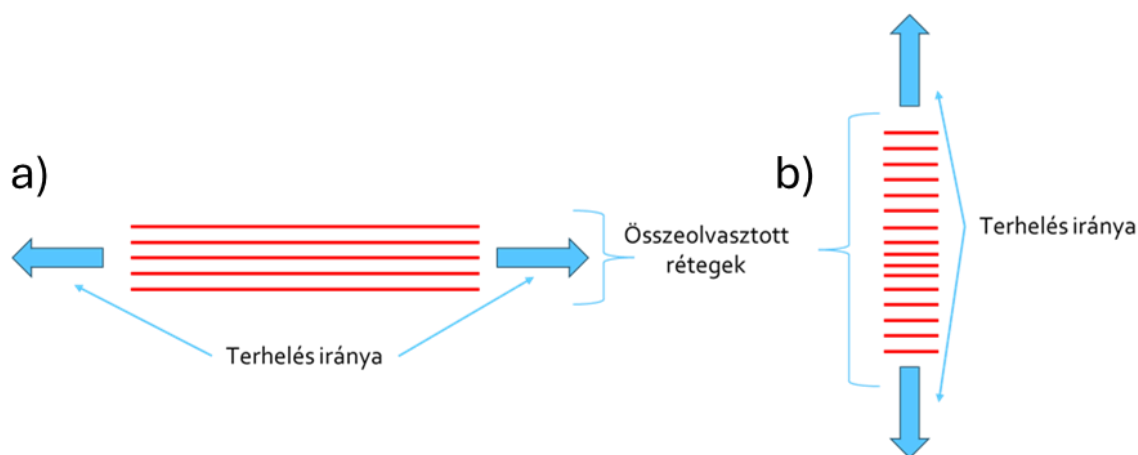
- alapnyomtatás
- kétszeres átolvasztási ciklus
- alapnyomtatás, majd H900-as hőkezelés
- kétszeres átolvasztási ciklus, majd H900-as hőkezelés.

Az elkészített próbatestek vastagsága ebben az esetben is 2 mm és 3 mm volt, mely kétszeres olvasztási ciklusát a maradó feszültség mérő darabokhoz hasonlóan a VI. táblázat alapján végeztem el és a hatását a már megszilárdult réteg felületén alkalmaztam, újra átolvasztva a teljes nyomtatási keresztmetszetet. A H900-as hőkezelést a 36. ábra alapján hajtottam végre.



78. ábra, 2 mm-es, kétszeres olvasztási cikluson készített szakítópálcák eredményei

A „ZX” orientáció hátránya, hogy a terhelés iránya merőleges az épített rétegekre, így törése rideg, azonban előnye, hogy a rövid olvasztási távolságok miatt a tárgyasztaltól elválasztva, maradó alakváltozása elhanyagolható.



79. ábra, Húzófeszültségi terhelés rétegekhez képesti iránya az a) „YX” és b) „ZX” orientációkban

Amennyiben a húzófeszültség iránya a lerakott rétegekre párhuzamos, a rétegek közötti kohéziós erő kisebb mértékben befolyásolja a vizsgálat eredményeit. Amennyiben azonban az alkalmazott erő a lerakott rétegekre merőleges, a vizsgálat ezeket a rétegeket széthúzza egymástól, mely jellemzően kevésbé kedvező szakítószilárdsággal rendelkező, valamint kisebb nyúlású, ridegebb eredményt fog hozni [86].

A minták mikroszerkezetét pásztázó elektronmikroszkóp (SEM) segítségével vizsgáltam, a fázisok kémiai összetételét energiadiszperzív (EDS) mikroszondával határoztam meg. A mikroszkópos vizsgálatokhoz a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében a 80. ábrán szemléltetett Zeiss EVO MA 10 típusú, pásztázó elektronmikroszkópot használtam.



80. ábra, Zeis EVO MA 10 típusú SEM berendezés

A mikroszerkezetben kialakuló fázisok azonosítását röntgendiffrakciós módszerrel (XRD) végeztem el. A vizsgálatokat a 81. ábrán bemutatott Bruker D8 Discovery XRD berendezésen, végeztem Göbel tükörrel, Cu $K\alpha$ forrással (40 kV és 40 mA generátor beállításokkal), 10-125 °(2 θ) tartományban 0,006 °(2 θ) lépésközzel és 0,6s gyűjtési idővel LynxEye X-ET energiadiszperzív detektorral.

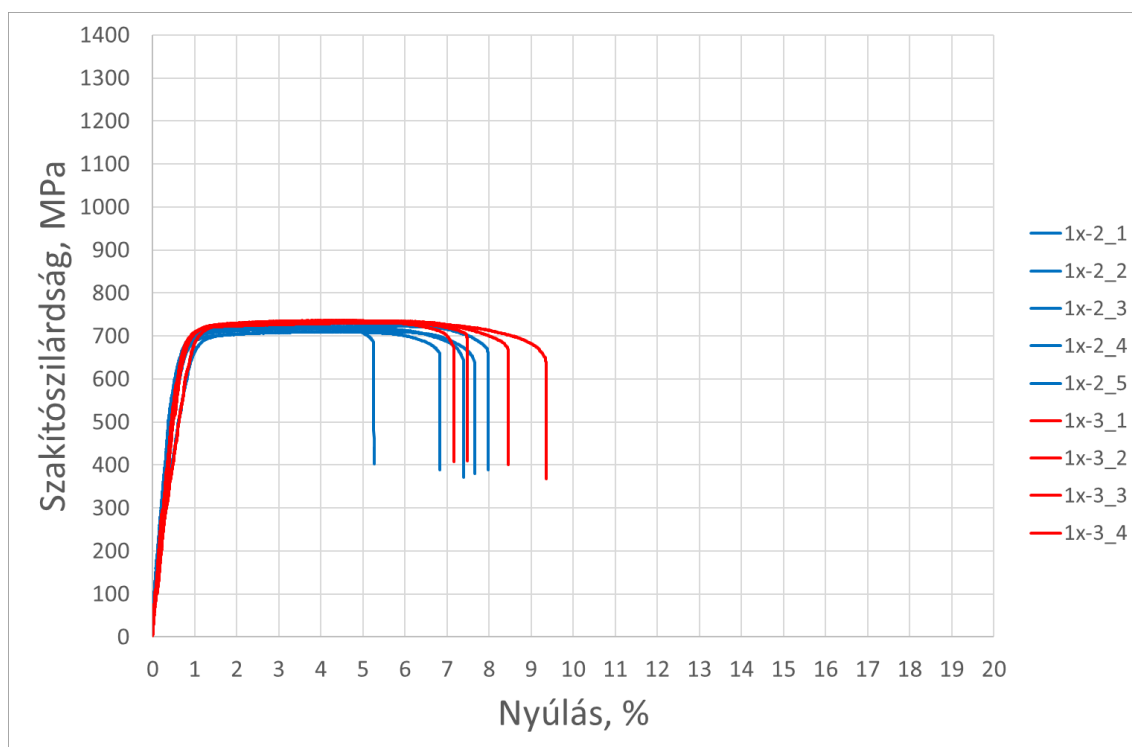


81. ábra, Bruker D8 Discovery XRD beredezés

A kiértékelés a Bruker EVA 5.0 szoftverrel történt, a fázisok azonosításához PDF2 adatbázist használtam. A Rietveld illesztést Bruker TOPAS 6.0 szoftverrel végeztem. A mérések a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézetének 3D Laboratóriumában készültek.

4.4.7.1. Alapnyomtatási beállítással nyomtatott darabok eredményeinek bemutatása

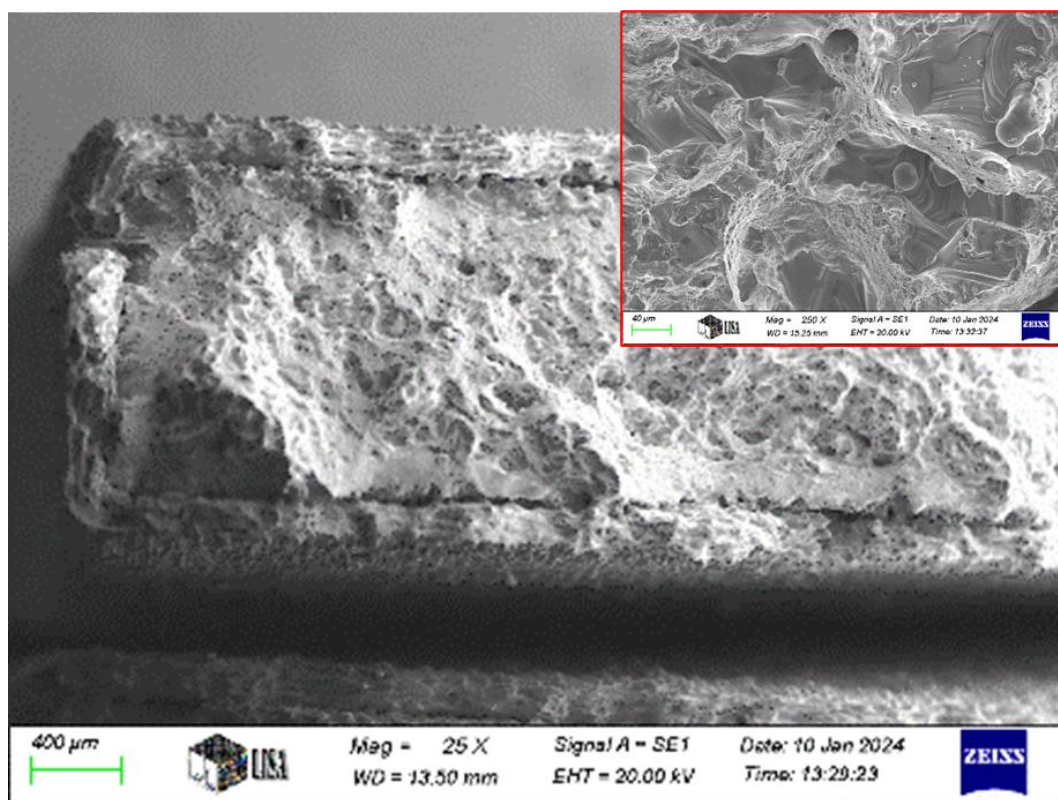
Az alapbeállításon nyomtatott próbatetek képezték a kutatási munkám alapját, minden további kísérleti lépés ezekre a darabokra épült fel. A 82. ábra szemlélteti a szakítószilárdsági és nyúlási értékeket. A 3D nyomtatás a VI. táblázat szerinti alapnyomtatási beállításokkal történt.



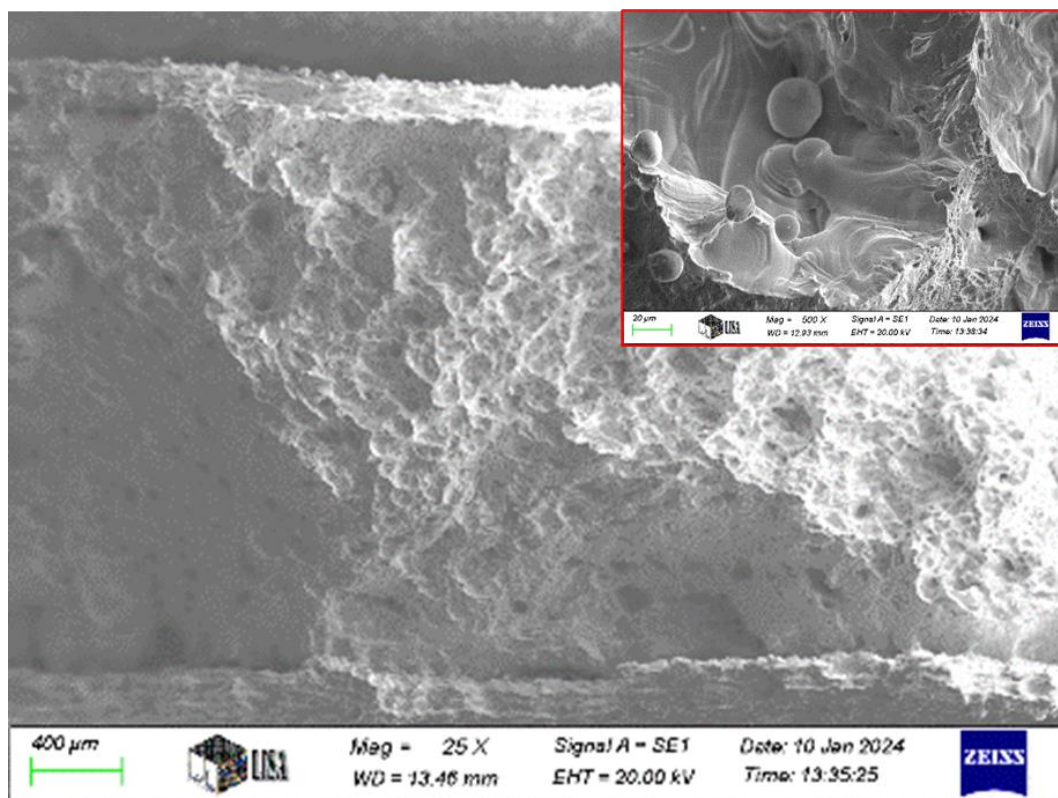
82. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatetek szakítószilárdsága és nyúlása alapnyomtatási állapotban

Az alapnyomtatáson készített 2 mm vastag próbatetek szakítószilárdsága 718MPa volt 7,02% nyúlás mellett, a 3 mm vastag próbatetek szakítószilárdsága 766MPa volt 8,41% nyúlás mellett.

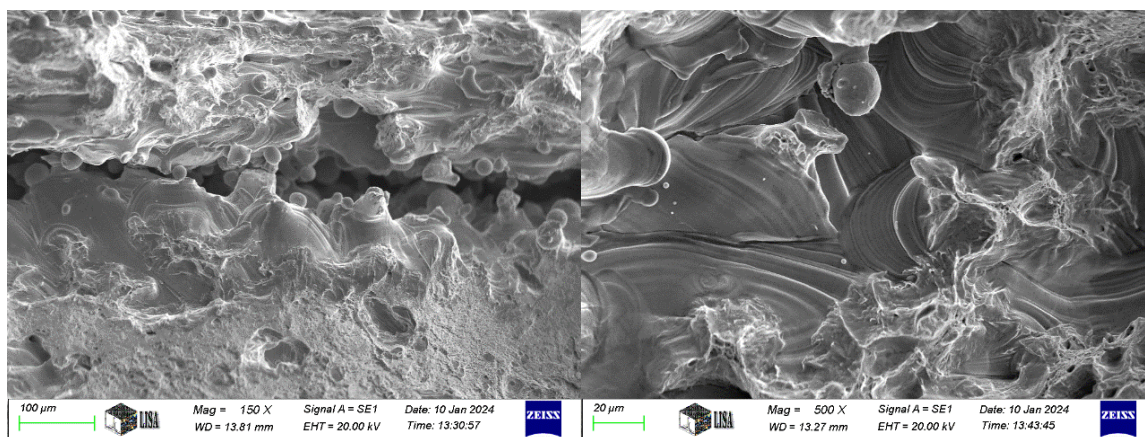
A 83., 84. és 85. ábrák által szemléltetve, a pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálat kimutatta, hogy az alapbeállításon nyomtatott darabok esetében a térfogat minden esetben tartalmaz meg nem olvasztott porszemcséket. Ezek a térfogatban maradt szemcsék növelik a porozitás arányát, ezzel negatív hatást kifejtve a szakítószilárdságra és a nyúlási értékekre.



83. ábra, 2 mm vastag, alapbeállítású próbatest töretfelületi felvétele



84. ábra, 3 mm vastag alapbeállítású próbatest töretfelületi felvétele

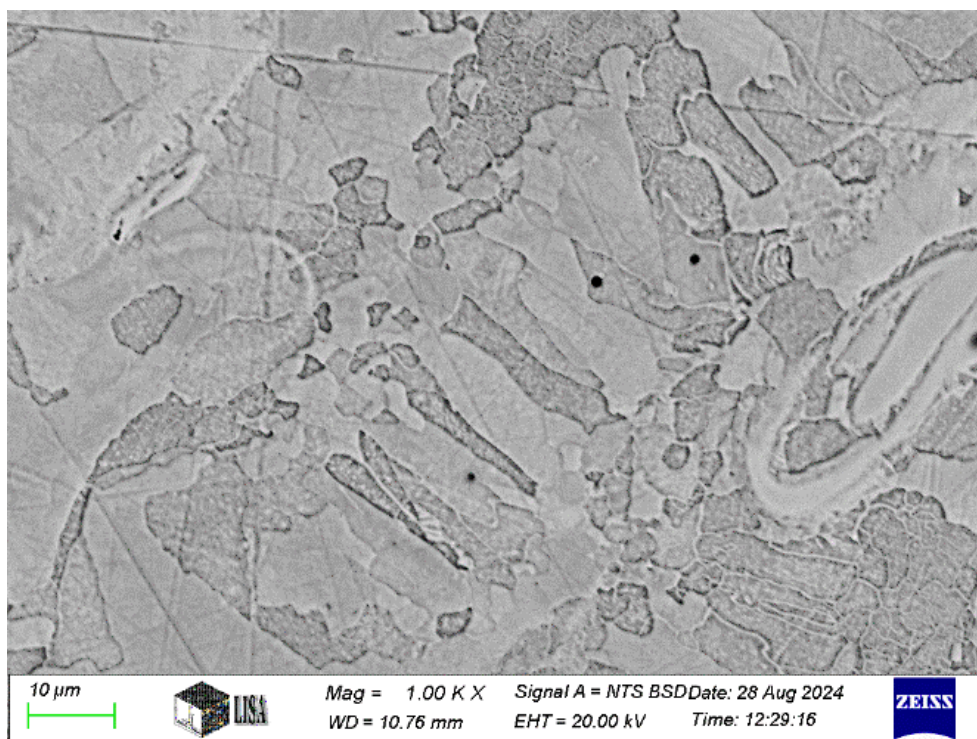


a) 2 mm

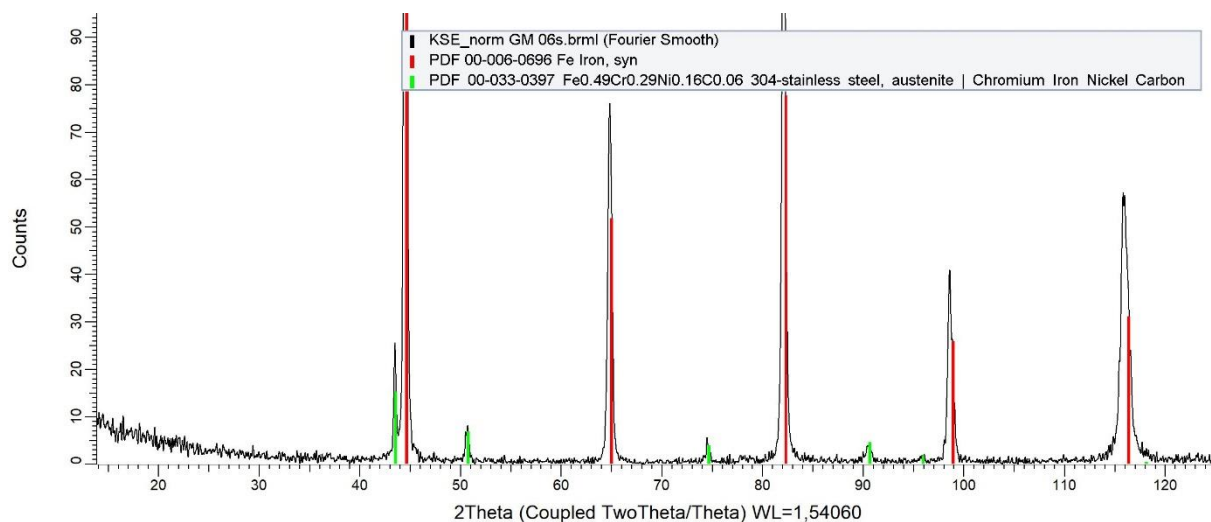
b) 3 mm

85. ábra, Alapbeállítással nyomtatott próbatest nyomtatási hibája, ahol a porszemcsék nem olvadtak meg

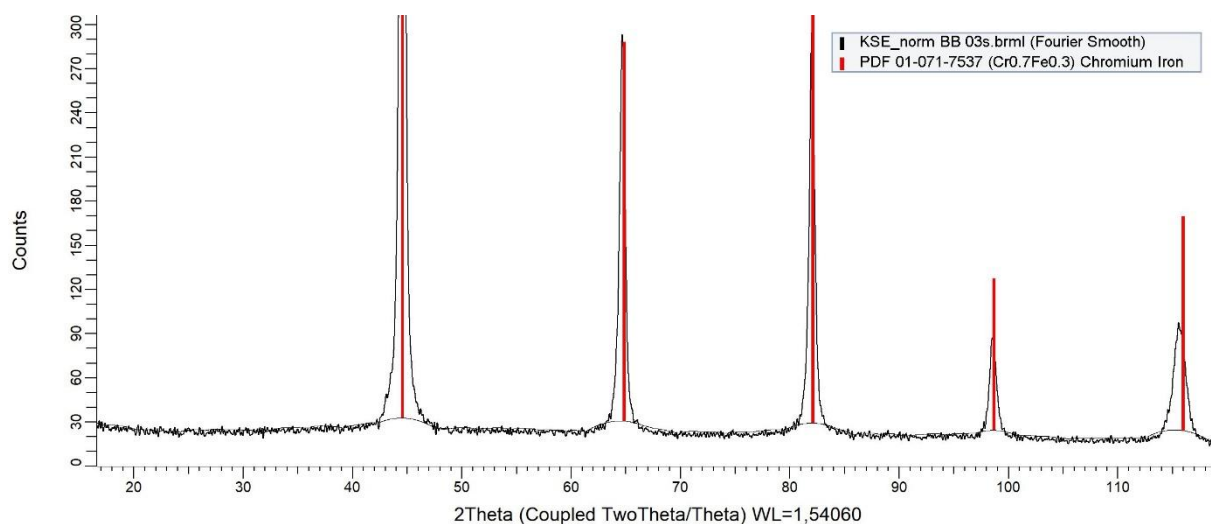
A 86., 87. és 88. ábra alapján, az alapbeállítással készült minta esetében a próbatest belsejének mikroszerkezetében nem kimutatható a 17-4PH rozsdamentes ötvöztet jellemző martenzites szerkezet, a mikroszerkezet tisztán ferrites. A felületen kis mértékben megváltozik a kémiai összetétel, ennek hatására megjelenik a másik allotróp módosulat, az ausztenit a mikroszerkezetben.



86. ábra, Alapbeállítással nyomtatott próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele



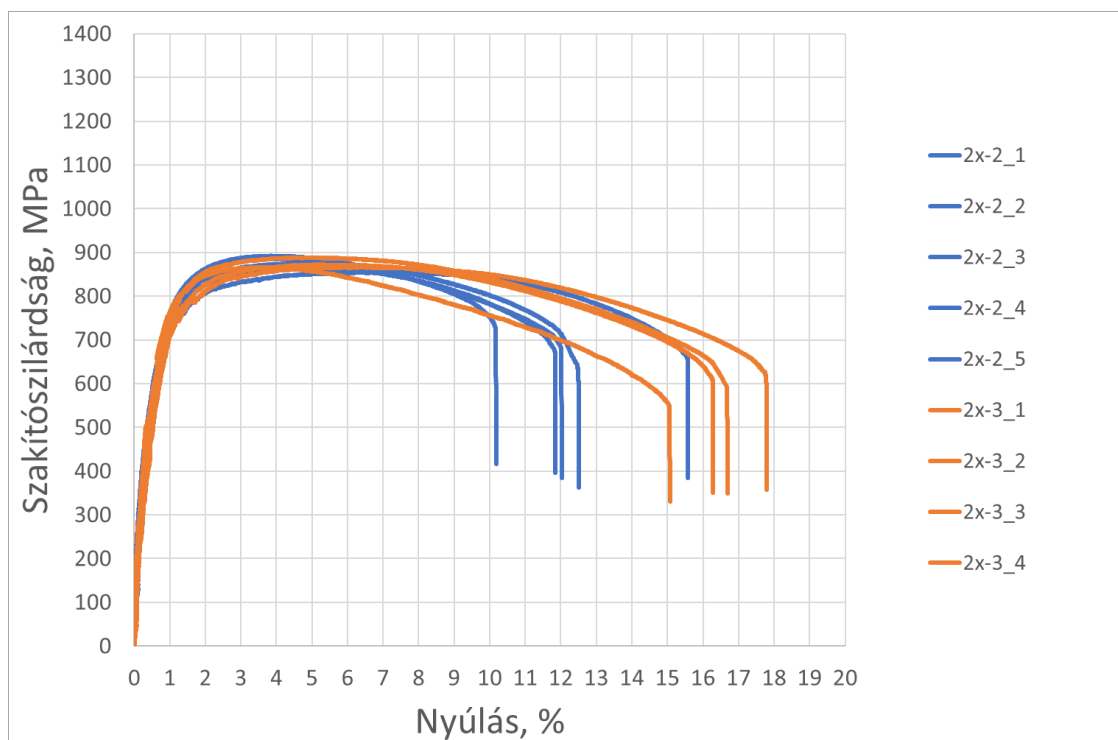
87. ábra, Alapbeállításon nyomtatott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



88. ábra, Alapbeállításon nyomtatott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye

4.4.7.2. Kétszer olvasztott állapotban gyártott darabok eredményeinek bemutatása

A kétszeres készített darabokat a VI. táblázat alapján készítettem el, ami abból állt, hogy a primer olvasztást követően a berendezés a már megszilárdult réteget pásztázta keresztül, nagyobb energiasűrűséggel. A 89. ábra ennek a vizsgálati állapotban elkészített darabok eredményeit mutatja be.

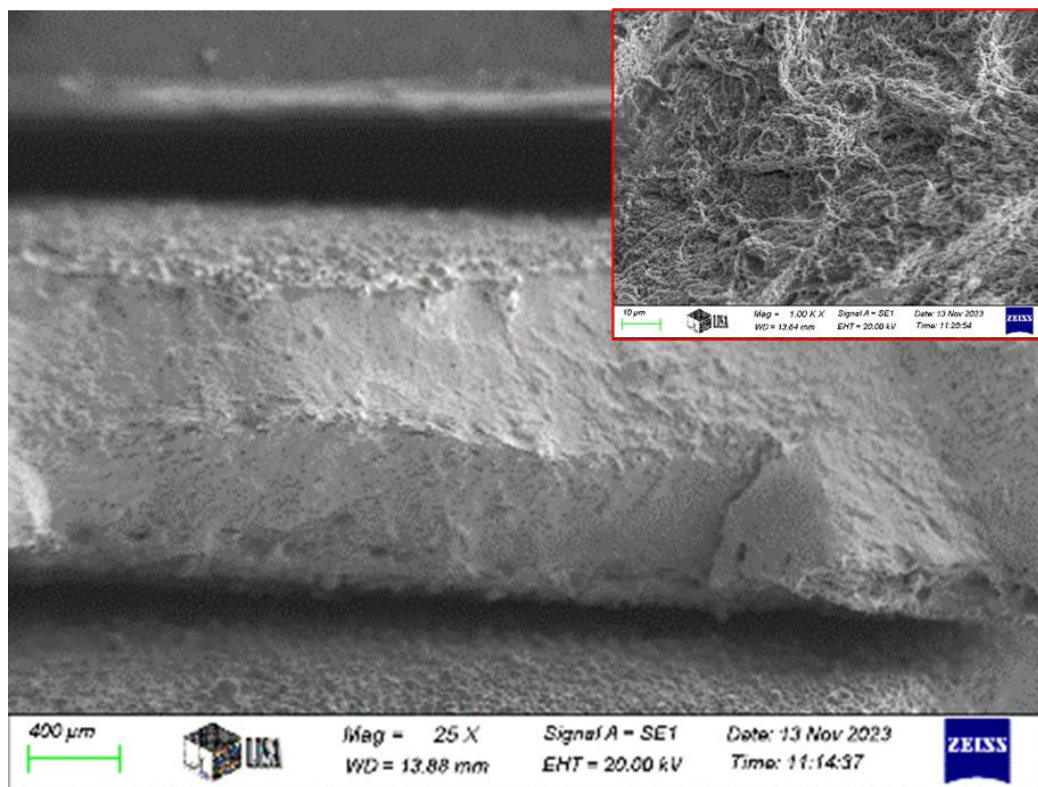


89. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek kétszer olvasztott állapotban

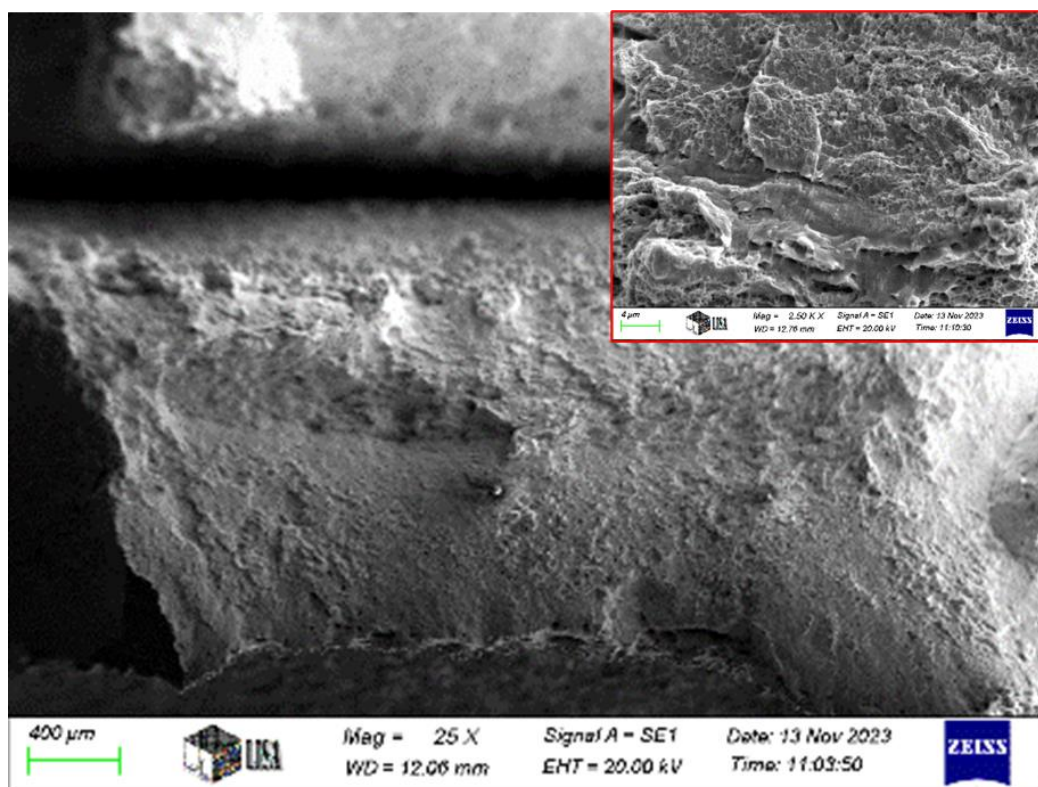
Az így elkészített 2 mm vastag próbatestek darabjai 15,6%-os nyúlási értéket értek el, 892 MPa szakítószilárdság mellett, a 3 mm-es próbatestek 17,8%-ot, 888 MPa szakítószilárdság mellett.

Ennek megfelelően, a kétszeres átolvasztás esetében a 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsága az alapnyomtatás 718MPa-os értékéhez képest 24,2%-kal, valamint a nyúlási érték az alapnyomtatás 7,02%-os értékéhez képest 122%-kal volt nagyobb. A 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsága az alapnyomtatás 766 MPa-os értékéhez képest 15,93%-kal, valamint a nyúlási érték az alapnyomtatás 8,41%-os értékéhez képest 111%-kal volt nagyobb.

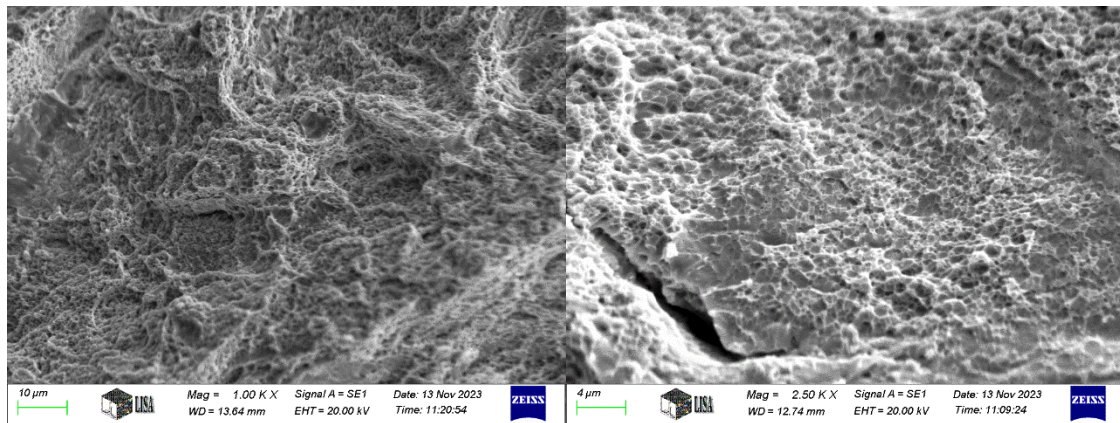
Ahogy a 90., 91., és 92. ábrák szemléltetik, a kétszeres átolvasztás a primer olvasztási folyamat során visszamaradt porszemcséket beleolvasztja a térfogatba, mely növeli a szerkezeti integritást és szívós törést eredményez, ami párhuzamba állítható a megnövekedett nyúlási értékekkel.



90. ábra, 2mm vastag, kétszeres olvasztású próbatest töretfelületi felvétele



91. ábra, 3 mm vastag kétszeres olvasztású próbatest töretfelületi felvétele

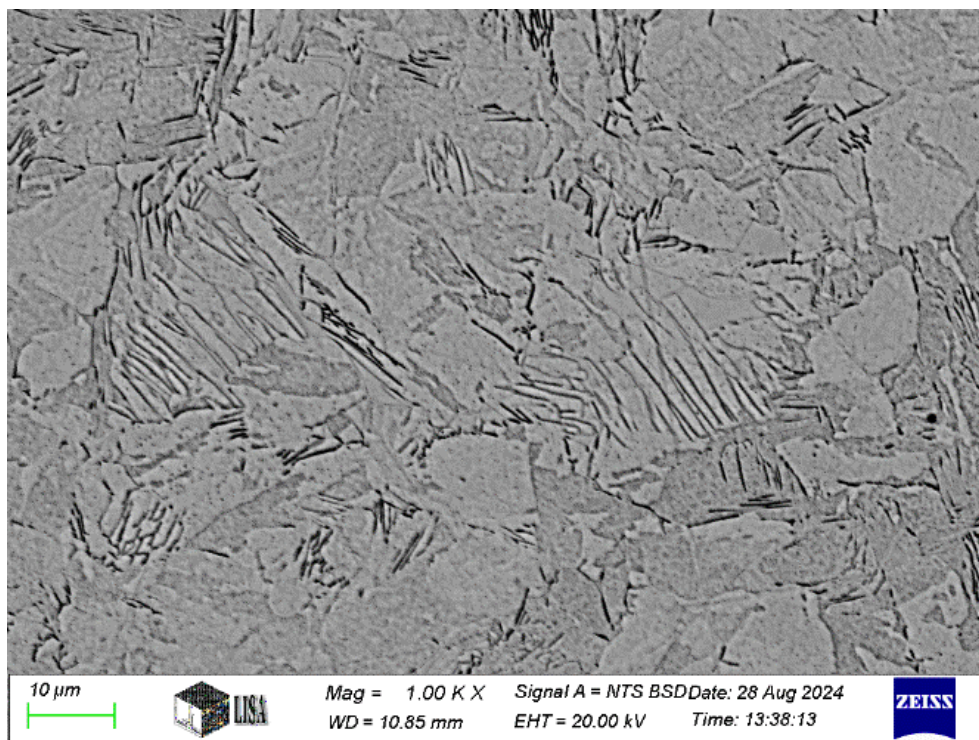


a) 2 mm

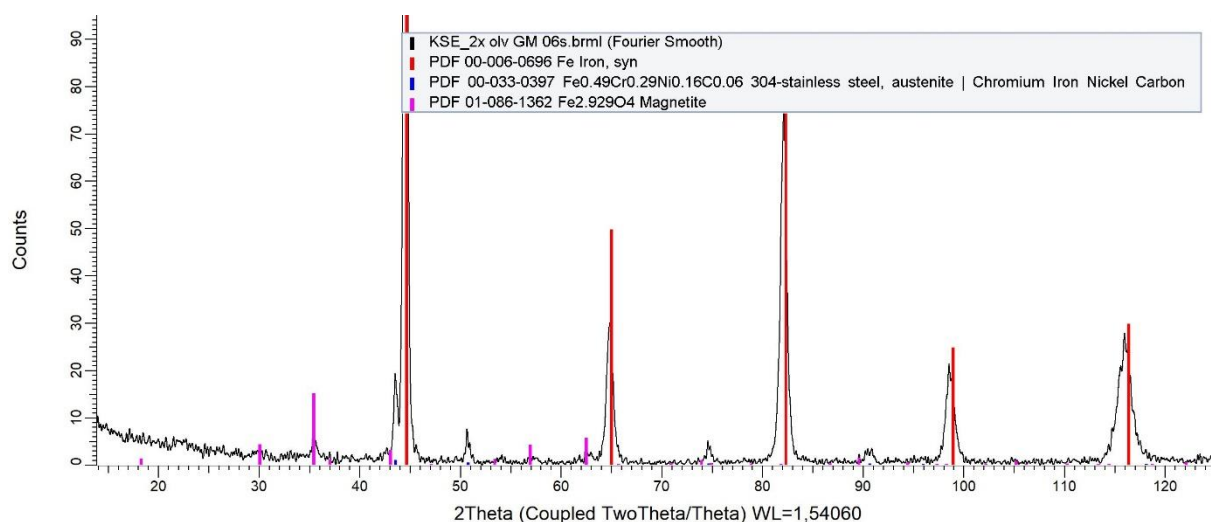
b) 3 mm

92. ábra, 2 és 3 mm vastag kétszeresen olvasztott próbatest szívós törése

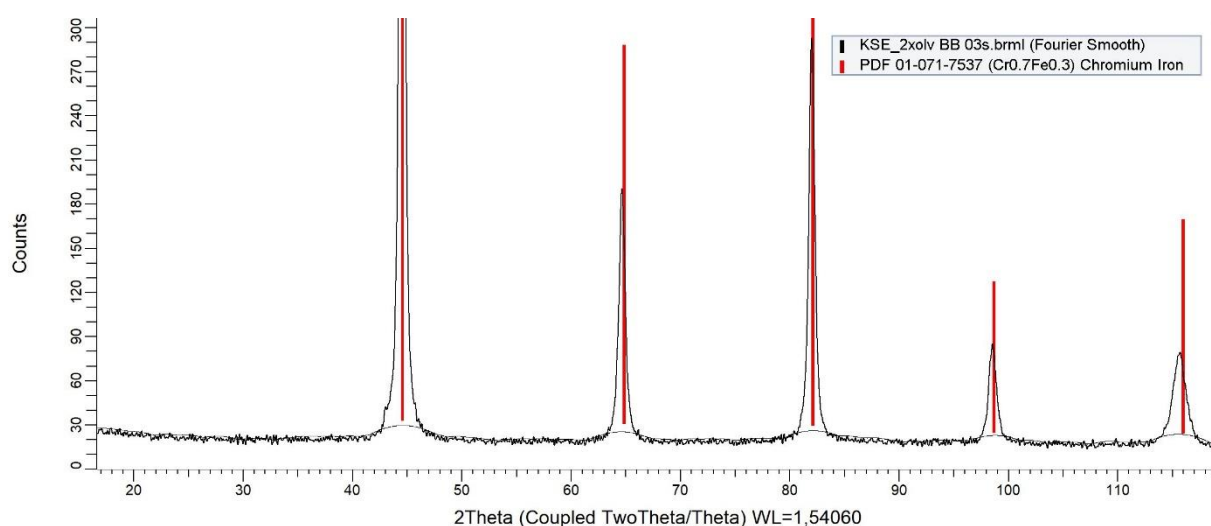
A 93., 94. és 95. ábrák alapján, a kétszer átolvasztott minták esetében a felületen, Fe oxid és magnetit jelent meg, valamint csekély mennyiségű ausztenit fázis. A próbatest belsejében a ferrites szerkezet mellett már markáns tűs szerkezet kimutatható.



93. ábra, Kétszer átolvasztva nyomtatott próbatestról készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele



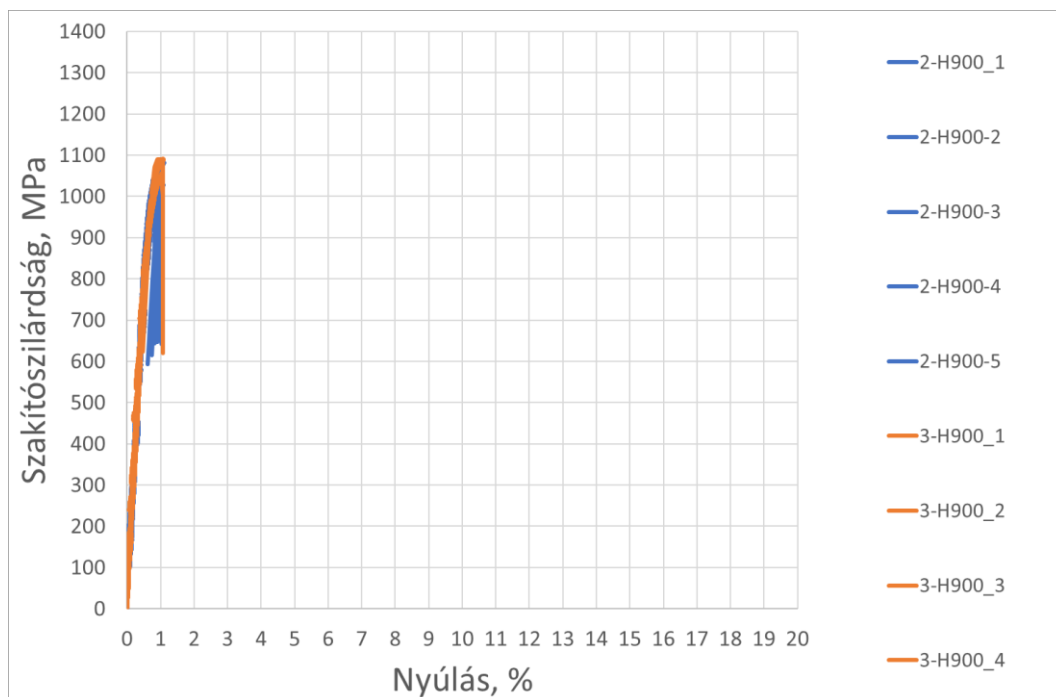
94. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



95. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye

4.4.7.3. Alapnyomtatási beállítással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok

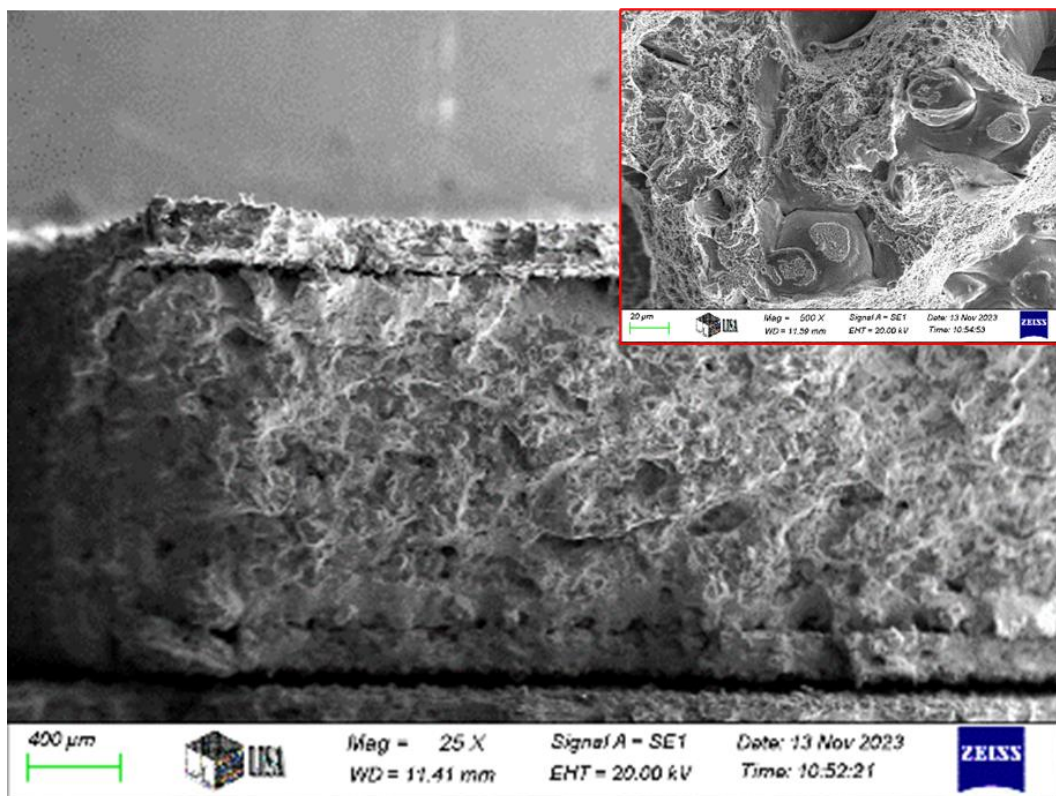
A 3D nyomtatási folyamat a VI. táblázat szerinti alapbeállításon zajlott, amit a 36. ábrán bemutatott H900-as hőkezelési ciklus követett. A 96. ábra mutatja be ezeknek a daraboknak a szakítószilárdsági és nyúlási értékeit.



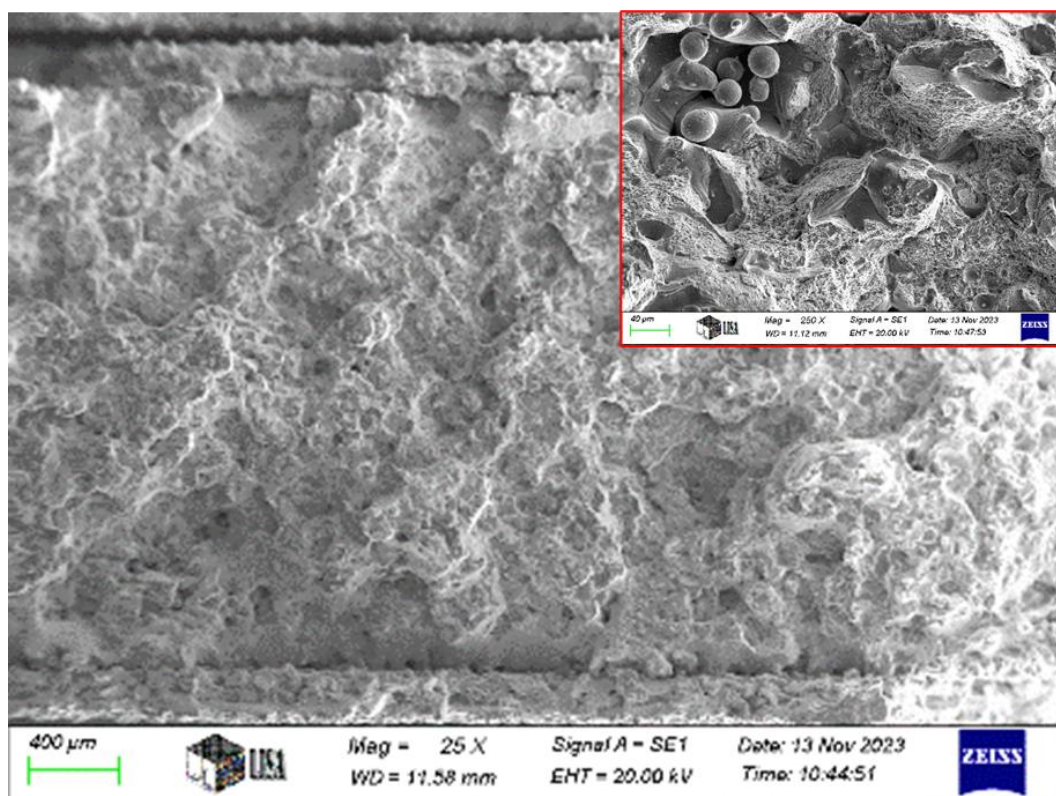
96. ábra, 2mm és 3mm vastag próbatestek H900 állapotban

Az alapnyomtatáson készített, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok esetében, a szakítószilárdság 2 mm vastag darabok esetében 1061 MPa volt 1,03% nyúlás mellett. A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság 1057 MPa volt, 0,98% nyúlás mellett. Ebben az esetben a darabok szakítószilárdsága az alapnyomtatással gyártott darabokhoz képest 2 mm vastag darabok esetében 47,77%-kal, 3 mm vastag darabok esetében 37,99%-kal nőtt. A nyúlási érték azonban mindkét esetben kevesebb lett, így a 2 mm vastag darabok esetében a nyúlás 85,33%-kal, a 3 mm vastag darabok esetében pedig 88,35%-kal lett kisebb.

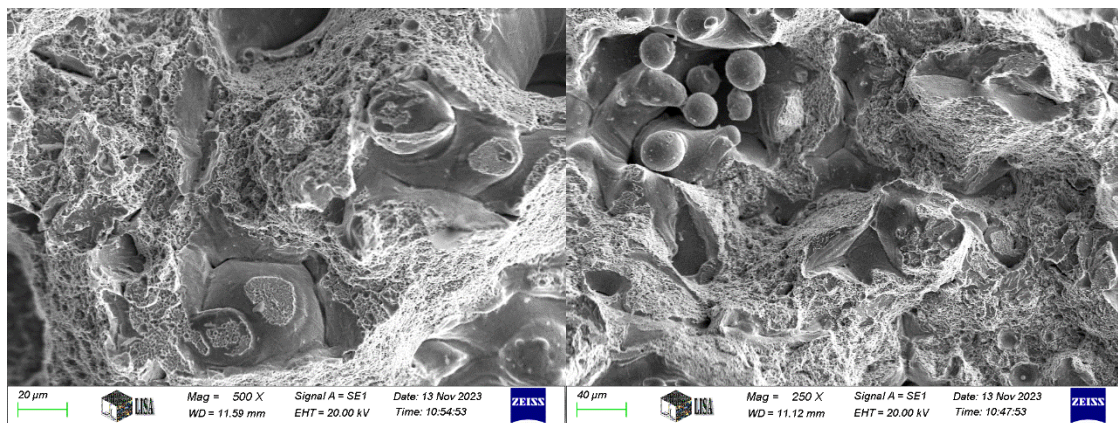
A H900-as öregítéssel kezelt próbatestek esetében a 97. , 98. és 99. ábrákon látható, hogy a primer olvasztás során visszamaradt porszemcsék továbbra is jelen vannak a térfogatban, azonban az öregítési program hatására a darabok ridegebbé válnak, így a megnövekedett szakítószilárdság mellett, szinte nyúlás nélkül törtek el.



97. ábra, 2 mm vastag, H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele



98. ábra, 3 mm vastag H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele

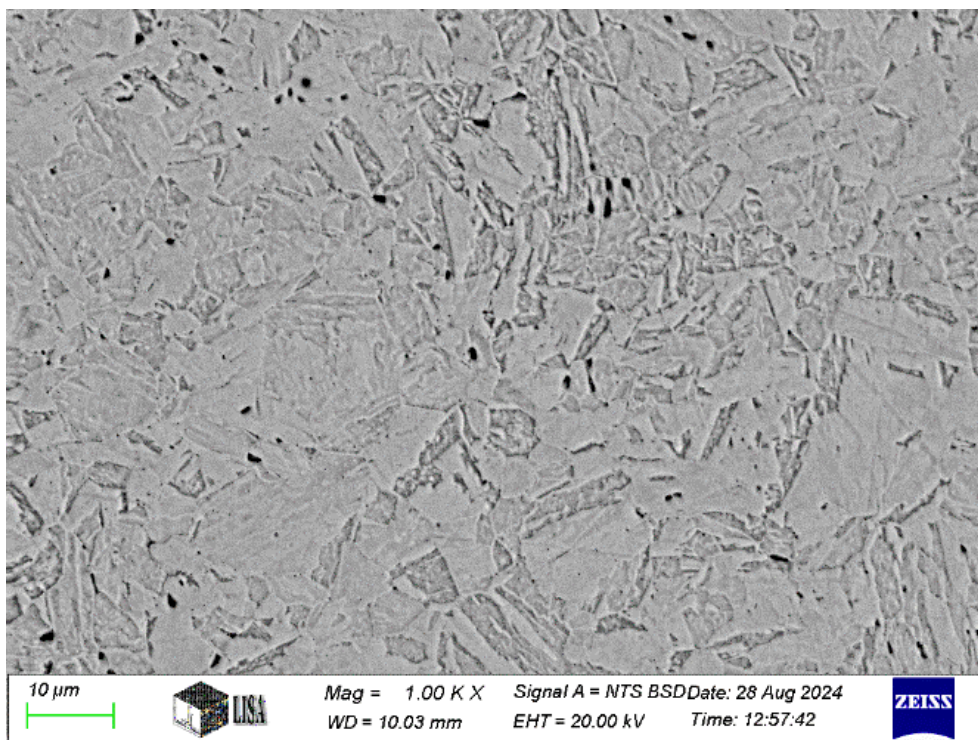


a) 2 mm

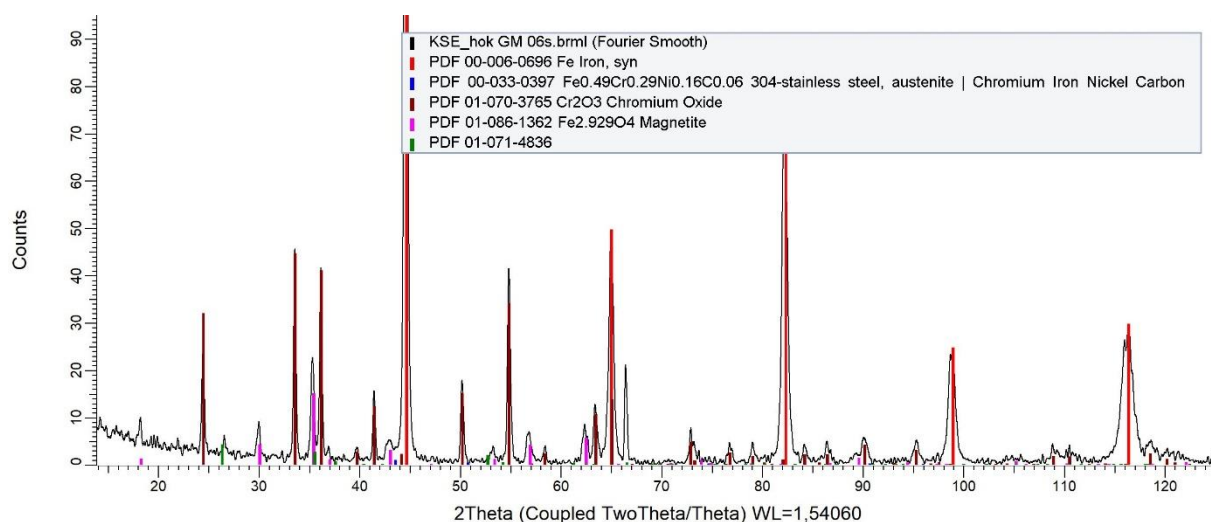
b) 3mm

99. ábra, 2 és 3 mm vastag H900 hőkezelt próbatest megmaradó nyomtatási hibájának felvétele

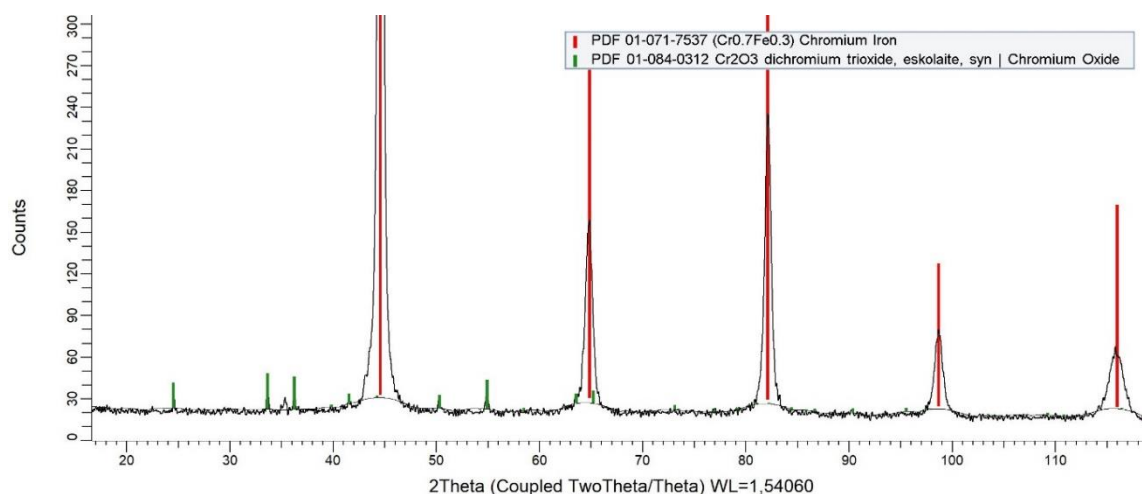
A 100., 101. és 102 ábrákon látható alapnyomtatással gyártott, majd H900 hőkezeléssel kezelt minták esetében a felületen Fe és Cr tartalmú oxidok azonosíthatók, valamint az ausztenit jelenléte is kimutatható. A próbatest belsejében ferrites szerkezet és kis mennyiségű martenzites, tűs szerkezet mellett kis mennyiségben króm oxid található.



100. ábra, Alap nyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele



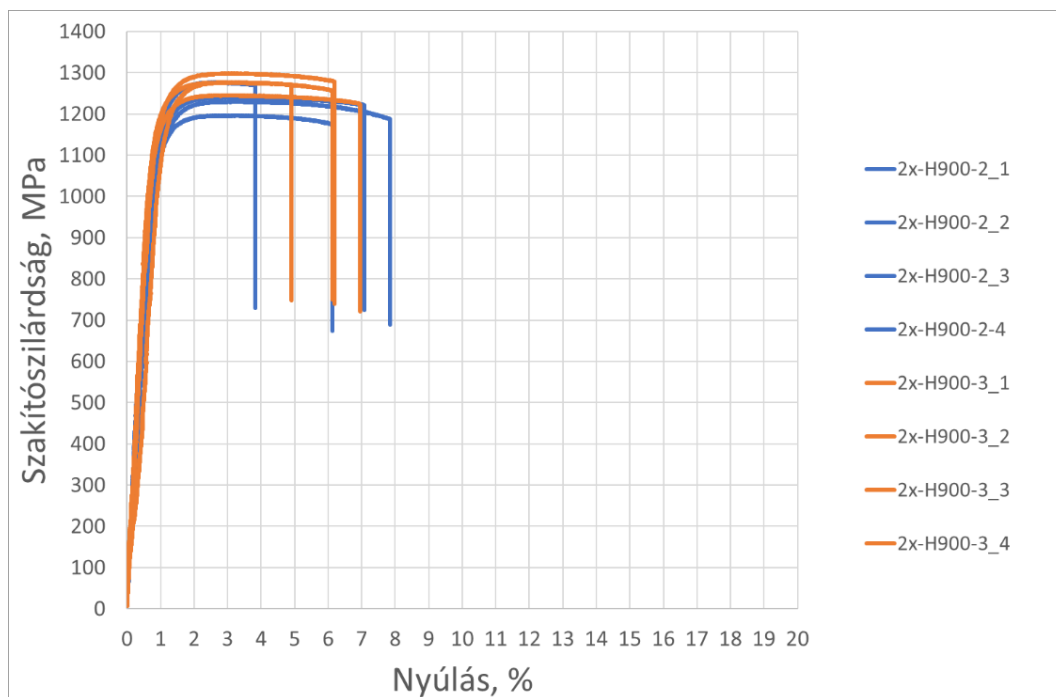
101. ábra, Alapbeállításon nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



102. ábra, Alapbeállításon nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye

4.4.7.4. Kétszeres átolvasztással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok

A VI. táblázatban bemutatott kétszeres olvasztást és a 36. ábrán látható H900-as hőkezelési állapotot kombináltam, ennek megfelelően 2 mm-es és 3 mm-es vastagság esetében is elkészítettem egy kétszeres olvasztási stratégián nyomtatott majd H900-as hőkezeléssel kezelt mérési sort. A 103. ábra ezeknek az eredményeit mutatja be.



103. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek egyszerre kétszer olvasztott és H900 állapotban

A kétszer átolvasztással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestek esetében a szakítószilárdság a 2 mm vastag daraboknál 1235 MPa volt 6,22%-os nyúlás mellett. A 3 mm vastag daraboknál a szakítószilárdság 1274 MPa volt, a nyúlás pedig 6,04%.

Ennek megfelelően, a kialakított rétegeken alkalmazott nagyobb energiasűrűségű ismételt átolvasztás és a H900-as hőkezelés együttes alkalmazása a „ZX” orientáción nyomtatott próbatesteken az alapállapothoz képest az alábbi különbségeket eredményezte:

- A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az alapnyomtatás 718 MPa-os értékéhez képest 1235 MPa volt, mely 72,01%-os növekedést, a nyúlási érték az alapnyomtatás 7,02%-os értékéhez képest, 6,22% volt, mely 11,40%-os csökkenést jelent.
- A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az alapnyomtatás 766 MPa-os értékéhez képest 1274 MPa volt, ami 66,32%-os növekedést, a nyúlási érték az alapnyomtatás 8,41%-os értékéhez képest 6,04% volt, mely 28,18%-os csökkenést jelent.

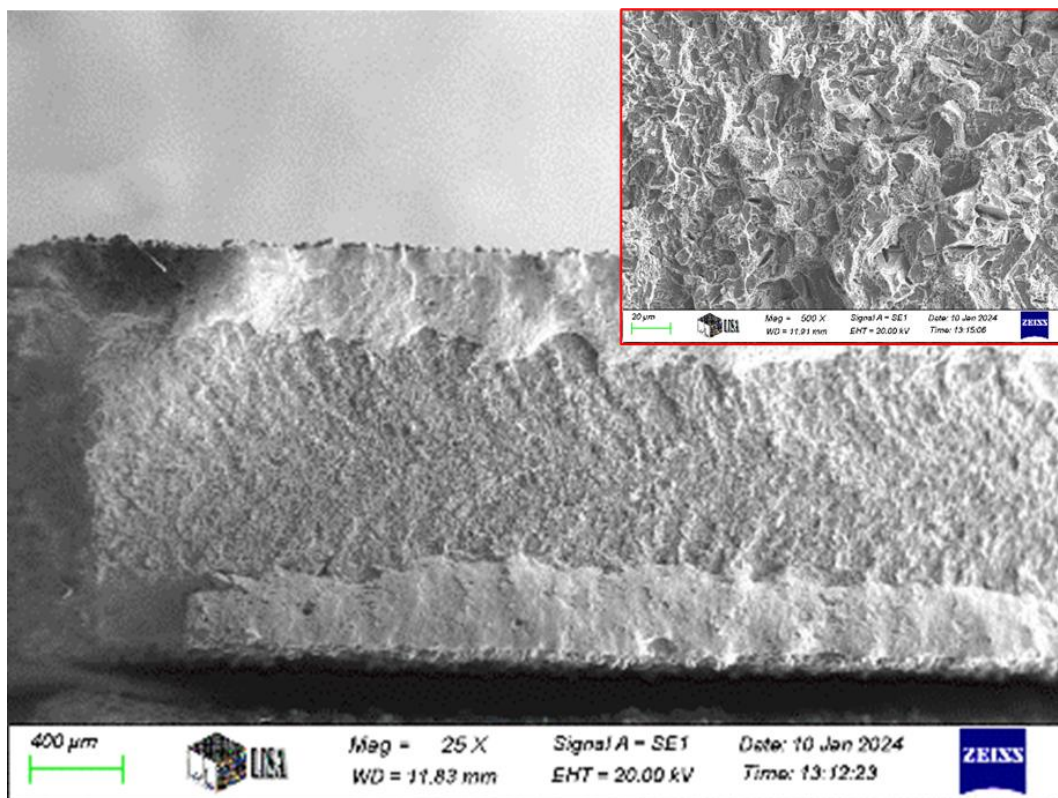
A szimplán H900-as hőkezeléssel kezelt darabokhoz képest az alábbi változást eredményezte:

- c. 2 mm vastag darabok esetében az alapbeállításon nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok 1061 MPa-os szakítószilárdságához képest, a kétszer átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt darabok esetében ez az érték 1235 MPa-ra változott, ami 16,4%-os növekedést, a nyúlási érték 1,03%-ról 6,22%-ra változása 503,88%-os növekedést jelent
- d. 3mm vastag darabok esetében az alapbeállításon nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok 1057 MPa-os szakítószilárdságához képest, a kétszer átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt darabok esetében ez az érték 1274 MPa-ra változott, ami 20,53%-os növekedést, a nyúlási érték 0,98%-ról 6,04%-ra változása 516,33%-os növekedést eredményez

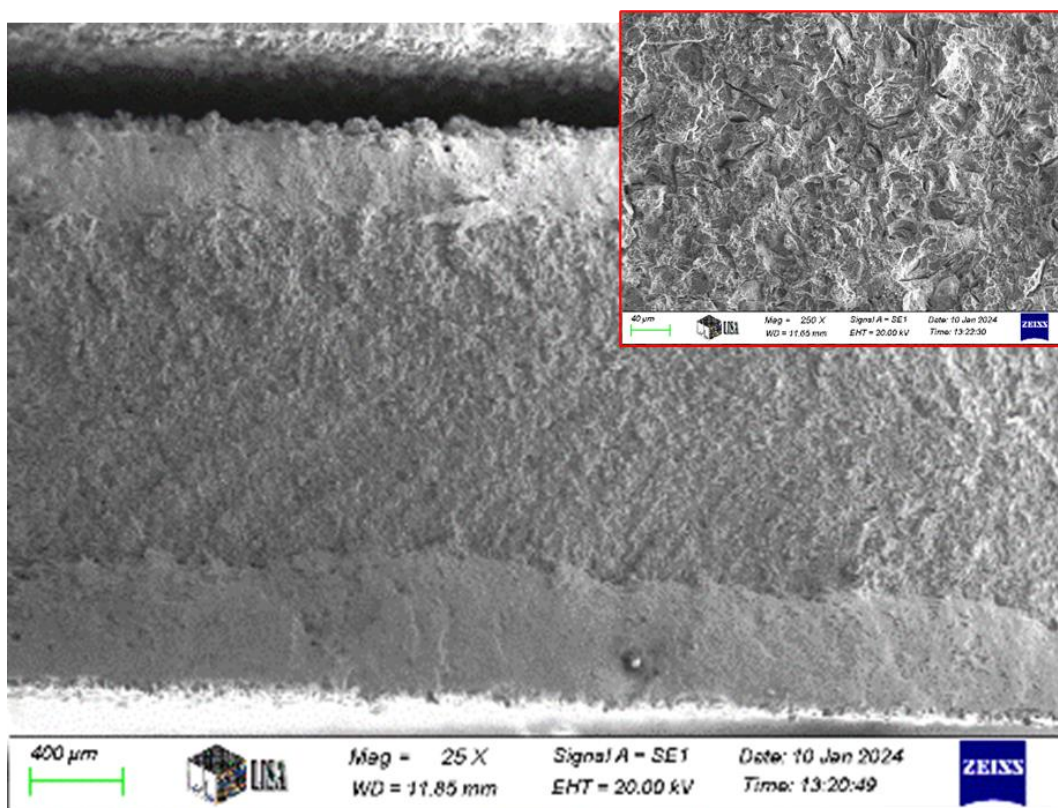
A szimplán kétszer olvasztott darabokhoz képest az alábbi változást eredményezte:

- e. A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság a kétszeres átolvasztás 892 MPa-os értékéhez képest 1235 MPa volt, mely 38,45%-os növekedést, a nyúlási érték a kétszeres átolvasztás 15,6%-os értékéhez képest 6,22% volt, mely 60,13%-os csökkenést jelent.
- f. A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság a kétszeres átolvasztás 888 MPa-os értékéhez képest 1274 MPa volt, ami 43,47%-os növekedést, a nyúlási érték a kétszeres átolvasztás 17,80%-os értékéhez képest 6,04% volt, mely 66,07%-os csökkenést jelent.

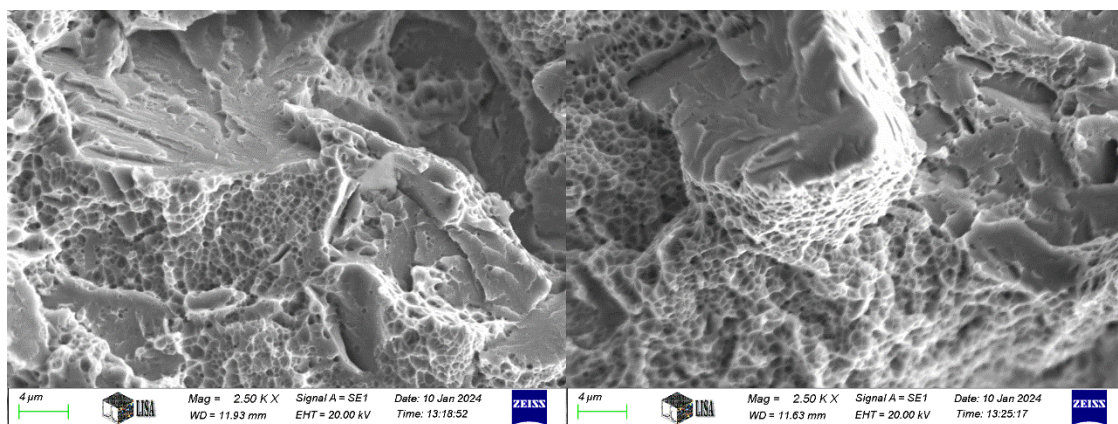
Abban az esetben, ha a gyártott darabok folyamat közben egy kétszeres átolvasztáson készülnek, amit H900-as hőkezelési program követ, a két eljárás hatása egyszerre vehető észre a darabok mikroszerkezetében. Ahogyan azt a 104., 105. és 106 ábrák is szemléltetik, a térfogatban felváltva vannak jelent a szívós és rideg törési felületek, valamint a felvételeken nem látható nyomtatási folyamat után visszamaradó, nem megolvasztott porszemcse.



104. ábra, 2 mm vastag egyszerre kétszeresen olvasztott és H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele



105. ábra, 3 mm vastag egyszerre kétszeresen olvasztott és H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele

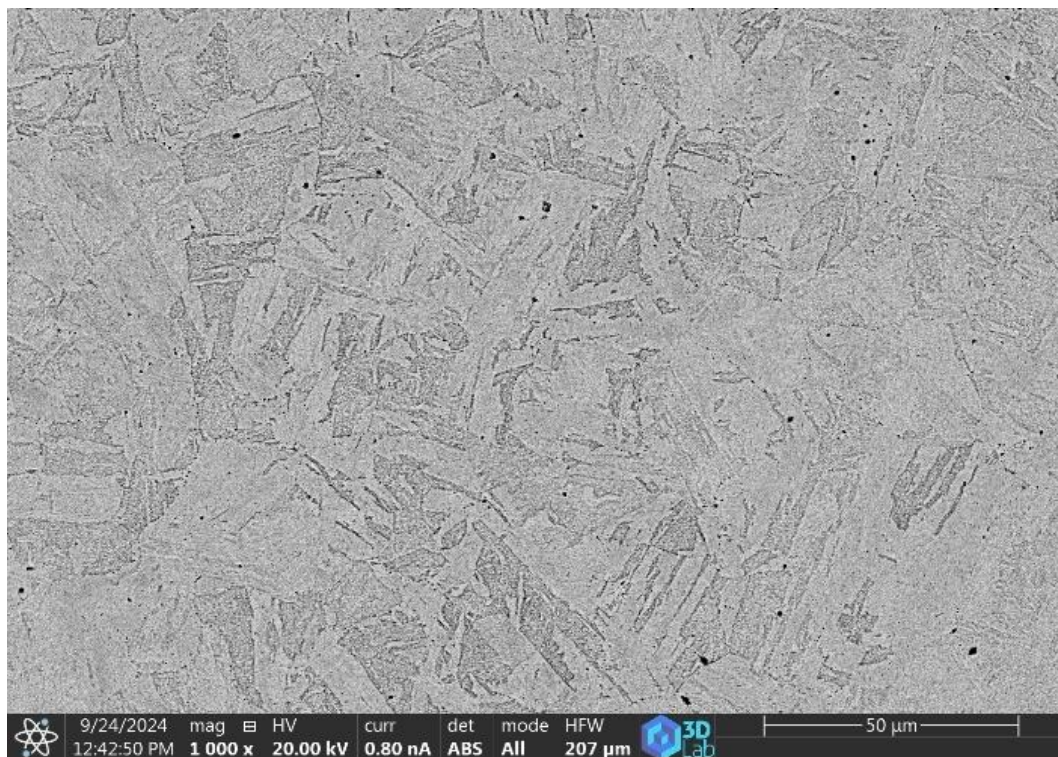


a) 2 mm

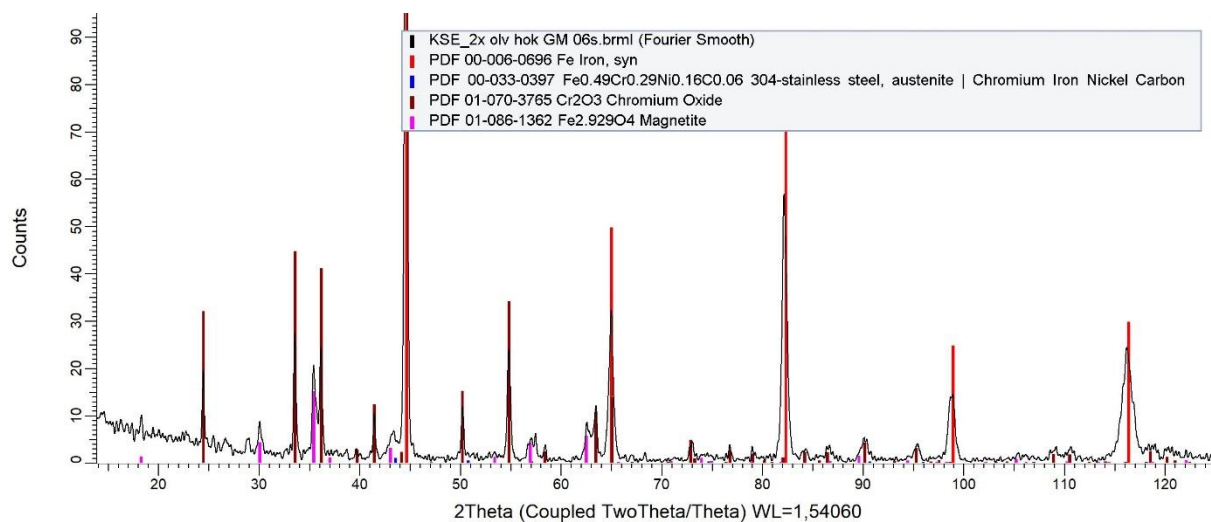
b) 3 mm

106. ábra, 2mm vastag egyszerre kétszeresen átolvasztott és H900 hőkezelt próbatest szívós és rideg törési felülete

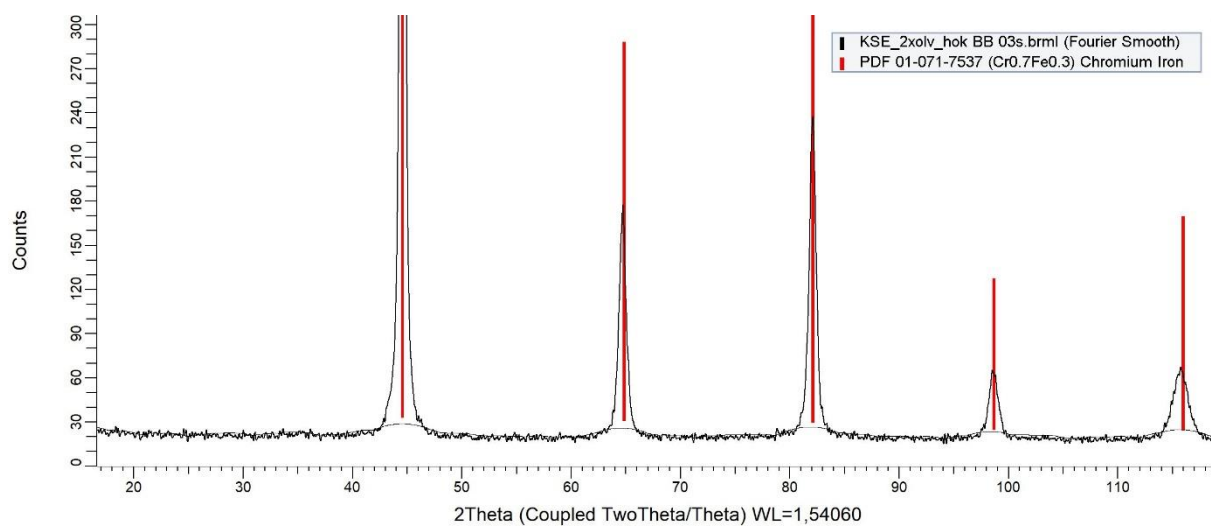
A 107., 108., és 109. ábrákon látható kétszer átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt minták esetében a felületen az oxidáció miatt Fe és Cr tartalmú oxidok jelentek meg, valamint ebben az esetben is azonosítani lehetett az ausztenit fázist. A próbatest belsejében teljesen ferrites szerkezet alakult ki ebben az esetben is, valamint kimutathatók lemezes, tűs és idiomorf szemcsék is.



107. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele



108. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



109. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye

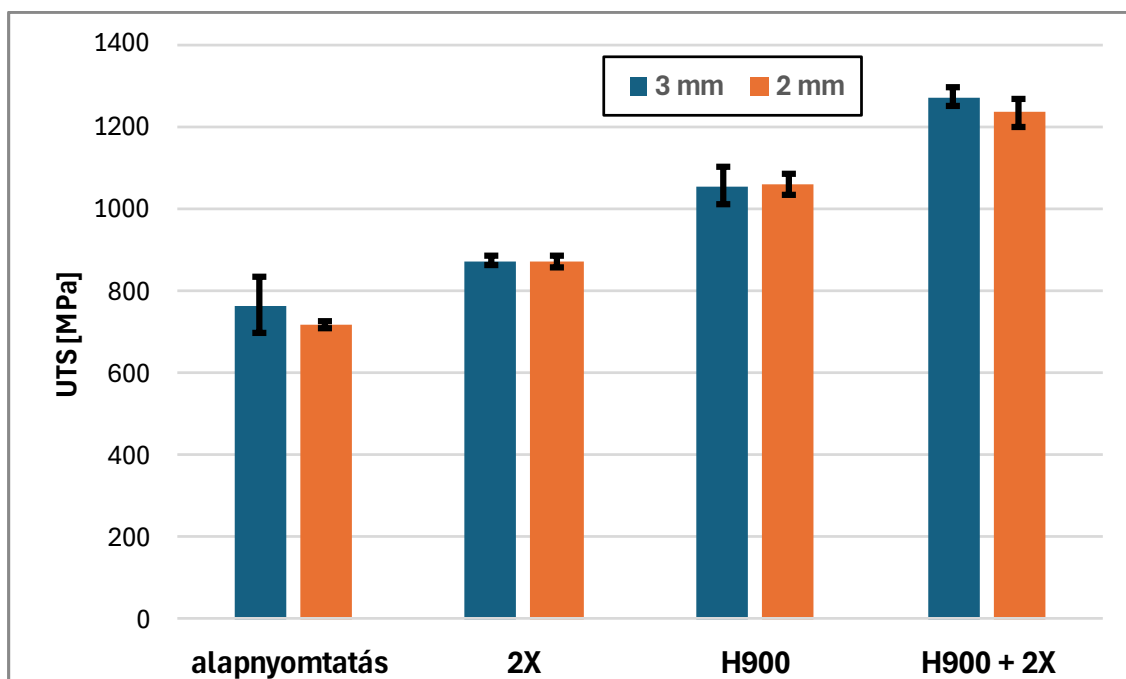
4.4.8. A „ZX” orientációs 3D nyomtatási eredmények összefoglalása

A vizsgálataim eredményeinek feldolgozásával az alábbi következtetéseket vontam le:

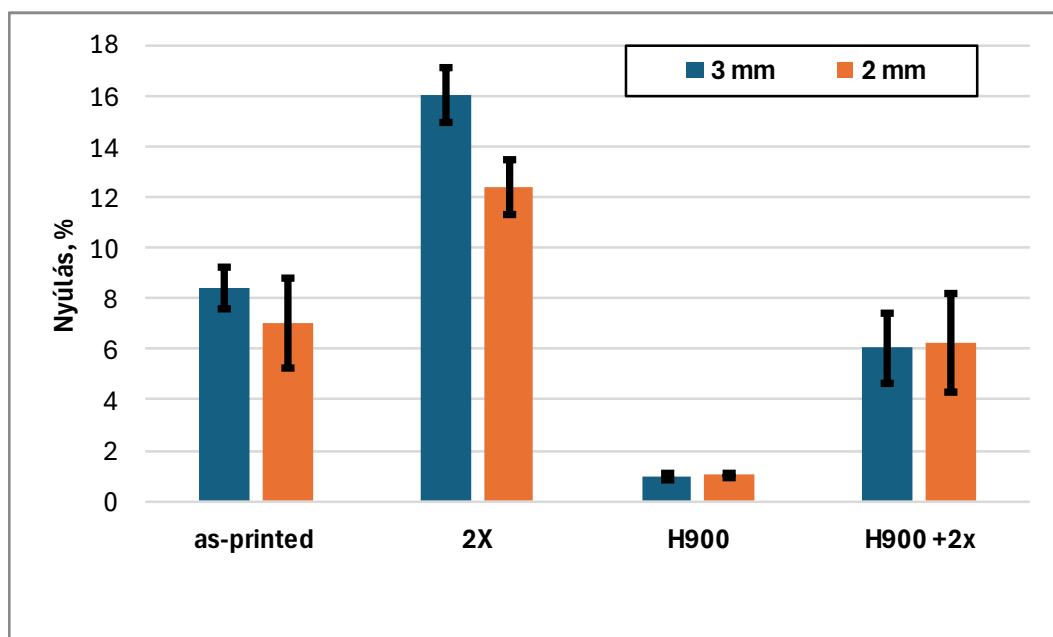
A minták mikroszerkezetében ferrit fázis azonosítható, amely a vas térben középpontos kockarácsú módosulata. Az egyes mintákban a ferrit fázis morfológiája eltérő.

- Az alapbeállítással készült minták esetében nincs jellegzetes martenzites, tűs szemcsealak a mikroszerkezetben.
- A H900 hőkezelt próbatestekben már ez a tűs szemcseszerkezet felismerhető, azonban azonban visszamaradó porszemcsék továbbra is jelen vannak a térfogatban.
- A kétszer átolvasztott minták esetében markáns lemezes, tűs jelleg figyelhető meg, valamint a visszamaradó porszemcsék beolvasztásra kerültek a térfogatba.
- A kétszer átolvasztott és H900-as hőkezelt minták esetében a tűs, lemezes és az idiomorf szemcsék jelentek meg.

Ezek alapján, a 110. és 111. ábra a négy mérési sor együttes szakítószilárdsági szemléltetését mutatja be.

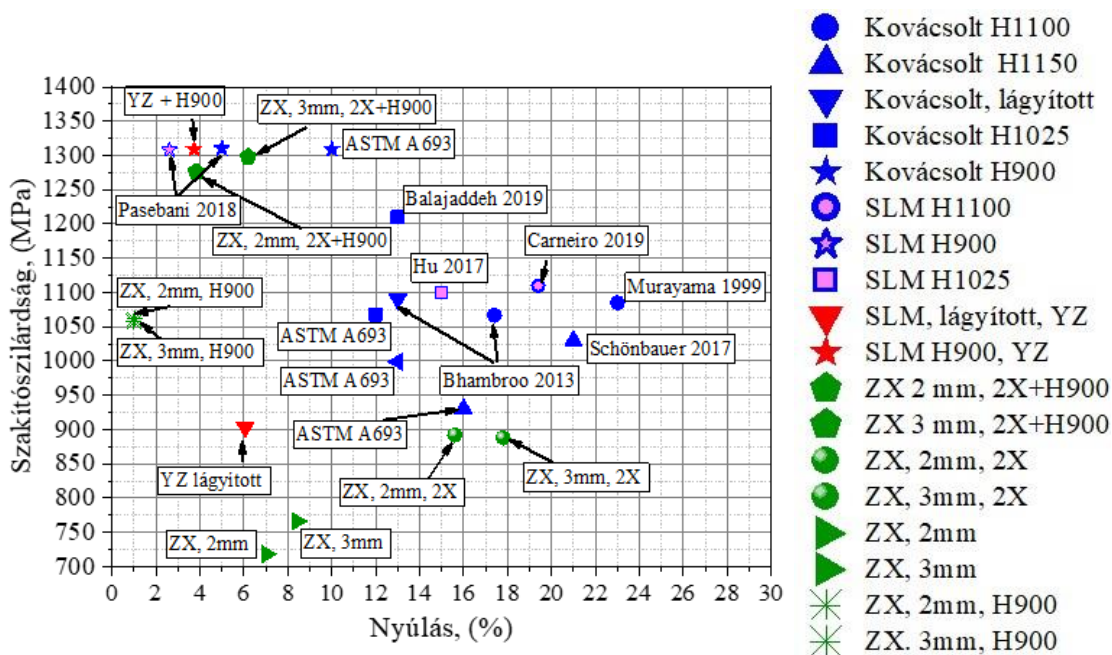


110. ábra, A „ZX” orientációban nyomtatott darabok szakítószilárdsága a különböző vizsgálati állapotokban



111. ábra, A „ZX” orientációban nyomtatott darabok nyúlása a különböző vizsgálati állapotokban

A 77. ábra kiegészítéseként a 112. ábra helyezi el a „ZX” orientált próbatesteket a bemutatott irodalmi mátrixban. Az ábrán látható jelölések alapján, a kékkel és kék körvonallal jelölt értékek a feldolgozott szakirodalomból származnak, a piros értékek „YZ” orientáción nyomtatott saját eredményekből, illetve a zöld, a „ZX” orientációs saját vizsgálatok eredményei.



112. ábra, Módosított 76. ábra, a „ZX” orientációs darabok összehasonlító különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [74]-[83]

A 112. ábra bemutatja, hogy az általam készített „ZX” orientációjú szakítópálcák eredményei, 2 mm-es vastagság esetében 1235 MPa, valamint 3 mm-es vastagság esetében 1274 MPa, hogyan viszonyulnak a saját „YZ” orientációjú, alapnyomtatási beállítású, majd H900-as hőkezelési programmal kezelt mérési eredményekhez, valamint a feldolgozott szakirodalomban megjelent hasonlóan „YZ” orientált és hőkezelt darabokhoz, illetve kovácsolt és H1100, H1150, H1025 és H900-as hőkezelési programmal kezelt darabokhoz. Ez alapján az alábbi megállapítást tettem:

- a) A „ZX” nyomtatási orientáción, a kétszeres átolvasztás és a H900-as hőkezelési program együttes alkalmazása az alapnyomtatáshoz képest akár 66 százalékos szakítószilárdság növekedést lehet elérni, csekély, mindössze 6%-os nyúlási érték csökkenés mellett, ezzel elérhetővé téve a feldolgozott szakirodalom által kedvezőtlennek ítélt nyomtatási orientációt.

A 3D fémnyomtatással gyártott darabok felhasználhatóságának egyik feltétele, hogy meg kell felelnie azoknak az elvárásoknak, melyek érvényesek a különböző hagyományos alakadási technológiával gyártott, kovácsolt, öntött, CNC esztergált, húzott, hajlított stb., darabokra. Ennek megfelelően az általam gyártott „ZX” nyomtatási orientációban elkészített darabok az alábbi lehetséges esetekben alkalmazhatók:

- A „ZX” orientációs alapnyomtatás alkalmazható abban az esetben, ha egyedi alkatrészek gyártása esetében a méretpontosság elengedhetetlen tényező, azonban mechanikai igénybevételek szempontjából elég, ha 700-800 MPa szakítószilárdsági értéket képes elviselni, 7,02-8,41% nyúlás mellett.
- A „ZX” orientációs alapnyomtatás és H900-as hőkezelés együttesen alkalmazható abban az esetben, ha az egyedi alkatrészek gyártása esetében a követelmények nagy szakítószilárdságot szabnak meg, amellett, hogy maximális terhelés mellett, maradó alakváltozást nem szenvedhetnek a darabok.
- A kétszeres átolvasztás alkalmazás alkalmazható abban az esetben, ha az egyedi alkatrészek gyártása esetében szakítószilárdsági szempontból 800-900MPa érték tartomány elérés a cél, azonban a nyúlási érték 15,6-17,8%-ra történő növelése lehetővé teszi, hogy nagy ciklikus terhelésnek álljon ellen. A kétszeres átolvasztás további előnye, hogy a beolvasztja a primer nyomtatási ciklus során visszamaradt porszemcséket, így jobb szerkezeti integritást biztosít.
- A kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelés együttesen alkalmazható, amennyiben egyedi alkatrészek alkalmazásával kívánunk helyettesíteni korábban

hasznló H900-as hőkezeléssel kezelt kovácsolt darabokat, ezzel megspórolva az új szerszám költségeit, illetve elérhetővé válik olyan termékek alkalmazása, melyeket kovácsolással nem, vagy csak nehezen lehet előállítani. A kétszeres olvasztás javítja az alapnyomtatási állapothoz képest a mikroszerkezetet, amit, ha H900-as öregítési hőkezelés követ, a két eljárás hatása együtt jelenik meg a mikroszerkezetben. Ez az együttes hatás eredményezi a „ZX” orientációban gyártott darabok maximális szakítószilárdságát, az alapállapothoz képest minimális nyúlás csökkenés mellett.

- A „ZX” orientáción történő 3D nyomtatás alkalmazásával érhető el a maximális méretpontosság, mivel ezen az orientáción következik be a legkisebb maradó alakváltozás a tárgyasztalról való eltávolítást követően. További előnye, hogy a tárgyasztal Z irányú darabokkal való feltöltése jelentősen növeli a berendezés egy cikluson nyomtatható darabjainak számát, így növelve a folyamat produktivitását.

5. Összefoglalás

Mivel gyakorlati felhasználásban nagyon ritka az olyan eset, ahol egyértelműen el lehet dönteni egy bonyolult alkatrész esetében, hogy milyen orientáción érdemes elkészíteni, ezért ez a metódus lehetőséget ad arra, hogy ezt a tulajdonságbeli függőséget teljesen figyelmen kívül lehessen hagyni. Ez segíti a tárgyasztal könnyebb feltöltését, potenciálisan könnyíti a testek eltávolítását a folyamat végén, valamint utat enged újabb geometriai megoldások megvalósításának. A kétszeres olvasztási program ugyan tovább lassítja az egyébként is lassú folyamatot, azonban a tárgyasztalon elhelyezett termékek mennyiségének növelése ezt a befektetett idő többletet maradéktalanul megtéríti. A folyamat végén alkalmazott hőkezelési program pedig megadja azt a szakítószilárdsági növekedést, ami az így elkészített darabokat a csúcserőértékek között helyezi el.

Kutatómunkám során összefoglaltam és ismertettem az additív gyártástechnológia történetét, valamint a kialakított 3D nyomtatási eljárásokat. A 3D nyomtatás egy olyan gyártástechnológiai irányzat, mely sok, akár ipari szereplő számára napjainkban még egzotikus jellegű, megfoghatatlan folyamat, azonban a súlycsökkentés, fogyasztás és energia csökkentés, illetve egyéb zöld irányzatok egyre inkább arra kényszerítik ezeket a szereplőket, hogy nyitottak legyenek ezekre a feltörekvő irányzatokra is. Polimerek 3D nyomtatása mára már abszolút elterjedt jelenség, már akár az otthonokban is elérhetőek, kis teljesítményű és munkaterű berendezések melyek hobbifelhasználásra, illetve az otthoni tevékenységek során megrongálódó, nehezen pótolható alkatrészek gyors és megbízható legyártására egyaránt felhasználható. Ezen folyamatok ipari mértékű megvalósításával már számos cég foglalkozik, valamilyen szálerezített, nagy teherbírású kompozit alapanyagokkal, vagy nagy bonyolultságú, egyedi szériatermékekkel. Munkámmal elsősorban az alkatrészek legyárthatóságának kívántam új metódusokat feltárni, főképp az orientációs különbségekre koncentrálni.

Kutatómunkám főbb eredményei a maradó feszültség mérő próbatestek felhajlásának egyenletekkel meghatároztam a különböző vastagságok közötti összefüggést, valamint meghatároztam egy faktor számot, mely segítségével alacsony hibahatár mellett előre ki lehet számolni mekkora lesz a folyamat közbeni módosítás, név szerint a kétszeres olvasztás, hatása a felhajlási értékekre.

A szakítószilárdsági vizsgálatokra vonatkozóan átfogó vizsgálatokat folytattam különböző próbatest méretekkel, vastagságokkal, orientációkkal, valamint folyamaton belüli

és folyamatot követő kezelési lépésekkel. Mivel a különböző nyomtatási ciklusok közötti eredményekben túl nagy szórás van, így közvetlenül nem összehasonlíthatók, így „ZX” orientációba tájolva a próbatesteket egy ciklusban készítettem el a teljes vizsgálati szettet. A „ZX” orientációban nyomtatott darabokra az alapnyomtatás beállításán felül nagyobb energiasűrűségű kétszeres olvasztási stratégiát alkalmaztam, ami a már megszilárdult réteget olvasztotta ismét újra. Ez a fajta újraolvasztás teljesen kiküszöböli a nagyobb energiasűrűség által létrehozott felporzási jelenséget, mely akkor jelentkezik, ha túl nagy energia éri a porágy felszínét. Mivel ebben az esetben az energia nem porággal találkozik, hanem szilárd felülettel, nem kerülnek porszemcsék a nyomtatás atmoszférájába, így nem defókuszálja a lézert, ezzel lehetővé téve, hogy a rendszerbe vitt energia nagyobb hatásfokkal tudjon hasznosulni. A „ZX” orientációs vizsgálataim legnagyobb eredménye, hogy az ebben az orientációban nyomtatott darabok szakítószilárdsági és nyúlási eredményei hasonló mértékűek, mint a hagyományos eljárással, illetve a preferált „YZ” orientáción nyomtatott darabokhoz. Ezzel azt a megállapítást tettem, hogy a kétszeres átolvasztás és a H900-as hőkezelés együttes alkalmazása elhanyagolhatóvá teszi a nyomtatási orientációt, így eliminálva az egyik legjelentősebb 3D nyomtatási tervezési faktort.

6. Summary

During my research I have summarized the history of additive manufacturing and described the existing 3D printing processes. The 3D printing itself is a manufacturing technology trend that is still an exotic and elusive process for many industries, but for high-end weight reduction, and the increase of energy efficiency this technology most not be ruled out. The 3D printing of polymers is now an absolute mainstream phenomenon; it is available in many households already. These smaller, low power and labour-intensive equipments can be used for hobby applications as well as low serial productions of hard to replace parts for household devices which are used in day-to-day activities. A number of companies are already involved in the industrial scale-up of these processes, either with fibre-reinforced, heavy-duty composite materials or with highly complex, customized mass-produced products. During my research I wanted to explore new methods for the manufacturability of components, focusing mainly on orientation differences.

The main results of my research are that I have determined the correlation between different printing thicknesses using the residual stress measuring specimens with equations, and I have determined a factor number that can be used of an accurate forecast, which can predict the effect of the in-process modification, namely the double melting, on the deformation, with a low margin of error.

For the tensile strength tests, I conducted a comprehensive series of tests with different specimen sizes, thicknesses, orientations, and in-process and post-process treatment steps. Since there is too high deviation between parts of different printing jobs, those are not directly comparable. Thus, I have oriented the specimens to the “ZX” orientation and performed the complete test sequence using one printing cycle. In addition to the base print setting, I applied a higher energy density double melting scanning strategy to these specimens, which remelted the already solidified layers. This type of re-melting completely eliminated the dusting phenomenon created by the higher energy density, which occurs when too much energy is applied to the surface of the powder bed. Since in this case the energy does not hit the powder bed but a solid surface, no dust particles are being ejected to the atmosphere of the printing volume, thus not defocusing the laser, allowing the energy introduced to the system to be used more efficiently. The biggest result of my “ZX” orientation tests is that the tensile strength and elongation results for parts printed in this orientation are similar to those for parts printed using the conventional processes and the preferred “YZ” orientation. Of this phenomenon, I found that the combination of double

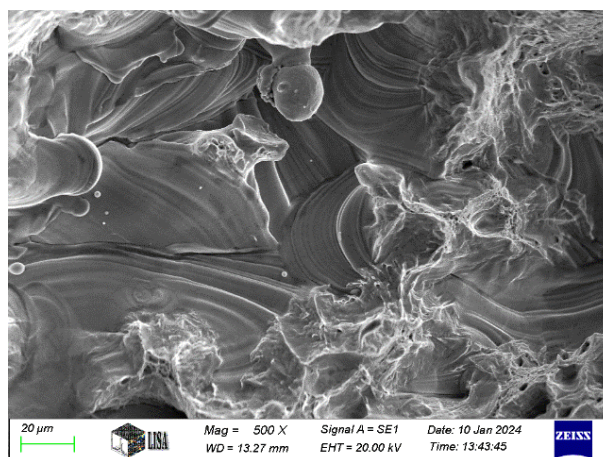
remelting and H900 heat treatment makes the printing orientation negligible, eliminating one of the most significant 3D printing design factors.

Since in practical applications it is very rare to be able to clearly decide on which orientation to make a complex part, my research gives the possibility to completely ignore this crucial factor, making it easier to fill up the printing volume of the machine and making new ways for part designing processes. The downside of the process is that the double melting program slows down further the already slow process, however, the quality improvement value that it delivers in terms of increasing the number of products placed on the building platform is a full return on the time invested. The applied heat treatment program at the end of the process gives the increase in tensile strength that puts the results in the peak range in the literature diagram.

7. Tézisek

1. Tézis

Az SLM porágyas 3D nyomtatási folyamat egyik negatív tulajdonsága, a T.1. ábrán bemutatott tökéletlen olvasztási jelenség, miszerint jelen vannak a 3D nyomtatott testek térfogatában olyan porszemcsék, melyek nem kerültek olvadék állapotba. Ezek a visszamaradó porszemcsék csökkentik a gyártott testek szerkezeti integritását, illetve növelik a porozitásuk százalékos mennyiségét.



T.1. ábra, SLM 3D nyomtatási folyamat során a térfogatban visszamaradó porszemcse

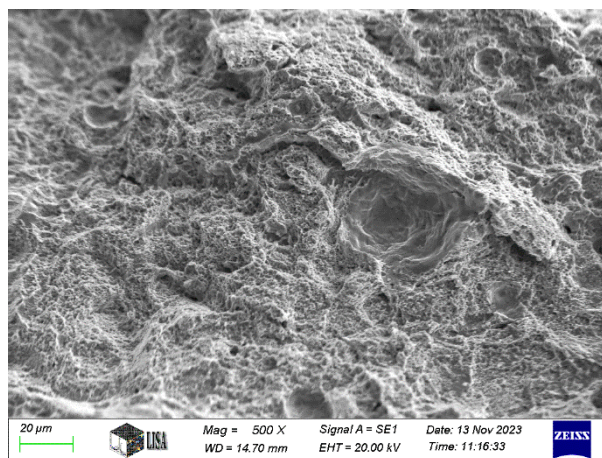
Ennek a jelenségnek a 3D nyomtatási folyamaton belüli mérséklésére alkalmaztam egy, a T.1. táblázat által bemutatott második olvasztási ciklust. Ezt a második olvasztási ciklust, a primer folyamat által már átolvasztott rétegeken hajtottam végre.

T.1. táblázat, 3D nyomtatást olvasztási beállítások

	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Alapnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

2.1. A kétszeres átolvasztás alkalmazása, a T.2. ábra által bemutatva, a primer olvasztási folyamat során visszamaradó porszemcséket beolvasztja a térfogatba, ezzel növelve a szerkezeti integritást és csökkentve a porozitásuk mennyiségét. A kétszeres átolvasztás további előnye, hogy mivel a nagyobb energiasűrűségű olvasztás nem a porágyon történik, hanem egy már megszilárdult rétegen, így a nagyobb energia hatására nem kerülnek a nyomtatási atmoszférába apró méretű porszemcsék, így nem defókuszálódik a lézer. A

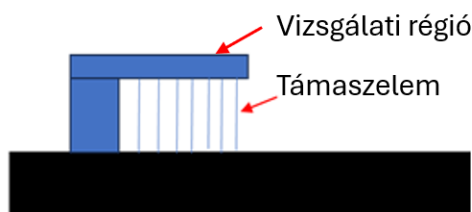
defókuszálódási jelenség kiküszöbölésével az alkalmazott lézer teljesítmény hatásfoka nem csökken a folyamat során.



T.2. ábra, A kétszeres átolvasztás hatása, a primer nyomtatással készített darabok térfogatában található visszamaradó porszemcsék beolvasztása a térfogatba

2. Tézis

A T.3. ábrán bemutatott, SLM technológia alkalmazásával, 17-4PH acél por alapanyaggal gyártott, a standard koordináta-rendszer szerinti „YX” 3D nyomtatási orientációjú, maradó feszültség mérő próbatestek támaszelemeinek tárgyasztaltól való oldása során, a testben ébredő maradó feszültségek hatására maradó alakváltozás történik.



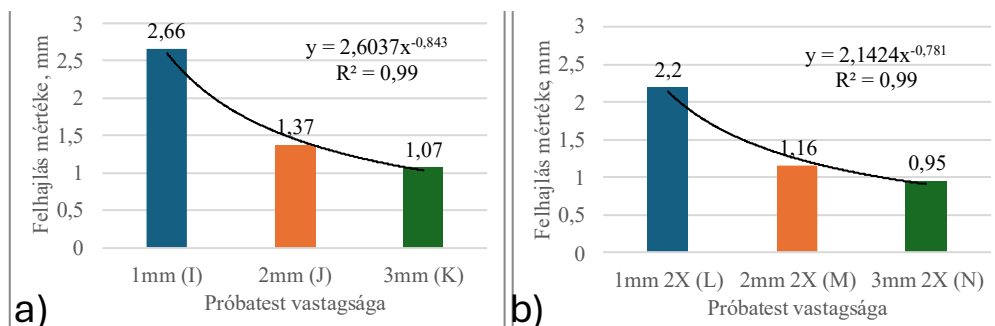
T.3. ábra, maradó feszültség mérő próbatest vázlatos szemléltetése

A jelenség vizsgálatához előállítottam $Z = 1, 2$ és 3 mm vizsgálati vastagságú, $Y = 40$ mm hosszú és $X = 10$ mm szélességű darabokat, melyeket $25\ \mu\text{m}$ -es rétegvastagsággal, valamint a T.2. táblázatban definiált nyomtatási beállításokkal készítettem el.

T.2. táblázat, 3D nyomtatási olvasztási beállítások

	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, $[\text{J}/\text{mm}^3]$	Energiasűrűség 2, $[\text{J}/\text{mm}^3]$
Alapnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

A második olvasztási ciklust, a primer folyamat által már átolvasztott rétegeken hajtottam végre. A T.4. ábra mutatja be az azonos 3D nyomtatási ciklusban elkészített a) alapnyomtatású, és b) kétszeres olvasztású darabok felhajlási eredményeit.



T.4. ábra, a) alapnyomtatáson és b) kétszeres olvasztással elkészített darabok felhajlási eredményei

1.1. Az 1, 2 és 3 mm darabok esetében a két vizsgált állapotban, „YX” nyomtatási orientáción, az alábbi egyenleteket határoztam meg:

a. Az alapnyomtatással elkészített próbatestek felhajlási értékei alapján:

$$y = 2,6037x^{-0,843}$$

ahol „y” a felhajlás mértéke, mm-ben, „x” pedig a próbatest vastagsága, szintén mm-ben.

b. A kétszeres olvasztással elkészített próbatestek felhajlási értékei alapján:

$$y = 2,1424x^{-0,781}$$

ahol „y” a felhajlás mértéke, mm-ben, „x” pedig a próbatest vastagsága, szintén mm-ben.

Ezek az egyenletek alkalmasak az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 17-4PH darabok, az $1 \leq X \leq 3$ értelmezési tartományon belüli felhajlási értékének előjelzésére.

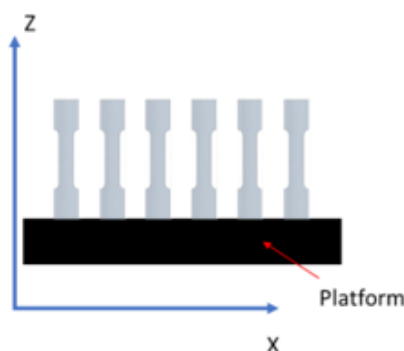
1.2. Az 1, 2, és 3 mm vastag, azonos nyomtatási ciklusban elkészített maradó feszültség mérő próbatestekben ébredő maradó feszültség mértéke a kétszeres átolvasztással az alapállapotban nyomtatott darabokhoz képest az alábbiak alapján változik:

- Az 1 mm vastag darabok esetében 2,66 mm-ről 2,2 mm-re, mely 17,29%-os csökkenést,
- A 2 mm vastag darabok esetében 1,37 mm-ről 1,16 mm-re, mely 15,33%-os csökkenést,

- c. Valamint a 3 mm vastag darabok esetében 1,07 mm-ről 0,95 mm-re, mely 11,22%-os csökkenést eredményez.

3. tézis

Az SLM technológia alkalmazásával, a T.5. ábra alapján, előállítottam 17-4PH acél por alapanyaggal gyártott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcákat, mely darabokat egy nyomtatási cikluson belül készítettem el, a standard koordináta rendszer „ZX” orientációja szerint.

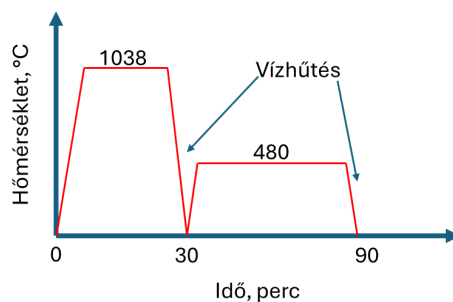


T.5. ábra, A „ZX” orientáción 3D nyomtatott szakítópálcák elvi ábrája

Az összehasonlításhoz a T.3. táblázat által bemutatott olvasztási paramétereket és a T.6. ábrán bemutatott H900-as hőkezelési programot alkalmaztam. A második olvasztási ciklust, a primer folyamat által már átolvasztott rétegeken hajtottam végre.

T.3. táblázat, 3D nyomtatási olvasztási paraméterek

	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Alapnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

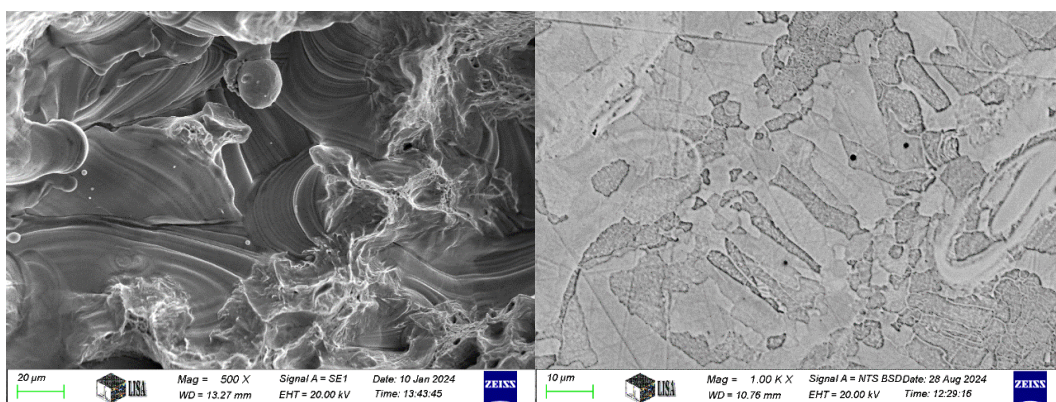


T.6. ábra, H900-as hőkezelés

A T.3. táblázat és a T.6. ábra alapján, az alábbi mérési sorokat vizsgáltam 2 és 3 mm vastag darabok esetében:

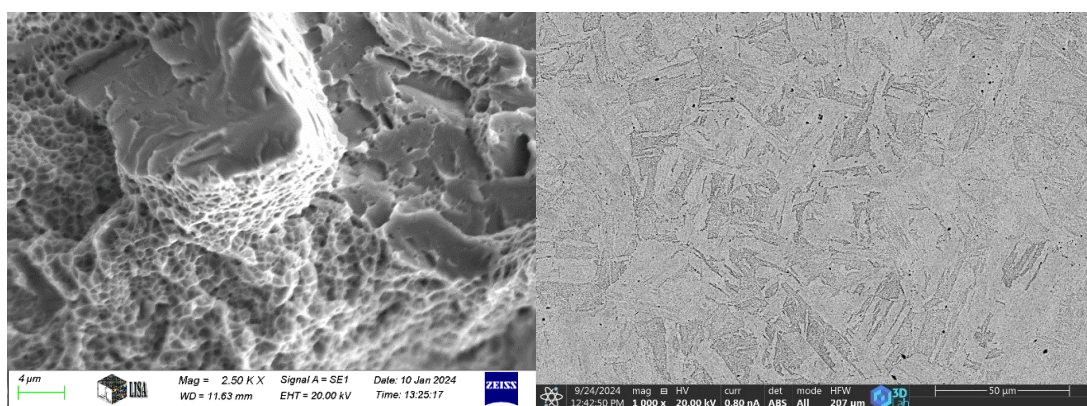
- alapnyomtatás,
- kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelés együttes alkalmazása.

3.1. Az alapnyomtatási beállításokkal gyártott darabok mikroszerkezetében, a T.7. ábra által bemutatva, nem volt definiálható a 17-4PH acél ötvözet jellegzetes martenzites, tűs megjelenése, valamint visszamaradó porszemcsék voltak jelen a térfogatban.



T.7. ábra, alapbeállítással nyomtatott próbatest felvételei

A kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelési program együttes alkalmazása ezeket a visszamaradó porszemcséket visszaolvasztotta a térfogatba, valamint módosította a darabok szemcseszerkezetét. Ahogyan azt a T.8. ábra bemutatja, az így előállított darabok mikroszerkezetében megjelentek a lemezes, tűs és idiomorf jellegű szemcsék is.



T.8. ábra, Egyszerre kétszeres olvasztással gyártott és H900-as hőkezelési programmal kezelt darabok felvételei

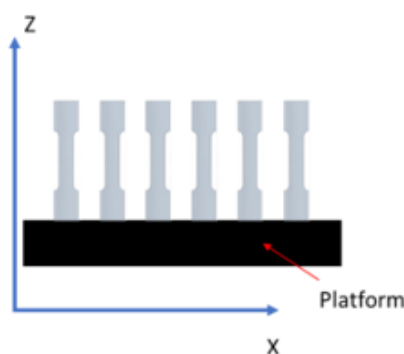
3.2. A mikroszerkezetben történő változás az alábbi szakítószilárdság és nyúlási érték változást eredményezte a „ZX” orientációban nyomtatott 2 és 3 mm vastag darabok esetében:

a) A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az alapnyomtatás 718 MPa-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt esetén 1235 MPa volt, mely 72,01%-os növekedést, a nyúlási érték az alapnyomtatás 7,02%-os értékéhez képest, a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt 6,22% volt, mely 11,40%-os csökkenést jelent.

b) A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az alapnyomtatás 766 MPa-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt esetén 1274 MPa volt, ami 66,32%-os növekedést, a nyúlási érték az alapnyomtatás 8,41%-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt 6,04% volt, mely 28,18%-os csökkenést jelent.

4. tézis

Az SLM technológia alkalmazásával, a T.9. ábra alapján, előállítottam 17-4PH acél por alapanyaggal gyártott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcákat, mely darabokat egy nyomtatási cikluson belül készítettem el, a standard koordináta rendszer „ZX” orientációja szerint.

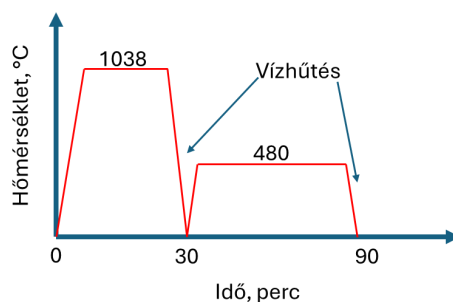


T.9. ábra, A „ZX” orientáción 3D nyomtatott szakítópálcák elvi ábrája

Az összehasonlításhoz a T.4. táblázat által bemutatott olvasztási paramétereket és a T.10. ábrán bemutatott H900-as hőkezelési programot alkalmaztam. A második olvasztási ciklust, a primer folyamat által már átolvasztott rétegeken hajtottam végre.

T.4. táblázat, 3D nyomtatási olvasztási paraméterek

	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

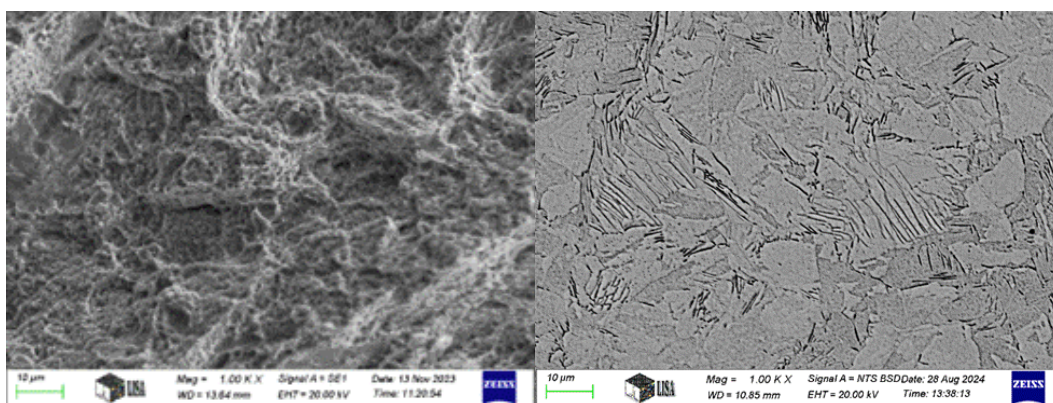


T.10. ábra, H900-as hőkezelés

A T.4. táblázat és a T.10. ábra alapján, az alábbi mérési sorokat vizsgáltam 2 és 3 mm vastag darabok esetében:

- kétszeres átolvasztás,
- kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelés együttes alkalmazása.

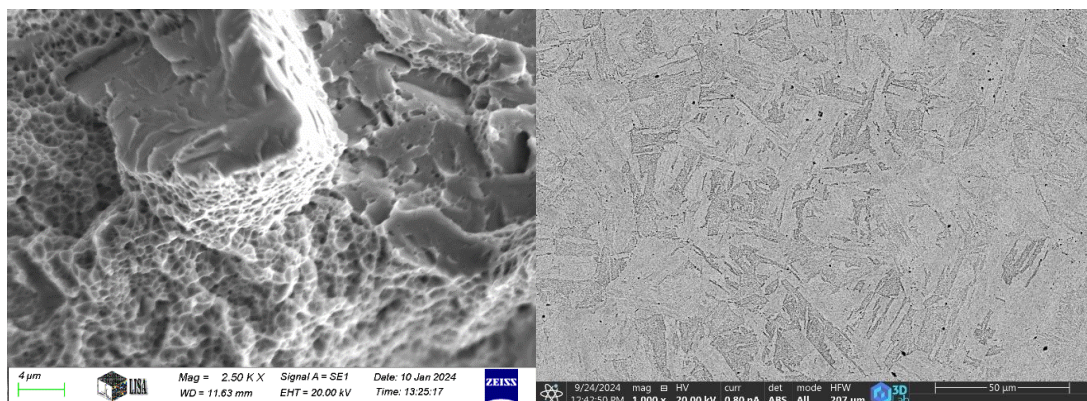
4.1. A kétszeres olvasztással nyomtatott darabok mikroszerkezetében, a T.11. ábra által bemutatva, megjelenik a 17-4PH acél ötvözetre jellemző, lemezes, és martenzites tűs megjelenés, valamint visszamaradó porszemcsék beolvasztásra kerültek a térfogatba.



T.11. ábra, kétszeres olvasztással nyomtatott próbatest felvételei

A kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelési program együttes alkalmazása ezeket a visszamaradó porszemcséket visszaolvasztotta a térfogatba, valamint módosította a darabok

szemcseszerkezetét. Ahogy azt a T.12. ábra bemutatja, az így előállított darabok mikroszerkezetében megjelentek a lemezes, tűs és idiomorf jellegű szemcsék is.



T.12. ábra, Egyszerre kétszeres átolvasztással gyártott és H900-as hőkezelési programmal kezelt darabok felvételei

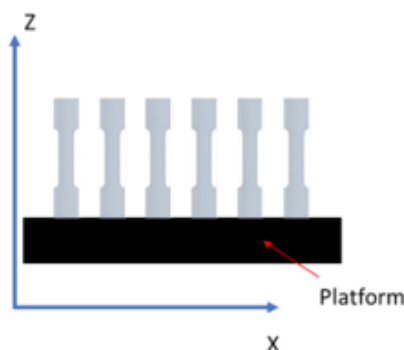
4.2. A mikroszerkezetben történő változás az alábbi szakítószilárdság és nyúlási érték változást eredményezte a „ZX” orientációban nyomtatott 2 és 3 mm vastag darabok esetében:

a) A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság a kétszeres átolvasztás 892 MPa-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt esetén 1235 MPa volt, mely 38,45%-os növekedést, a nyúlási érték a kétszeres átolvasztás 15,60%-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt 6,22% volt, mely 60,13%-os csökkenést jelent.

b) A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság a kétszeres átolvasztás 888 MPa-os értékéhez képest a kétszeres átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt esetén 1274 MPa volt, ami 43,47%-os növekedést, a nyúlási érték a kétszeres átolvasztás 17,80%-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt 6,04% volt, mely 66,07%-os csökkenést jelent.

5. tézis

Az SLM technológia alkalmazásával, a T.13. ábra alapján, előállítottam 17-4PH acél por alapanyaggal gyártott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcákat, mely darabokat egy nyomtatási cikluson belül készítettem el, a standard koordináta rendszer „ZX” orientációja szerint.

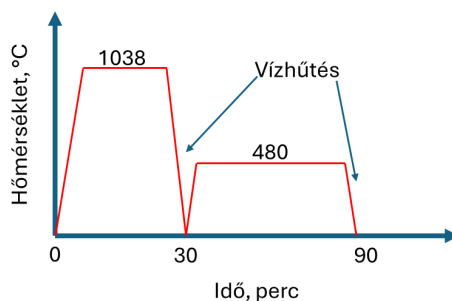


T.13. ábra, A „ZX” orientáción 3D nyomtatott szakítópálcák elvi ábrája

Az összehasonlításhoz a T.5. táblázat által bemutatott olvasztási paramétereket és a T.14. ábrán bemutatott H900-as hőkezelési programot alkalmaztam. A második olvasztási ciklust, a primer folyamat által már átolvasztott rétegeken hajtottam végre.

T.5. táblázat, 3D nyomtatási olvasztási paraméterek

	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Alapnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

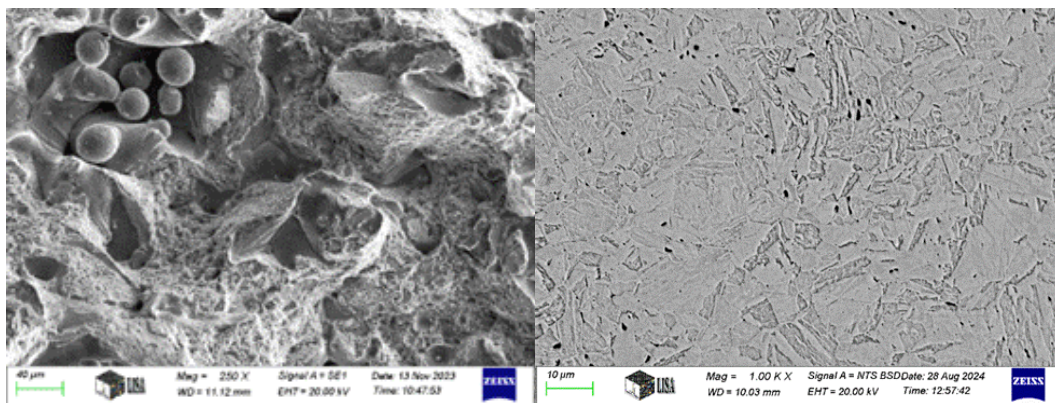


T.14. ábra, H900-as hőkezelés

A T.5. táblázat és a T.14. ábra alapján, az alábbi mérési sorokat vizsgáltam 2 és 3 mm vastag darabok esetében:

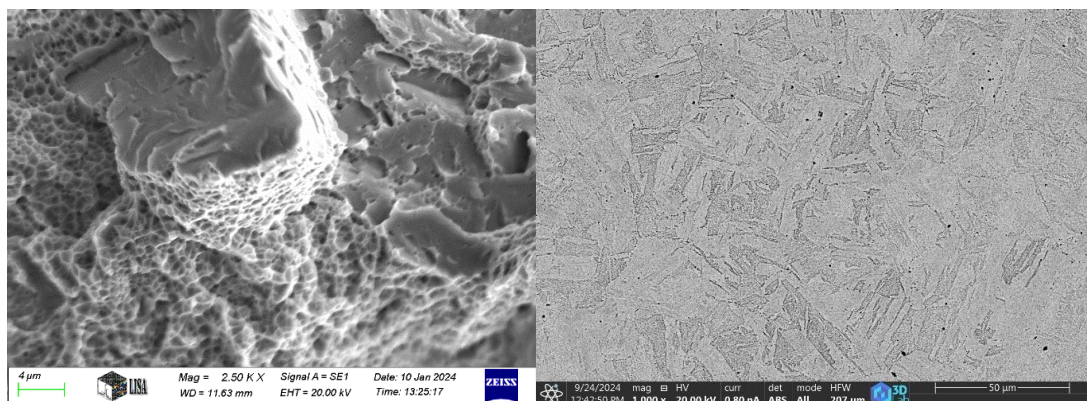
- alapbeállítású nyomtatás, majd H900-as hőkezelés,
- kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelés együttes alkalmazása.

4.1. Az alapbeállítással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok mikroszerkezetében, a T.15. ábra által bemutatva, megjelenik a 17-4PH acél ötvözetre jellemző, martenzites tűs megjelenés, azonban a visszamaradó porszemcsék továbbra is jelen vannak a térfogatban.



T.15. ábra, alapbeállítással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest felvételei

A kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelési program együttes alkalmazása ezeket a visszamaradó porszemcséket visszaolvasztotta a térfogatba, valamint módosította a darabok szemcseszerkezetét. Ahogy azt a T.16. ábra bemutatja, az így előállított darabok mikroszerkezetében megjelentek a lemezes, tűs és idiomorf jellegű szemcsék is.



T.16. ábra, Egyszerre kétszeres olvasztással gyártott és H900-as hőkezelési programmal kezelt darabok felvételei

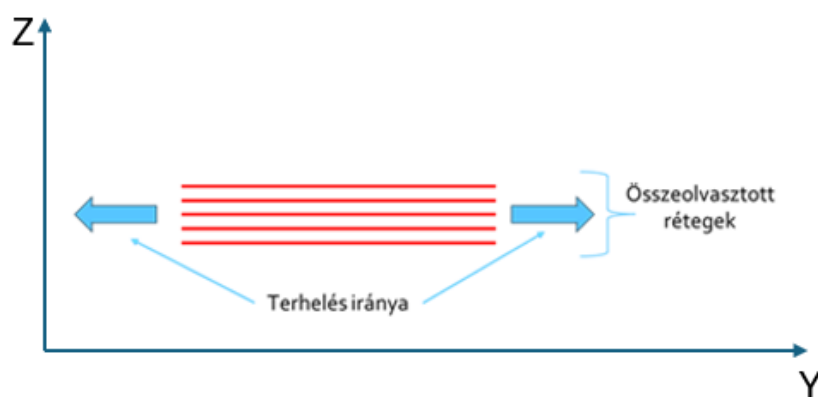
4.2. A mikroszerkezetben történő változás az alábbi szakítószilárdság és nyúlási érték változást eredményezte a „ZX” orientációban nyomtatott 2 és 3 mm vastag darabok esetében:

a) A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az alapnyomtatás és H900-as hőkezelés 1061 MPa-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt esetén 1235 MPa volt, mely 16,40%-os növekedést, a nyúlási érték az alapnyomtatás és H900-as hőkezelés 1,03%-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt 6,22% volt, ami 503,88%-os növekedést jelent.

b) A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az alapnyomtatás és H900-as hőkezelés 1057 MPa-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt esetén 1274 MPa volt, ami 20,53%-os növekedést, a nyúlási érték az alapnyomtatás és H900-as hőkezelés 0,98%-os értékéhez képest a kétszeresen átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt 6,04% volt, ami 516,33%-os növekedést jelent.

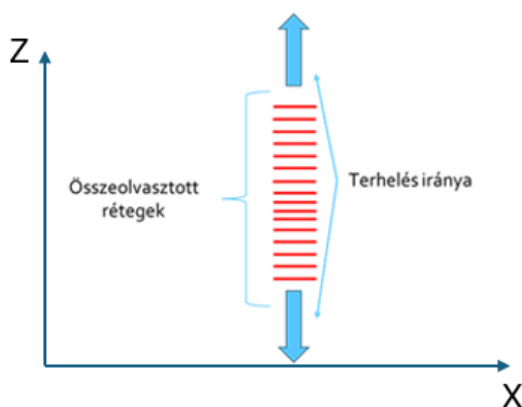
6. Tézis

A standard koordináta rendszert alapul véve, a feldolgozott szakirodalomban létezik, a T.17. ábrán bemutatott, „YZ” preferált nyomtatási orientáció, ami alapján a szerzők a 3D nyomtatás ezt a típusú kivitelezését ajánlják szakítószilárdsági vizsgálatokhoz.



T.17. ábra, A feldolgozott szakirodalom alapján preferált „YZ” nyomtatási orientáció

Az „YZ” orientáción elkészített szakítópálcák előnye, hogy a terhelés iránya párhuzamos az épített rétegekre, így nagyobb nyúlási értéket képes produkálni, azonban a hosszú olvasztási távolság miatt, a testekben ébredő maradó feszültség hatására, a nyomtatási ciklus végén, a tárgyasztaltól elválasztva maradó alakváltozáson mennek keresztül. A maradó feszültség értékek kiküszöbölésének érdekében a vizsgálati darabjaimat, a T.18 ábra által bemutatott „ZX” orientáción készítettem el.

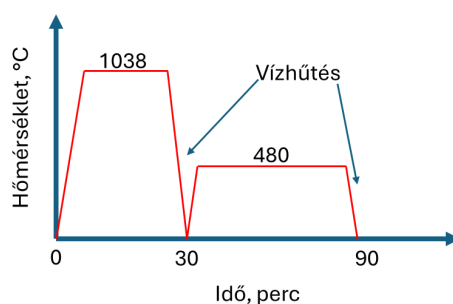


T.18. ábra, A kísérleteim által alkalmazott „ZX” nyomtatási orientáció

A „ZX” orientáció hátránya, hogy a terhelés iránya merőleges az épített rétegekre, így kisebb a nyúlása, azonban a rövid olvasztási távolságok miatt a tárgyasztaltól elválasztva, maradó alakváltozása elhanyagolható. Ennek a jelenségnek a 3D nyomtatási folyamaton belüli mérséklésére alkalmaztam egy, a T.6. táblázat által bemutatott második olvasztási ciklust. Ezt a második olvasztási ciklust, a primer folyamat által már átolvasztott rétegeken hajtottam végre. Ezen felül alkalmaztam, a T. 19. ábrán látható H900-as hőkezelési programot.

T.6. táblázat, 3D nyomtatást olvasztási beállítások

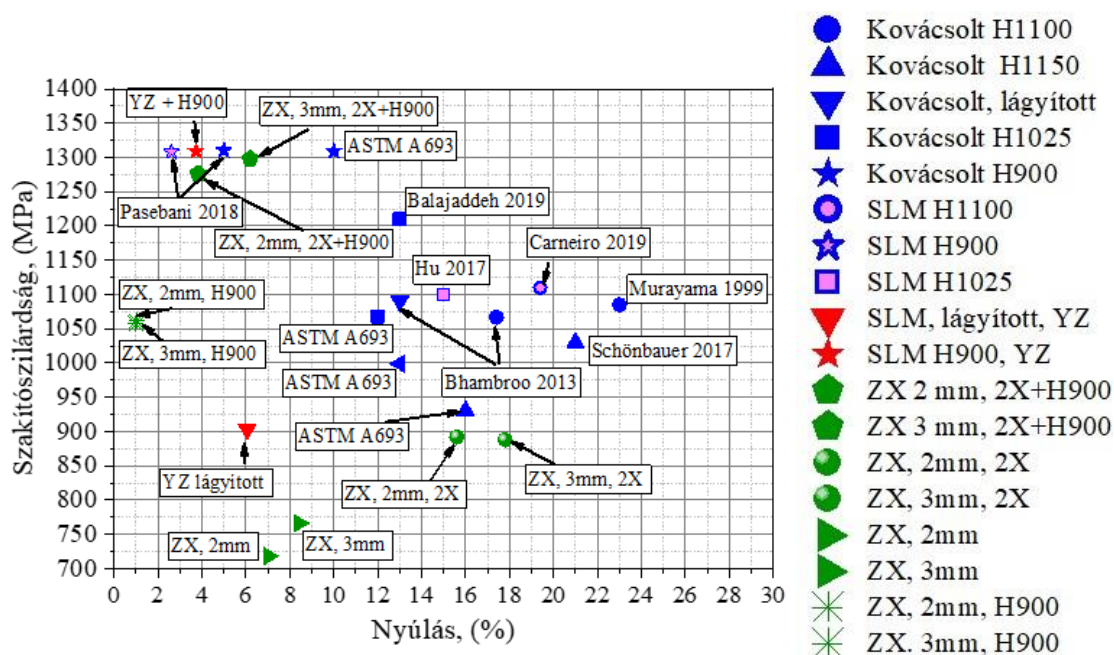
	Primer folyamat	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Alapnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38



T.19. ábra, H900-as hőkezelés

6.1. A T.20. ábra bemutatja, hogy az általam készített „ZX” orientációjú szakítópálcák eredményei, 2 mm-es vastagság esetében 1235 MPa, valamint 3 mm-es vastagság esetében 1274 MPa, hogyan viszonyulnak a saját „YZ” orientációjú, alapnyomtatási beállítású, majd H900-as hőkezelési programmal kezelt mérési eredményekhez, valamint a feldolgozott szakirodalomban megjelent hasonlóan „YZ” orientált és hőkezelt darabokhoz, illetve kovácsolt és H1100, H1150, H1025 és H900-as hőkezelési programmal kezelt darabokhoz. Ez alapján az alábbi megállapítást tettem:

a) A „ZX” nyomtatási orientáción, a kétszeres átolvasztás és a H900-as hőkezelési program együttes alkalmazása az alapnyomtatáshoz képest akár 66%-os szakítószilárdság növekedést lehet elérni, csekély, mindössze 6%-os nyúlási érték csökkenés mellett, ezzel elérhetővé téve a feldolgozott szakirodalom által kedvezőtlennek ítélt nyomtatási orientációt.



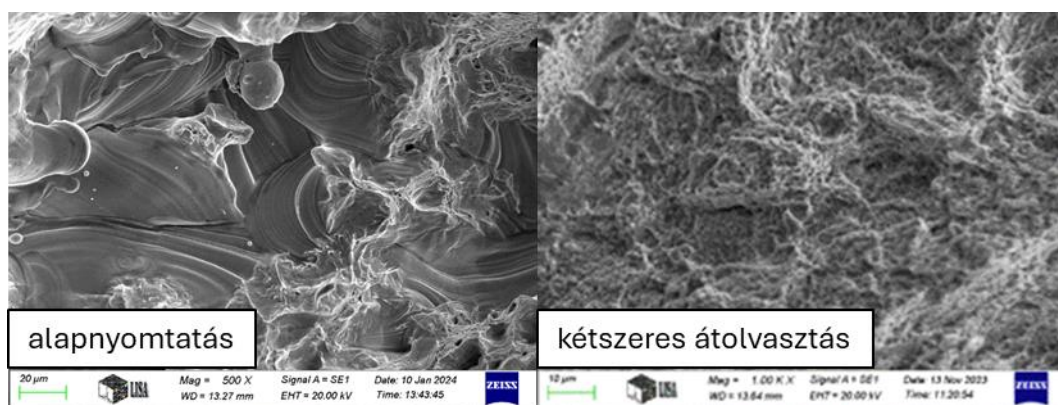
T.20. A zölddel jelölt „ZX” orientációjú, 2 és 3 mm vastag alapnyomtatású, kétszeres olvasztású, alapnyomtatás és H900-as hőkezelésű, illetve kétszeres olvasztású és H900-as hőkezelésű szakítópálcák eredményeinek elhelyezése a felhasznált szakirodalomban

6.2 A 3D fémnyomtatással gyártott darabok felhasználhatóságának egyik feltétele, hogy meg kell felelnie azoknak az elvárásoknak, melyek érvényesek a különböző hagyományos alakadási technológiával gyártott, például a T.20. ábrán bemutatott kovácsolt darabokra.

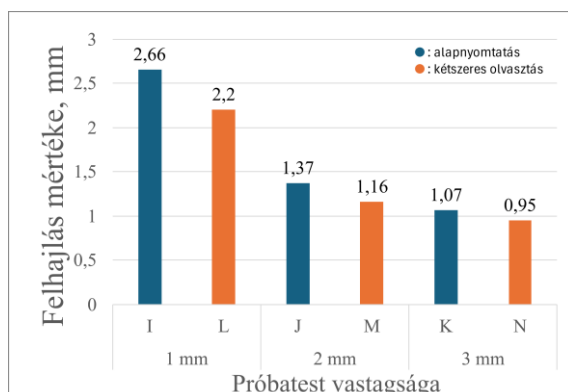
Ennek megfelelően az általam gyártott „ZX” nyomtatási orientációban elkészített darabok az alábbi lehetséges esetekben alkalmazhatók:

- A „ZX” orientációs alapnyomtatás alkalmazható abban az esetben, ha egyedi alkatrészek gyártása esetében a méretpontosság elengedhetetlen tényező, azonban mechanikai igénybevételek szempontjából elég, ha 700-800 MPa szakítószilárdsági értéket képes elviselni, 7,02-8,41% nyúlás mellett.
- A „ZX” orientációs alapnyomtatás és H900-as hőkezelés együttesen alkalmazható abban az esetben, ha az egyedi alkatrészek gyártása esetében a követelmények nagy szakítószilárdságot szabnak meg, amellet, hogy maximális terhelés mellett, maradó alakváltozást nem szenvedhetnek a darabok.
- A T.21. ábra alapján, a kétszeres átolvasztás az alapnyomtatás során visszamaradó porszemcséket beolvasztja a térfogatba. Ezen felül a T.22. ábra alapján csökkenti a darabok tárgyasztaltól való eltávolítása utáni maradó alakváltozás mértékét. A „ZX”

orientációs kétszeres átolvasztás alkalmazás alkalmazható abban az esetben, ha az egyedi alkatrészek gyártása esetében szakítószilárdsági szempontból 800-900MPa érték tartomány elérés a cél, azonban a nyúlási érték 15,6-17,8%-ra történő növelése lehetővé teszi, hogy nagy ciklikus terhelésnek álljon ellen.



T.21. ábra, Az alapbeállítással és kétszeres olvasztással nyomtatott próbatestek felvételei



T.22. ábra, A kétszeres átolvasztás hatása az „YX” orientációjú darabok támaszelemeinek oldását követő felhajlási értékekre

- A kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelés együttesen alkalmazható, amennyiben egyedi alkatrészek alkalmazásával kívánunk helyettesíteni korábban hasonló H900-as hőkezeléssel kezelt kovácsolt darabokat, ezzel megspórolva az új szerszám költségeit, illetve elérhetővé válik olyan termékek alkalmazása, melyeket kovácsolással nem, vagy csak nehezen előállíthatók. A kétszeres olvasztás javítja az alapnyomtatási állapothoz képest a mikroszerkezetet, amit, ha H900-as öregítéses hőkezelés követ, a két eljárás hatása együtt jelenik meg a mikroszerkezetben. Ez az együttes hatás eredményezi a „ZX” orientációban gyártott darabok maximális szakítószilárdságát, az alapállapothoz képest minimális nyúlás csökkenés mellett.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani tudományos vezetőmnek, **Dr. Varga Lászlónak**, hogy munkámat végig támogatta és útmutatást nyújtott.

Köszönöm **Kovács Árpádnak** és **Dr. Nagy Erzsébetnek** a SEM és XRD mérésekben nyújtott segítséget és iránymutatást, valamint, hogy a vizsgálataimat a Miskolci Egyetem, Anyag- és Vegyészmérnöki Karának, Fémtani, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetének 3D Labs vizsgálati egységében végrehajthattam. Külön köszönöm **Dr. Mikó Tamásnak** a sok évnyi konzultációt a szakítóvizsgálatok irányában, valamint a számos vizsgálatot és közösen megjelentetett cikket a témában.

Köszönöm **Dr. Erdélyi Jánosnak** és **Kéri Zoltánnak**, hogy a 3D nyomtatási vizsgálataimban támogattak és tanácsokkal láttak el.

Köszönöm **Prof. Dr. Mertinger Valériának** és **Szobota Péternek**, hogy a maradó feszültség méréseire irányuló vizsgálataimat lehetővé tették és konzultációikkal támogatták a méréseim sikerességét.

Nem utolsó sorban szeretném megköszöni mindenkinek, akik nem kerültek megnevezésre, hogy dolgozatom írásában támogattak és végig kísérték a tanulmányaim, illetve kutatómunkám során.

Irodalomjegyzék

- [1]. Standard, A. S. T. M. "Standard terminology for additive manufacturing technologies." ASTM International F2792-12a 46 (2012): 10918-10928.
- [2]. Kawalkar, Rajat, Harrsh Kumar Dubey, and Satish P. Lokhande. "A review for advancements in standardization for additive manufacturing." *Materials Today: Proceedings* 50 (2022): 1983-1990.
- [3]. Redwood, Ben, Filemon Schffer, and Brian Garret. *The 3D printing handbook: technologies, design and applications*. 3D Hubs, 2017.
- [4]. Kodama, Hideo. "Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer." *Review of scientific instruments* 52.11 (1981): 1770-1773.
- [5]. Su, Amanda, and Subhi J. Al'Aref. "History of 3D printing." *3D printing applications in cardiovascular medicine*. Academic Press, 2018. 1-10.
- [6]. Deckard, Carl Robert. *Selective laser sintering*. The University of Texas at Austin, 1988.
- [7]. Yadroitsev, Igor, et al., eds. *Fundamentals of laser powder bed fusion of metals*. Elsevier, 2021.
- [8]. Pei, Eujin, Israt Rumana Kabir, and Bastian Leutenecker-Twelsiek. "History of AM." *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 3-29.
- [9]. Siemiński, Przemysław. "Introduction to fused deposition modeling." *Additive Manufacturing*. Elsevier, 2021. 217-275.
- [10]. Jones, Rhys, et al. "RepRap—the replicating rapid prototyper." *Robotica* 29.1 (2011): 177-191.
- [11]. Pagac, Marek, et al. "A review of vat photopolymerization technology: materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing." *Polymers* 13.4 (2021): 598.
- [12]. Gibson, Ian, et al. "Introduction and basic principles." *Additive manufacturing technologies* (2021): 1-21.
- [13]. Thakar, Chetan M., et al. "3d Printing: Basic principles and applications." *Materials Today: Proceedings* 51 (2022): 842-849.
- [14]. Oropallo, William, and Les A. Piegl. "Ten challenges in 3D printing." *Engineering with Computers* 32 (2016): 135-148.

- [15]. Pham, Duc Truong, and Chunqian Ji. "Re-coating of SLA parts containing trapped volumes." *ADVANCES IN MANUFACTURING TECHNOLOGY-CONFERENCE-*. Vol. 15. TAYLOR & FRANCIS LTD, 2001.
- [16]. Hunter, Luke W., et al. "Assessment of trapped powder removal and inspection strategies for powder bed fusion techniques." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 106 (2020): 4521-4532.
- [17]. Iancu, Cătălin. "ABOUT 3D PRINTING FILE FORMATS." *Annals of Constantin Brancusi'University of Targu-Jiu. Engineering Series/Analele Universității Constantin Brâncuși din Târgu-Jiu. Seria Inginerie* 2 (2018).
- [18]. Zhou, Lu-Yu, Jianzhong Fu, and Yong He. "A review of 3D printing technologies for soft polymer materials." *Advanced Functional Materials* 30.28 (2020): 2000187.
- [19]. Hu, Jing. "Study on STL-based slicing process for 3D printing." (2017).
- [20]. Ganganath, Nuwan, et al. "Trajectory planning for 3D printing: A revisit to traveling salesman problem." *2016 2nd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*. IEEE, 2016.
- [21]. Gibson, Ian, et al. "Vat photopolymerization processes." *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing* (2015): 63-106.
- [22]. Gibson, Ian, et al. "Material jetting." *Additive manufacturing technologies* (2021): 203-235.
- [23]. Gibson, Ian, et al. "Binder jetting." *Additive manufacturing technologies* (2021): 237-252.
- [24]. Gülcan, Orhan, Kadir Günaydın, and Aykut Tamer. "The state of the art of material jetting—a critical review." *Polymers* 13.16 (2021): 2829.
- [25]. Gibson, Ian, et al. "Material jetting." *Additive manufacturing technologies* (2021): 203-235.
- [26]. Gilani, Negar, Aleksandra Foerster, and Nesma T. Aboulkhair. "Material Jetting." *Springer Handbook of Additive Manufacturing*. Cham: Springer International Publishing, 2023. 371-387.
- [27]. Gibson, Ian, et al. "Material extrusion." *Additive Manufacturing Technologies* (2021): 171-201.extrusion
- [28]. Spiller, Saveria, Filippo Berto, and Nima Razavi. "Mechanical behavior of Material Extrusion Additive Manufactured components: an overview." *Procedia Structural Integrity* 41 (2022): 158-174.

- [29]. Gibson, Ian, et al. "Sheet lamination." *Additive manufacturing technologies* (2021): 253-283.
- [30]. Pilipović, Ana. "Sheet lamination." *Polymers for 3D printing*. William Andrew Publishing, 2022. 127-136.
- [31]. Thompson, Scott M., et al. "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics." *Additive Manufacturing* 8 (2015): 36-62.
- [32]. Gibson, Ian, et al. "Powder bed fusion." *Additive manufacturing technologies* (2021): 125-170.
- [33]. Gao, Bingwei, et al. "A review of research progress in selective laser melting (SLM)." *Micromachines* 14.1 (2022): 57.
- [34]. Yakout, Mostafa, et al. "Influence of thermal properties on residual stresses in SLM of aerospace alloys." *Rapid Prototyping Journal* 26.1 (2020): 213-222.
- [35]. Li, Yingli, et al. "Heat transfer and phase transition in the selective laser melting process." *International Journal of Heat and Mass Transfer* 108 (2017): 2408-2416.
- [36]. Duda, Thomas, and L. Venkat Raghavan. "3D metal printing technology." *IFAC-PapersOnLine* 49.29 (2016): 103-110.
- [37]. Molitch-Hou, Michael. "Overview of additive manufacturing process." *Additive manufacturing*. Butterworth-Heinemann, 2018. 1-38.
- [38]. Srinivasan, D., et al. "3D printing manufacturing techniques, materials, and applications: an overview." *Advances in Materials Science and Engineering* 2021.1 (2021): 5756563.
- [39]. Vafadar, a.; Guzzomi, F.; Rassau, A.; Hayward, K. *Metal Additive Manufacturing: A Review of Common Processes, Industrial Applications, and Current Challenges*. Appl. Sci. 2021, 11, 1213. <https://doi.org/10.3390/app11031213>
- [40]. Huang, Runze, et al. "Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components." *Journal of cleaner production* 135 (2016): 1559-1570.
- [41]. Rejeski, David, Fu Zhao, and Yong Huang. "Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing." *Additive Manufacturing* 19 (2018): 21-28.
- [42]. Huang, Samuel H., et al. "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review." *The International journal of advanced manufacturing technology* 67 (2013): 1191-1203.

- [43]. Rylands, Brogan, et al. "The adoption process and impact of additive manufacturing on manufacturing systems." *Journal of manufacturing technology management* 27.7 (2016): 969-989.
- [44]. Durach, Christian F., Stefan Kurpjuweit, and Stephan M. Wagner. "The impact of additive manufacturing on supply chains." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 47.10 (2017): 954-971.
- [45]. Wu, Junhui. "Study on optimization of 3D printing parameters." *IOP conference series: materials science and engineering*. Vol. 392. IOP Publishing, 2018.
- [46]. Gao, Wei, et al. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering." *Computer-aided design* 69 (2015): 65-89.
- [47]. Duda, Thomas, and L. Venkat Raghavan. "3D metal printing technology." *IFAC-PapersOnLine* 49.29 (2016): 103-110.
- [48]. Das, Suman, David L. Bourell, and S. S. Babu. "Metallic materials for 3D printing." *Mrs Bulletin* 41.10 (2016): 729-741.
- [49]. Pan, Z., et al. "Influence of shielding gas flow on the uniformity of additively manufactured martensitic stainless steel." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1249. No. 1. IOP Publishing, 2022.
- [50]. Protasov, C. E., et al. "Experimental study of residual stresses in metal parts obtained by selective laser melting." *Physics Procedia* 83 (2016): 825-832.
- [51]. Gusarov, A. V., M. Pavlov, and I. Smurov. "Residual stresses at laser surface remelting and additive manufacturing." *Physics Procedia* 12 (2011): 248-254.
- [52]. Jacob, Gregor, et al. *Effects of powder recycling on stainless steel powder and built material properties in metal powder bed fusion processes*. Gaithersburg, MD: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 2017.
- [53]. Gusarov, A. V., and E. P. Kovalev. "Model of thermal conductivity in powder beds." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 80.2 (2009): 024202.
- [54]. Simchi, A. "Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features." *Materials Science and Engineering: A* 428.1-2 (2006): 148-158.
- [55]. Kudryavtsev, Y. "Residual stress." *Springer handbook of experimental solid mechanics* (2008): 371-388.
- [56]. Withers, P. J. "Residual stress and its role in failure." *Reports on progress in physics* 70.12 (2007): 2211.

- [57]. Martínez Bastús, Albert. Numerical sensitivity study of residual stress and distortion in selective laser melting of 17-4 PH Steel. MS thesis. Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.
- [58]. Protasov, C. E., et al. "Experimental study of residual stresses in metal parts obtained by selective laser melting." *Physics Procedia* 83 (2016): 825-832.
- [59]. Chahal, Vedant, and Robert M. Taylor. "A review of geometric sensitivities in laser metal 3D printing." *Virtual and Physical Prototyping* 15.2 (2020): 227-241.
- [60]. Li, Chao, et al. "Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting." *Additive Manufacturing* 17 (2017): 157-168.
- [61]. Ngo, Tuan D., et al. „Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, application and challenges.” *Composites Part B. Engineering* 143 (2018). 172-196.
- [62]. Baghi, Alireza Dareh, et al. "Experimental realisation of build orientation effects on the mechanical properties of truly as-built Ti-6Al-4V SLM parts." *Journal of Manufacturing Processes* 64 (2021): 140-152.
- [63]. Kladovasilakis, Nikolaos, et al. "Impact of metal additive manufacturing parameters on the powder bed fusion and direct energy deposition processes: A comprehensive review." *Progress in Additive Manufacturing* 6 (2021): 349-365.
- [64]. Appalsamy, Thesan, Silumko Luvo Hamilton, and Motsoko Juniet Kgaphola. "Tensile test analysis of 3D printed specimens with varying print orientation and infill density." *Journal of Composites Science* 8.4 (2024): 121.
- [65]. Pant, Prabhat, et al. "Mapping of residual stresses in as-built Inconel 718 fabricated by laser powder bed fusion: A neutron diffraction study of build orientation influence on residual stresses." *Additive Manufacturing* 36 (2020): 101501.
- [66]. Ezair, Ben, Fady Massarwi, and Gershon Elber. "Orientation analysis of 3D objects toward minimal support volume in 3D-printing." *Computers & Graphics* 51 (2015): 117-124.
- [67]. Vanek, Juraj, Jorge A. Garcia Galicia, and Bedrich Benes. "Clever support: Efficient support structure generation for digital fabrication." *Computer graphics forum*. Vol. 33. No. 5. 2014.
- [68]. Monkova, Katarina, et al. "Study of 3D printing direction and effects of heat treatment on mechanical properties of MS1 maraging steel." *Archive of Applied Mechanics* 89 (2019): 791-804.

- [69]. Pelin, Cristina-Elisabeta, et al. "Mechanical properties of 3D printed metals." *INCAS Bulletin* 13.1 (2021): 123-129.
- [70]. Yakout, Mostafa, et al. "In-situ monitoring and detection of spatter agglomeration and delamination during laser-based powder bed fusion of Invar 36." *Optics & Laser Technology* 136 (2021): 106741.
- [71]. Anderoglu, Osman. Residual stress measurement using X-ray diffraction. Diss. Texas A&M University, 2005.
- [72]. Prevéy, Paul S. "X-ray diffraction residual stress techniques." (1986).
- [73]. Davis, Joseph R., ed. Tensile testing. ASM international, 2004.
- [74]. Kovacs, Sandor Endre, et al. "Additive manufacturing of 17-4PH alloy: Tailoring the printing orientation for enhanced aerospace application performance." *Aerospace* 10.7 (2023): 619.
- [75]. Suri, P., B. P. Smarslok, and Randall M. German. "Impact properties of sintered and wrought 17-4 PH stainless steel." *Powder metallurgy* 49.1 (2006): 40-47.
- [76]. Pasebani, Somayeh, et al. "Effects of atomizing media and post processing on mechanical properties of 17-4 PH stainless steel manufactured via selective laser melting." *Additive Manufacturing* 22 (2018): 127-137.
- [77]. Balajaddeh, Milad Bahrami, and Homam Naffakh-Moosavy. "Pulsed Nd: YAG laser welding of 17-4 PH stainless steel: Microstructure, mechanical properties, and weldability investigation." *Optics & Laser Technology* 119 (2019): 105651.
- [78]. Murayama, M., K. Hono, and Y. Katayama. "Microstructural evolution in a 17-4 PH stainless steel after aging at 400 C." *Metallurgical and Materials Transactions A* 30.2 (1999): 345-353.
- [79]. Bhambroo, Rajan, et al. "Effect of reverted austenite on mechanical properties of precipitation hardenable 17-4 stainlesssteel." *Materials Science and Engineering: A* 568 (2013): 127-133.
- [80]. Carneiro, Luiz, et al. "Cyclic deformation and fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel." *International Journal of Fatigue* 123 (2019): 22-30.
- [81]. German, Randall M. "Thermal processing optimization of injection molded stainless steel powders." *MATERIAL AND MANUFACTURING PROCESS* 12.4 (1997): 713-735.

- [82]. Schönbauer, Bernd M., Keiji Yanase, and Masahiro Endo. "The influence of various types of small defects on the fatigue limit of precipitation-hardened 17-4PH stainless steel." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 87 (2017): 35-49.
- [83]. Lashgari, H. R., et al. "Heat treatment response of additively manufactured 17-4PH stainless steel." *Materials Characterization* 197 (2023): 112661.
- [84]. Berghaus, Michael, et al. "Effect of high laser scanning speed on microstructure and mechanical properties of additively manufactured 316L." *Progress in Additive Manufacturing* (2024): 1-14.
- [85]. Masmoudi, Amal, Rodolphe Bolot, and Christian Coddet. "Investigation of the laser–powder–atmosphere interaction zone during the selective laser melting process." *Journal of Materials Processing Technology* 225 (2015): 122-132.
- [86]. Aripin, Mohammad Azlan, et al. "Effects of build orientations on microstructure evolution, porosity formation, and mechanical performance of selective laser melted 17-4 PH stainless steel." *Metals* 12.11 (2022): 1968.

Ábrajegyzék

1. ábra, Topológiaiailag optimalizált alumínium tartóelem.....	1
2. ábra, FEM módszeres elemzése a topológiaiailag optimalizált tartóelemnek.....	2
3. ábra, Kutatómunka vázlatos ismertetése	3
4. ábra, A Kodama által készített 3D nyomtatott test, ~50mm magas, 27 rétegből álló, 2 mm rétegvastagságú kikeményített gyanta	4
5. ábra, Az első Charles Hull által 3D nyomtatott darab, 1983-ban	5
6. ábra, Adrian Bowyer első saját magát pótolni képes RepRap 3D nyomtatója	6
7. ábra, Az AM folyamatok összefoglalása	6
8. ábra, Napjainkban elterjedt additív gyártástechnológiák	7
9. ábra, 3D nyomtatás rétegtékezési stratégiája.....	7
10. ábra, Felületmodell, különböző mennyiségű háromszög elemekből felépítve.....	9
11. ábra, SLA rendszer sematikus ábrája	10
12. ábra, SLA technológiával nyomtatott benchmark hajó	10
13. ábra, Material jetting sematikus ábrája.....	11
14. ábra, Material jetting, kész termék	11
15. ábra, Binder jetting sematikus ábrája	12
16. ábra, Binder jetting eljárással készített kész termék.....	12
17. ábra, Material extrusion sematikus ábrája	13
18. ábra, Material extrusion technológiával elkészített termék	13
19. ábra, Sheet lamination sematikus ábrája.....	14
20. ábra, Sheet lamination technológiával előállított darabok.....	14
21. ábra, Direct Energy Deposition sematikus ábrája	15
22. ábra, DED technológiával gyártott test.....	16
23. ábra, Powder Bed Fusion sematikus ábrája	17
24. ábra, PBD (SLM) technológiával előállított test	17
25. ábra, 3D nyomtatás olvasztásának karakterisztikája	18
26. ábra, AM folyamatok piaci értékesítési aránya 2020-ban	19
27. ábra, AM technológiák ipari eloszlása.....	19
28. ábra, Vastag és vékony rétegek közötti felbontásbeli különbség.....	21
29. ábra, Maradó feszültség okozta geometriai ronszolódás	22
30. ábra, Környező porszemcsék nem kívánt szinterelődése	23
31. ábra, Egy szakítópálca lehetséges nyomtatási orientációi	26

32. ábra, Orlas Creator 3D fémnyomtató berendezés.....	28
33. ábra, 17-4PH acélpor SEM felvétele	29
34. ábra, Páztázási szög változása lerakott rétegenként 45°-os rotációval	30
35. ábra, Nem megolvasztott porszemcsék az alapnyomtatás térfogatában.....	30
36. ábra, A H900-as hőkezelési ciklus sematikus bemutatása	31
37. ábra, A Maradó feszültség mérő próbatest fő méretei	33
38. ábra, Kinyomtatott maradó feszültség mérő próbatestek	33
39. ábra, Az AM gyártásnál alkalmazott maradó feszültség próbatest vágásra, majd az emiatt létrejövő maradó alakváltozás	34
40. ábra, Maradó feszültség mérő próbatest feszültségeinek oldása során kialakuló maradó alakváltozás	35
41. ábra, A röntgendiffrakció elvi ábrája	35
42. ábra, XRD maradó feszültség mérés a gyakorlatban.....	36
43. ábra, XRD vizsgálatokhoz, a próbatesteket felvett mérési vonalak	36
44. ábra, „A” jelű, 1 mm vastag próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után	38
45. ábra B jelű, 1 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve	38
46. ábra C jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után.....	39
47. ábra, D jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után	39
48. ábra, E jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve.....	40
49. ábra, F jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve.....	40
50. ábra, G jelű, 3 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után	41
51. ábra, H jelű, 3 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve.....	41
52. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1 mm A) és B); 2 mm C), D), E) és F); valamint 3 mm G) és H) jelű darabok maradó feszültség átlag értékei.....	42

53. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott maradó feszültség próbatestek átlag értékei, a): A,C,D,G jelű darabok esetében tárgyasztaltól oldott állapotban, valamint b): B,E,F,H jelű darabok esetében hőkezelt állapotban	42
54. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1mm vastag (A,B - átlag), 2mm vastag (C,D,E,F- átlag) és 3mm vastag (G,H - átlag) próbatestek Z irányú felhajlási értékei	43
55. ábra, Módosított maradó feszültség mérő próbatestek, a 3D nyomtató tárgyasztalán, illetve vázlatosan	44
56. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlása, a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint alapállapotban (I, J, K)	45
57. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlása, a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint 2X olvasztott állapotban (L, M, N)	46
58. ábra, Alapbeállításon és kétszeres olvasztással nyomtatott darabok felhajlási mértékének sorba állítása	46
59. ábra, Instron 5980-as szériájú, 600kN erő kifejtésre is alkalmas szakítógép	48
60. ábra, Orientációs különbségeket vizsgáló szakítópálcák méretei.....	49
61. ábra Az „YX” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatest eredményei.....	49
62. ábra, Az „YX” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló, a tárgyasztalra 45°-ban döntött próbatestek eredményei.....	50
63. ábra, Az „YZ” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatestek eredményei	50
64. ábra, A vizsgált szakítópálcák felületei értékei: a) 402,39 mm ² ; b) 583,05 mm ² ; c) 762,86 mm ²	51
65. ábra, Maradó feszültségek a különböző felületi kiterjedésű szakítópálcákban	51
66. ábra, Az „YX” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei.....	52
67. ábra, Az „YX” orientációjú, 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei.....	52
68. ábra, Az „YX” orientációjú, a) 402,39 mm ² ; b) 583,05 mm ² és c) 762,86 mm ² felületi kiterjedésű próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási értékei	53
69. ábra, Fő vizsgálati szakítópálcák méretei	54
70. ábra, Az „YZ” orientációban 3D nyomtatott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcák	54
71. ábra, Az „YZ” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági eredményei	55
72. ábra, Az „YZ” orientációjú, 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági eredményei	55

73. ábra, Az „YZ” orientációjú, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási értékei.....	56
74. ábra, Utókezelésként alkalmazott H900-as öregítési hőkezelési program.....	57
75. ábra, Töretfelületek SEM felvételeinek különbségei az a) nyomtatott; b) lágyított; és c) öregített darabok között.....	57
76. ábra, A nyomtatott, lágyított és öregített állapotok közötti szakítószilárdságbeli különbség.....	58
77. ábra, Jelenlegi kutatás értékei összehasonlítva különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [74]-[83].....	58
78. ábra, 2 mm-es, kétszeres olvasztási cikluson készített szakítópálcák eredményei.....	60
79. ábra, Húzófeszültségi terhelés rétegekhez képesti iránya az a) „YX” és b) „ZX” orientációkban	60
80. ábra, Zeis EVO MA 10 típusú SEM berendezés	61
81. ábra, Bruker D8 Discovery XRD berendezés.....	61
82. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsága és nyúlása alapnyomtatási állapotban	62
83. ábra, 2 mm vastag, alapbeállítású próbatest töretfelületi felvétele.....	63
84. ábra, 3 mm vastag alapbeállítású próbatest töretfelületi felvétele.....	63
85. ábra, Alapbeállítással nyomtatott próbatest nyomtatási hibája, ahol a porszemcsék nem olvadtak meg	64
86. ábra, Alapbeállítással nyomtatott próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele	64
87. ábra, Alapbeállításon nyomtatott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye.....	65
88. ábra, Alapbeállításon nyomtatott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye	65
89. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek kétszer olvasztott állapotban	66
90. ábra, 2mm vastag, kétszeres olvasztású próbatest töretfelületi felvétele	67
91. ábra, 3 mm vastag kétszeres olvasztású próbatest töretfelületi felvétele	67
92. ábra, 2 és 3 mm vastag kétszeresen olvasztott próbatest szívós törése	68
93. ábra, Kétszer átolvasztva nyomtatott próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele	68
94. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye.....	69

95. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye.....	69
96. ábra, 2mm és 3mm vastag próbatestek H900 állapotban	70
97. ábra, 2 mm vastag, H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele	71
98. ábra, 3 mm vastag H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele	71
99. ábra, 2 és 3 mm vastag H900 hőkezelt próbatest megmaradó nyomtatási hibájának felvétele	72
100. ábra, Alap nyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele.....	72
101. ábra, Alapbeállításon nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye	73
102. ábra, Alapbeállításon nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye	73
103. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek egyszerre kétszer olvasztott és H900 állapotban	74
104. ábra, 2 mm vastag egyszerre kétszeresen olvasztott és H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele.....	76
105. ábra, 3 mm vastag egyszerre kétszeresen olvasztott és H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele.....	76
106. ábra, 2mm vastag egyszerre kétszeresen átolvasztott és H900 hőkezelt próbatest szívós és rideg törési felülete.....	77
107. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestről készült próbatest szemcseszerkezetének SEM felvétele	77
108. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye	78
109. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye	78
110. ábra, A „ZX” orientációban nyomtatott darabok szakítószilárdsága a különböző vizsgálati állapotokban	79
111. ábra, A „ZX” orientációban nyomtatott darabok nyúlása a különböző vizsgálati állapotokban	80
112. ábra, Módosított 76. ábra, a „ZX” orientációs darabok összehasonlítva különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [74]-[83].....	80