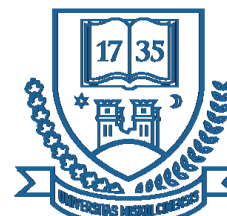


Kerpely Antal Anyagtudományok és -technológiák Doktori Iskola

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

Témavezetői ajánlás

Kovács Sándor Endre, 3D fémnyomtatással előállított acéltermékek tulajdonságainak vizsgálata című PhD értekezéséhez

Kovács Sándor Endre, Járműipari Öntészeti szakirányos BSc, majd Kohómérnöki MSc tanulmányainak befejezését követően 2020 szeptemberében kezdte meg doktori tanulmányait.

Kutatási témájának az egyik széles körben alkalmazott 3D fémnyomtatási eljárással (SLM) előállított acéltermékek vizsgálatát választotta, mely még napjainkban és a közeljövőben is bőven fog kutatási potenciált biztosítani a tématerülettel foglalkozók számára.

Már MSc tanulmányai alatt is az Additív Technológiák szakterületét kutatta és 2018-ban aktívan részt vett a Miskolci Egyetem Öntészeti Intézetének műhelycsarnokában telepített 3D fémnyomtató berendezés telepítésében.

Az ezt követő években a Miskolci Egyetemen az első felhasználók között a gyakorlatban is foglalkozott ezzel a tématerülettel, melynek eredményeként sikeresen megvédte az ebben a témában íródott diplomamunkáját is.

A jelölt doktori tanulmányait a kihívásokkal teli Covid időszakban is mindvégig kiemelkedő szorgalommal és elhivatottsággal végezte, melynek során több kutatási projektben (STEMUP, UMA3) is részt vett.

Már a képzés kezdetétől világosan megmutatkozott tudományos érdeklődése és önálló kutatómunkára való alkalmassága. Tanulmányai során következetesen és módszeresen építette fel kutatási tervét, az elméleti háttér áttekintésétől kezdve a kísérleti vizsgálatok tervezésén és kivitelezésén át az eredmények részletes kiértékeléséig.

Doktori tevékenységét 2022 februárjától munka mellett folytatta, mely további kihívások elé állította, ám kitartásának és szorgalmának eredményeként elkészült PhD értekezése is bizonyítja a szakma iránti szeretetét.

Székesfehérvár, 2025.08.11



Dr. Varga László

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés.....	1
2. Szakirodalmi összefoglaló.....	4
2.2. Az additív gyártástechnológiai folyamatok bemutatása.....	4
2.2.1. Felületmodellek és forrásfájl generálás.....	5
2.2.2. A porágyas 3D nyomtatás bemutatása.....	6
2.3. Az additív gyártástechnológiai eljárások ipari eloszlása.....	9
2.4. Az additív gyártástechnológiával végzett gyártás kihívásai.....	10
2.4.1. Az egyedi geometriájú és a nagy szériában gyártott termékek gyártása.....	10
2.4.2. Az építési idő és a felbontás közötti összefüggés.....	10
2.4.3. A felhasználható anyagok mennyisége, tisztasága és kezelése, valamint a támaszelemek építési stratégiája.....	11
2.5. A 3D nyomtatás során kialakuló maradó feszültségek.....	12
2.5.1. A maradó feszültségek kialakulása.....	14
2.6. A 3D nyomtatási orientáció bemutatása.....	15
3. Feldolgozott irodalom összefoglalása, tudáshiány definiálása.....	17
4. Saját kutatás bemutatása.....	18
4.1. A 17-4 PH rozsdamentes acél ötvözet hőkezelése.....	23
4.2. A maradó feszültségek mérése.....	24
4.2.1. A maradó feszültség vizsgálatok eredményeinek bemutatása, rendszerezése...	28
4.2.2. Eredmények összefoglalása.....	32
4.2.3. Maradó feszültség mérő próbatetek egy nyomtatási ciklusban történő gyártása.....	33
4.2.4. A módosított maradó feszültség próbatetek eredményeinek összefoglalása....	37
4.3. A 17-PH rozsdamentes acél próbatetek szakítószilárdsági vizsgálatai.....	38
4.3.1. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatetek.....	39

4.3.2. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek eredményeinek összefoglalása	40
4.3.3. Az „XY” orientáción gyártott különböző felületi kiterjedésű próbatestek vizsgálatai	41
4.3.4. Az „XY” orientáción elkészített próbatestek eredményeinek összefoglalása ...	44
4.3.5. Az „YZ” orientáción elkészített darabok szakítószilárdsági vizsgálata	44
4.3.6. Az „YZ” orientáción elkészített darabok eredményeinek összefoglalása	48
4.3.7. A „ZX” 3D nyomtatási orientációban elkészített darabok vizsgálata.....	49
4.3.8. A „ZX” orientációs 3D nyomtatási eredmények összefoglalása	69
5. Összefoglalás	74
6. Summary.....	76
7. Tézisek.....	78
Köszönetnyilvánítás	82
Az MTMT-ben feltüntetett, 3D nyomtatás témakörben végzett publikációs tevékenység .	83
Irodalomjegyzék	85
Ábrajegyzék.....	91
Függelék	96
1. Melléklet.....	96

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, mint például a fémöntés, a CNC esztergálás, a kovácsolás, a húzás és a hajlítás. Ezeknél az eljárásoknál, az alakadási folyamat, egy formaüreg feltöltésével, vagy egy tömb anyag formára alakításával történik. Mindkét esetben nagy anyagvesztés 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 topológiailag optimalizált, kikönnnyített 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 topológiailag optimalizált terméktervezési folyamatot mutat be.

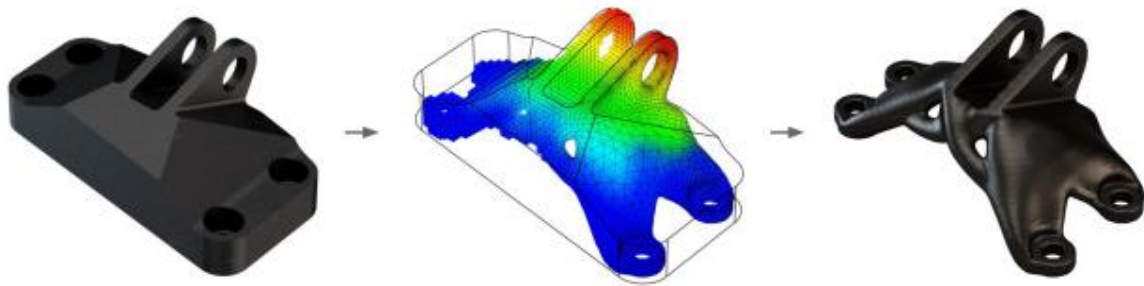


1. ábra, Topológiailag optimalizált alumínium tartóelem

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 ösztérfogattal rendelkeznek, így kevesebb alapanyag szükséges az előállításukhoz. Ez fenntarthatóbbá teszi a terméket és a folyamatot is. A 2. ábra egy ilyen folyamatot mutat be az 1. ábrához hasonló példa alkatrészen. 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

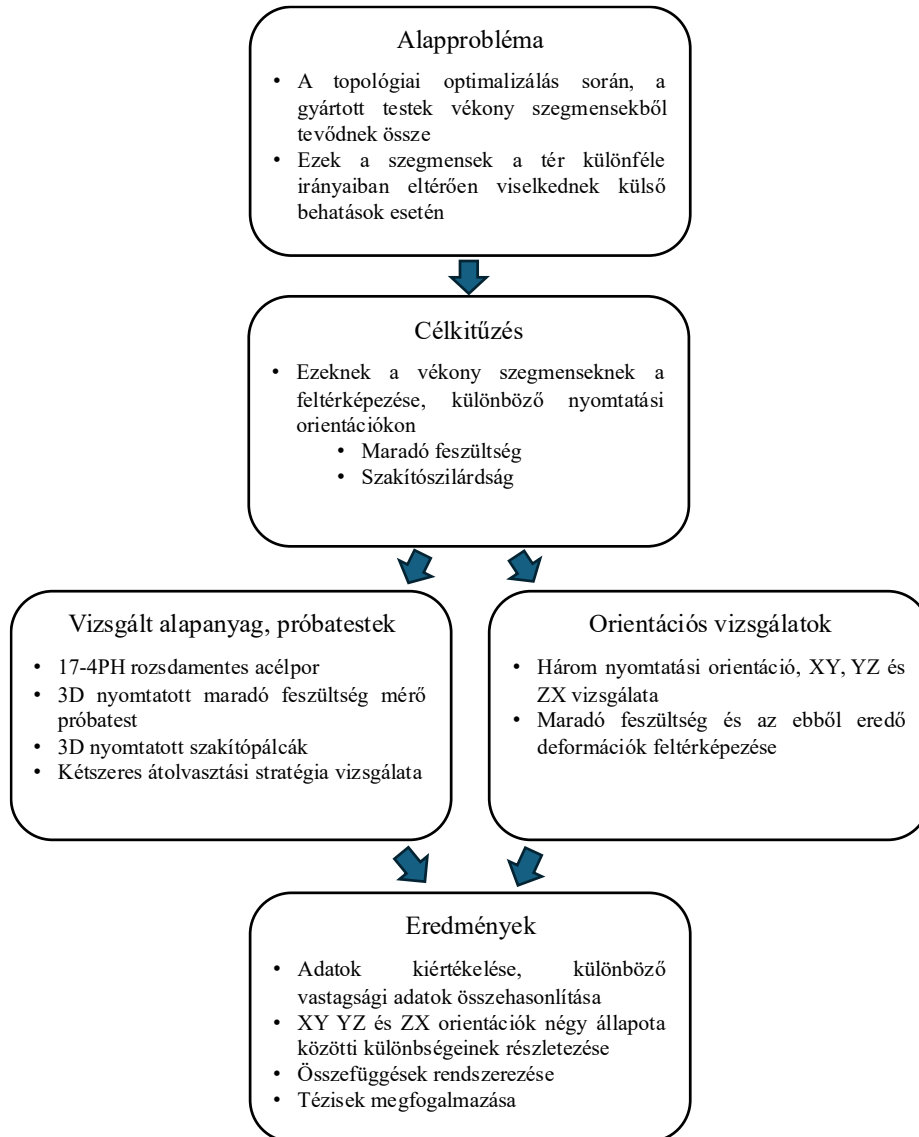
Kép forrása: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/>

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-nyúlás értékét javítsam, illetve maradó feszültségekből eredő alakváltozását csökkentsem. 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
		Tárgyasztaltól elválasztott 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 alkalmaztam.

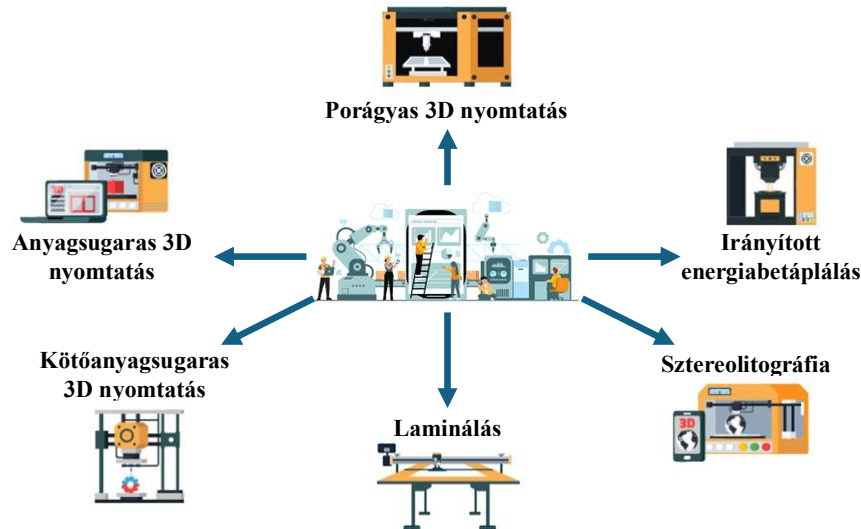


3. ábra, Kutatómunka vázlatos ismertetése

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, egy előnyomtatást követő, nagyobb energiasűrűséggel 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

A 3D nyomtatással, valamint ezen belül különféle AM eljárások létrehozásával és fejlesztésével, számos kutatócsoport, gyártó és egyetem foglalkozik. A 4. ábra ezeket az eljárásokat mutatja be.



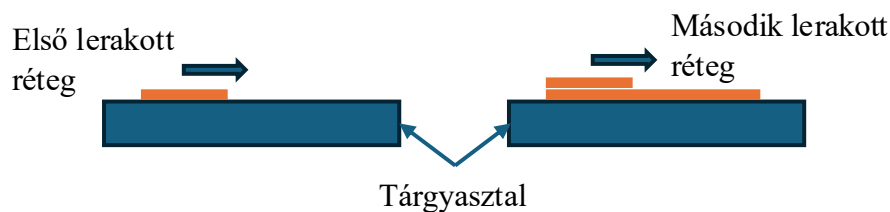
4. ábra, Az AM folyamatok összefoglalása

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

A kutatási területem alapjául választott porágyas 3D nyomtatási eljárást a 2.2.2. alfejezet mutatja be részletesen.

2.2. Az additív gyártástechnológiai folyamatok bemutatása

Az AM folyamatok esetében, a gyártó berendezés típusától (legyen az folyadék alapú, huzalt alkalmazó vagy porágyas) és a felhasznált alapanyagoktól függetlenül (mely lehet polimer, kerámia vagy fém), minden eljárás ugyanazon az alapelven működik, miszerint a felépítés rétegről rétegre történik. Az 5. ábra mutatja be az építés elvét, ahogyan az aktuálisan lerakott rétegeket vagy a tárgyasztal, vagy egy korábban lerakott réteg előzi meg [4][5]. A 3D nyomtatási folyamat addig tart, amíg az utolsó réteg elhelyezésre nem került.



5. ábra, 3D nyomtatás rétegeképzési stratégiája

A 4. ábra a folyamatok legegyszerűbb csoportosítását szemlélteti. Ezen kívül azonban további csoportosítás lehet, az alkalmazott alapanyagok típusa (fémek, kerámiák, polimerek, kompozitok) vagy a felhasznált anyagok fizikai megjelenése (huzal, folyadék, por), illetve, a kötést létrehozó közeg vagy mód (polimerizáció, fémes kötés, kötőanyag alkalmazása) szerint [6]. A különböző anyag és kötésmód párokból létrehozott kész termék különböző feladatot képes ellátni. Ezért amennyiben nem csak egy prototípust szeretnénk elkészíteni, hanem szerkezeti elemként, vagy működő alkatrészként kívánjuk alkalmazni a gyártott darabot, megfelelő körütekintéssel kell megválasztani az alkalmazandó eljárást.

Ahhoz, hogy a 3D nyomtatás, a kiválasztott folyamat szerint 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 [7]. A maradék 10% erősen kötődik az adott folyamat specifikus paramétereikhez. Sem folyékony alapanyagot felhasználó, sem porágyas rendszereknél nem szabad úgy megtervezni a nyomtatni való geometriát, hogy a nem feldolgozott alapanyagot a szilárd test közrefogja, ezzel csapdába ejtse [8][9].

A folyamatok kiindulási pontja minden esetben egy paraméterekkel ellátott 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 tömör 3D testet felületmodellé, általában STL fájlra kell alakítani. Ez a kiterjesztés az egyik legelterjedtebb, valamint minden egyes berendezés által támogatott fájlformátum [10]. Elérhetőek azonban a piacon ennek fájlformátumnak alternatívái is, eltérő geometriai megközelítéssel. A generált felületmodell az STL kiterjesztés esetén háromszögekből építi fel a megrajzolt testet. A háromszögeknek az összmenyisége a felületmodellben nagyban befolyásolja a 3D nyomtatás végkimenetelét. Ezt hívjuk felbontásnak [11]. A 6. ábra ennek egy példáját mutatja be.



6. ábra, Felületmodell, különböző mennyiségű háromszög elemekből felépítve

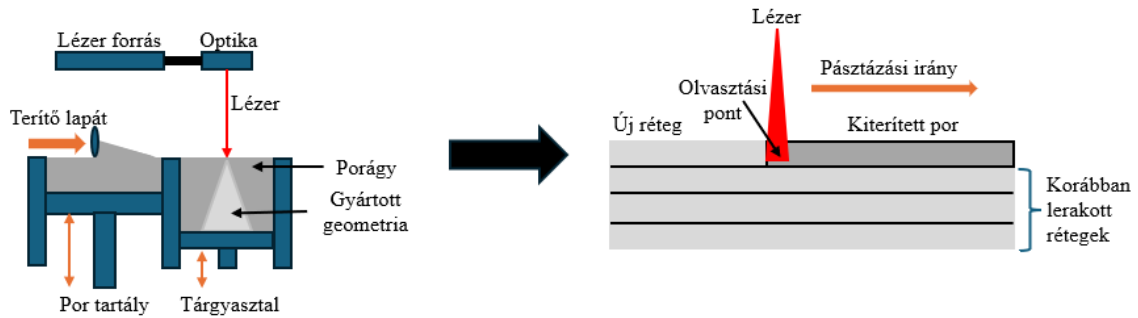
Kép forrása: <https://www.3dnatives.com/en/researchers-integrate-dna-instructions-into-a-3d-part-to-facilitate-its-duplication-241220194/>

Minél nagyobb a felbontás, annál részletesebb lesz a generált felületmodell, azonban lényegesen lassabb a 3D geometria konverziós folyamata 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 elkészültével megkezdhető a szeletelési folyamat. A szeletelés abból áll, hogy a felhasználó által betáplált rétegvastagságnak megfelelően a 3D nyomtató berendezés szoftvere a generált felületmodellt az általános „XYZ” koordináta rendszer „Z” irányában, a rétegvastagságnak megfelelő vastagságú szeletekre vágja, majd ezeken a szeleteken belül, felrajzolja a megmunkáló egység pásztázásának útvonalát [12]. 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, 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 porágyas 3D nyomtatás bemutatása

A lézert alkalmazó porágyas 3D nyomtatás az angol laser powder bed fusion (LPBF) kifejezésből származik. Az általános 3D nyomtatási tulajdonságokon kívül, minden porágyas kategóriába tartozó 3D nyomtatási folyamat megadott karakterisztikákon osztozik, melyek magukba foglalják a különböző energiaforrásokat, a porok kezelését, a beadagolási

és az elsimítási eljárásokat, a tárgyasztal mozgatását, valamint a fel nem használt alapanyag kivezetését a folyamatból. A legjellemzőbb energiaforrás kialakítás melyet ezeknél a berendezéseknél alkalmaznak, az valamilyen szilárdtest lézer [14][15]. A 7. ábra szemlélteti a nyomtatási elrendezést sematikusán, míg a 8. ábra egy ilyen módon gyártott testet mutat be.

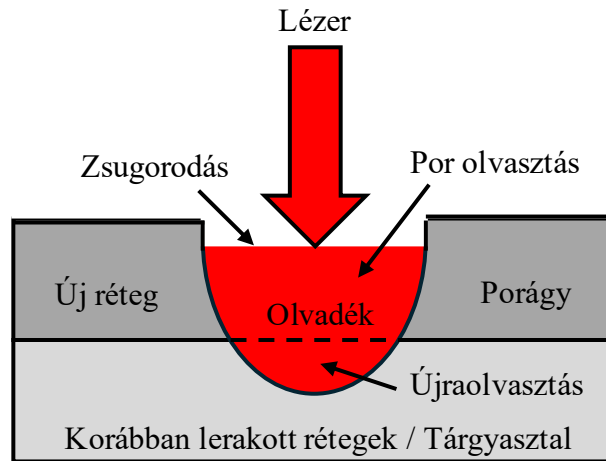


7. ábra, Porágyas 3D nyomtatás sematikus ábrája



8. ábra, LPBF technológiával előállított test

A por alapanyag a rendszerben, amennyiben a gyártó berendezés lehetővé teszi, emelt hőmérsékleten van jelen, amelyet infravörös fűtőegységek biztosítanak. Ez az előmelegítés csökkenti az esetleges folyamat közben bekövetkező deformációt [16]. A 3D nyomtatási folyamat közben, a berendezés egy folyamatos sebességgel haladó megmunkáló lézer energia forrással pásztázza végig a meghatározott keresztmetszetet, valamint az e mellé generált támaszelemeket, melyeket a folyamat során minden esetben alkalmazni kell, hogy a gyártott testek a rétegeképítés során ne legyenek képesek deformálódásra. Ezek a támaszelemek rögzítik a tárgyasztalhoz az épülő geometriát, illetve ezeken keresztül a tárgyasztal irányába hővezetés is történik. Ahogy az a 9. ábrán is látható, a nyomtatási folyamat közben lehetetlen azt elkerülni, hogy az energiaforrás ne hatoljon be a korábban lerakott rétegekbe, ennek következtében az energia nem csupán hővezetés útján, hanem közvetlen módon fejt ki a hatását [17].



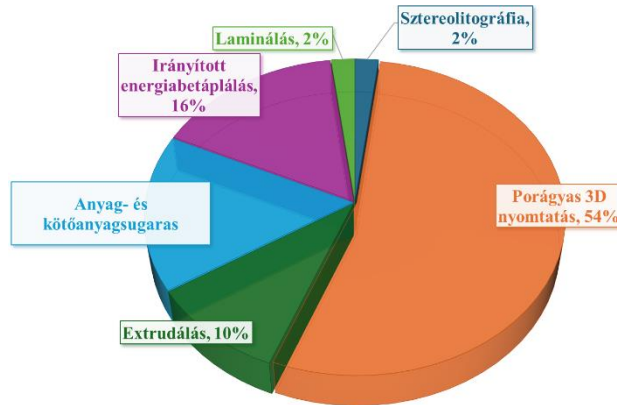
9. ábra, 3D nyomtatás olvasztásának karakterisztikája

Amikor egy adott por réteg kiterítésre kerül, az optikai rendszerrel fókuszált energiaforrás elkezd a működését, mely során végig pásztázza a teljes gyártandó keresztmetszetet. A beáramló energia hatására, a porszemcsék megolvadnak, illetve az energia intenzitásától és pásztázási sebességétől függően, a korábban lerakott rétegekben egy bizonyos mélységig újraolvadás és újraszilárdulás megy végbe. Lassabb pásztázási sebesség esetében azonos hőenergia mennyiség mélyebbre tud hatolni a már korábban lerakott térfogatban. Az újraolvasztott zónák kontrakciója kritikus pontja az LPBF gyártási folyamatnak. Az alkalmazott energia intenzitásának megfelelő kiválasztása azért is fontos, mivel az energianyaláb középpontja minden esetben a legintenzívebb, így azok a porszemcsék, amik ennek az útvonalába esnek még optimálisan beállított folyamat paraméterek mellett is átléphetik a forrás hőmérsékletét, így gázhalmazállapotba kerülhetnek [17]. A nagy intenzitású lézer porágyra kifejtett hatására során a kisebb frakciójú porszemcsék a védőgáz atmoszférájába kerülhetnek, majd lebegő helyzetükben képesek elérni azt a halmazállapot változást, mely defókuszálási jelenséget eredményezve csökkenti a lézer porágyba jutó intenzitását, így rontva a nyomtatás minőségét.

A pásztázási keresztmetszetet környező por, mely nem került összeolvasztásra, a rendszerben marad, így másodlagos támaszként szolgál. A felesleges por a gyártás végén visszajártható és újra felhasználható. Egy réteg elkészültével a berendezés a tárgyasztalt egy magassági szinttel lejjebb, a portároló egységet pedig a beadagolandó por mennyiségének 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 [18][19][20].

2.3. Az additív gyártástechnológiai eljárások ipari eloszlása

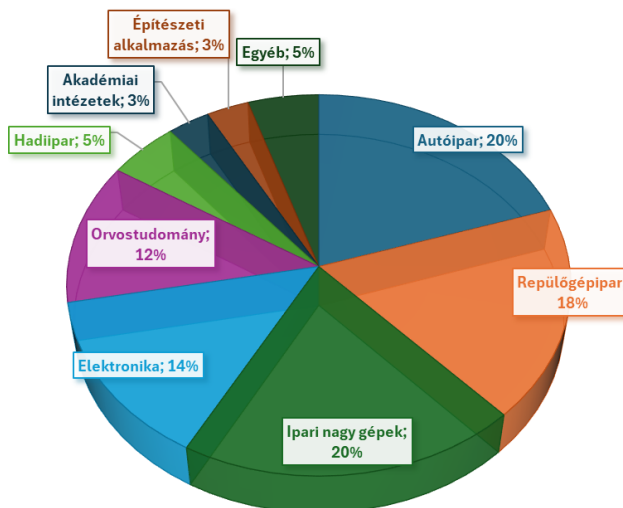
A különböző AM technológiák az évek során egymástól függetlenül nagy mértékű fejlődést mutattak, kialakítva az aktuális piaci helyzetüket. A „Wohler’s Report” 2021-es számában a 10. ábra szerint mérték fel az alkalmazott eljárások eloszlását.



10. ábra, AM eljárások piaci részesedése 2020-ban

Kép forrása: Wohler’s Report, 2021

Ez az eloszlás azt mutatja, hogy az ipari folyamatok közül, a porágyas 3D nyomtatás technológia fedi le az alkalmazás több mint 50%-át, az extrudálás, anyag- és kötőanyag-sugaras eljárás, laminálás, illetve az irányított energia betáplálás pedig az eloszlás maradék részén osztozik. A 11. ábra a 3D nyomtatási eljárások piaci részesedését mutatja be iparágak szerint.



11. ábra, AM technológiák ipari megoszlása

A bemutatott ipari megoszlás minden anyagtípusra vonatkozik [21]. Azonban az ipari fejlesztések és akadémiai kutatások fókuszában elsősorban a fém termékek additív gyártása található. A fémek 3D nyomtatásánál, a kevesebb selejt és forgácsmennyiség, valamint a

darabok utómunkálásának és tisztításának minimalizálása jelentősen csökkenti a gyártás környezetszennyezési mértékét, valamint mindig csak annyi alapanyagot használ fel a folyamat, amennyire ténylegesen szükség van. Ennek köszönhetően az ellátási lánc is jóval fenntarthatóbbá válik [22][23][24]. Azonban ez nem csak az alapanyagok, hanem a termékek ellátási láncára is hatással lesz. Abban az esetben, ha az alkatrészek egy részét fizikailag nem kell tárolni mivel csak digitális modell formájában létezik, amelyből bármikor elkészíthető a termék, az erre vonatkoztatott raktározási és kiszállítási költség csökkenthető, ami ugyancsak pozitív hatással van a globális káros anyag kibocsátás csökkentésére [25][26].

2.4. Az additív gyártástechnológiával végzett gyártás kihívásai

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. Ahhoz, hogy maximálisan ki lehessen használni egy adott AM eljárás előnyeit, úgy kell kiválasztani a használni kívánt technológiát, hogy egy alkatrész tervezése során ne kelljen kompromisszumokat kötni. 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.

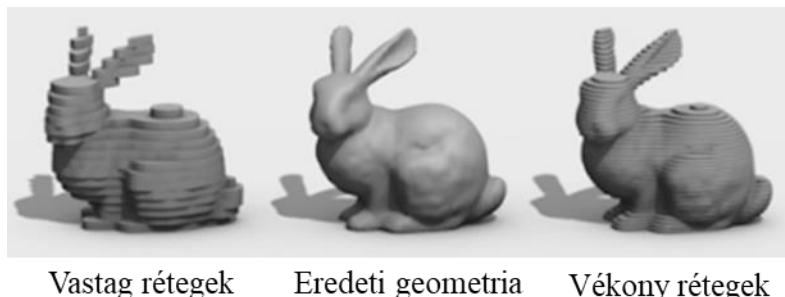
2.4.1. Az egyedi geometriájú és a nagy szériában gyártott termékek gyártása

Az fémes AM eljárások jelenlegi helyzetükben, leginkább kis darabszámú, vagy kis szériamennyiségű, nagy komplexitású termékek gyártására alkalmasak. A nagy szériaszámú termékek gyártását továbbra is lefedi a nyomásos öntés, illetve a CNC esztergálás. Ahogyan azonban azt a 11. ábra is bemutatja, az AM legjellemzőbb célcsoportjai az autóipar és a repülőgép ipar. Mindkét esetben akkor alkalmazzák, amennyiben nem lehet gazdaságosan tömeget csökkenteni, vagy egyedi alkatrészek gyártására van szükség. Ezeknek a daraboknak a nyomtatási ideje azon kritikus faktor lehet. Mivel a nyomtatási idő legtöbbször a vertikális kiterjedéstől függ, mindenféleképpen úgy kell megtervezni a munkateret, hogy minél több darab legyen elhelyezve a tálcán [27][28].

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 standard „XYZ” koordináta rendszerbeli „Z” irányú kiterjedésével, illetve a darabok felbontásával. Egy kevesebb rétegmennyiségből kialakított

test rövidebb idő alatt elkészül, azonban kisebb felbontása rontja a felületi minőséget és a szerkezeti integritást. Leegyszerűsítve, 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 a 12. ábra.



12. 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 elvégzik a gyártott darabokat felületének megmunkálását.

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

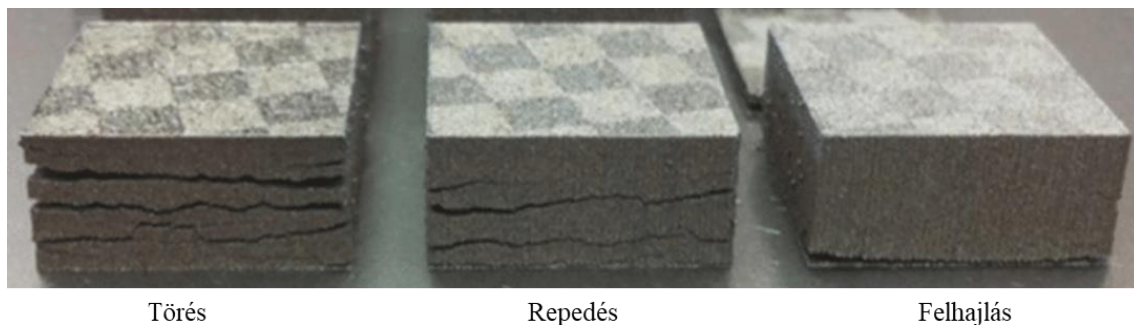
A kereskedelmi forgalomban kapható termékek jellemzője, hogy az anyagok széles skáláját fedik le, melyeknek megvan a maga helye és funkciója. Ez AM eljárások esetében erőteljesen korlátozott. A legtöbb AM berendezés, ami nem csak prototípust gyárt csak egyféle anyagtípust képes egyszerre kezelni. Ez 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, a folyamat végeztével fizikailag kell megoldani ezeknek az elemeknek a bontását. Ezek eltávolíthatóságát úgy kell megtervezni, hogy a tárgyasztalon tartsák az épülő darabokat, de a folyamat közben önmaguktól a tárgyasztaltól ne legyenek képesek elválni. Minden olyan esetben kötelező a támaszelemek használata, ahol a geometriában túlnyúlások, alávágások

vannak, vagy egymásban mozgó alkatrészeket egy nyomtatási folyamatban készítünk el [28]. Előnye a támaszelemek alkalmazásának, hogy könnyebb a darabok eltávolíthatósága a tárgyasztalról, valamint ezek a támaszelemek gondoskodnak a tárgyasztal felé történő hővezetés kialakításáról is.

A fémek nyomtatása jelentősen lassabb és drágább folyamat [29], 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 [30]. A védőatmoszféra használata kötelező, mivel ellenkező esetben oxidáció indulna el a folyamat közben keletkező olvadékcsepp felületén. Jellemzően nitrogén vagy argon gáz jelenléte mellett történik a 3D nyomtatás [31].

2.5. A 3D nyomtatás során kialakuló maradó feszültségek

Az AM folyamatok legnagyobb negatív tulajdonsága, hogy építés közben a folyamatos halmazállapot változából eredendő térfogatváltozás hatására nagy mértékű maradó feszültség tud kialakulni a gyártott testben, mely feszültség eloszlása nem egyenletes [32]. A 13. ábra mutatja be ezeknek a maradó feszültségeknek a hatását, amelyek olyan térfogati változásokhoz vezethetnek, mint vetemedések, repedések vagy törések.

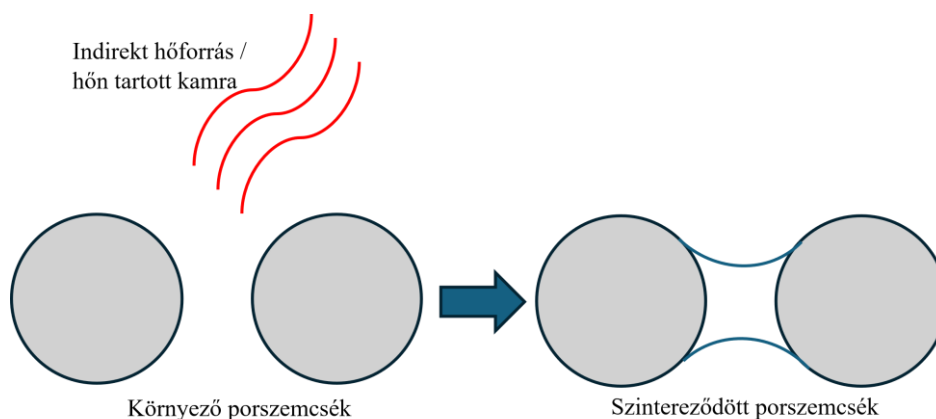


13. ábra, Maradó feszültség okozta geometriai roncsolódás porágyas 3D nyomtatott eljárással készült M2-es gyorsacél próbatesteken [33]

Ez minden olyan technológiánál jellemző, ahol a folyamatban magas hőmérséklet gradiens alakul ki. Az intenzív hőbevitel egységnyi felületen jellemzően a másodperc törtrészig van jelen. Ezalatt az idő alatt a térfogat megolvad és ahogy a hőforrás tovább halad lehűl, majd megszilárdul. Ahogyan azonban a 9. 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 hűtadási folyamat a rétegek között mennyire intenzíven játszódna le, függ attól, hogy mekkora az alkalmazott

energiasűrűség, valamint, hogy milyen az alapanyag hővezetési tényezője. 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 olvadáshoz közeli hőmérséklet alakul ki, míg az ettől távolabbi, főleg porágy alkotta zónákban, az alapanyag szobahőmérsékleten van jelen. Az újraolvasztott zónák kontrakciója kritikus pontja az LPBF gyártási folyamatnak. Amellett, hogy nagy hősokkot okoz a gyártott testen belül, egy nem jól megtervezett modell mindenképpen találkozni fog, ilyen jelenségre visszavehető olvasztási hibával a gyártás során. További hibalehetőség a gyártás során kialakuló maradó feszültségekből eredő alakváltozás.

Az egyik leggyakrabban alkalmazott megoldás a maradó feszültségekből eredő hibák csökkentésére a munkatér emelt hőmérsékleten tartása mely képes a maradó feszültségek több mint 85%-át eltávolítani a rendszerből [34]. Azonban ez az emelt hőmérsékleten tartott rendszer hatással van a porágy tulajdonságaira is. Miként a 14. ábra bemutatja, az emelt hőmérséklet hatására az energiának nem, vagy nem közvetlenül kitett szemcsék is változhatnak, ami során nem kívánt szintereződés alakulhat ki. Ez a jelenség növeli a porágy átlagos szemcseméretét [35].



14. 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 hő változásnak a mértéke a folyamat előrehaladtával egyre nagyobb, így akár egy pár órás nyomtatás során is 30-40°C hőmérséklet különbség mérhető a munkatérben. Az, hogy a hővezetés a gyártott testet milyen mélységig befolyásolja, a felhasznált alapanyag hővezetési képességétől függ [36][37].

2.5.1. A maradó feszültségek kialakulása

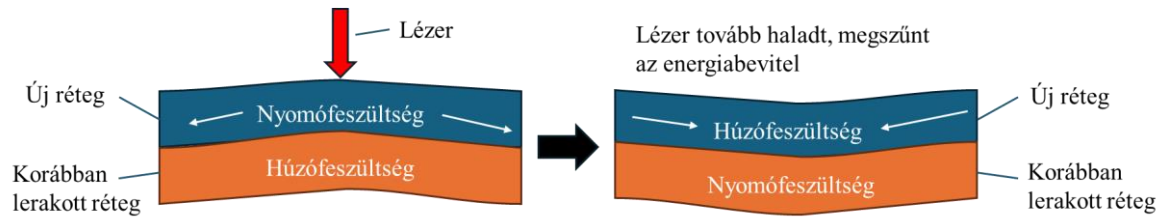
Definíció szerint, maradó feszültség alatt azokat a mechanikai feszültségeket értjük, melyek valamely munkadarabban, illetve szilárd testben keletkeznek úgy alkotva egyensúlyi rendszert, hogy a darabra semmilyen külső erő vagy nyomaték nem hat [38]. Ezek a feszültségek mértéküktől függően többféle módon 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 [39]. Jellemző az is, hogy a mikro szinten ható feszültségek apró repedései indukálják a makro és nagyobb nagyságrendű repedések megjelenését. Három fő fajtája fordul elő [40][41][42]:

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 a szemcse orientációtól függően változnak, mely feszültségekhez vezetnek. A másik, mely jelentősebb, a különböző fázisátmenetekre és ezek mechanikai tulajdonságaira vezethető vissza.
3. Szubmikroszkopikus feszültség: atomi nagyságú, oka valamely kristályrácsban belüli rendellenesség, vakancia, intersticiós vagy szubsztitúciós atom, illetve diszlokáció.

A maradó feszültségeket kialakulásuk szerint szintén három fő fajtába lehet sorolni. Az egyik csoport, a hőmérsékleti gradiens alapján kialakuló feszültségek az LPBF technológia esetében jelentősek. 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, nem jellemző a LPBF technológiánál.

A hőmérsékleti gradiens miatt kialakuló maradó feszültség lényege, hogy az LPBF folyamat során a gyors felhevítés és lehűlés a feszültség indukáló jelensége [43]. Az energiának közvetlenül kitett, felhevített zóna tágulása nagyobb, mint amelyik hővezetésen keresztül kap energiát. Ennek megfelelően, a 15. ábra szerint, a mélyebben lévő rétegek korlátozzák a térfogatváltozást, ezzel nyomófeszültséget indukálnak az új rétegben és húzófeszültséget a korábban lerakottakban. Az energiaforrás továbbhaladtával ez a nyomó-

és húzófeszültség pár megfordul. Így a gyors olvasztás és újra szilárdulás ciklusok hatására rétegenként épül be a maradó feszültség a térfogatba [39].



15. ábra, A lézer energia hatására létrejövő nyomó és húzófeszültség az aktuális és a korábban lerakott rétegekben

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 paramétertől függ. Szerepet játszik a nyomtatási orientáció, a lézer teljesítmény, valamint ennek mozgási sebessége. Különböző alapanyagok között ez a kapcsolat eltérő mértékben változhat [44]. 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 [45]. Ezeket az okokat foglalja össze vázlatosan a II. táblázat.

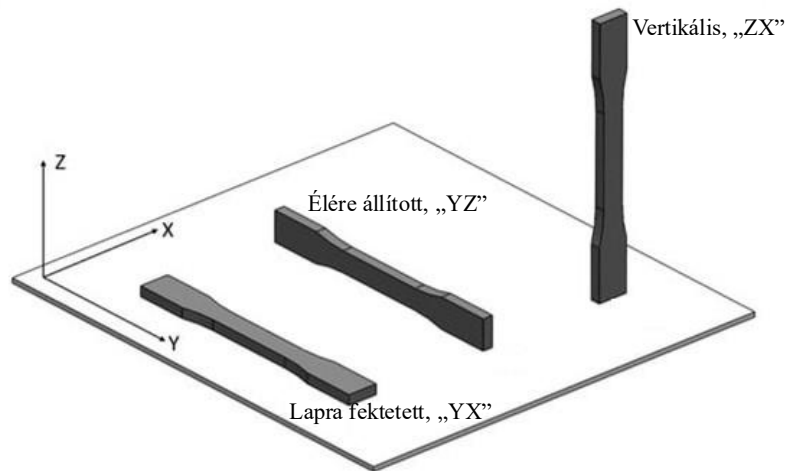
II. táblázat, A maradó feszültségek kialakulásának fő befolyásoló tényezői 3D nyomtatott fém termékek esetében

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 [46], 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 térbeli kiterjedése [47][48]. A 16. ábra szemlélteti ennek egy leegyszerűsített rendszerét [49].



16. ábra, Egy szakítópálca lehetséges nyomtatási orientációi [49]

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 [50]. 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 hosszúkás, 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 [51]. 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 [52]. 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 [53][54]. Lapos szakítópálcák esetében a szakirodalomban megfogalmazottak alapján, kétféle nyomtatási irány preferált, a lapra fektetett, vagy „YX” orientált, illetve a hosszanti élére állított, vagy „YZ” orientált. Az „YX” orientáció használatára a fő indok az, hogy kevés rétegből felépülnek a testek, és a hosszan lefektetett rétegekre párhuzamosan fog érkezni a terhelés, így minimalizálva a nyomtatási időt és 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 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.

A „Z” tengely irányába orientált, vertikális, próbatestek esetében ez a maradó alakváltozás elhanyagolható, így ezek kivétel nélkül alkalmasak további tesztelésre. Ezek alapján a következő tudáshiányt fedeztem fel:

- A komplex geometriák gyártásánál nem minden esetben alkalmazható a szakirodalom által ajánlott optimális „YX” orientáció. Az ilyen geometriákat felépítő vékony szegmensek egy része „Z” orientációban lehet jelen a gyártás során. A „Z” orientált próbatestek tulajdonságainak fejlesztésével azonban kevés munka foglalkozik
- Dolgozatom írásával bezárólag, nem találtam olyan kétszeres átolvasztást alkalmazó nyomtatási stratégiát, mely a „Z” orientált darabok esetében, a primer pásztázási 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. Ennek a 3D nyomtatási folyamaton belüli mérséklésével kevés szakirodalom foglalkozik.

4. Saját kutatás bemutatása

A kutatási munkám során LPBF 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 17. ábrán látható Orlas Creator LPBF 3D nyomtató berendezéssel valósítottam meg, a nyomtatás paramétereit a III. táblázat foglalja össze.



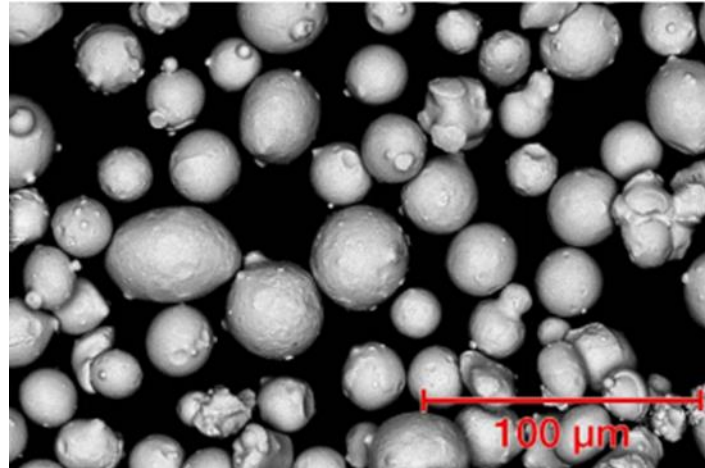
17. ábra, Orlas Creator 3D fémnyomtató berendezés

III. táblázat, A 3D nyomtató berendezés gyártási paramétereit

Gyártási paraméter:	Érték:
Lézer energia típus	Yb: szálal, 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 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 18. ábra mutatja be a 17-4PH rozsdamentes acél por morfológiáját, illetve a IV. táblázat az összetételét.



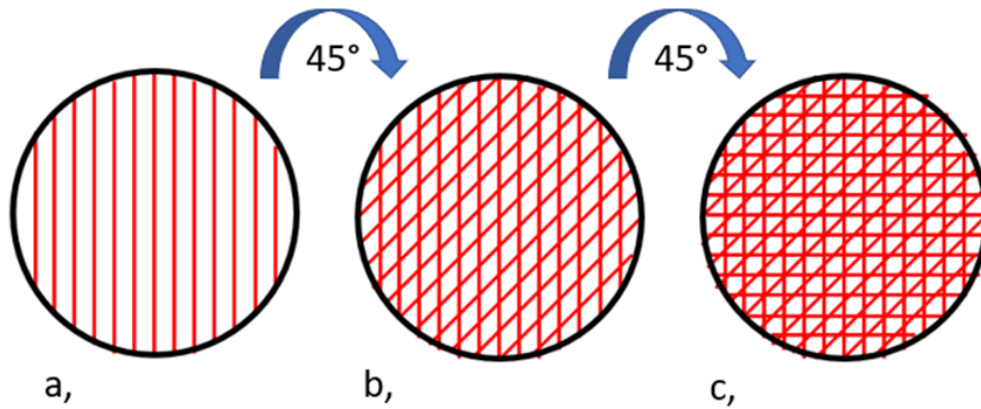
18. ábra, 17-4PH acélpor SEM felvétele

IV. táblázat, A 17-4PH acélpor kémiai összetétele

Összetétel	C	Cr	Cu	Ni	Nb	Mn	Si	Fe
Tömegszázalék (m/m%)	0,02	16,52	3,94	4,47	0,3	0,04	0,43	74,28

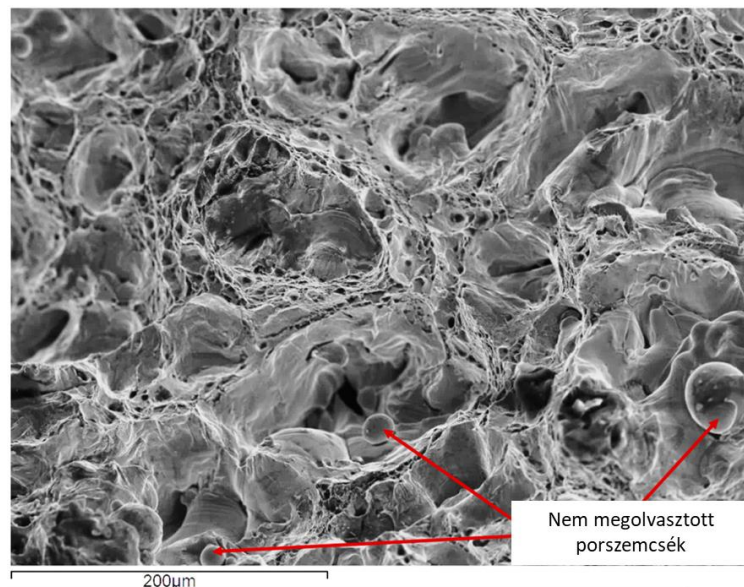
A por alapanyag gáz atomizációs eljárással készült, szferoidikus morfológiával. Erre a gömbszerű kialakításra azért van szükség, mert a por kiterítése során, a gömb alakú szemcsék elgördülnek egymáson és nem hagynak csíkot a porágy felületén. A porágy tökéletes terítése elengedhetetlen fontosságú a pontos nyomtatás véghezviteléhez.

Kiindulási állapotnak, előnyomtatásként, minden esetben a berendezés alapbeállítását vettem, mely 25 μm rétegvastagságot határozott meg, 1200 mm/s-es pásztázási sebességű, 107W teljesítményű olvasztás mellett, mely iránya minden egymást követő réteg esetében 45°-os szögben, óramutató járásával megegyezően változott. Ezt mutatja be a 19. ábra, ahol az „a,” a kiinduló réteg, a „b,” és a „c,” pedig az egymást követő lerakott rétegeket szimbolizálja. A pásztázási vonalak közötti távolság 80 μm volt.



19. 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 [59]. Az előnyomtatáson elkészített mintáknak az átlagos térkitöltése 97% volt, ez $7,6 \text{ g/cm}^3$ sűrűségértéknek felel meg [56][57]. Ez részben azért alacsonyabb, mint a hagyományos eljárással, fémöntéssel, kovácsolással, CNC esztergálással készült próbatestek esetében, mert miként azt a 19. 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 20. ábra szemléltet, a 3D nyomtatási folyamat során visszamaradó, nem megolvasztott porszemcsék.



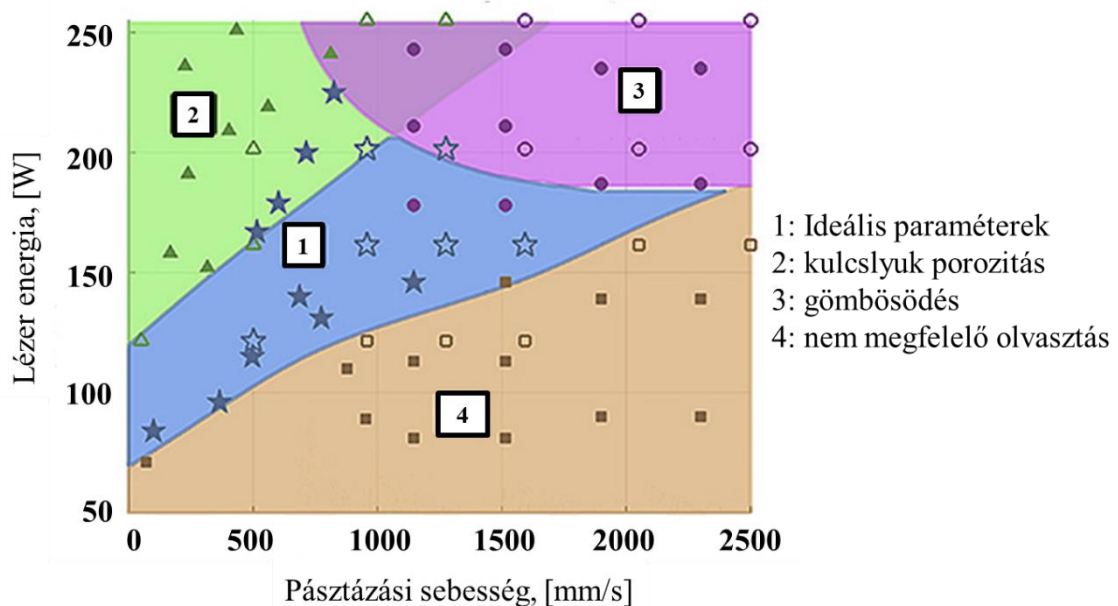
20. ábra, Nem megolvasztott porszemcsék a 107W teljesítménnyel, 1200mm/s pásztázási sebességgel elkészített 17-4PH szakítópálca töretfelületén.

A kiindulási állapotnak megfelelően, az V. táblázatban foglaltam össze a felhasznált anyag jellemzőket.

V. táblázat, A disszertációban alkalmazott anyagállandók és jelölésük

Megnevezés	Jelölés	Érték
Sűrűség – 1 [55][56]	ρ_1	7,6 g/cm ³
Sűrűség – 2 [56][57]	ρ_2	7,75 g/cm ³
Young modulus – 1 [56][58]	E_1	180 GPa
Young modulus – 2	E_2	195 GPa
Poisson tényező	ν	0,30

A feldolgozott szakirodalom kimondja [55][56][57][58], hogy a 3D nyomtatás során eltérő energiasűrűséggel kinyomtatott darabok esetében a porozitások kialakulása miatt, a sűrűség és a Young-modulus értéke eltérő lehet. A 21. ábra mutatja be a különböző energiasűrűséggel nyomtatott Ni-5wt.%Nb termékek példáján [73], hogy milyen energiasűrűség alkalmazásánál, milyen porozitás képes kialakulni a térfogatban. Az ábrán látható értékek általánosan alkalmazhatók fém termékek porágyas 3D nyomtatásának esetében [74][75].



21. ábra, Fém ötvözetek porozitás képződési valószínűség, energiasűrűségekre vonatkoztatva [73]

A kísérleti sorozatokban, a VI. táblázat lézer teljesítmény és pásztázási sebesség értékeit alkalmaztam.

VI. táblázat, 3D nyomtatási olvasztási stratégiák

Olvasztási stratégia neve	Pásztázási sebesség, [mm/s]	Lézer teljesítmény, [W]
Előnyomtatás	1200	107
Kétszeres átolvasztás	800	175

Azonban ahhoz, hogy ezeket az értékeket energiasűrűség formájában lehessen értékelni, az első egyenletet alkalmaztam:

$$E_V = \frac{P}{v \cdot h \cdot t} \quad (1) [76]$$

ahol „P” a lézer teljesítmény wattban számítva, „v” a pásztázási sebesség mm/s-ban, „h” a pásztázási vonalak távolsága egymástól, mm-ben, valamint „t” a rétegvastagság, szintén mm-ben. Ez alapján a VII. táblázat ábrázolja a kapott energiasűrűség értékeket, az alkalmazott olvasztási ciklusokon belül.

VII. táblázat, 3D nyomtatási energiasűrűségek

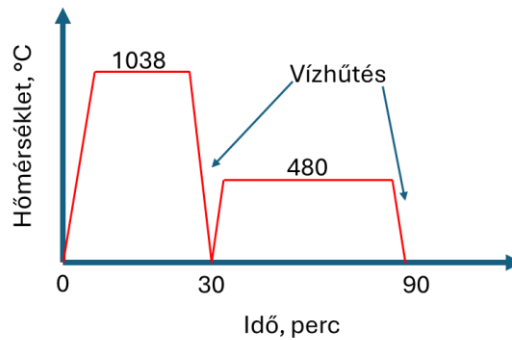
	Első olvasztási ciklus	Második olvasztási ciklus
	Energiasűrűség 1, [J/mm ³]	Energiasűrűség 2, [J/mm ³]
Előnyomtatás	44,58	-
Kétszeres átolvasztás	44,58	109,38

A VII. táblázat alapján, az általam alkalmazott primer olvasztás 44,58 [J/mm³] számított energia sűrűség értéke az alsó hibasávba esik, melyet a 20. ábra igazol. Ahhoz, hogy ezt a hiba arányt a nyomtatási cikluson belül mérsékeljem, alkalmaztam egy kétszeres átolvasztási ciklust. A kétszeres átolvasztás lényege, hogy a primer olvasztási folyamatot követően, a portérités előtt, a berendezés az utolsó megszilárdult réteg felületén, a VII. táblázatnak megfelelően, nagyobb energiasűrűséggel végez el ismételt pásztázást. Ez a kétszeres átolvasztás a 21. ábra szerint a kulcslyuk porozitás képződésének valószínűségi határára esik, azonban az ábra értékei a porágy közvetlen olvasztása esetén érvényesek. Azonban, mivel az újraolvasztás egy már megszilárdult rétegen megy végbe, a nagyobb energiasűrűség a szilárd térfogatban hasznosul, így mérsékelve a bevitt hő hatását. Másik jellemző hibajelenség nagyobb energiasűrűségek alkalmazása esetén, az energiabevitel hatására, a nyomtatási atmoszférába kerülő kisebb frakciójú porszemcsék. Ez a felporzás jelensége. Az a jelenség hátránya, hogy ezek a lebegő szemcsék a lézer energiáját képesek

elnyelni és kis méretüknek köszönhetően ebben az állapotukban kiéghetnek, vagy plazma állapotba kerülnek. Ez defókusználhatja a lézert, mely következtében kisebb teljesítményű olvasztási energia hasznosul a porágy felszínén. Az emelt energiasűrűségű átolvasztás, mivel nem porágyon végbemenő folyamat, nem okoz felporzási jelenséget, így az energia teljes mértékben a felületen hasznosul. Az ezt megelőző alacsony energiasűrűségű előnyomtatás pedig azért kedvező, mert az alacsonyabb energiabevitel által atmoszférába vitt porszemcsék mennyisége kevesebb, így a berendezés keringető rendszere maradéktalanul eltávolítja, mire a nagyobb energiasűrűségegre 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.

4.1. 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 el lehessen érni. 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 csökken 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 támaszelemeken keresztül a hőt az épített testből. A szakítószilárdságot mérő próbatestek esetében a 22. ábra által bemutatott H900-as öregítési ciklust alkalmaztam.

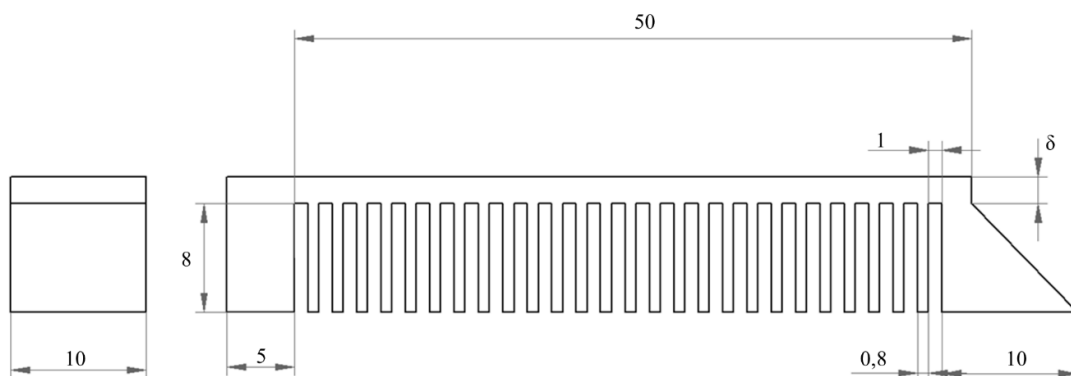


22. ábra, A H900-as hőkezelési ciklus sematikus bemutatása

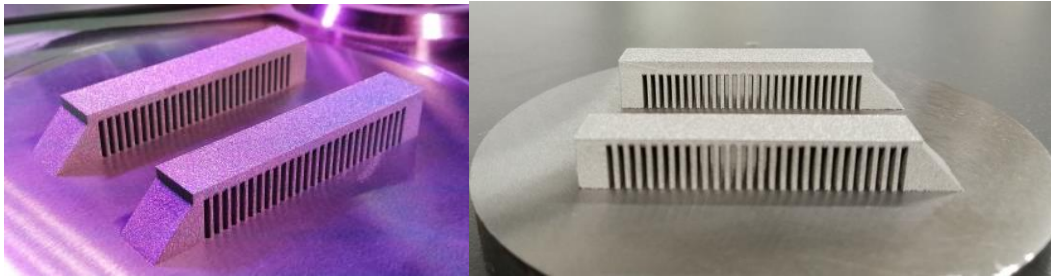
A hőkezelési folyamat egy 30 perces oldó hőkezeléssel kezdődik, melyet vízűtés és egy 60 perces 480°C-os öregítés követett, mindez argon atmoszféra alatt lett végrehajtva. A darabok ez esetben a tárgyasztaltól el lettek távolítva.

4.2. A maradó feszültségek mérése

A rétegeképítés során kialakuló maradó feszültségek mérésére leginkább reprezentatívabb próbatetek az „YX” nyomtatási orientáción helyezkednek el, mivel ezen az orientáción a legnagyobb a nyomtatott darabok maradó alakváltozásának mértéke. Mivel az LPBF 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 19. ábrán bemutatott rotáció egy rendszerbe épített megoldás. Ennek megfelelően, Chao Li próbatetei mintájára [45] elkészítettem egy maradó feszültség mérő próbatestet, aminek a méretei alkalmasak kisebb munkaterű berendezésekben történő gyártásra. Ennek a méreteit mutatja be a 23. ábra és a kész próbatestet a 24. ábra. A feltüntetett értékek milliméterben értendők. A vastagság értéke változó volt, $\delta = 1, 2$ és 3 mm.

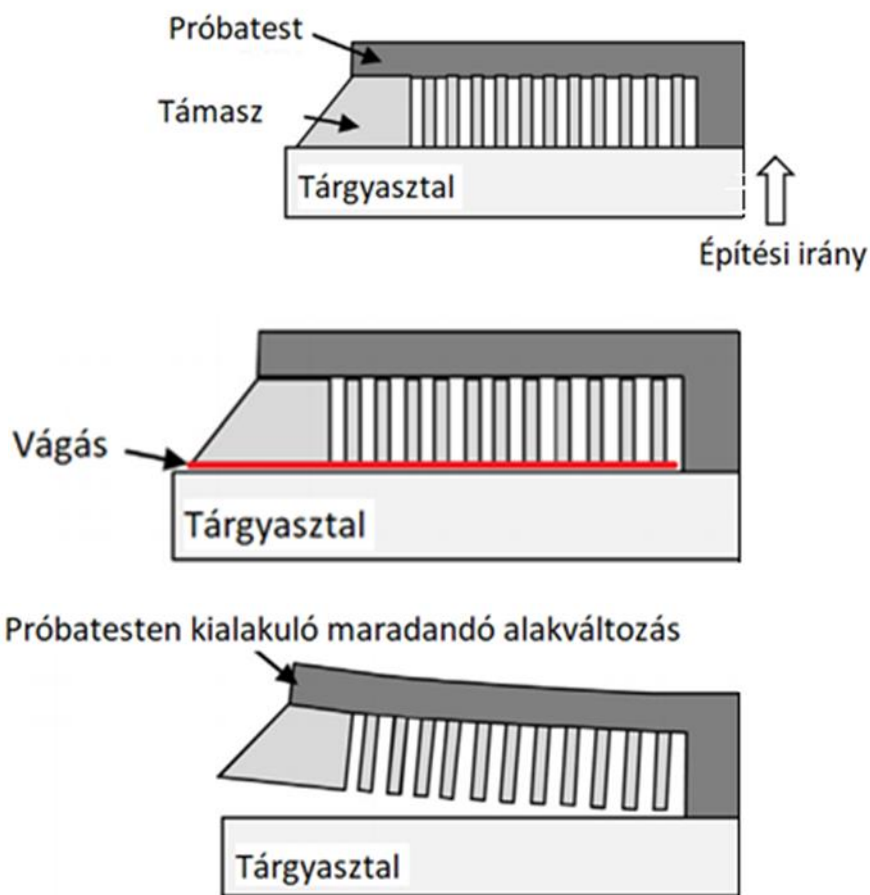


23. ábra, A Maradó feszültség mérő próbatest fő méretei, [mm]-ben



24. ábra, Kinyomtatott maradó feszültség mérő próbatetek

A próbatetek megvastagított támaszelemekkel közvetlenül a tárgyasztalra kerültek kinyomtatásra, majd ezeket a támaszokat egy vízszintes vágással oldottam. Ennek következtében a testek engedtek a maradó feszültségeknek és maradó alakváltozáson mentek keresztül. A 25. ábra mutatja be ezt a folyamatot.



25. ábra, Az AM gyártásnál alkalmazott maradó feszültség próbatest vágása, majd az emiatt létrejövő maradó alakváltozás

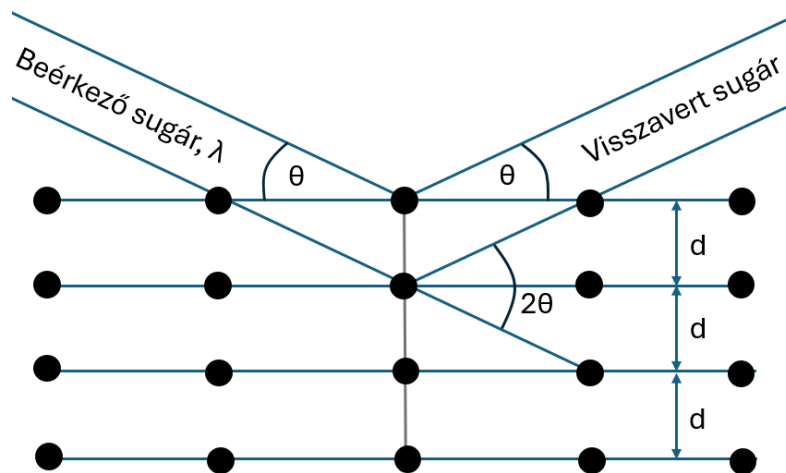
A geometria fő tulajdonsága, hogy különböző rétegvastagságok alkalmazásával nyomon lehet követni, hogy a különböző vizsgálati vastagságú darabok felhajlási értékei között mennyi az eltérés. Ezáltal kimutatható, hogy „YX” orientáción, adott szélességű és hosszúságú darabok esetében melyik vastagság számít kedvezőnek és melyik használata

nem ajánlott, vagy csak valamilyen utókezeléssel együtt. A 26. ábra ezt a maradó alakváltozást mutatja be.



26. ábra, Maradó feszültség mérő próbatest tárgyasztaltól való vágása során kialakuló maradó alakváltozás

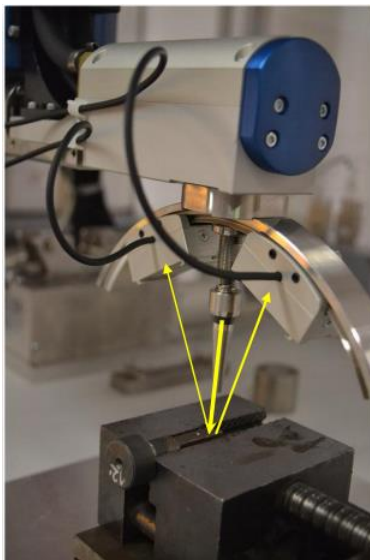
Maradó feszültségek mérésére rendelkezésre állnak roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati lehetőségek. Az egyik legegyszerűbb és legelterjedtebben alkalmazott eljárás, a roncsolásmentes röntgendiffrakciós módszer (XRD, az „x-ray diffraction” angol kifejezésből). Az XRD eljárás a kristálysíkok közötti 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 Young-modulus és Poisson tényező értékekből számítják ki, valamint a Bragg-törvény segítségével [60][61]. Ezt mutatja be a 27. ábra és a 2. egyenlet.



27. ábra, A röntgendiffrakció elvi ábrája

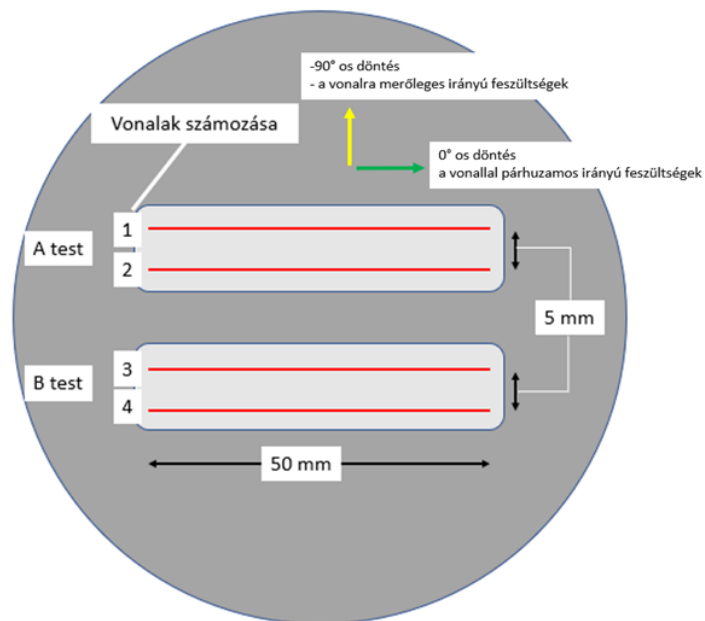
$$m\lambda = 2d \cdot \sin\theta \quad (2)$$

Ahol „m” a diffrakció rendje, „ λ ” a beérkező sugár hullámhossza, „d” a rácssíkok közötti távolság és „ θ ” a diffrakciós szög. A 28. ábra mutatja be annak a gyakorlati alkalmazását.



28. ábra, XRD maradó feszültség mérés a gyakorlatban

Hogy átfogóbb képet lehessen alkotni a testekben kialakuló maradó feszültségekről, minden próbatesten két párhuzamos vizsgálati vonalat vettem fel a 29. ábra alapján, a próbatestek középvonalától számított 2,5 mm távolságra.



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

4.2.1. A maradó feszültség vizsgálatok eredményeinek bemutatása, rendszerezése

A 29. ábra alapján, a maradó feszültség értékeket a próbatest 50 mm-es hosszán, 11 mérési pontot határoztam meg, a próbatest középvonalától 2,5 mm távolságra, két mérési vonalon. A 3D nyomtatási folyamatot a VII. táblázat szerinti előnyomtatási beállításon végeztem el. A vizsgálati paramétereket a VIII. táblázat mutatja be. Az alkalmazott hőkezelés egy 30 perces, 500°C-os hőntartás volt, melyet levegőn való lehűtés követett.

VIII. táblázat, Maradó feszültség mérő próbatestek vizsgálati darabjai

Próbatest jelzése	Vizsgálati rész vastagsága	Vizsgált állapot		
		előnyomtatás	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	

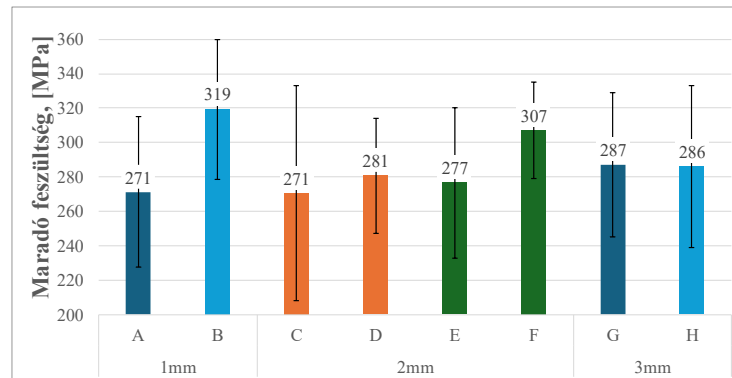
A vizsgálatok során a különböző jelölésű próbatestek az alábbi párokban lettek elkészítve:

- 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 az 1. Melléklet, 95-102. ábráin láthatók. Az eredmények diagramjain szereplő rövidítések:

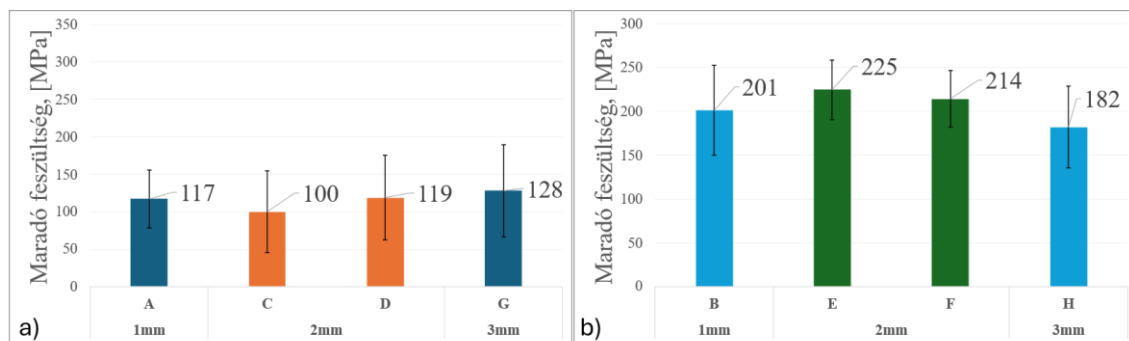
- R: tárgyasztalhoz rögzített, minden próbatest
- H: hőkezelt, B, E, F, H próbatestek
- V: tárgyasztalhoz rögzítő támaszelemek feloldva, elvágva, A,C,D,G próbatestek

Az 30. 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.



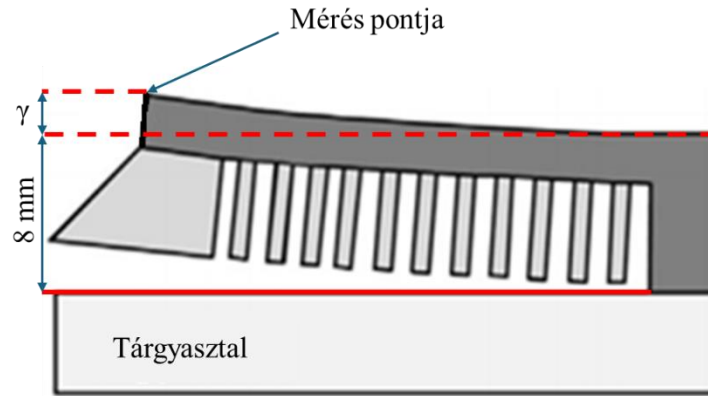
30. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1 mm A) és B); 2 mm C), D), E) és F); valamint 3 mm G) és H) jelű darabok maradó feszültség átlag értékei és szórása

A 31. 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 színek a könnyebb összehasonlítás érdekében megegyeznek az 30. ábrával.



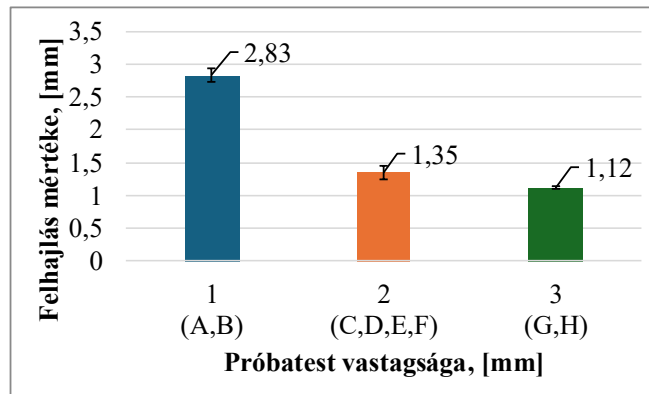
31. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott maradó feszültség próbatetek átlag értékei, a): A,C,D,G jelű darabok esetében tárgyasztaltól oldott állapotban, valamint b): B,E,F,H jelű darabok esetében hőkezelt állapotban

Azoknak a daraboknak, melyeknek tárgyasztallal való kapcsolatát oldottam, engedve ezzel, hogy hatására maradó alakváltozást szenvedjenek, a „Z” irányú felhajlásának mértékét megmértem, melyet a 32. ábra szemléltet. Ezen értékek segítségével a 3. egyenlet alapján kiszámoltam a felhajlás görbületét, melyhez felhasznált felhajlási értékeket a 33. ábra szemlélteti, A 34. ábra a 3. egyenlet alapján számított görbületeket szemlélteti.

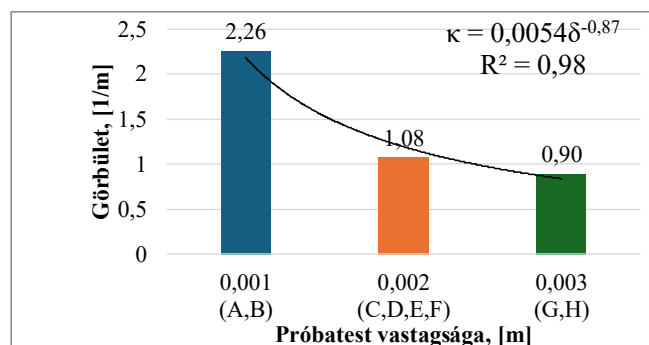


32. ábra, Az „YX” orientációkban nyomtatott próbatetek felhajlás mérésének vázlatos ismertetése

$$\kappa = \frac{2\gamma}{L^2} \quad (3)$$



33. ábra, Az „YX” orientációkban nyomtatott, 1 mm vastag (A, B – átlag), 2 mm vastag (C, D, E, F – átlag) és 3 mm vastag (G, H – átlag) próbatetek felhajlásának értékei



34. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1 mm vastag (A,B - átlag), 2 mm vastag (C,D,E,F- átlag) és 3 mm vastag (G,H - átlag) próbatetek görbületének értékei

A felhajlások átlag értékére trendvonalat rögzítettem, mely segítségével meghatároztam a 4. egyenletet:

$$\kappa = 0,0054\delta^{-0,87} \quad (4)$$

Ahol „ κ ” a kialakuló görbület mértéke [1/m], és „ δ ” a próbatetek vizsgálati vastagsága [m]. Ez az egyenlet alkalmas az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 50 mm vizsgálati hosszúságú 17-4PH darabok, az $0,001 \text{ m} \leq \kappa \leq 0,003 \text{ m}$ vizsgálati vastagság tartományon belüli görbületi értékek [1/m]-ben való előjelzésére. Az R^2 determinációs együttható megmutatja, hogy az egyenlet az „ κ ” változásokat 98%-os pontossággal írja le.

Az 5. egyenlet alapján meghatároztam a felhajlás másodrendű nyomatékát („I”), ahol „ δ ” a „Z” irányú kiterjedés mértéke [m], illetve „L” a test vizsgálati hossza [m].

$$I_Z = \frac{L \cdot \delta^3}{12} \quad (5)$$

A Young modulus, a maradó alakváltozás okozta görbület és a másodrendű nyomaték segítségével meghatározható a hajlító nyomaték, melyet a 6. egyenlet mutat be:

$$M_r = E_1 \cdot I \cdot \kappa \quad (6)$$

Mely egyenletben:

- E: az anyag Young-modulusa, jelen esetben $E_1 = 180 \text{ GPa}$ (az V. táblázat alapján, a porozitás mennyiség miatt az alacsonyabb Young-modulust alkalmaztam)
- I: a keresztmetszeti másodrendű nyomaték, [m^4], mely értéke függ a próbatest hajlításra merőleges alakjától
- κ : görbület, [1/m]

Az 5. és 6. egyenlet alapján meghatároztam az 1, 2 és 3 mm vizsgálati vastagságú próbatetekben kialakuló másodrendű nyomatékot, valamint a hajlító nyomatékot, melyet a IX. táblázat szemléltet.

IX. táblázat, az 1 mm, 2 mm és 3 mm vizsgálati vastagságú próbatetek másodrendű nyomatéka és hajlító nyomatéka

Próbatetek elnevezése	Vizsgálati vastagság [m]	Másodrendű nyomaték [m^4]	Hajlító nyomaték [Nm]
A, B	0,001	4,17E-12	1,70
C, D, E, F	0,002	3,34E-11	6,48
G, H	0,003	1,13E-10	18,14

A IX. táblázat és az 1. Melléklet, 95-102. ábrái alapján megállapítottam, hogy a vastagság növelésével növekszik a másodrendű nyomaték és a hajlító nyomaték is, azonban a mért maradó feszültség értékek mértéke és ennek szórása nem teszi lehetővé, hogy egyértelmű összefüggéseket lehessen felírni a kettő kapcsolatáról. Azonban az eredmények kimutatják, hogy a másodrendű nyomaték és hajlító nyomaték növekedésével a próbatetek maradó alakváltozás utáni görbületének mértéke csökken.

4.2.2. Eredmények összefoglalása

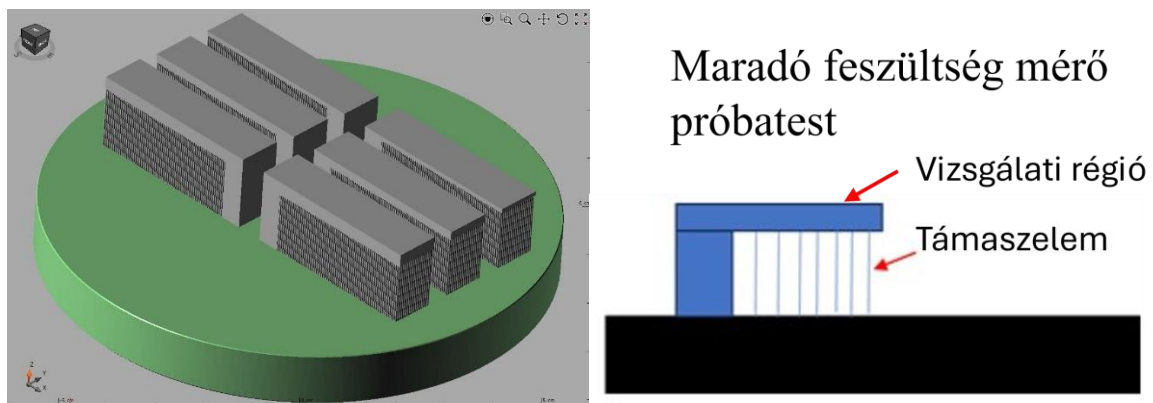
Az 1, 2, és 3 mm vastag, azonos nyomtatási ciklusban elkészített maradó feszültség mérő próbatestekben ébredő maradó feszültség mértéke 30 perces 500°C-os hőkezeléssel az alapállapotban nyomtatott darabokhoz képest a 30. ábra szerint, az alábbiak alapján változik:

- A maradó feszültségek mértéke az alkalmazott hőkezeléssel a következőképpen változott:
 - 1 mm vastag daraboknál ~37%-kal
 - 2mm vastag darabok esetében ~19%~30%-kal
 - 3 mm vastag darabok esetében ~36%-kal csökkentette

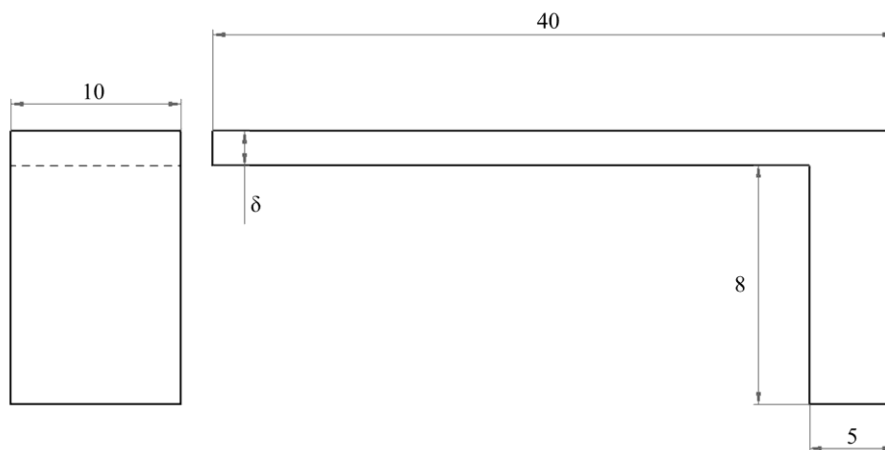
A 24. ábrán bemutatott, a 95-102. ábrákból készült diagram alapján, a próbatestek feszültségeloszlása az 50 mm-es vizsgálati hosszon, a 3D nyomtatási hóciklusának tulajdonsága következtében, nagy mértékű szórást eredményezett ezért nem mutatható ki egyértelmű összefüggés a mért maradó feszültség értékek és a számított nyomaték értékek között. Ugyanakkor, a másodrendű nyomaték, valamint hajlító nyomaték a próbatest vastagságánál növelésével növekszik, ezzel párhuzamosan a felhajlási görbület mértéke csökken.

4.2.3. Maradó feszültség mérő próbatetek egy nyomtatási ciklusban történő gyártása

Az alapján, hogy a maradó feszültségek okozta maradó alakváltozásokat közvetlenül tudjam összehasonlítani, a próbatetekben annak érdekében módosítottam, hogy több darabot lehessen egy nyomtatási ciklus alatt legyártani. Ez azért fontos lépés, mivel az 1. Melléklet 95-102. ábráinak eredményei és az 30. ábra grafikonja alapján, a különböző ciklusokban készült darabok eredményei nagyobb eltéréseket képesek mutatni, mint az azonos ciklusban készültek. A 23. ábrán bemutatott próbatest vizsgálati hosszát 50 mm-ről 40 mm-re csökkentettem, illetve a 10 mm-es megerősített rögzítési pontot elhagytam. Az 35. ábra ezeknek a daraboknak a nyomtatási elhelyezkedését, főbb méreteit pedig a 36. ábra mutatja be [mm]-ben.



35. ábra, Módosított maradó feszültség mérő próbatetek, a 3D nyomtató tárgyasztalán,



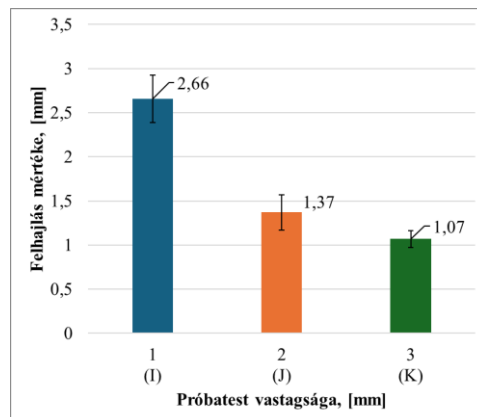
36. ábra, Módosított maradó feszültség mérő próbatetek főbb méretei, [mm]-ben

A módosított maradó feszültség mérő próbatesteket a VII. táblázat alapján, a primer olvasztási eljárást követő, kétszeres átolvasztással készítettem el. A X. táblázat a vizsgálati paramétereket sorolja fel a különböző vizsgálati vastagsággal nyomtatott darabok esetében.

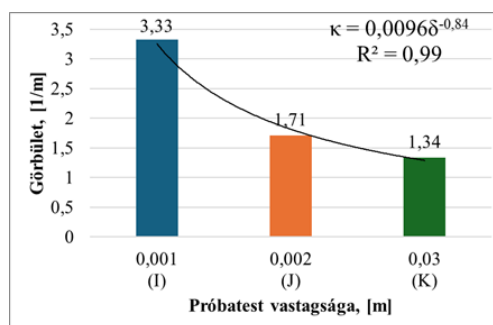
X. táblázat, Módosított maradó feszültség mérő próbatestek vizsgálati darabjai

Próbatest jelzése	Vastagság	Vizsgált állapot	
		előnyomtatás	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 37 és 39. ábra. mutatja be ezeket a felhajlási értékeket előnyomtatott állapotban, illetve kétszeres átolvasztott állapotban. Az eredményekről a 3. egyenlet alapján kiszámítottam az egyes próbatestek felhajlásának görbületét, melyet a 38. és a 40. ábra szemléltet.



37. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának mértéke [mm], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint alapállapotban (I, J, K)

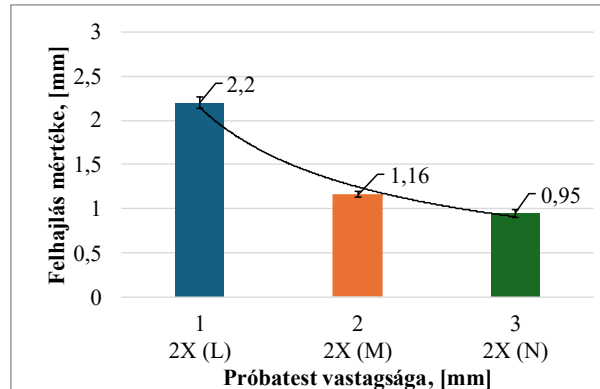


38. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának görbülete [1/m], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint alapállapotban (I, J, K)

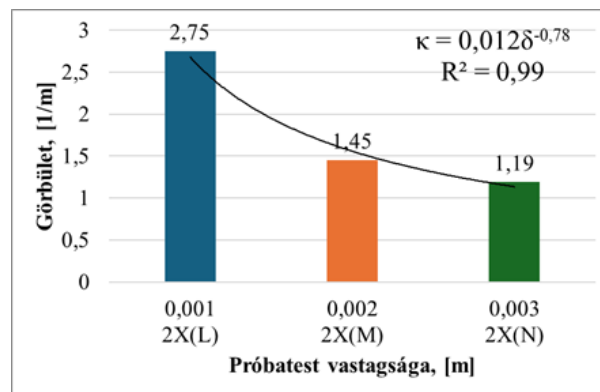
Az előnyomtatással elkészített darabok felhajlásának értékei alapján a 7. egyenletet határoztam meg:

$$\kappa = 0,0096\delta^{-0,84} \quad (7)$$

ahol „ κ ” a görbület mértéke, [1/m]-ben, „ δ ” pedig a próbatest vastagsága [m]-ben.



39. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának mértéke [mm], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint 2X olvasztott állapotban (L, M, N)



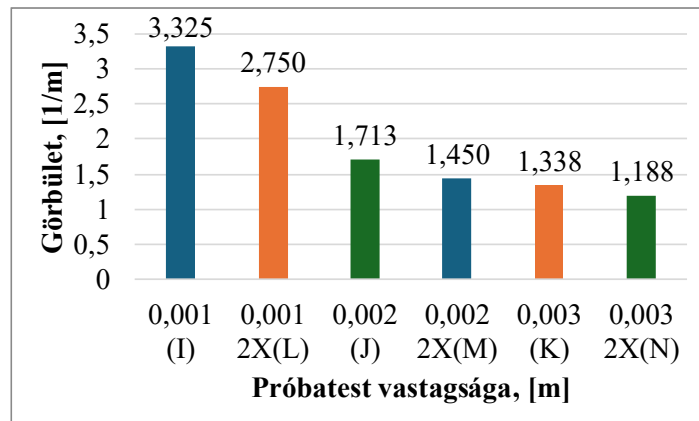
40. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának görbülete [1/m], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint 2X olvasztott állapotban (L, M, N)

A kétszeres átolvasztással gyártott darabok felhajlásának értékei alapján a 8. egyenletet határoztam meg:

$$\kappa = 0,012\delta^{-0,78} \quad (8)$$

ahol „ κ ” a kialakuló görbület, [1/m]-ben, „ δ ” pedig a próbatest vastagsága, [m]-ben.

A 7. és 8. egyenletek alkalmasak az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 40 mm vizsgálati hosszúságú, 17-4PH darabok, az $0,001 \text{ m} \leq \delta \leq 0,003 \text{ m}$ vizsgálati vastagság tartományon belüli görbületi értékek [1/m]-ban való előjelzésére. Az R^2 determinációs együttható megmutatja, hogy az egyenletek a „ κ ” változását 99%-os pontossággal írja le. A 41. ábra ezeket az eredményeket mutatja be, a kialakuló görbület szerint sorrendbe téve.



41. ábra, Előnyomatással és kétszeres olvasztással nyomtatott darabok görbületeinek sorba állítása

Az 5. és 6. egyenlet alapján, a XI. táblázatban összefoglaltam a különböző másodrendű nyomaték és hajlító nyomaték értékeket. A különbség a IX. táblázathoz képest, valamint az I-J-K és L-M-N jelölésű darabok között, hogy a kétszeres átolvasztásra vonatkozó számításban a 6. egyenletben esetén, az V. táblázat Young modulus E_2 értékét alkalmaztam.

XI. táblázat, 1 mm, 2 mm és 3 mm vizsgálati vastagságú próbatestek másodrendű nyomatéka és hajlító nyomatéka

Próbatestek elnevezése	Vizsgálati vastagság [m]	Másodrendű nyomaték [m ⁴]	Hajlító nyomaték [Nm]
I	0,001	3,34E-12	2,00
J	0,002	2,67E-11	8,22
K	0,003	9,00E-11	21,67
L	0,001	3,34E-12	1,79
M	0,002	2,67E-11	7,54
N	0,003	9,00E-11	20,84

4.2.4. A módosított maradó feszültség próbatestek eredményeinek összefoglalása

A $\delta = 1, 2,$ és 3 mm vastag, $L = 40$ mm vizsgálati hosszúságú, azonos nyomtatási ciklusban elkészített maradó feszültség mérő próbatestek maradó alakváltozása során kialakuló görbület, a kétszeres átolvasztással nyomtatott darabok esetében, az alapállapotban nyomtatott darabokhoz képest az alábbiak szerint változik:

- Az 1 mm vastag darabok esetében az $1/R$ érték $3,33$ $1/m$ -ről $2,75$ $1/m$ -re mely $17,42\%$ -os csökkenést
- A 2 mm vastag darabok esetében az $1/R$ érték $1,71$ $1/m$ -ről $1,45$ $1/m$ -re, mely $15,20\%$ -os csökkenést,
- Valamint a 3 mm vastag darabok az $1/R$ érték $1,34$ $1/m$ -ről $1,19$ $1/m$ -re, mely $11,19\%$ -os csökkenést eredményez.

Az 1, 2 és 3 mm darabok esetében a két vizsgált állapotban, „YX” nyomtatási orientáción, meghatároztam a 9. és 10. egyenletet:

- Az előnyomtatással elkészített próbatestek felhajlási értékei alapján:

$$\kappa = 0,0096\delta^{-0,84} \quad (9)$$

- A kétszeres olvasztással elkészített próbatestek felhajlási értékei alapján:

$$\kappa = 0,0121\delta^{-0,78} \quad (10)$$

ahol „ κ ” a görbület [$1/m$]-ben, „ δ ” pedig a próbatest vastagsága, [m]-ben.

A 9. és 10. egyenletek alkalmasak az „YX” 3D nyomtatási orientáción elkészített 17-4PH darabok, az $0,001 \text{ m} \leq \delta \leq 0,003 \text{ m}$ értelmezési tartományon belüli görbületi értékének előjelzésére. Az 50 mm vizsgálati hosszúságú darabokhoz hasonlóan, az eredmények azt mutatják, hogy a másodrendű nyomaték és hajlító nyomaték növekedésével a próbatestek maradó alakváltozás utáni görbületének mértéke csökken.

4.3. A 17-PH rozsdamentes acél próbatestek szakítószilárdsági vizsgálatai

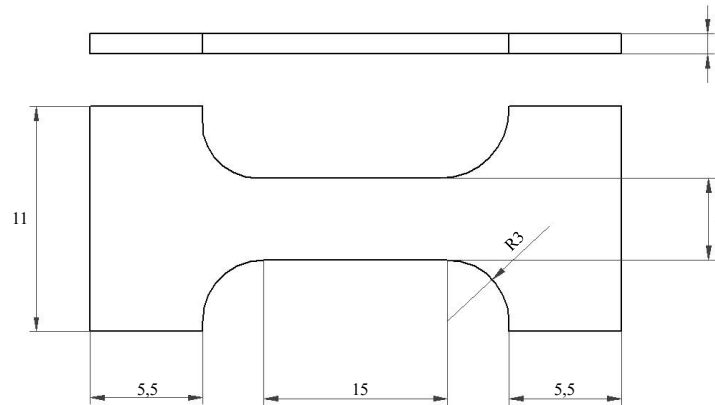
A vizsgálat célja, a maximális húzófeszültség, a folyáshatár, valamint a rugalmassági modulus meghatározása. A szakítószilárdságot mérő próbatestek gyártása azért előnyös, mert egyszerűen kivitelezhető és gyors, egyértelmű eredményt szolgáltat a próbatestekről, valamint egyértelműen nyomon lehet követni a különböző geometriai változások hatását a kapott diagramokon [62]. 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. A 42. ábra mutatja be a vizsgálathoz alkalmazott berendezést, mely egy Instron 5982 típusú szakítógépet volt. A kísérletek a Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében, 100kN-os erőmérő cellával készültek.



42. ábra, Instron 5980-as szériájú szakítógép

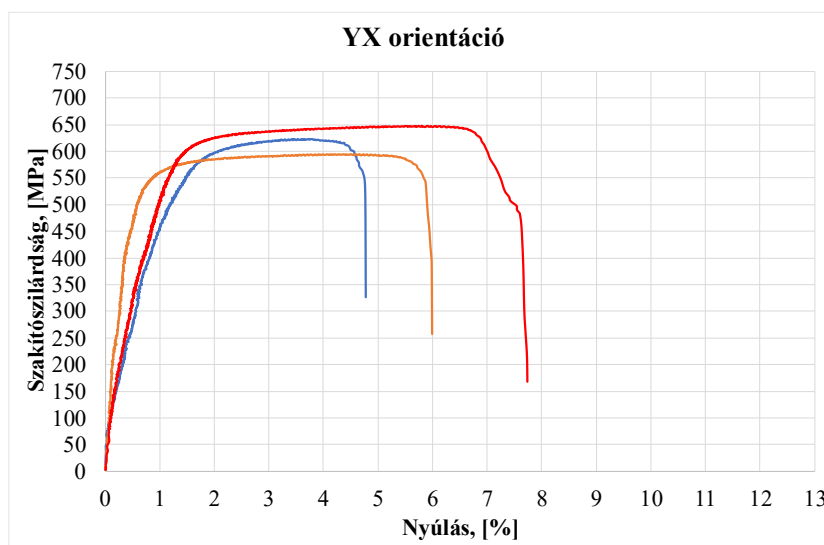
4.3.1. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek

A 43. ábrán bemutatott próbatestekkel orientációs különbségeket vizsgáltam. Ezeknek a daraboknak a vastagsága $\delta = 1$ mm volt. Méretükből adódóan, egy nyomtatási cikluson belül többféle orientáción tájolt darab helyezhető el a tárgyasztalra, a teljes nyomtatási időt kis mértékben befolyásolva.

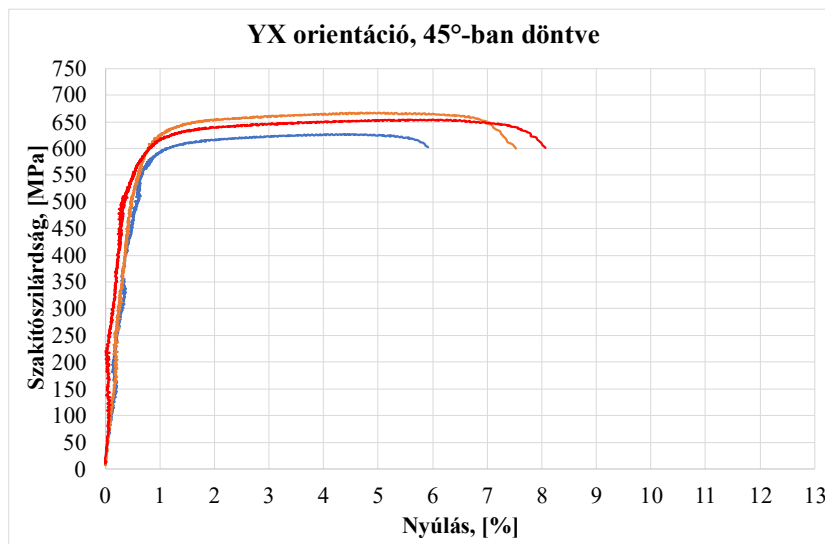


43. ábra, Orientációs különbségeket vizsgáló szakítópálcák méretei

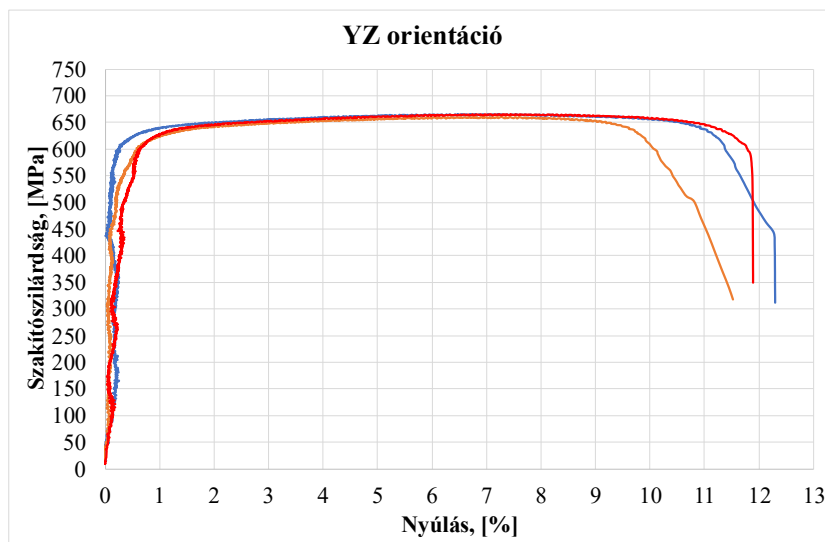
A nyomtatási orientációknak a 16. ábra által bemutatott „YX”-et és „YZ”-t választottam, valamint, a kettő között a tárgyasztalhoz viszonyítva 45° -ban döntve is végeztem szakítószilárdsági vizsgálatot. A 3D nyomtatott darabok a VII. táblázat alapján előnyomtatási beállítással készültek el. A 44., 45. és 46. ábra ezeknek a szakítószilárdságnyúlás diagramjait mutatják be.



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



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



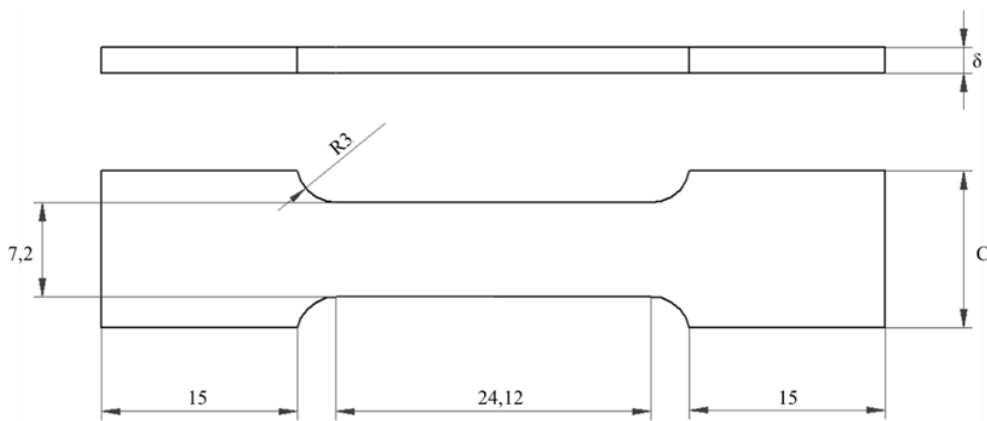
46. ábra, Az „YZ” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatestek eredményei

4.3.2. Különböző nyomtatási orientációkon előállított próbatestek eredményeinek összefoglalása

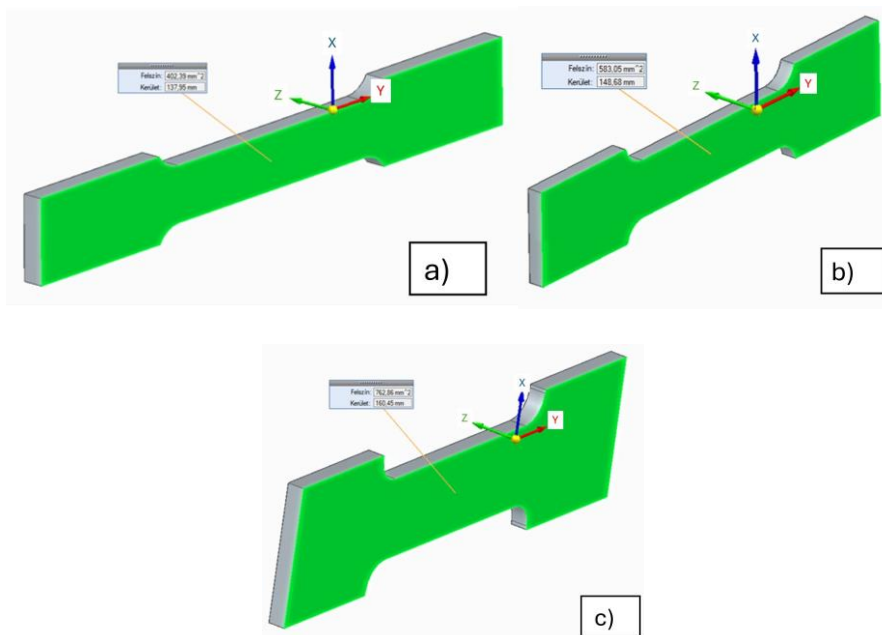
Az eredmények alapján megállapítottam, hogy a nyomtatási platformra párhuzamos rétegek felületének csökkentésével a nyúlás értéke akár 50%-kal növekedett. Ez a jelenség párhuzamba állítható azzal a kijelentéssel, hogy minél rövidebb távokat kell végig pásztáznia a lézernek, annál kisebb maradó feszültség alakul ki a térfogatban [45].

4.3.3. Az „XY” orientáción gyártott különböző felületi kiterjedésű próbatetek vizsgálatai

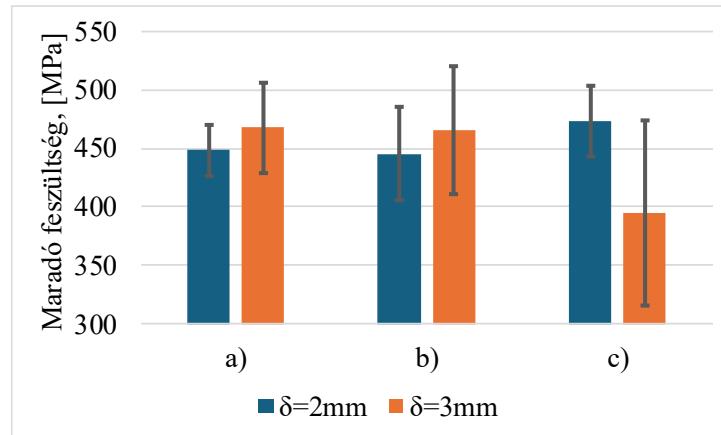
A pásztázási távolságok változásának további vizsgálatára hoztam létre a 47. ábrán látható próbatestet mely szélességének méretei $C = 8 \text{ mm}$; 12 mm ; és 16 mm , valamint a vastagságának méretei $\delta = 2 \text{ mm}$ és 3 mm voltak. A változó paraméterekből adódó felületi eltéréseket a 48. ábra szemlélteti. A darabokat „YX” orientáción készítettem el, így alkalmasak voltak XRD maradó feszültség mérésre is, valamint a VII. táblázat alapján előnyomtatási stratégiával történt a nyomtatás. A 49. ábra mutatja be ezeket a mérési eredményeket.



47. ábra, A vizsgált szakítópálcák főbb méretei, ahol a „C” és „δ” értékek változók

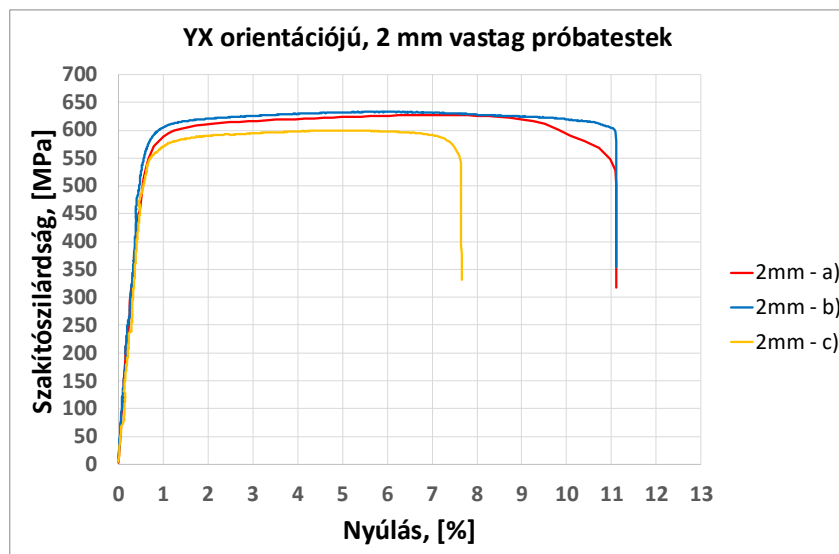


48. ábra, A vizsgált szakítópálcák felületei értékei: a) 8 mm befogási szélességű, $402,39 \text{ mm}^2$; b) 12 mm befogási szélességű, $583,05 \text{ mm}^2$; c) 16 mm befogási szélességű, $762,86 \text{ mm}^2$

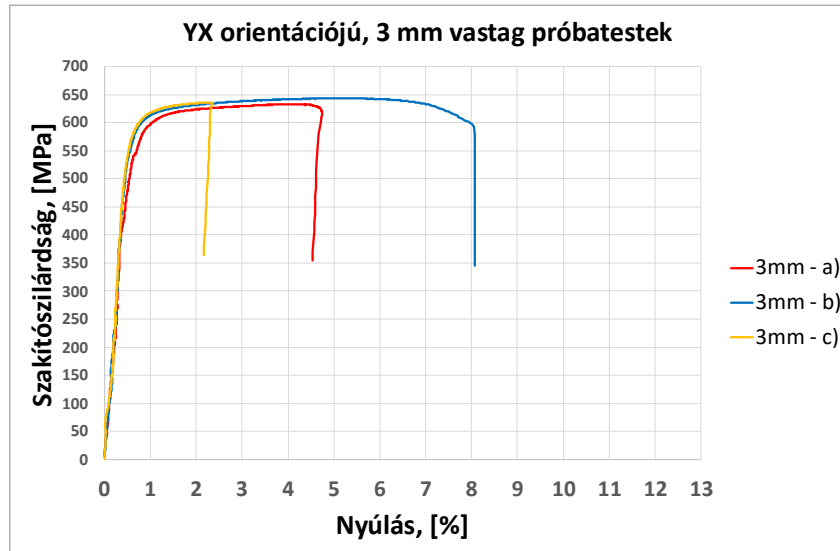


49. ábra, Maradó feszültségek a különböző felületi kiterjedésű szakítópálcákban, illetve ezen értékek szórása

A 49. ábra két fontos információval szolgál. Az egyik, hogy a 2 mm és a 3 mm vastagságú próbatestek maradó feszültség értékei egymáshoz képest más tendenciát mutatnak. A felületi kiterjedés növelésével, a 2 mm vastag próbatestek maradó feszültségének átlagértéke 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 50. és 51. ábra. ezeknek az „YX” orientációjú daraboknak szakítószilárdsági és nyúlási értékeit mutatja be.

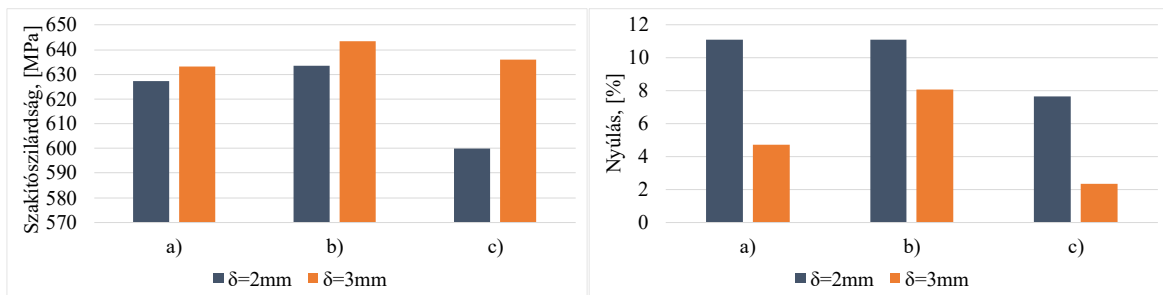


50. ábra, Az „YX” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei



51. ábra, Az „YX” orientációjú, 3 mm vastag próbatetek 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 52. ábra és a XII. táblázat.



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

XII. táblázat, Az „YX” orientációjú, különböző felületi kiterjedésű próbatetek 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	4,74	644	8,07	636	2,36

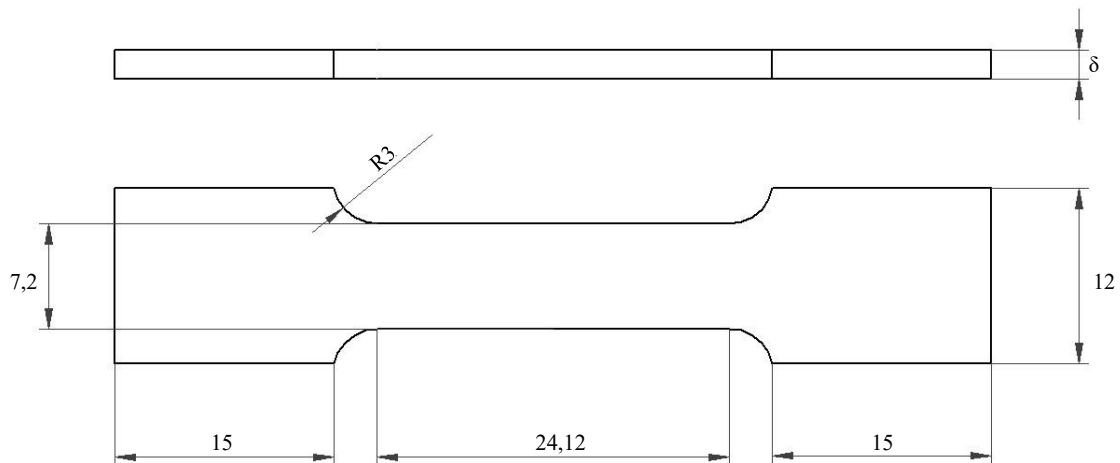
A tárgyasztalhoz rögzítő támaszelemek oldása után a vizsgált darabok minden esetben, a maradó feszültség hatására, maradó alakváltozáson mentek keresztül.

4.3.4. Az „XY” orientáción elkészített próbatetek eredményeinek összefoglalása

Az eredmények azt mutatják, hogy a 3 mm vastag próbatetek nagyobb szakítószilárdsággal rendelkeznek, mint a 2 mm vastag párjaik. Ez mindhárom geometriai paraméternél hasonlóképp jelentkezik. Megállapítottam, 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. A tárgyasztalhoz rögzítő támaszelemek oldása után a vizsgált darabok minden esetben, a maradó feszültség hatására, maradó alakváltozáson mentek keresztül.

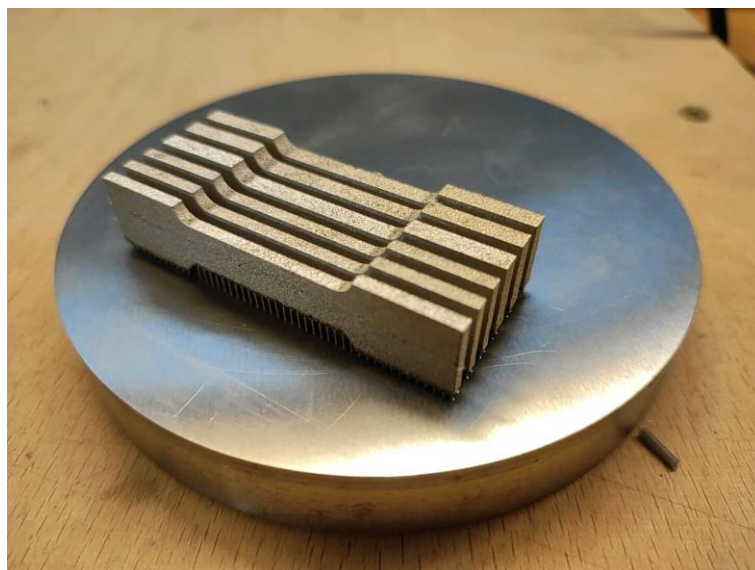
4.3.5. Az „YZ” orientáción elkészített darabok szakítószilárdsági vizsgálata

A maradó feszültségek okozta alakváltozás csökkentése érdekében [50] elkészítettem a 47. ábrán szemléltetett b) jelű darabot „YZ” nyomtatási orientáción a 16. ábra szerint, mely fő méreteit az 53. ábra szemlélteti. Az ábrán látható nem rögzített méret a próbatetek vastagsága, mely $\delta = 2$ mm, illetve 3 mm volt.



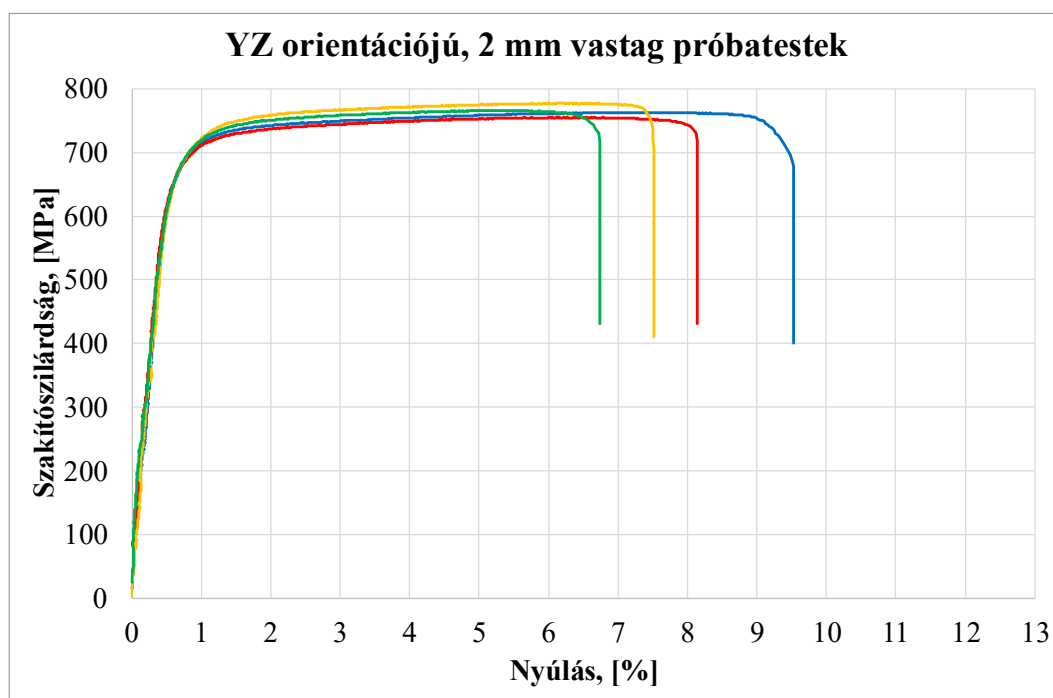
53. ábra, 12 mm befogási szélességű szakítópálcák méretei

A 54. ábra mutatja be a darabok egy lehetséges nyomtatási elrendezését. A darabok ebben az esetben előnyomtatási beállításon készültek el a VII. táblázat alapján.

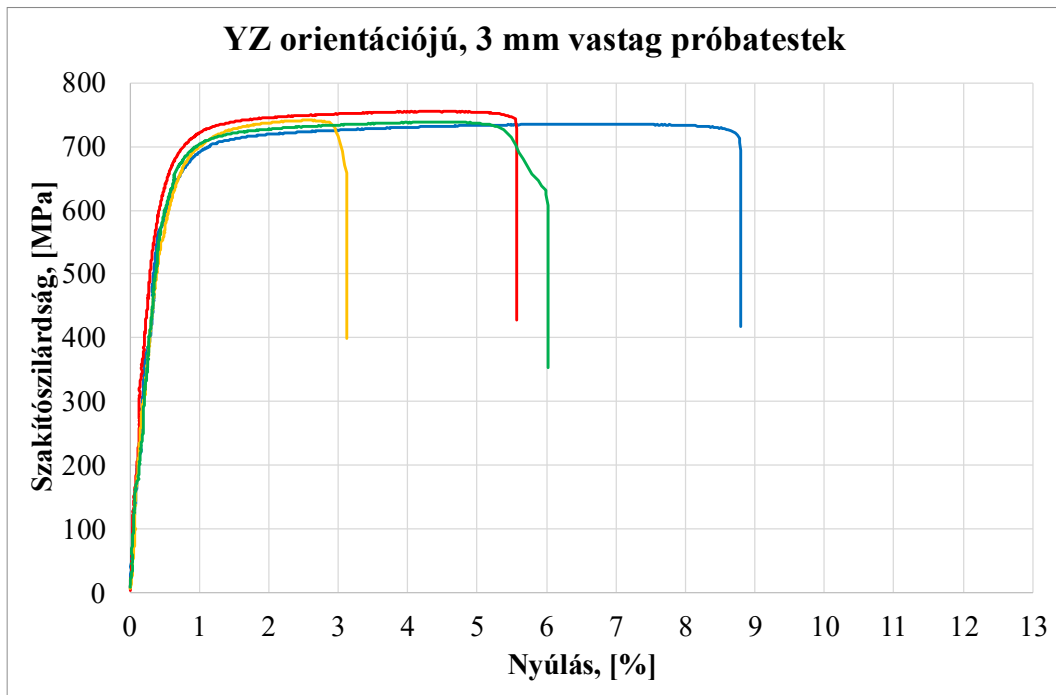


54. ábra, Az „YZ” orientációban 3D nyomtatott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcák

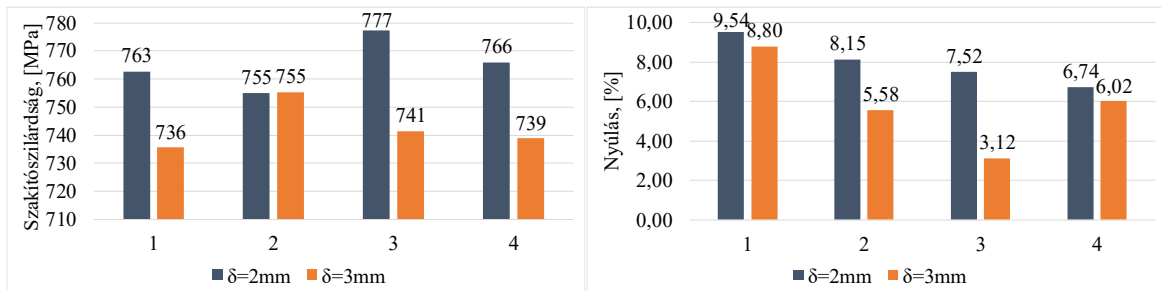
Az „YZ” nyomtatási orientációban elkészített 2 és 3 mm vastag darabok szakítószilárdsági és nyúlási értékeit az 55., 56. ábra szemlélteti, valamint ezek összefoglalását az 57. ábra.



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



56. ábra, Az „YZ” orientációjú, 3 mm vastag próbatetek szakítószilárdsági eredményei



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

Az „YZ” orientációban nyomtatott próbatetek esetében a 2 mm vastag próbateteknek a szakítószilárdsága és nyúlása is jellemzően nagyobb volt a 3 mm vastag darabok értékeinél. Ezeknek a számszerűsítését mutatja be a XIII. táblázat.

XIII. táblázat, Az „YZ” orientációjú, 2 mm és 3 mm vastag próbatetek szakítószilárdsági értékei

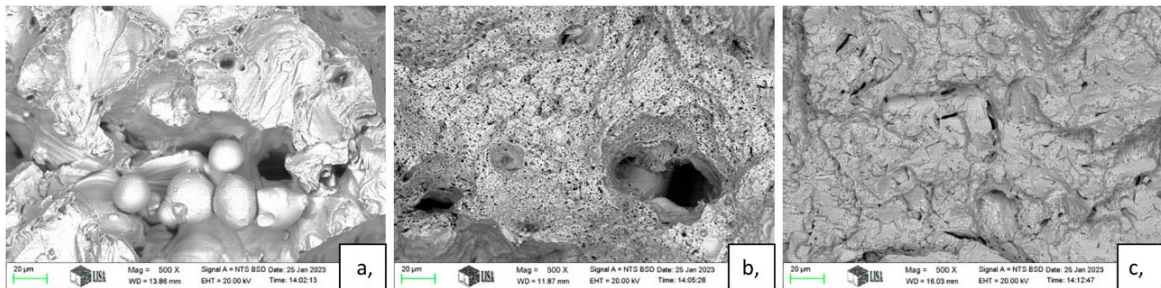
	1		2		3		4	
	R _m , [MPa]	Nyúlás, [%]	R _m , [MPa]	Nyúlás, [%]	R _m , [MPa]	Nyúlás, [%]	R _m , [MPa]	Nyúlás, [%]
2mm	763	9,54	755	8,15	777	7,52	766	6,74
3mm	736	8,80	755	5,58	741	3,12	739	6,02

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.

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

A szakítószilárdság növeléséhez, a 22. ábrán bemutatott H900-as öregítési hőkezelési eljárást választottam, mivel a 17-4PH alapanyaghoz ez az egyik leggyakrabban használt eljárás, mivel a 17-4PH egy kiválóan keményedő acél ötvözet, így az öregítés hatására éri el a maximális szakítószilárdsági értékét.

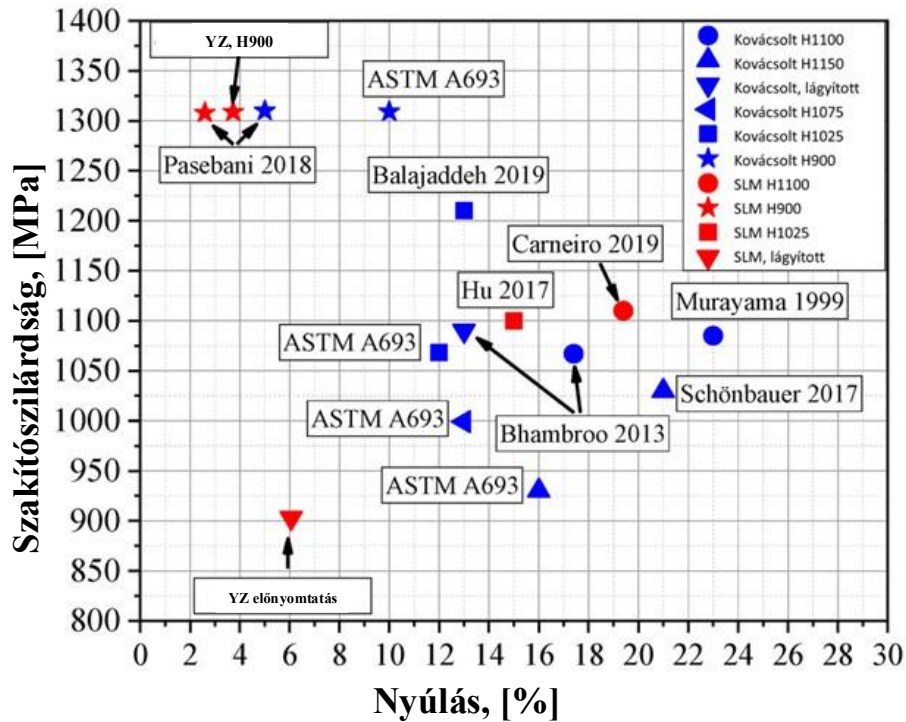
A hőkezelési folyamat egy 1038°C-os, 30 perces lágyításból áll, melyet vízhűtés követ, majd 60 perces öregítés 480°C-on, amit ismét vízhűtés zár, mindez argon atmoszféra alatt. Annak érdekében, hogy a nyomtatott és hőkezelt állapotok különbségeit megvizsgáljam, SEM felvételeket készítettem a darabok töretfelületéről. Az 58. ábra mutatja be a nyomtatott, lágyított és az öregített próbatestek töretfelvételeinek SEM felvételeit.



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

A nyomtatott állapotban a 20. ábrához hasonlóan, jelen vannak visszamaradó porszemcsék, azonban ezek a lágyított, majd ezt követő öregített állapotokban kisebb mértékben mutathatók ki.

Az öregített darabok szakítószilárdsági értéke 1310 MPa volt, ami vetekszik a különböző hőkezelési programokkal kezelt kovácsolt darabok értékeivel. Az 59. ábra egy ilyen összehasonlítást mutat be.



59. ábra, Az „YZ” orientációs előnyomtatás és H900-as hőkezelésű 3D nyomtatás értékei összehasonlítva különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [63]-[72]

4.3.6. Az „YZ” orientáción elkészített darabok eredményeinek összefoglalása

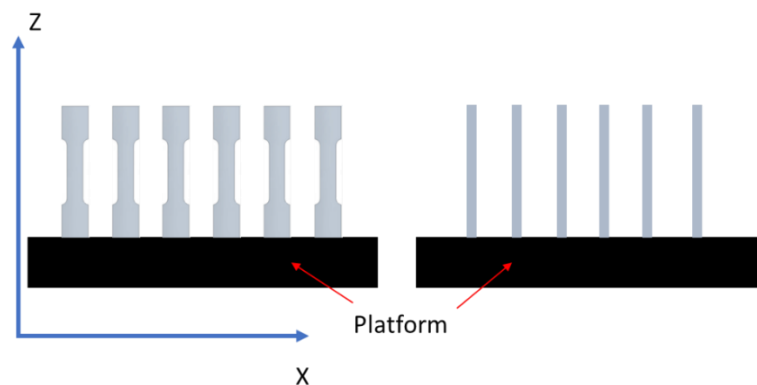
Ahogy az az 59. ábrán látható, a kutatásom során kapott eredmények szakítószilárdságban elérik az ASTM A693 szabvány kovácsolt és öregített próbatestének értékeit, valamint vetekszik Pasebani és szerzőtársai 3D nyomtatott és kovácsolt darabjainak eredményeivel is [65]. A különbség a saját eredményeim 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 „YZ” orientációs 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, amikor a porágy felületén elhelyezkedő, jellemzően kisebb frakciójú szemcsék az inert atmoszférába jutnak, mely defókuszálhatják a lézer forrást, ezzel akadályozva a magasabb energia megfelelő hasznosulását [77].

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

A 4.2.4. fejezet vizsgálatához hasonlóan, ahhoz, hogy a kapott mérési eredményeket megfelelően 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 [50]. A 60. ábra mutatja be ennek megfelelően a négy szett próbatest elhelyezkedését a tárgyasztalon. A vizsgálati állapotok a következők voltak:

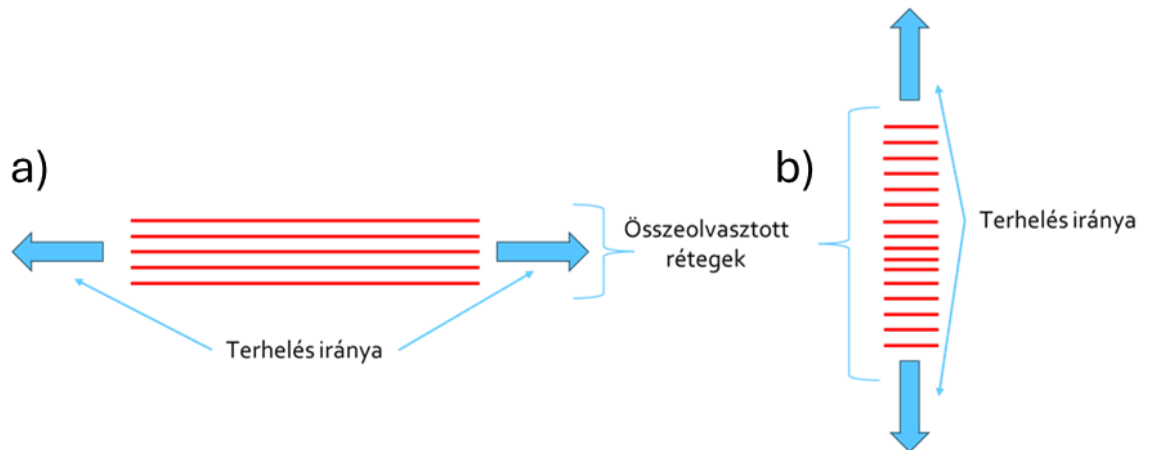
- előnyomtatás
- kétszeres átolvasztási ciklus
- előnyomtatás, majd H900-as hőkezelés
- kétszeres átolvasztási ciklus, majd H900-as hőkezelés.

A próbatestek méreteit az 53. ábra szemlélteti. Az elkészített próbatestek vastagsága ebben az esetben is $\delta = 2$ mm és 3 mm volt, mely kétszeres olvasztási ciklusát a maradó feszültség mérő darabokhoz hasonlóan a VII. táblázat alapján végeztem el és a hatását a már megszilárdult réteg felületén alkalmaztam, újra átolvasztva a teljes nyomtatási keresztmetszetet. A H900-as hőkezelést a 22. ábra alapján hajtottam végre.



60. 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. Azonban, a szakítóvizsgálatsorán alkalmazott erő hatása a rétegekre eltérő. A 61. ábrán az „YZ” és „ZX” orientációk rétegeképésre eső erőbevitel összehasonlítása látható.



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

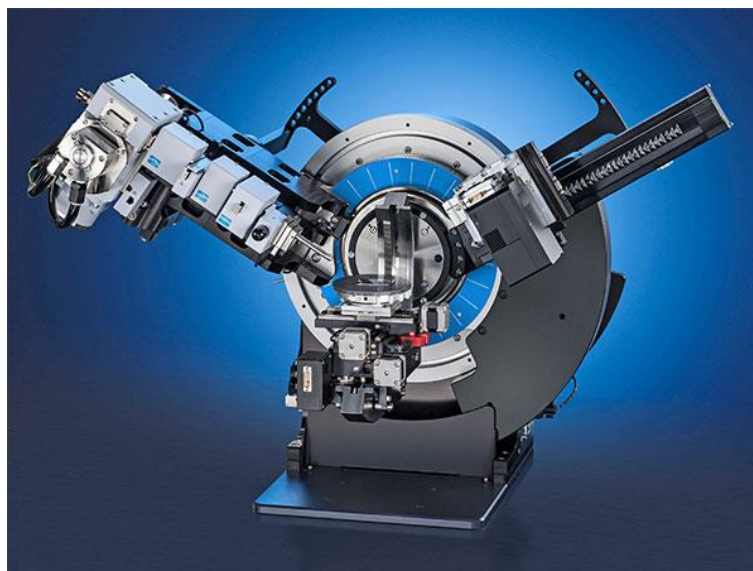
Amennyiben a húzófeszültség iránya a lerakott rétegekre párhuzamos, a rétegek közötti kohéziós erő kisebb mértékben befolyásolja a vizsgálat eredményeit. Amennyiben azonban az alkalmazott erő a lerakott rétegekre merőleges, a vizsgálat ezeket a rétegeket széthúzza egymástól, mely jellemzően kevésbé kedvező szakítószilárdsággal rendelkező, valamint kisebb nyúlású, ridegebb eredményt fog eredményezni [78].

A minták mikroszerkezetét SEM segítségével vizsgáltam, a fázisok kémiai összetételét energiadiszperzív (EDS) mikroszondával határoztam meg. A mikroszkópos vizsgálatokhoz a Miskolci Egyetem Fémteni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológiai Intézetében a 62. ábrán szemléltetett Zeiss EVO MA 10 típusú, pásztázó elektronmikroszkópot használtam.



62. ábra, Zeiss EVO MA 10 típusú SEM berendezés

A mikroszerkezetben kialakuló fázisok azonosítását XRD módszerrel végeztem el. A vizsgálatokat a 63. ábrán is szemléltetett, Bruker D8 Discovery XRD berendezésen, végeztem Göbel tükörrel, Cu K α 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.

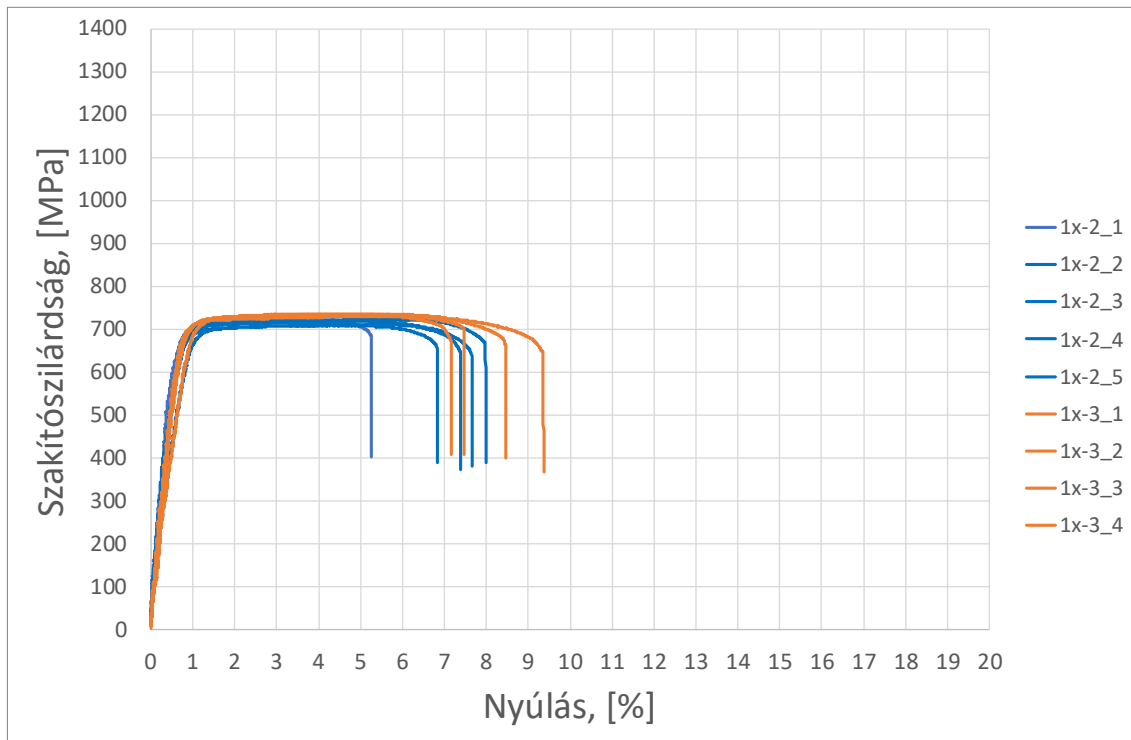


63. ábra, Bruker D8 Discovery XRD berendezés

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 Fémtni, Képlékenyalakítási és Nanotechnológia Intézetének 3D Laboratóriumában készültek.

4.4.7.1. Előnyomtatási beállítással nyomtatott darabok eredményeinek bemutatása

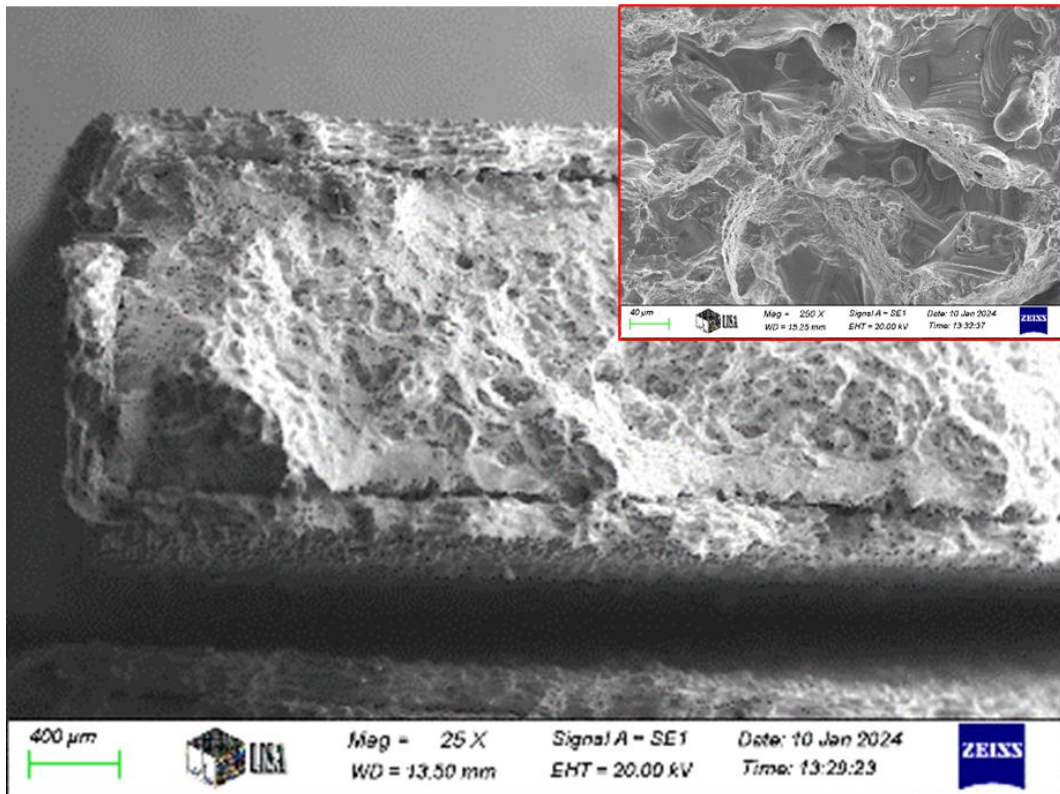
Az előnyomtatással gyártott próbatetek képezték a kutatási munkám alapját, minden további kísérleti lépés ezekre a darabokra épült fel. A 64. ábra szemlélteti a szakítószilárdsági és nyúlási értékeket. A 3D nyomtatás a VII. táblázat szerinti előnyomtatási beállításokkal történt.



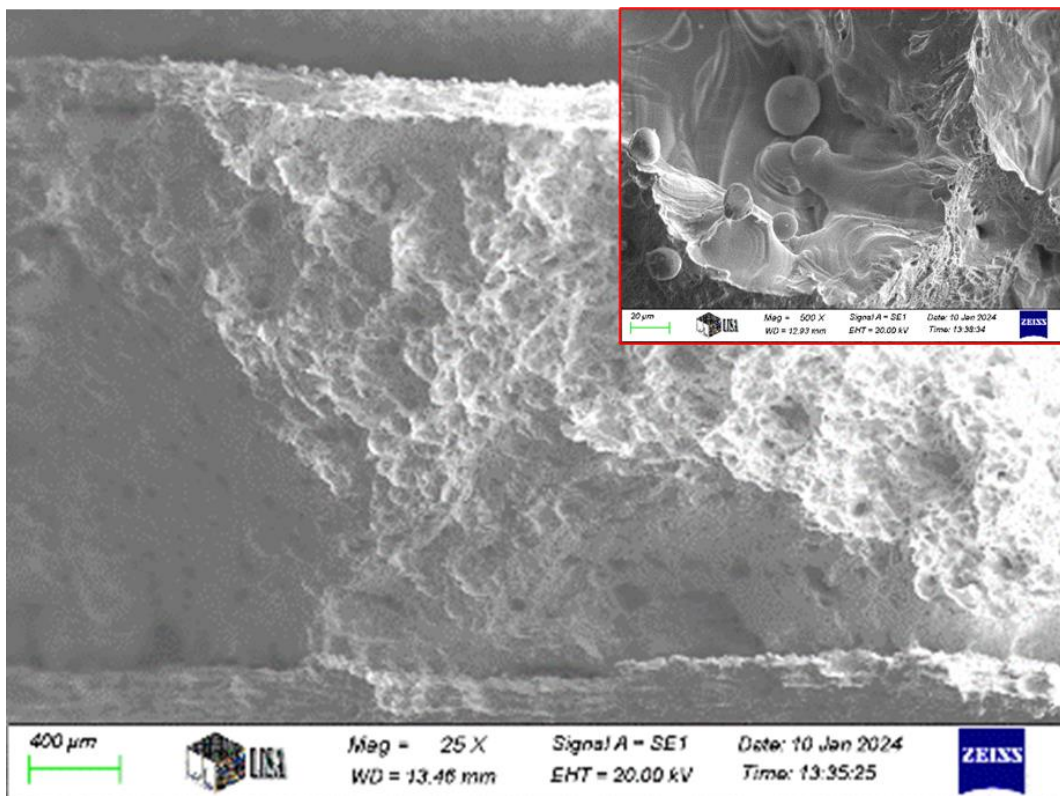
64. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatetek szakítószilárdsága és nyúlása előnyomtatási állapotban

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

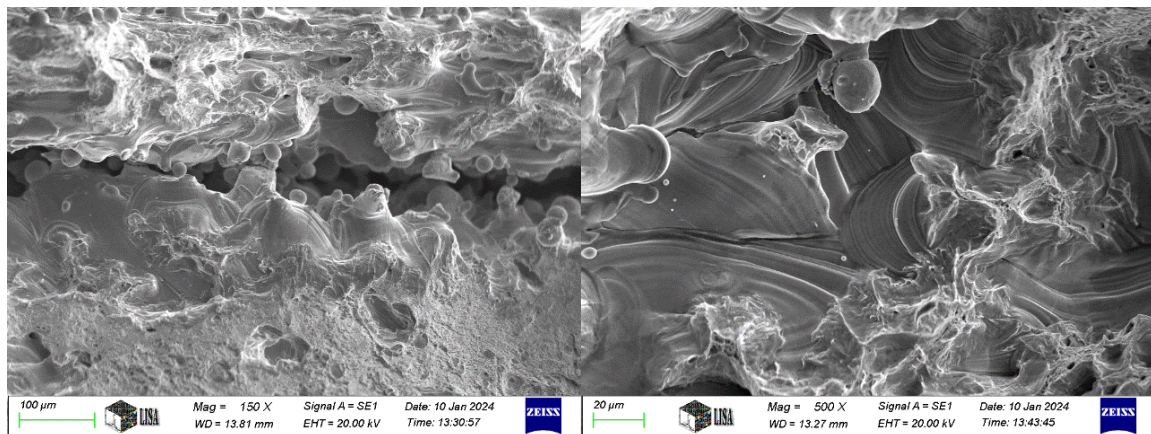
A 65., 66. és 67. ábrák által szemléltetve, a pásztázó elektron mikroszkópos vizsgálat kimutatta, hogy az előnyomtatással gyártott darabok esetében a térfogat minden esetben tartalmaz meg nem olvasztott porszemcséket. Ezek a térfogatban maradt szemcsék növelik a porozitás arányát, ezzel negatív hatást kifejtve a szakítószilárdságra és a nyúlási értékekre.



65. ábra, 2 mm vastag, előnyomtatással gyártott próbatest töretfelületi felvétele



66. ábra, 3 mm vastag előnyomtatással gyártott próbatest töretfelületi felvétele

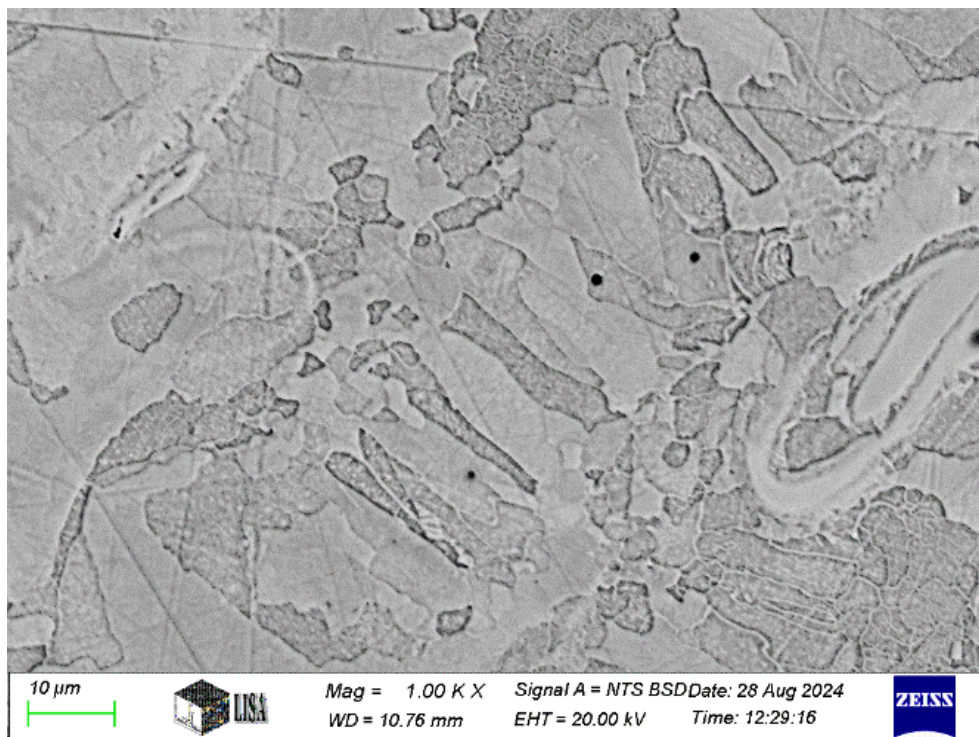


a) 2 mm

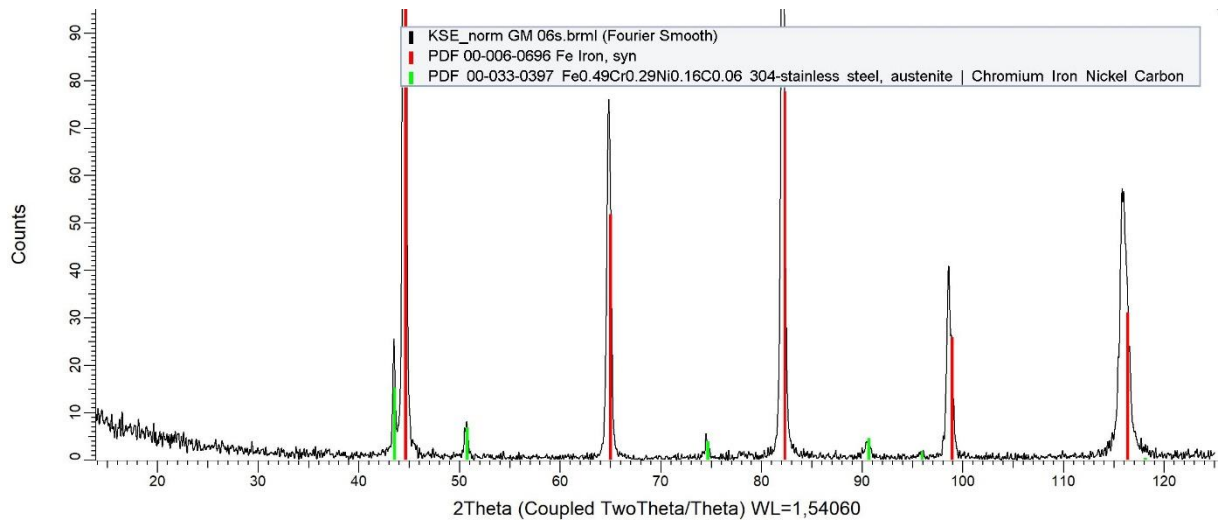
b) 3 mm

67. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatest nyomtatási hibája a) 2 mm és b) 3 mm vizsgálati vastagság esetében, ahol a porszemcsék nem olvadtak meg

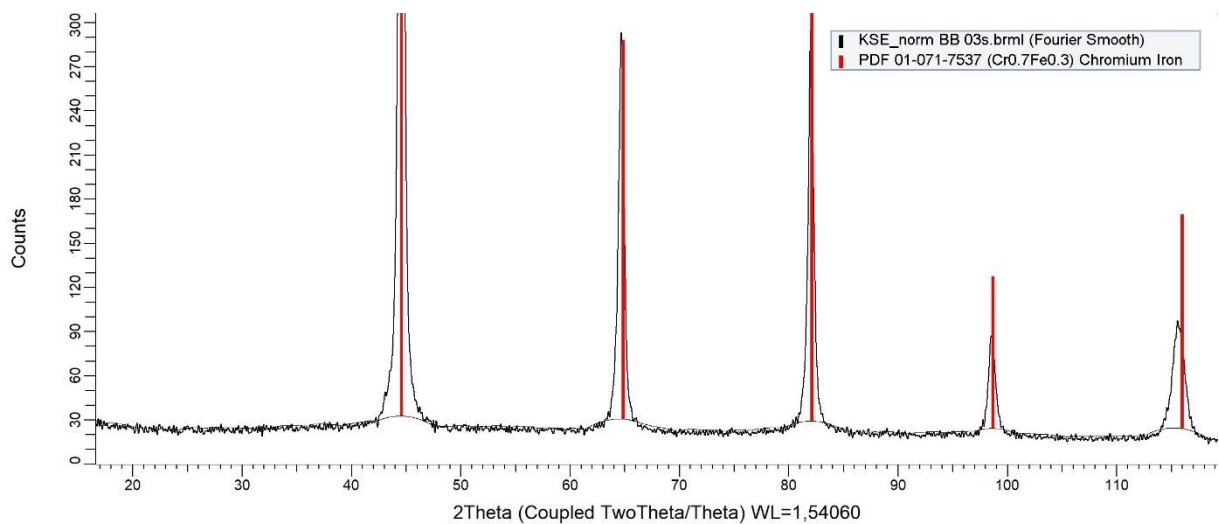
A 68., 69. és 70. ábra alapján, az előnyomtatással készült minta esetében a próbatest belsejének mikroszerkezetében nem kimutatható a 17-4PH rozsdamentes ötvözetre jellemző martenzites szerkezet, a mikroszerkezet tisztán ferrites. A felületen kis mértékben megváltozik a kémiai összetétel, ennek hatására megjelenik a másik allotróp módosulat, az ausztenit a mikroszerkezetben.



68. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatestról készült próbatest mikroszerkezetének SEM felvétele



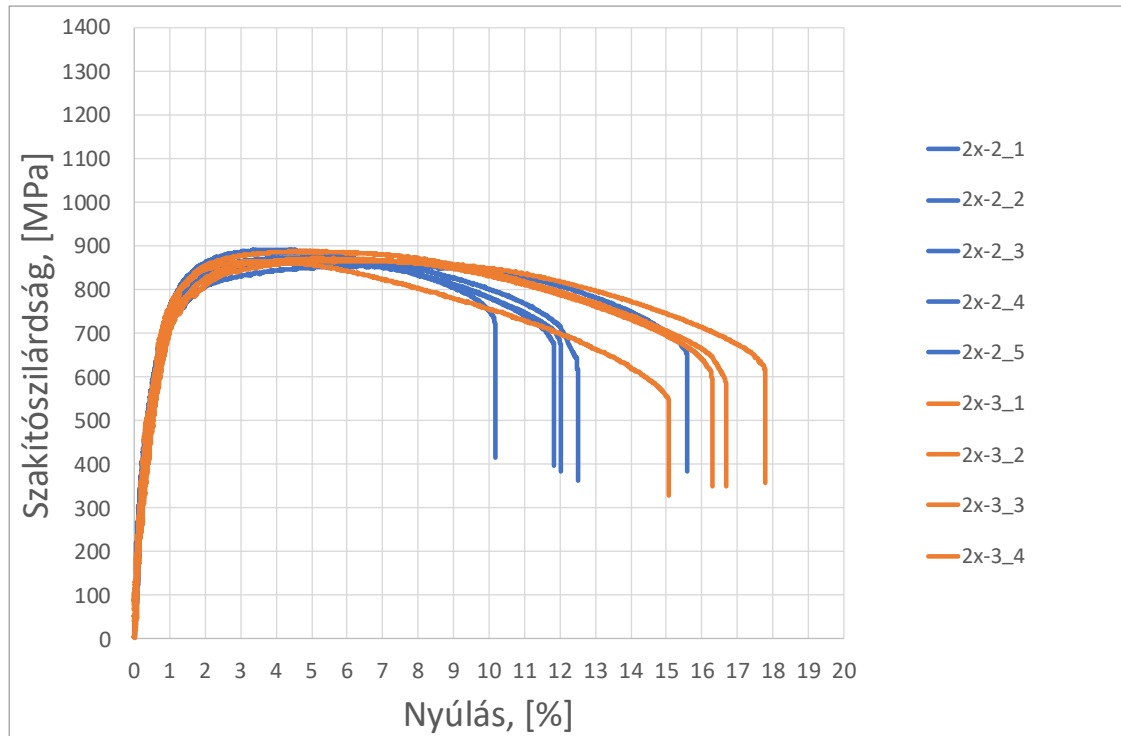
69. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



70. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye

4.4.7.2. Kétszer olvasztott állapotban gyártott darabok eredményeinek bemutatása

A kétszeres olvasztással 3D nyomtatott darabokat a VII. táblázat alapján készítettem el, ami abból állt, hogy a primer olvasztást követően a berendezés a már megszilárdult réteget pásztázta keresztül, nagyobb energiasűrűséggel. A 71. ábra ennek a vizsgálati állapotban elkészített darabok szakítószilárdság és nyúlás eredményeit mutatja be.

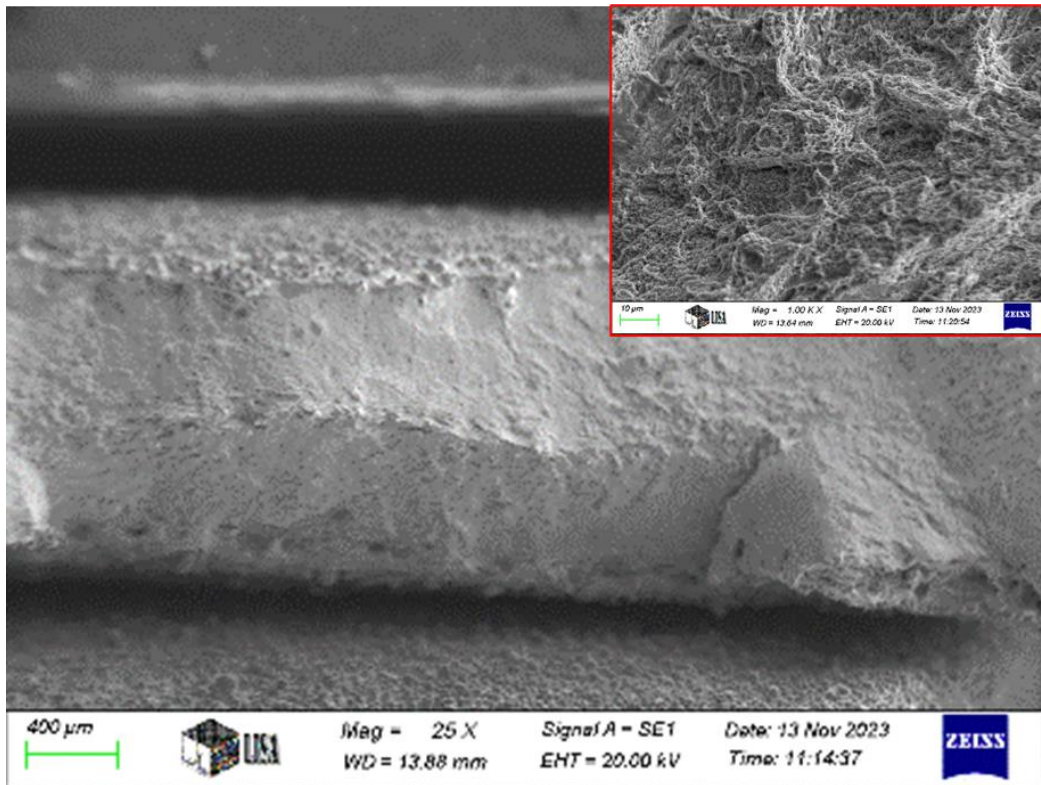


71. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatetek kétszer olvasztott állapotban

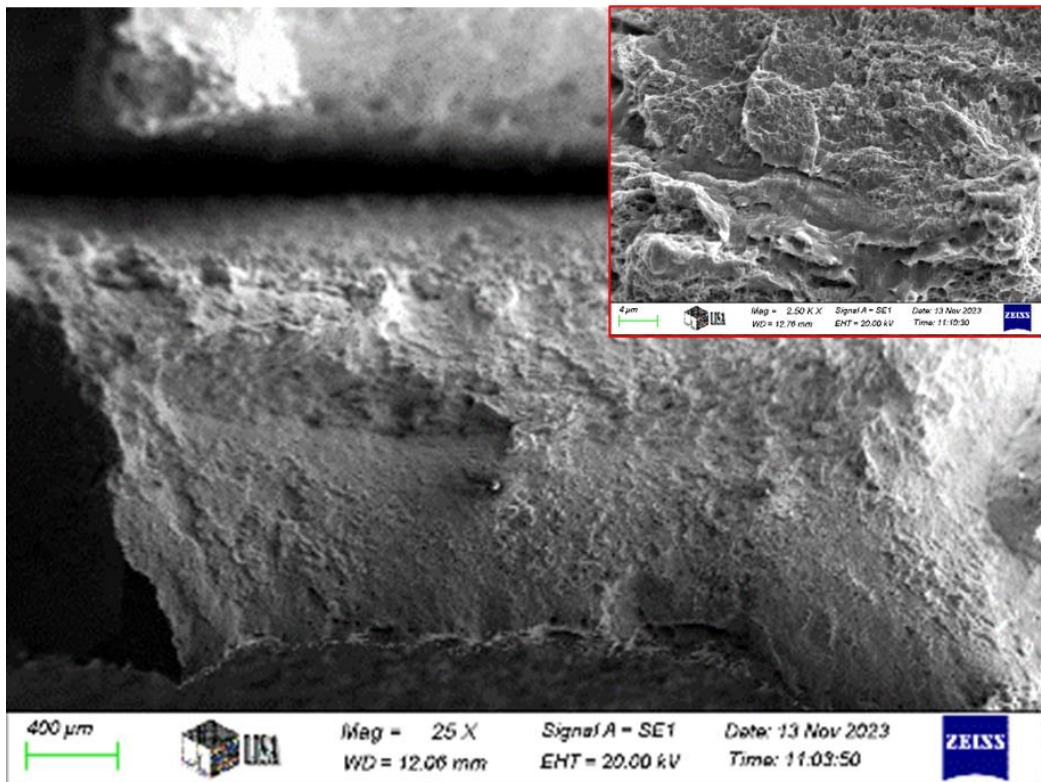
Az így elkészített 2 mm vastag próbatetek darabjai 15,6%-os nyúlási értéket értek el, 892 MPa szakítószilárdság mellett, a 3 mm-es próbatetek 17,8%-ot, 888 MPa szakítószilárdság mellett.

Ennek megfelelően, a kétszeres átoltasztás esetében a 2 mm vastag próbatetek szakítószilárdsága az előnyomtatás 718 MPa-os értékéhez képest 24,2%-kal, valamint a nyúlási érték az előnyomtatás 7,02%-os értékéhez képest 122%-kal volt nagyobb. A 3 mm vastag próbatetek szakítószilárdsága az előnyomtatás 766 MPa-os értékéhez képest 15,93%-kal, valamint a nyúlási érték az előnyomtatás 8,41%-os értékéhez képest 112%-kal volt nagyobb.

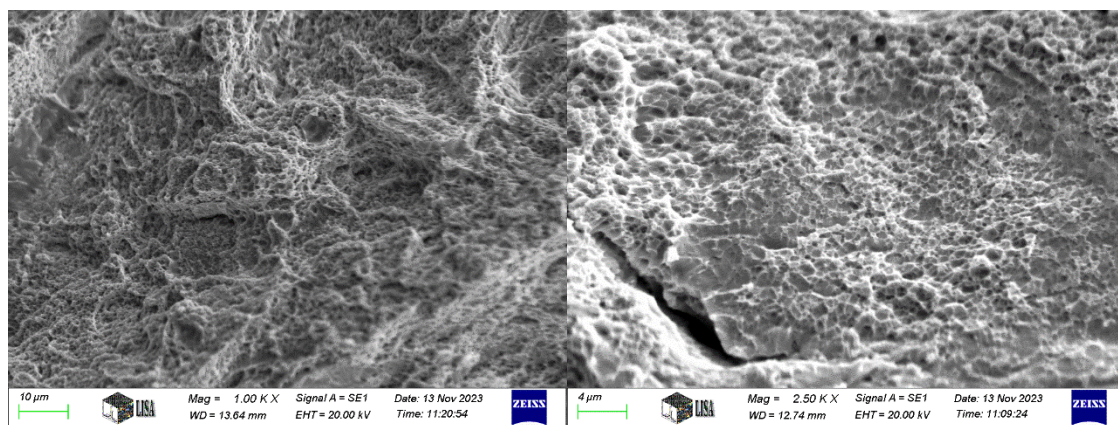
Ahogy azt a 72., 73., és 74. ábrák szemléltetik, a kétszeres átoltasztás a primer olvasztási folyamat során visszamaradt porszemcséket beleolvasztja a térfogatba, mely növeli a szerkezeti integritást és szívós törést eredményez, ami párhuzamba állítható a megnövekedett nyúlási értékekkel.



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



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

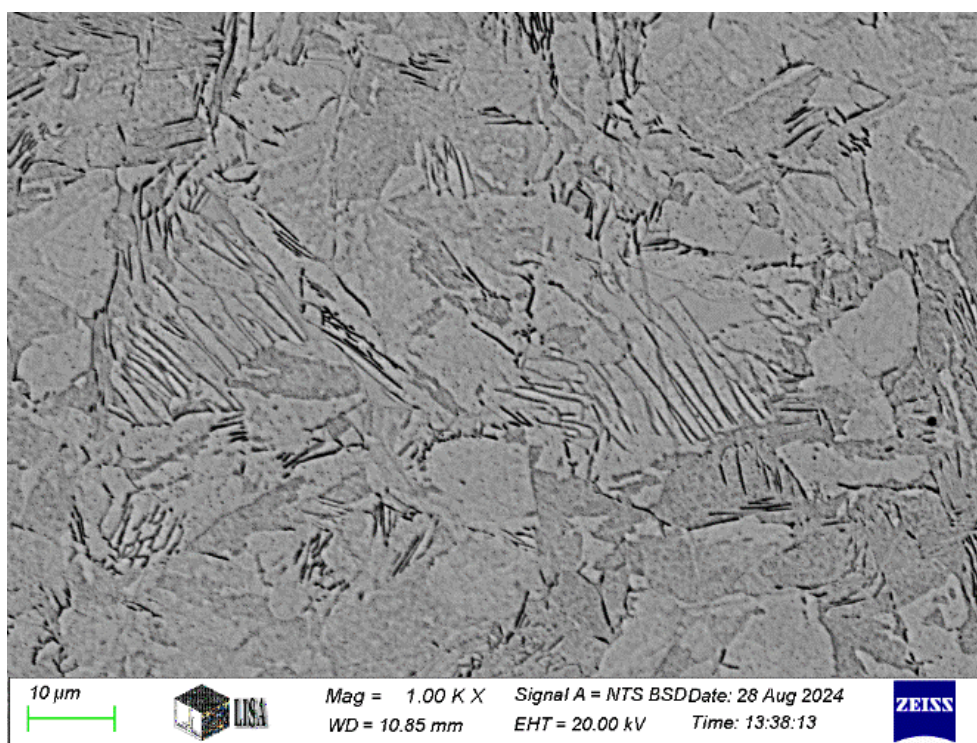


a) 2 mm

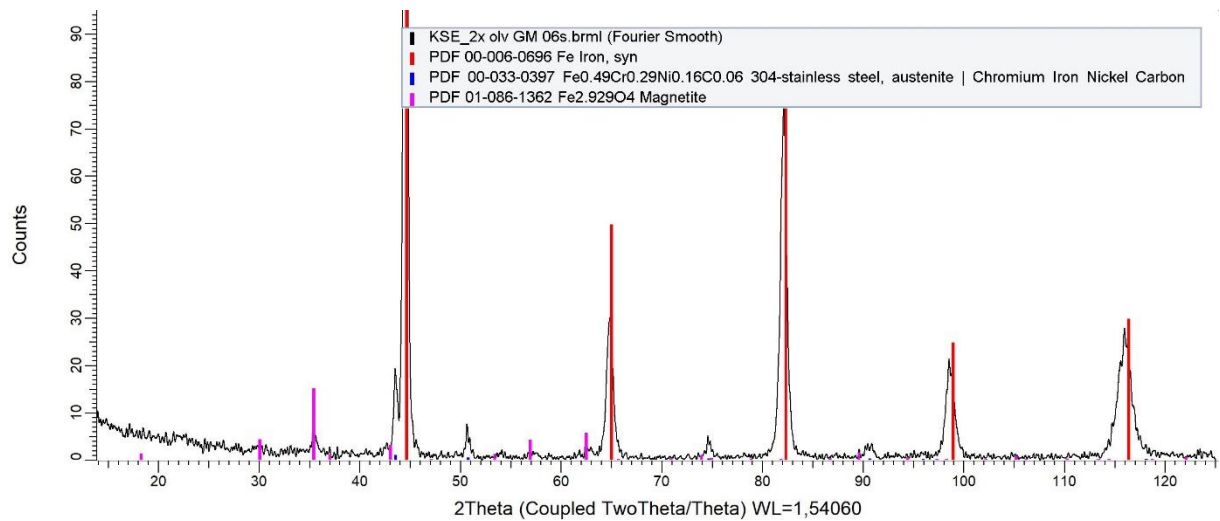
b) 3 mm

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

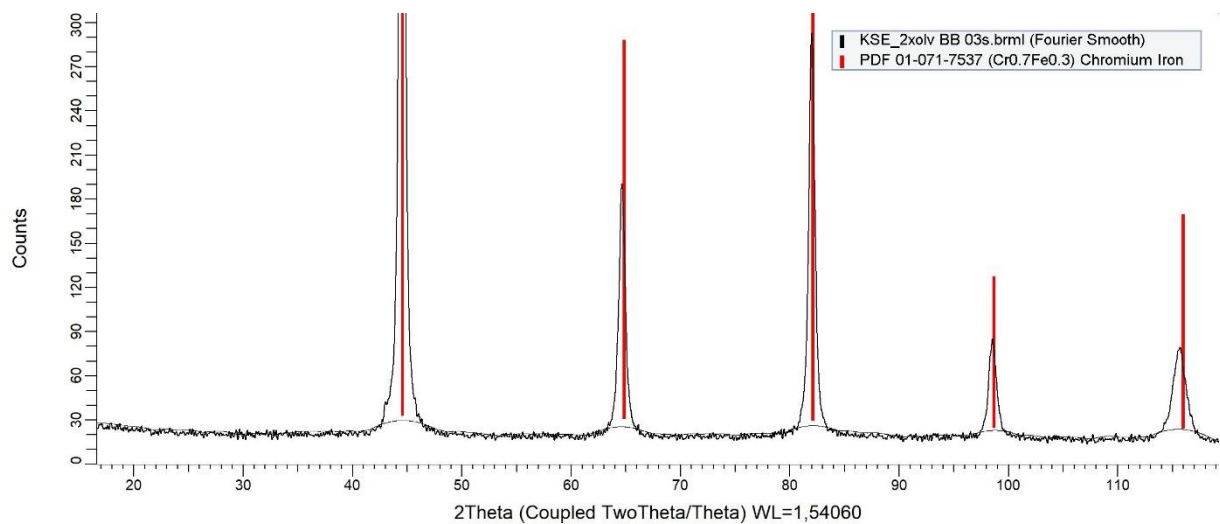
A 75., 76. és 77. ábrák alapján, a kétszer átolvasztott minták esetében a felületen, Fe-oxid és magnetit jelent meg, valamint csekély mennyiségű ausztenit fázis. A próbatest belsejében a ferrites szerkezet mellett már markáns tűs szerkezet kimutatható.



75. ábra, Kétszer átolvasztva nyomtatott próbatestról készült próbatest mikroszerkezetének SEM felvétele



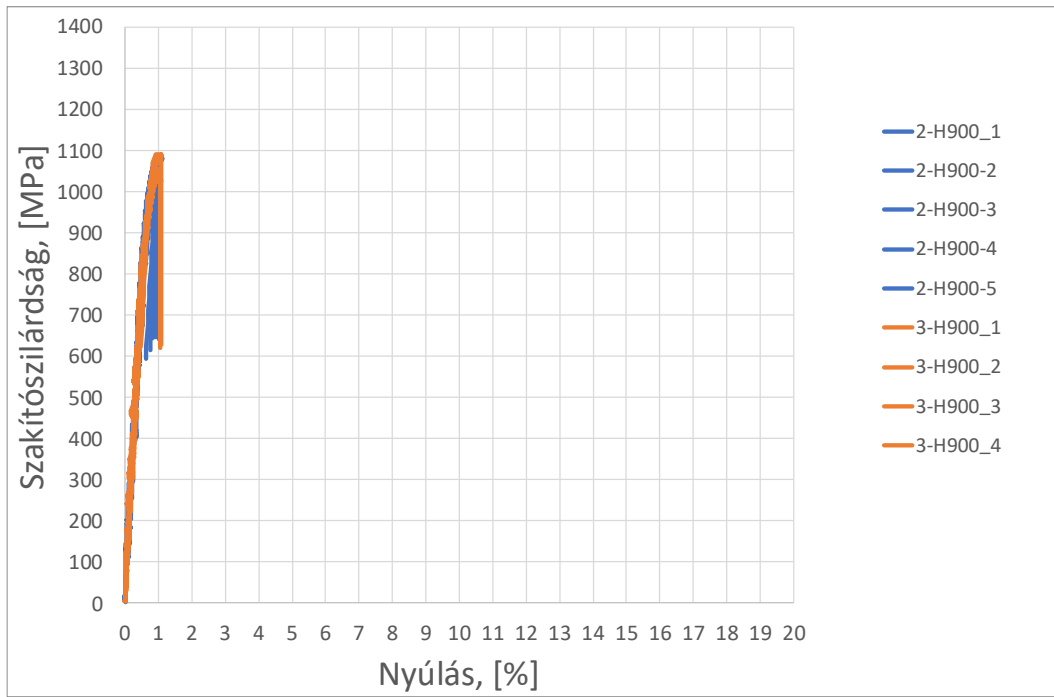
76. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



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

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

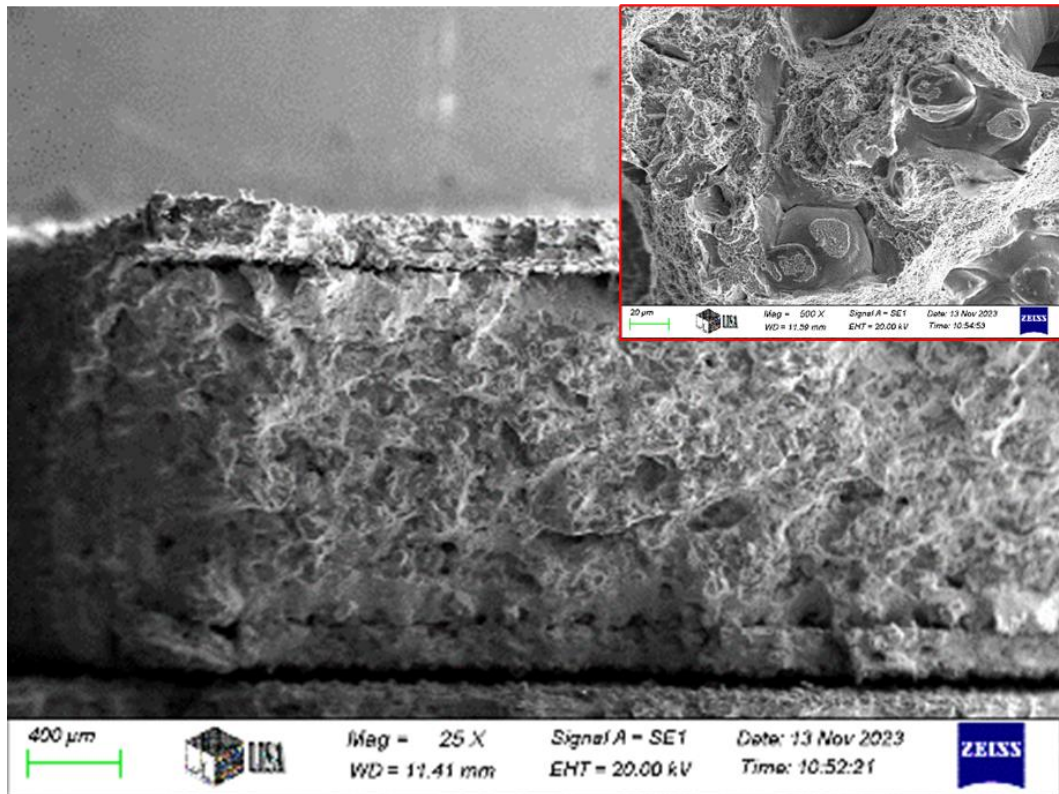
A 3D nyomtatási folyamat a VII. táblázat szerinti előnyomtatási beállításon zajlott, amit a 22. ábrán bemutatott H900-as hőkezelési ciklus követett. A 78. ábra mutatja be ezeknek a daraboknak a szakítószilárdsági és nyúlási értékeit.



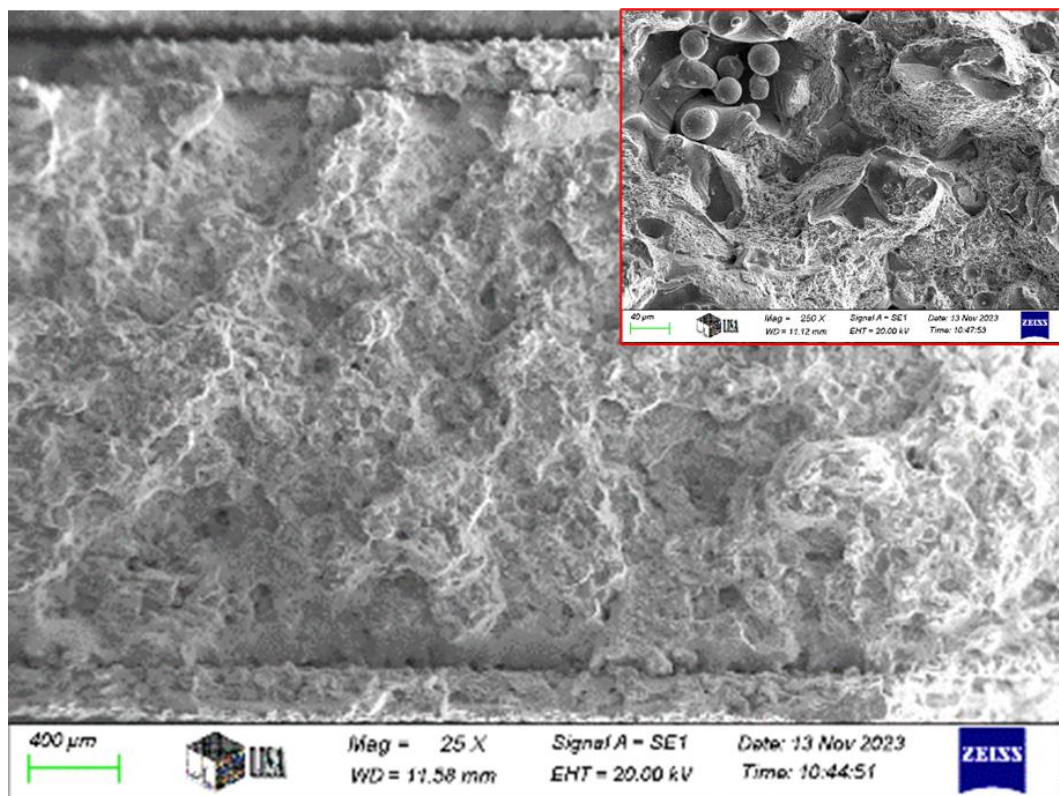
78. ábra, 2mm és 3mm vastag próbatestek H900 állapotban

Az előnyomtatáson 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 előnyomtatással 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.

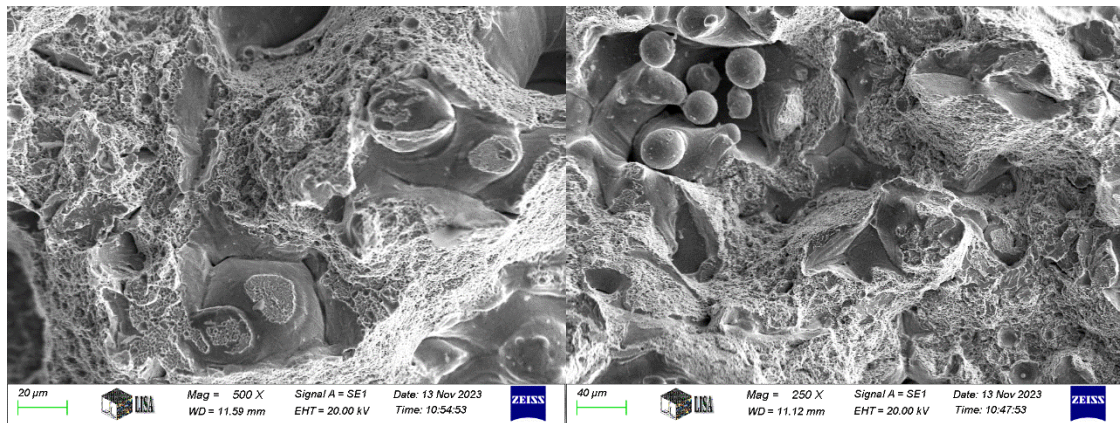
A H900-as öregítéssel kezelt próbatestek esetében a 79. , 80. és 81. ábrákon látható, hogy a primer olvasztás során visszamaradt porszemcsék továbbra is jelen vannak a térfogatban, azonban az öregítési program hatására a darabok ridegebbé válnak, így a megnövekedett szakítószilárdság mellett, szinte nyúlás nélkül törtek el.



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



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

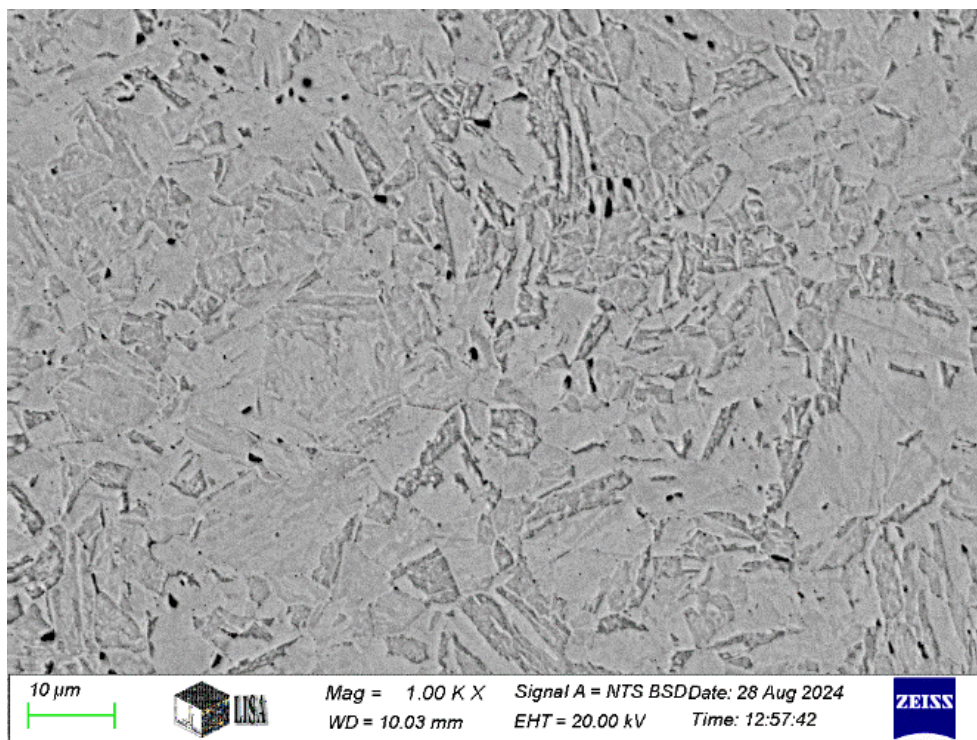


a) 2 mm

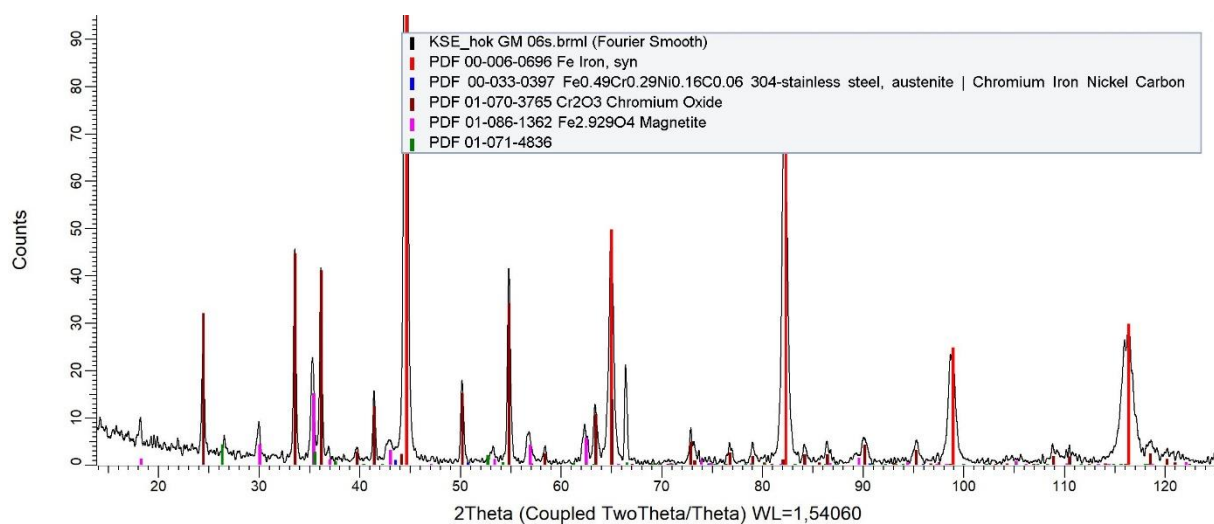
b) 3mm

81. ábra, Az a) 2 mm és b) 3 mm vastag H900 hőkezelt próbatesszt megmaradó nyomtatási hibájának felvétele

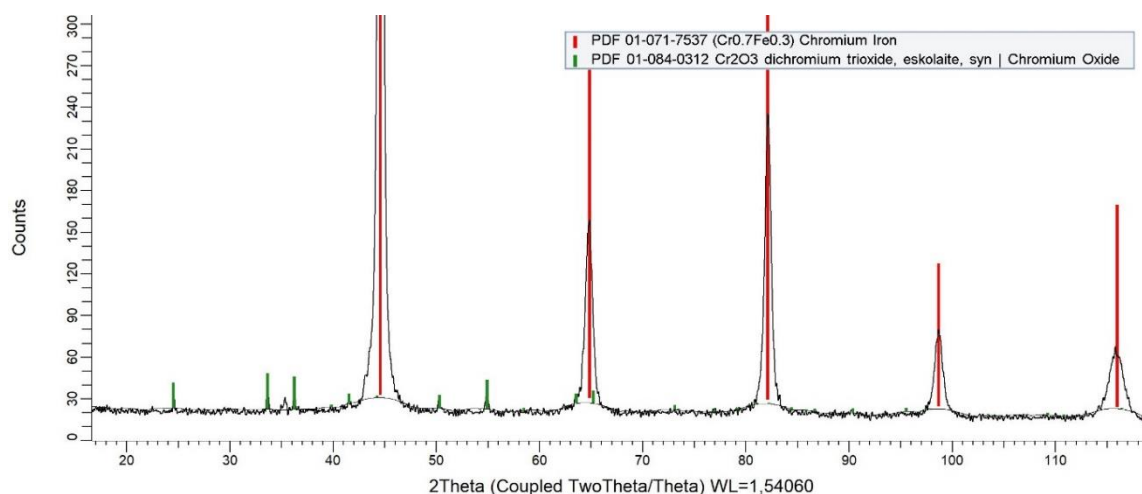
A 82., 83. és 84 ábrákon látható előnyomtatással gyártott, majd H900 hőkezeléssel kezelt minták esetében a felületen Fe és Cr tartalmú oxidok azonosíthatók, valamint az ausztenit jelenléte is kimutatható. A próbatesszt belsejében ferrites szerkezet és kis mennyiségű martenzites, tús szerkezet mellett kis mennyiségben króm oxid található.



82. ábra, Előnyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatessztről készült próbatesszt mikroszerkezetének SEM felvétele



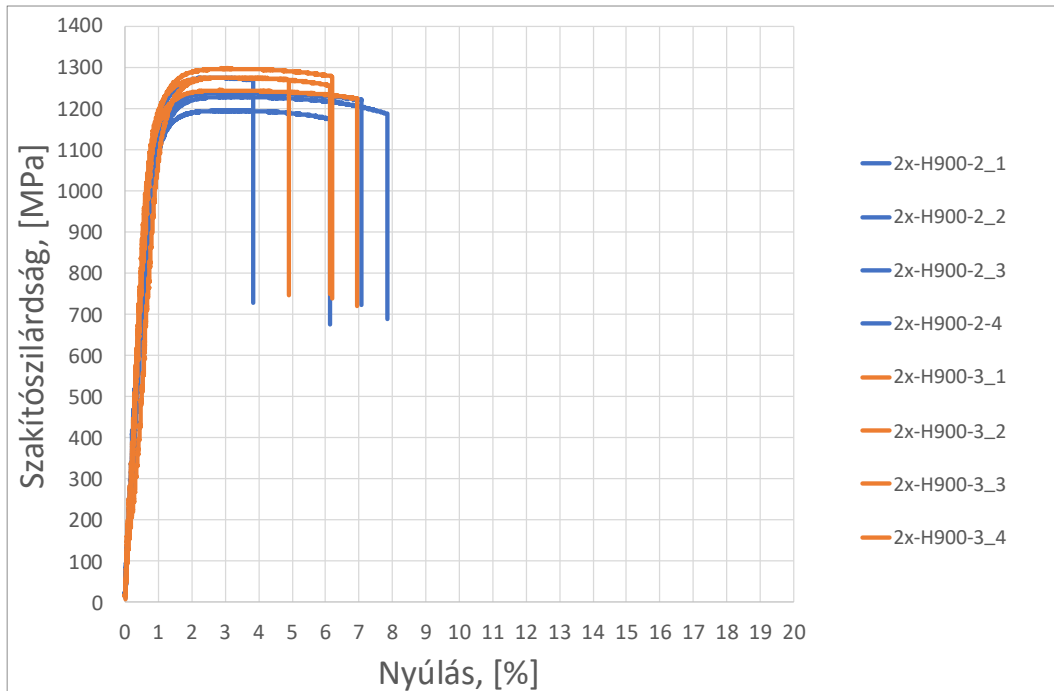
83. ábra, Előnyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatessz kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye



84. ábra, Előnyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatessz térfogatának XRD fázisanalízis eredménye

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

A VII. táblázatban bemutatott kétszeres olvasztást és a 22. 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 85. ábra ezeknek az eredményeit mutatja be.



85. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatetek egyszerre kétszer olvasztott és H900 állapotban

A kétszer átolvasztással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatetek 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 próbatetekben az alapállapothoz képest az alábbi különbségeket eredményezte:

- a. A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az előnyomtatás 718 MPa-os értékéhez képest 1235 MPa volt, mely 72%-os növekedést, a nyúlási érték az előnyomtatás 7,02%-os értékéhez képest, 6,22% volt, mely 11%-os csökkenést jelent.
- b. A 3 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság az előnyomtatás 766 MPa-os értékéhez képest 1274 MPa volt, ami 66%-os növekedést, a nyúlási

érték az előnyomtatás 8,41%-os értékéhez képest 6,04% volt, mely 28%-os csökkenést jelent.

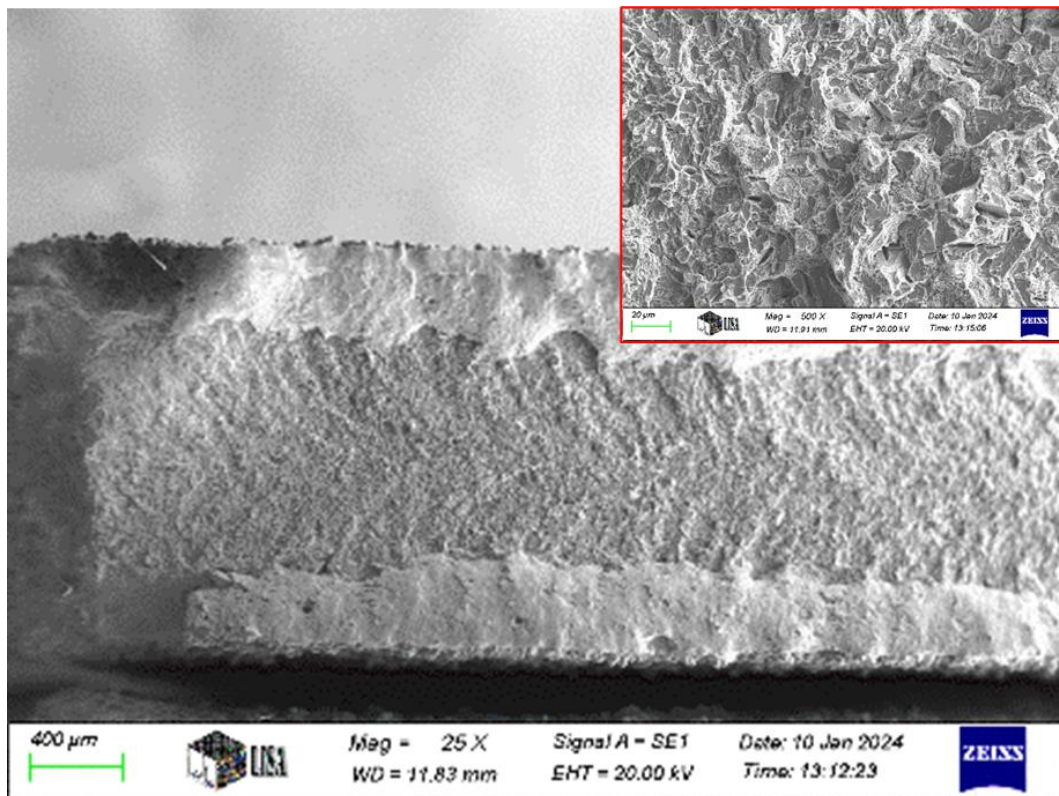
A szimplán H900-as hőkezeléssel kezelt darabokhoz képest az alábbi változást eredményezte:

- c. 2 mm vastag darabok esetében az előnyomtatással gyártott, 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%-os növekedést, a nyúlási érték 1,03%-ról 6,22%-ra változása 503%-os növekedést jelent
- d. 3mm vastag darabok esetében az előnyomtatással gyártott, 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 21%-os növekedést, a nyúlási érték 0,98%-ról 6,04%-ra változása 516%-os növekedést eredményez

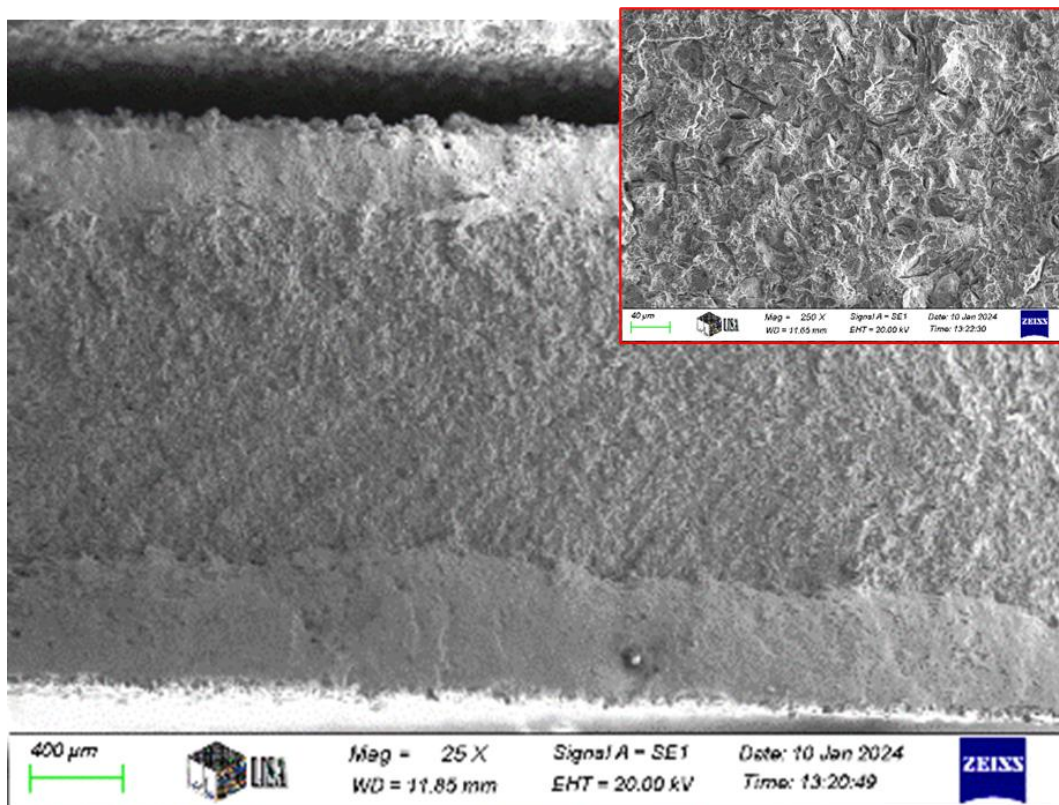
A szimplán kétszer olvasztott darabokhoz képest az alábbi változást eredményezte:

- e. A 2 mm vastag darabok esetében a szakítószilárdság a kétszeres átolvasztás 892 MPa-os értékéhez képest 1235 MPa volt, mely 38%-os növekedést, a nyúlási érték a kétszeres átolvasztás 16%-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%-os növekedést, a nyúlási érték a kétszeres átolvasztás 17,80%-os értékéhez képest 6,04% volt, mely 66%-os csökkenést jelent.

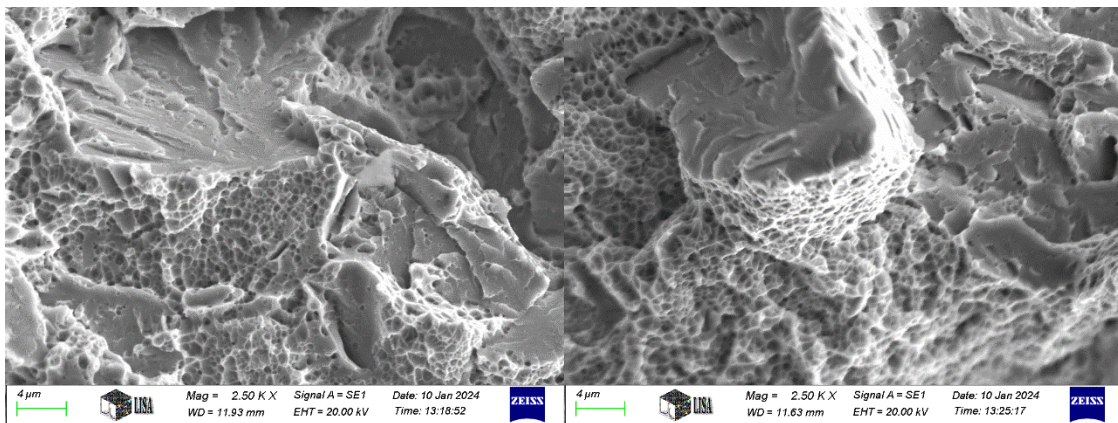
Abban az esetben, ha a gyártott darabok folyamat közben egy kétszeres átolvasztáson készülnek, amit H900-as hőkezelési program követ, a két eljárás hatása egyszerre vehető észre a darabok mikroszerkezetében. Ahogyan azt a 86., 87. és 88 ábrák is szemléltetik, a térfogatban felváltva vannak jelent a szívós és rideg törési felületek, valamint a felvételeken nem látható nyomtatási folyamat után visszamaradó, nem megolvasztott porszemcse.



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



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

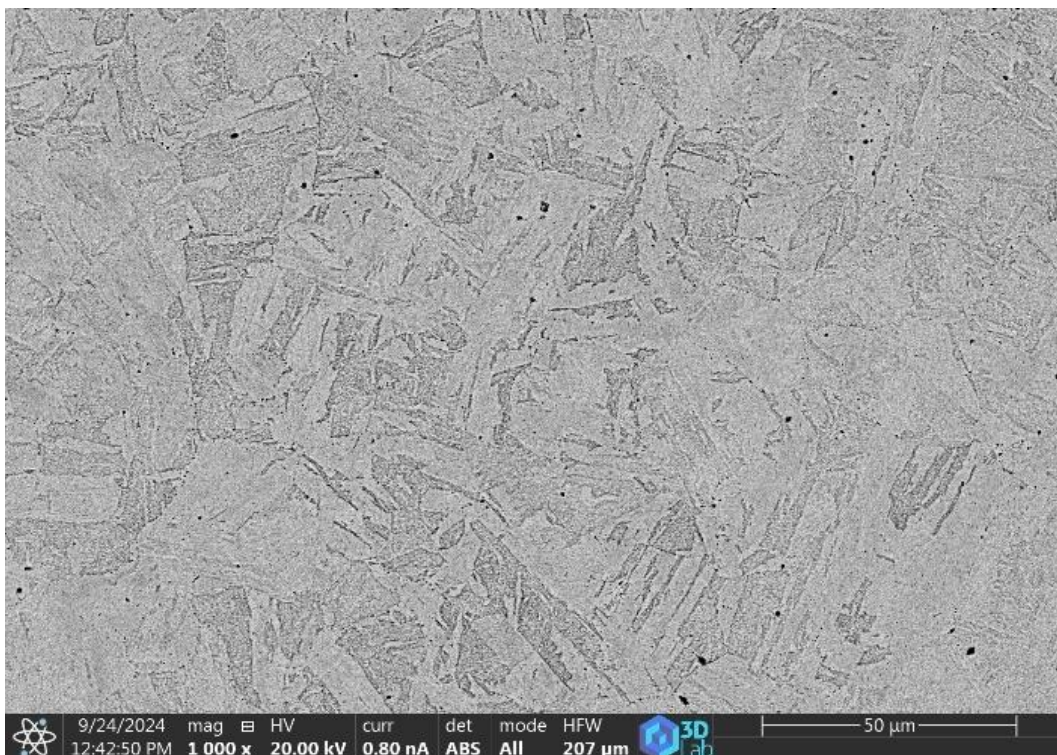


a) 2 mm

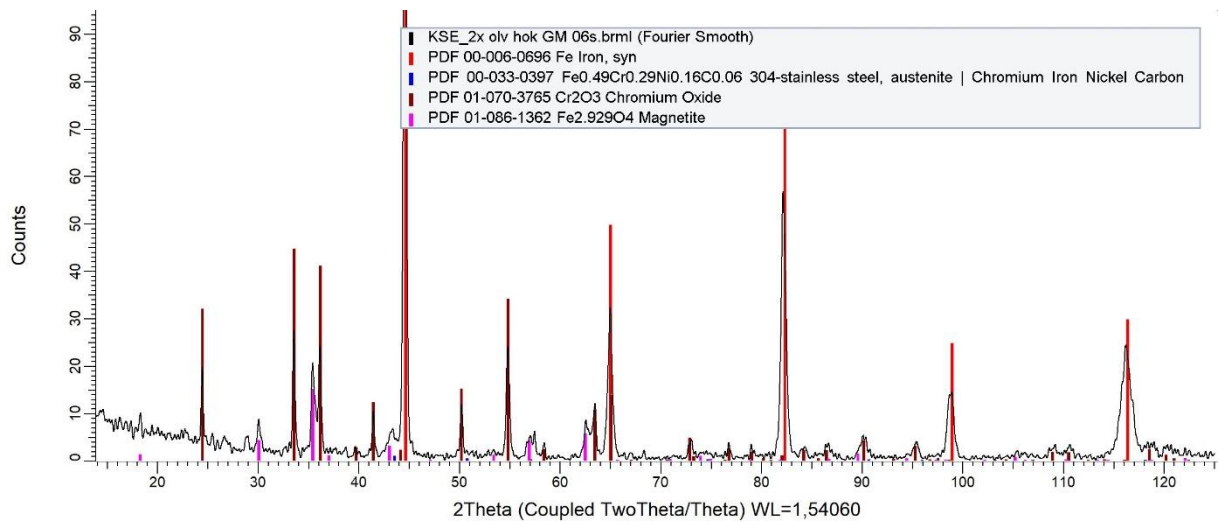
b) 3 mm

88. ábra, Az a) 2 mm és b) 3 mm vastag egyszerre kétszeresen átolvasztott és H900 hőkezelt próbatest szívós és rideg törési felülete

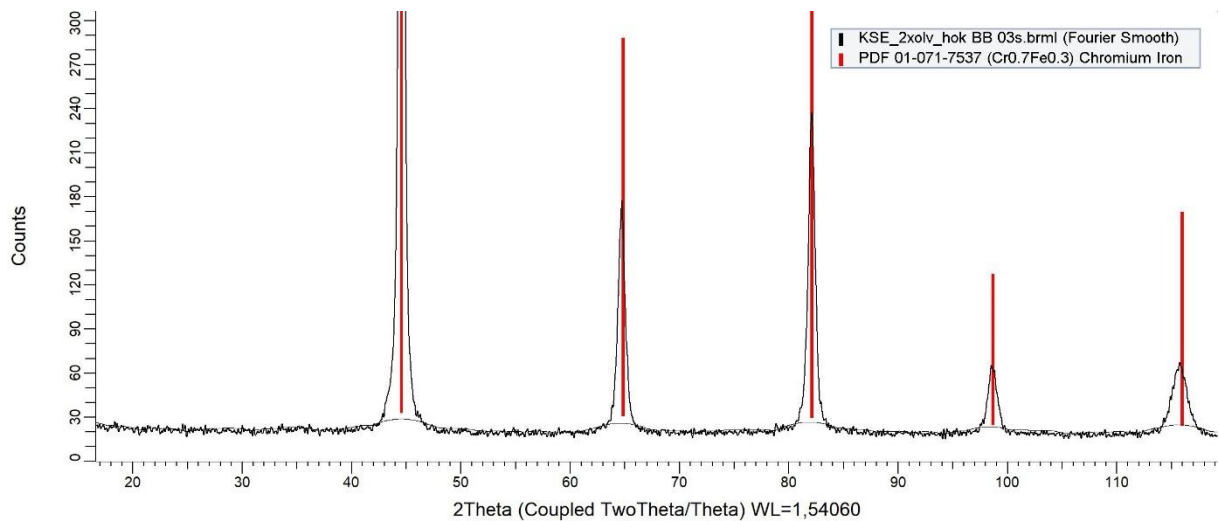
A 89., 90., és 91. ábrákon látható kétszer átolvasztott és H900-as hőkezeléssel kezelt minták esetében a felületen az oxidáció miatt Fe és Cr tartalmú oxidok jelentek meg, valamint ebben az esetben is azonosítani lehetett az ausztenit fázist. A próbatest belsejében teljesen ferrites szerkezet alakult ki ebben az esetben is, valamint kimutathatók lemezes, tűs és idiomorf szemcsék is.



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



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



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

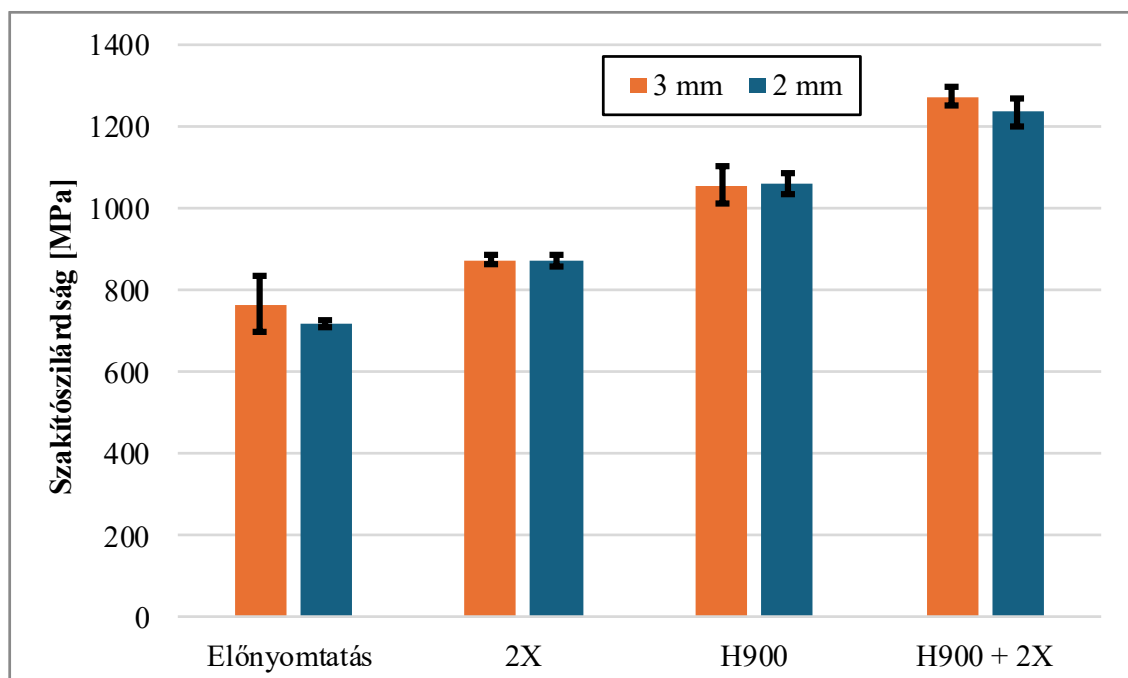
4.3.8. A „ZX” orientációs 3D nyomtatási eredmények összefoglalása

A vizsgálataim eredményeinek feldolgozásával az alábbi következtetéseket vontam le:

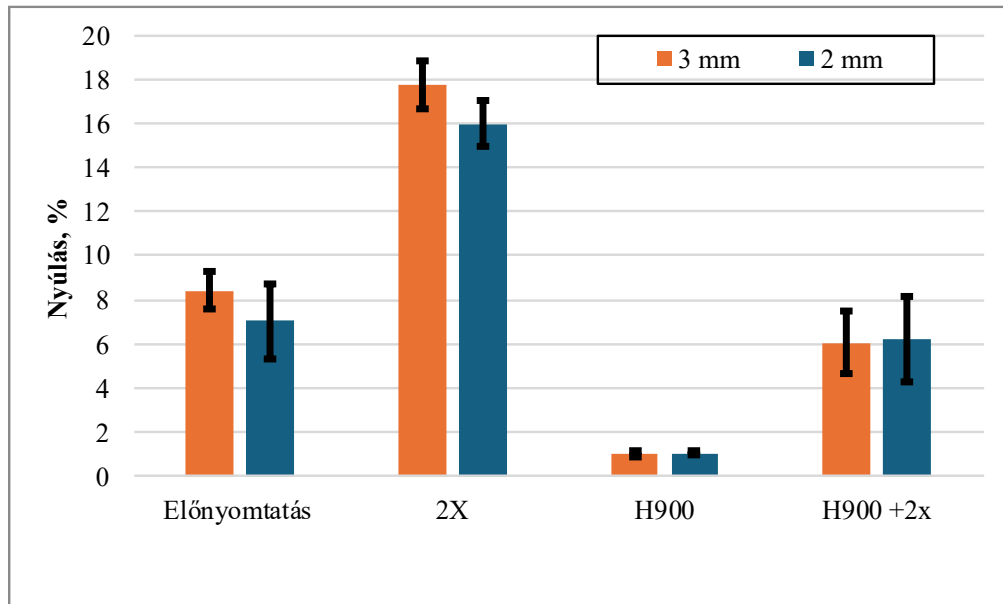
A minták mikroszerkezetében ferrit fázis azonosítható, amely a vas térben középpontos kockarácsú módosulata. Az egyes mintákban a ferrit fázis morfológiája eltérő.

- Az előnyomtatással készült minták esetében nincs jellegzetes martenzites, tűs szemcsealak a mikroszerkezetben.
- A H900 hőkezelt próbatestekben már ez a tűs szemcseszerkezet felismerhető, 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 92. és 93. ábra a négy mérési sor együttes szakítószilárdsági szemléltetését mutatja be.



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



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

A 92. és 93. ábrák adatainak felhasználásával, alkalmaztam négy minősítési index faktort, mely értékeit a XIV. táblázat tartalmazza, ahol „ R_m ” a maximális szakítószilárdság, „ A ” a nyúlás, valamint „ ρ ” a sűrűség:

- Szívóssági index: pontos becslést ad az anyagok törés előtti energia elnyelő képességére, azonban kiugró értékeknél túlhangsúlyozza a nyúlási értéket.
Képlete: $T = R_m \cdot A$
- Logaritmikus szívóssági index: jobban közelíti az igazi alakváltozási munkát, azaz a feszültség – nyúlás görbe alatti területet, valamint mérsékli a nagy nyúlás hatását, kiegyensúlyozottabb mutató, főleg az autóiparban az repülőgépiparban alkalmazzák.

$$\text{Képlete: } I = R_m \cdot \ln \left(1 + \frac{A}{100} \right)$$

- Fajlagos logaritmikus index: a logaritmikus szívóssági indexhez képest, az anyagok sűrűségéből, a tömeg szerinti besorolásra mutató szám, mely alkalmas az anyagok tömeg szerinti besorolására, ha az energiaelnyelés a cél.

$$\text{Képlete: } I_\rho = \frac{R_m}{\rho} \cdot \ln \left(1 + \frac{A}{100} \right)$$

- Fajlagos szilárdsági index: az anyagok szilárdsági mutatója, egységnyi tömegrre vetítve, segít kiválasztani a legnagyobb teherbírást, minimális tömeg mellett.

$$\text{Képlete: } S_\rho = \frac{R_m}{\rho}$$

A 94. 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, előnyomtatási 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 „ZX” nyomtatási orientáción, a kétszeres átolvasztás és a H900-as hőkezelési program együttes alkalmazása az előnyomtatáshoz 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 esetekben alkalmazhatók:

- A „ZX” orientációs előnyomtatás alkalmazható abban az esetben, ha egyedi alkatrészek gyártása esetében a méretpontosság elengedhetetlen tényező, azonban mechanikai igénybevételek szempontjából a XIV. táblázat alapján a 2 és 3 mm vastag darabok a $T = 5040-6442$ szívóssági index, $I = 48,71-61,85$ logaritmikus index, $I_p = 0,0061-0,0081$, illetve $S_p = 0,0945-1009$ fajlagos szilárdsági index tartományokig felhasználhatók.
- A „ZX” orientációs előnyomtatás és H900-as hőkezelés együttesen alkalmazható abban az esetben, ha az egyedi alkatrészek gyártása esetében a követelmények a XIV. táblázat alapján a 2 és 3 mm vastag darabok a $T = 1035,86-1092,83$ szívóssági index, $I = 10,31-10,87$ logaritmikus index, $I_p = 0,0014$, illetve $S_p = 0,1392-0,1397$ fajlagos szilárdsági index tartományokig felhasználhatók.
- A kétszeres átolvasztás alkalmazás alkalmazható abban az esetben, ha az egyedi alkatrészek gyártása esetében mechanikai igénybevétel szempontból a XIV. táblázat alapján a 2 és 3 mm vastag darabok a $T = 13915,2-15806,4$ szívóssági index, $I = 129,31-145,47$ logaritmikus index, $I_p = 0,0167-0,0188$, illetve $S_p = 0,1147-0,1152$ fajlagos szilárdsági index tartományig felhasználhatók.

- 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 lehet előállítani. A kétszeres olvasztás javítja az előnyomatási állapothoz képest a mikroszerkezetet, amit, ha H900-as öregítéses hőkezelés követ, a két eljárás hatása együtt jelenik meg a mikroszerkezetben. Mechanikai igénybevétel szempontból a XIV. táblázat alapján a 2 és 3 mm vastag darabok a $T = 7681,7-7694,96$ szívóssági index, $I = 74,52-74,72$ logaritmikus index, $I_p = 0,0096$, illetve $S_p = 0,1595-1645$ fajlagos szilárdsági index tartományig felhasználhatók.
- 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” orientációjú 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 a kétszeres olvasztási 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 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 szálerősített, nagy teherbírású kompozit alapanyagokkal, vagy nagy bonyolultságú, egyedi szériatermékekkel. Munkámmal elsősorban az alkatrészek legyárthatóságának kívántam új metódusokat feltárni, főképp az orientációs különbségekre koncentrálni.

Kutatómunkám egyik főbb eredménye, hogy a maradó feszültség mérő próbatestek felhajtása és a különböző vizsgálati vastagságok közötti összefüggést egyenletekkel meghatároztam, valamint kimutattam, hogy a kétszeres átolvasztás csökkenti a maradó feszültség okozta maradó alakváltozását a 3D nyomtatott daraboknak.

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 előnyomtatás 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 that using double melting on the already solidified layer can reduce the deformation resulting from residual stresses of the 3D printed specimens.

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 the 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.

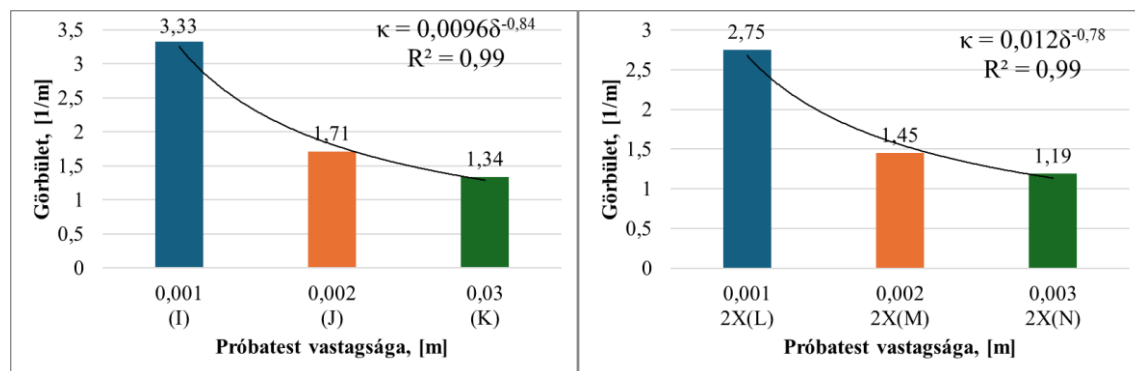
Since in practical applications it is very rare to be able to clearly decide on which orientation to make a complex part, my research gives the possibility to completely ignore this crucial factor, making it easier to fill up the printing volume of the machine and making new ways for part designing processes. 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

Orlas Creator 3D fém nyomtatóval, 17-4PH fémporból, LPBF technológia alkalmazásával előállított próbatesteket 107 W lézer energiájú, 1200 mm/s pásztázási sebességű és 25 μm rétegvastagságú, 80 μm pásztázási vonaltávolságú előnyomtatással, valamint a nyomtatott réteget a következő por terítési ciklust megelőzően 175 W lézer energiájú és 800 mm/s pásztázási sebességű kétszeres átolvasztási ciklus alkalmazásával az alábbi tézisek fogalmazhatók meg:

1. Tézis

Az „YX” nyomtatási orientációjú, $L = 0,04$ m vizsgálati hosszúságú, $X = 0,01$ m szélességű és $\delta = 0,001$, $0,002$ és $0,003$ m vastagságú próbatestek esetében, a nyomtatási ciklust követően, a tárgyasztaltól való eltávolítása után, az alakváltozást mérve a $\kappa \approx 2\delta/L^2$ képlet alapján meghatározható a kialakuló görbület (T.1. ábra).



T.1. ábra, Előnyomtatással, I; J; K és kétszeres átolvasztással L; M; N gyártott próbatestek görbületi értékei

1.1.: Azonos „ δ ” vizsgálati vastagság esetén, a kétszeres átolvasztással készített darabok görbületi értékei kisebbek, mint az előnyomtatás görbületi értékei, ez azt jelenti, hogy a nagyobb energiasűrűségű kétszeres átolvasztás csökkenti a maradó feszültség által okozott alakváltozást.

1.2.: Az előnyomtatással előállított darabok görbületét $0,001 \text{ m} \leq \delta \leq 0,003 \text{ m}$ „Z” irányú vastagság esetén a $\kappa = 0,0096\delta^{-0,84}$ egyenlettel, valamint az ugyanezen értelmezési tartományú, kétszeres átolvasztással készített darabok görbületét a $\kappa = 0,012\delta^{-0,78}$ egyenlettel lehet előre jelezni, mely egyenletben a „ κ ” érték [1/m]-ben, a „ δ ” érték [m]-ben értendő, valamint az R^2 determinációs együttható 0,99.

„ZX” orientációban gyártott szakítószilárdság mérésére alkalmas próbatesteket előnyomtatási és kétszeres átolvasztási állapotban előállítva, majd a tárgyasztaltól való

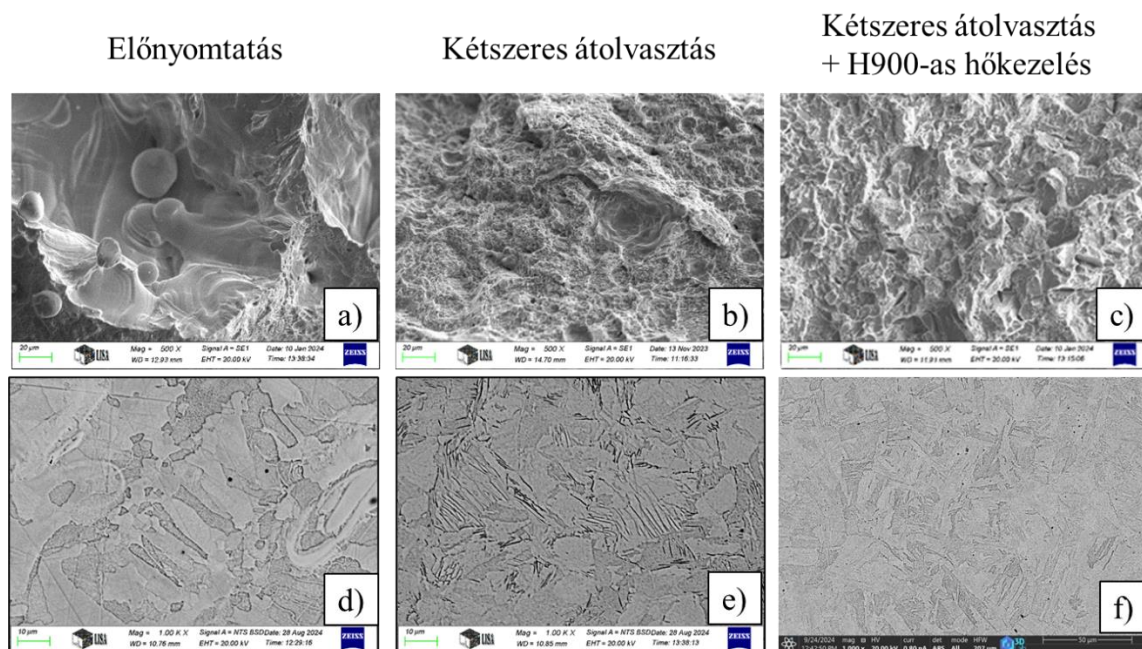
elválasztást követően H900-as öregítési ciklust is alkalmazva, a különböző vizsgált állapotokra meghatározható a szívóssági index ($T = R_m \cdot A$), a fajlagos logaritmusos index ($I_p = (R_m/\rho) \cdot \ln(1+A/100)$) valamint a fajlagos szilárdsági index ($S_p = R_m/\rho$). Az egyenletekben „ R_m ” a szakítószilárdság [MPa]-ban, „ A ” a nyúlás [%]-ban, valamint „ ρ ” a sűrűség [kg/m^3]-ben. Az energiasűrűség az $E_v = P/(v \cdot h \cdot t)$ egyenlettel határozható meg, mely egyenletben a „ P ” a lézer energia [W]-ban, „ v ” a pásztázási sebesség [mm/s]-ban, valamint „ h ” a pásztázási vonalak távolsága egymástól [mm]-ben, valamint „ t ” a rétegvastagság [mm]-ben (T.1. táblázat). A T.2. ábra a különböző vizsgált állapotok töretfelületét, illetve mikroszerkezetét mutatja be. Ezen eredmények alapján az alábbi tézisek fogalmazhatók meg:

2. Tézis

A különböző nyomtatott állapotú minták mikroszerkezeti vizsgálata alapján az alábbi új tudományos eredményt fogalmaztam meg:

2.1.: A kétszeres olvasztással nyomtatott darabok szövetszerkezetében a ferrites szerkezet mellett tús szerkezet található, valamint az előnyomtatás során visszamaradó porszemcsék visszaolvadtak, ezzel tovább növelve a próbadarabok tömörségét.

2.2.: A kétszeres átolvasztással készített, majd H900-as hőkezeléssel kezelt darabok esetében, ferrites szerkezet alakul ki, a lemezes, tús szemcsék megjelenése mellett. A próbatestekben nem található visszamaradó porszemcsék.



T.2. ábra, a), b) és c), Töretfelületekről, valamint d), e) és f) mikroszerkezetekről készített pásztázó elektron mikroszkópos felvételek

3. Tézis

A vizsgált állapotok minősítési indexei alapján, megállapítottam:

3.1.: A H900-as hőkezelés csökkenti a szívóssági indexet az előnyomtatott állapothoz képest, míg a kétszeres átolvasztás jelentős növekedést eredményez. A kétszeres átolvasztást követő H900-as hőkezelés mérsékli ezt a növekedést, de a szívóssági index továbbra is meghaladja az előnyomtatott állapothoz tartozó értéket.

3.2.: A H900-as hőkezelés jelentősen csökkenti a fajlagos logaritmikus indexet az előnyomtatott állapothoz képest, míg a kétszeres átolvasztás számottevő növekedést okoz. A kétszeres átolvasztást követő H900-as hőkezelés mérsékli a növekedést, de az index továbbra is növekvő tendenciát mutat.

3.3.: A H900-as hőkezelés lényegesen növeli a fajlagos szilárdsági indexet az előnyomtatott állapothoz képest. A kétszeres átolvasztás önmagában csak csekély mértékű növekedést eredményez, azonban a kétszeres átolvasztást követő H900-as hőkezelés a szimplán H900-as hőkezeléssel kezelt darabokhoz képest is növeli a fajlagos szilárdsági indexet.

T.1. táblázat, A „ZX” orientációban nyomtatott szakítószilárdság mérő próbatestek minősítési indexei

	Vastagság [mm]	Szakítószilárdság R_m [MPa]	Nyúlás, A [%]	Szívóssági index, T	Fajlagos logaritmikus index, I_p	Fajlagos szilárdsági index, S_p
Elő-nyomtatás	2	718	7,02	5040	0,0064	0,0945
	3	766	8,41	6442	0,0081	0,1009
Elő-nyomtatás + H900	2	1061	1,03	1093	0,0014	0,1397
	3	1057	0,98	1036	0,0014	0,1392
Kétszeres átolvasztás	2	892	15,6	13915	0,0167	0,1152
	3	888	17,8	15806	0,0188	0,1147
Kétszeres átolvasztás + H900	2	1235	6,22	7682	0,0096	0,1595
	3	1274	6,04	7695	0,0096	0,1645

4. Tézis

A kétszeres átolvasztás és H900-as hőkezelés együttesen alkalmazható abban az esetben, ha a korábban hasonló H900-as hőkezeléssel kezelt kovácsolt darabokat egyedi alkatrészek alkalmazásával kívánjuk helyettesíteni. Ezzel a módszerrel készíthető olyan termék is, melyek kovácsolással nem, vagy csak nehezen előállítható. A kétszeres olvasztás visszaolvasztja az előnyomtatás során visszamaradó porszemeséket a térfogatba majd, ha ezután H900-as hőkezelést alkalmazunk a két eljárás hatása egyszerre érvényesül. Ez az együttes hatás eredményezi a „ZX” orientációban gyártott darabok maximális szakítószilárdságát és megfelelő nyúlási értékét.

5. Tézis

Az alacsony energiasűrűségű előnyomtatást követően a következő porterítési ciklust megelőzően a réteget nagyobb energiasűrűséggel kétszeresen olvasztva a „ZX” orientáción nyomtatott darabok szövetszerkezetében kialakul a jellegzetes martenzites tűs szerkezet a ferrit mellett, ennek hatására szívós törést mutatnak, mely következtében, az előnyomtatáshoz képest lényegesen nagyobb nyúlási értékkel rendelkeznek. Ebből az következik, hogy a nagyobb energiasűrűségű kétszeres átolvasztás képes javítani a „ZX” orientáción nyomtatott darabok rétegeképzésre merőleges húzó erővel szembeni ellenállóságát, megtartva a minimális maradó alakváltozási sajátságát. Ez lehetővé teszi a tárgyasztal „Z” orientációjú darabokkal való feltöltésének lehetőségét, ezzel növelve a berendezés hatékonyságát. Továbbá mivel a nagyobb energiasűrűségű kétszeres átolvasztás nem a porágyon végbemenő folyamat, így nem okoz felporzási jelenséget, így az energia közvetlenül a szilárd felületen hasznosul. Az ezt megelőző előnyomtatás azért kedvező, mert az alacsonyabb energiabevitel hatására a nyomtatási atmoszférába kerülő porszemcsék mennyisége kevesebb, így ezek a lebegő porszemcsék nem defókuszálják a lézert.

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 végigkísértek a tanulmányaim, illetve kutatómunkám során.

Az MTMT-ben feltüntetett, 3D nyomtatás témakörben végzett publikációs tevékenység

1. Kovács Sándor Endre; Varga László, Residual stress analysis of 3D printed metal parts, 10. Jubileumi Interdiszciplináris Doktorandusz Konferencia : Absztraktkötet, Pécs, Magyarország: Pécsi Tudományegyetem Doktorandusz Önkormányzat (2021) 347 p. p. 103
2. Kovács Sándor Endre; Varga László, Additív technológiával előállított termékekben kialakuló maradó feszültségek vizsgálata, Bányászati és Kohászati Lapok (2023) 156: 2 pp. 10-15., 6 p. (2023)
3. Kovács Sándor Endre; Varga László, Additive manufacturing mistakes: an overview of possible errors in Laser Power Bed Fusion processes, DOKTORANDUSZ ALMANACH 2023 : 1 pp. 184-188. , 5 p. (2023)
4. Kovács Sándor Endre; Mikó Tamás; Troiani, Enrico; Markatos, Dionysios; Pethő Dániel; Gergely Gréta; Varga László; Gácsai Zoltán, Additive Manufacturing of 17-4PH Alloy: Tailoring the Printing Orientation for Enhanced Aerospace Application Performance, AEROSPACE 10 : 7 Paper: 619 , 13 p. (2023)
5. Kovács, Sándor Endre; Varga, László, Residual stress build-up during 3D metal printing, IX. INTERDISZCIPLINÁRIS DOKTORANDUSZ KONFERENCIA 2020 ABSZTRAKTKÖTET: 9th INTERDISCIPLINARY DOCTORAL CONFERENCE 2020 BOOK OF ABSTRACTS, Pécs, Magyarország: Pécsi Tudományegyetem Doktorandusz Önkormányzat (2020) 384 p. p. 369
6. Kovács Sándor Endre; Varga László, Additive manufacturing of 3D printed tensile test specimens, DOKTORANDUSZ ALMANACH 1 pp. 190-195. , 6 p. (2022)
7. Kovács Sándor Endre; Varga László, 3D nyomtatott acél próbatestek maradó feszültség vizsgálata (2021) Magyar Öntőnapok, 2021-10-15
8. Kovács Sándor Endre; Szentes Zsolt; Varga László, 3D fémnyomtatással előállított, nagy hővezető képességű nyomásos öntészeti szerszámanyag tulajdonságainak vizsgálata, Bányászati és Kohászati Lapok-Kohászat 153 : 1 pp. 16-21. , 6 p. (2020)
9. Kovács Sándor Endre; Szentes Zsolt; Varga László, Analysis of a Special, 3D Metal Printed HPDC Tool Material, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING AND MANAGEMENT SCIENCES / MŰSZAKI ÉS MENEDZSMENT TUDOMÁNYI KÖZLEMÉNYEK 5: 2 pp. 251-265., 15 p. (2020)

10. Halápi Dávid; Kovács Sándor Endre; Hudák Henrietta; Bodnár Zsolt; Palotás Árpád Bence; Varga László, Tensile Analysis of 3D Printer Filaments MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING: A PUBLICATION OF THE UNIVERSITY OF MISKOLC (2063-6792): 44 1 pp 14-23 (2019)
11. Halápi Dávid; Kovács Sándor Endre; Varga László; Palotás Árpád Bence, Tensile Strength Analysis of 3D Printer Filaments, Proceedings of 4th International Interdisciplinary 3D Conference : Engineering Section, Pécs, Magyarország : Pécsi Tudományegyetem (2018) 115 p. pp. 33-43. , 11 p., Közlemény:31156952
12. Halápi Dávid; Kovács Sándor Endre; Palotás Árpád Bence; Varga László, 3D nyomtatott PLA rétegvastagság vizsgálata, XXI. Bányászati, Kohászati és Földtani Konferencia, Nagybánya, Románia : Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT) (2019) pp. 61-65. , 5 p.

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]. Pagac, Marek, et al. "A review of vat photopolymerization technology: materials, applications, challenges, and future trends of 3D printing." *Polymers* 13.4 (2021): 598.
- [5]. Gibson, Ian, et al. "Introduction and basic principles." *Additive manufacturing technologies* (2021): 1-21.
- [6]. Thakar, Chetan M., et al. "3d Printing: Basic principles and applications." *Materials Today: Proceedings* 51 (2022): 842-849.
- [7]. Oropallo, William, and Les A. Piegl. "Ten challenges in 3D printing." *Engineering with Computers* 32 (2016): 135-148.
- [8]. 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.
- [9]. 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.
- [10]. 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).
- [11]. 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.
- [12]. Hu, Jing. "Study on STL-based slicing process for 3D printing." (2017).
- [13]. 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.
- [14]. Gibson, Ian, et al. "Powder bed fusion." *Additive manufacturing technologies* (2021): 125-170.

- [15]. Gao, Bingwei, et al. "A review of research progress in selective laser melting (SLM)." *Micromachines* 14.1 (2022): 57.
- [16]. Yakout, Mostafa, et al. "Influence of thermal properties on residual stresses in SLM of aerospace alloys." *Rapid Prototyping Journal* 26.1 (2020): 213-222.
- [17]. 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.
- [18]. Duda, Thomas, and L. Venkat Raghavan. "3D metal printing technology." *IFAC-PapersOnLine* 49.29 (2016): 103-110.
- [19]. Molitch-Hou, Michael. "Overview of additive manufacturing process." *Additive manufacturing*. Butterworth-Heinemann, 2018. 1-38.
- [20]. Srinivasan, D., et al. "3D printing manufacturing techniques, materials, and applications: an overview." *Advances in Materials Science and Engineering* 2021.1 (2021): 5756563.
- [21]. 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>
- [22]. 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.
- [23]. Rejeski, David, Fu Zhao, and Yong Huang. "Research needs and recommendations on environmental implications of additive manufacturing." *Additive Manufacturing* 19 (2018): 21-28.
- [24]. 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.
- [25]. 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.
- [26]. 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.
- [27]. Wu, Junhui. "Study on optimization of 3D printing parameters." *IOP conference series: materials science and engineering*. Vol. 392. IOP Publishing, 2018.

- [28]. Gao, Wei, et al. "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering." *Computer-aided design* 69 (2015): 65-89.
- [29]. Duda, Thomas, and L. Venkat Raghavan. "3D metal printing technology." *IFAC-PapersOnLine* 49.29 (2016): 103-110.
- [30]. Das, Suman, David L. Bourell, and S. S. Babu. "Metallic materials for 3D printing." *Mrs Bulletin* 41.10 (2016): 729-741.
- [31]. 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.
- [32]. Protasov, C. E., et al. "Experimental study of residual stresses in metal parts obtained by selective laser melting." *Physics Procedia* 83 (2016): 825-832.
- [33]. Ye, Jiayu, et al. "A review of the parameter-signature-quality correlations through in situ sensing in laser metal additive manufacturing." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 124.5 (2023): 1401-1427.
- [34]. Gusarov, A. V., M. Pavlov, and I. Smurov. "Residual stresses at laser surface remelting and additive manufacturing." *Physics Procedia* 12 (2011): 248-254.
- [35]. 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.
- [36]. 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.
- [37]. Simchi, A. "Direct laser sintering of metal powders: Mechanism, kinetics and microstructural features." *Materials Science and Engineering: A* 428.1-2 (2006): 148-158.
- [38]. Kudryavtsev, Y. "Residual stress." *Springer handbook of experimental solid mechanics* (2008): 371-388.
- [39]. Withers, P. J. "Residual stress and its role in failure." *Reports on progress in physics* 70.12 (2007): 2211.
- [40]. 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.
- [41]. P. Bárczy és E. Fuchs, *Metallográfia I*, Budapest: Tankönyvkiadó, 1981.
- [42]. ASM International, *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, USA: ASM International, 2002.

- [43]. Protasov, C. E., et al. "Experimental study of residual stresses in metal parts obtained by selective laser melting." *Physics Procedia* 83 (2016): 825-832.
- [44]. 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.
- [45]. Li, Chao, et al. "Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting." *Additive Manufacturing* 17 (2017): 157-168.
- [46]. 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.
- [47]. 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.
- [48]. 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.
- [49]. 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.
- [50]. 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.
- [51]. 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.
- [52]. 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.
- [53]. 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.
- [54]. Pelin, Cristina-Elisabeta, et al. "Mechanical properties of 3D printed metals." *INCAS Bulletin* 13.1 (2021): 123-129.

- [55]. Huang, Liang, et al. "Effect of process parameters on density and mechanical behaviour of a selective laser melted 17-4PH stainless steel alloy." *Open Physics* 20.1 (2022): 66-77.
- [56]. Jones, Jaidyn, Ana Vafadar, and Reza Hashemi. "A Review of the Mechanical Properties of 17-4PH Stainless Steel Produced by Bound Powder Extrusion." *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7.5 (2023): 162.
- [57]. Gu, Hengfeng & Gong, Haijun & Pal, Deepankar & Rafi, H. & Starr, Thomas & Stucker, Brent. (2013). Influences of Energy Density on Porosity and Microstructure of Selective Laser Melted 17-4PH Stainless Steel. 24th International SFF Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2013.
- [58]. Emanuelli, Lorena, et al. "Study of microstructure and mechanical properties of 17-4 PH stainless steel produced via Binder Jetting." *Powder Metallurgy* 66.5 (2023): 377-386.
- [59]. 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.
- [60]. Anderoglu, Osman. Residual stress measurement using X-ray diffraction. Diss. Texas A&M University, 2005.
- [61]. Prevéy, Paul S. "X-ray diffraction residual stress techniques." (1986).
- [62]. Davis, Joseph R., ed. Tensile testing. ASM international, 2004.
- [63]. 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.
- [64]. 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.
- [65]. 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.
- [66]. 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.
- [67]. 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.

- [68]. 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.
- [69]. 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.
- [70]. German, Randall M. "Thermal processing optimization of injection molded stainless steel powders." *MATERIAL AND MANUFACTURING PROCESS* 12.4 (1997): 713-735.
- [71]. 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.
- [72]. Lashgari, H. R., et al. "Heat treatment response of additively manufactured 17-4PH stainless steel." *Materials Characterization* 197 (2023): 112661.
- [73]. Johnson, Luke, et al. "Assessing printability maps in additive manufacturing of metal alloys." *Acta Materialia* 176 (2019): 199-210.
- [74]. Scime, Luke, and Jack Beuth. "Using machine learning to identify in-situ melt pool signatures indicative of flaw formation in a laser powder bed fusion additive manufacturing process." *Additive Manufacturing* 25 (2019): 151-165.
- [75]. Scime, Luke, and Jack Beuth. "Melt pool geometry and morphology variability for the Inconel 718 alloy in a laser powder bed fusion additive manufacturing process." *Additive Manufacturing* 29 (2019): 100830.
- [76]. 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.
- [77]. 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.
- [78]. 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, Az AM folyamatok összefoglalása	4
5. ábra, 3D nyomtatás rétegtézési stratégiája.....	4
6. ábra, Felületmodell, különböző mennyiségű háromszög elemekből felépítve.....	6
7. ábra, Porágyas 3D nyomtatás sematikus ábrája.....	7
8. ábra, LPBF technológiával előállított test	7
9. ábra, 3D nyomtatás olvasztásának karakterisztikája	8
10. ábra, AM eljárások piaci részesedése 2020-ban	9
11. ábra, AM technológiák ipari megoszlása.....	9
12. ábra, Vastag és vékony rétegek közötti felbontásbeli különbség.....	11
13. ábra, Maradó feszültség okozta geometriai roncsolódás porágyas 3D nyomtatott eljárással készült M2-es gyorsacél próbatesten [33].....	12
14. ábra, Környező porszemcsék nem kívánt szinterelődése	13
15. ábra, A lézer energia hatására létrejövő nyomó és húzófeszültség az aktuális és a korábban lerakott rétegekben.....	15
16. ábra, Egy szakítópálca lehetséges nyomtatási orientációi [49]	16
17. ábra, Orlas Creator 3D fémnyomtató berendezés.....	18
18. ábra, 17-4PH acélpór SEM felvétele	19
19. ábra, Pásztázási szög változása lerakott rétegenként 45°-os rotációval	20
20. ábra, Nem megolvastott porszemcsék a 107W teljesítménnyel, 1200mm/s pásztázási sebességgel elkészített 17-4PH szakítópálca töretfelületén.	20
21. ábra, Fém ötvözetek porozitás képződési valószínűség, energiasűrűsége vonatkoztatva [73]	21
22. ábra, A H900-as hőkezelési ciklus sematikus bemutatása.....	24
23. ábra, A Maradó feszültség mérő próbatest fő méretei, [mm]-ben	24
24. ábra, Kinyomtatott maradó feszültség mérő próbatestek	25
25. ábra, Az AM gyártásnál alkalmazott maradó feszültség próbatest vágása, majd az emiatt létrejövő maradó alakváltozás	25
26. ábra, Maradó feszültség mérő próbatest tárgyasztaltól való vágása során kialakuló maradó alakváltozás	26

27. ábra, A röntgendiffrakció elvi ábrája	26
28. ábra, XRD maradó feszültség mérés a gyakorlatban.....	27
29. ábra, XRD vizsgálatokhoz, a próbatesteket felvett mérési vonalak	27
30. 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 és szórása.....	29
31. 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	29
32. ábra, Az „YX” orientációkban nyomtatott próbatestek felhajlás mérésének vázlatos ismertetése	30
33. ábra, Az „YX” orientációkban nyomtatott, 1 mm vastag (A, B – átlag), 2 mm vastag (C, D, E, F – átlag) és 3 mm vastag (G, H – átlag) próbatestek felhajlásának értékei	30
34. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott, 1 mm vastag (A,B - átlag), 2 mm vastag (C,D,E,F- átlag) és 3 mm vastag (G,H - átlag) próbatestek görbületének értékei.....	30
35. ábra, Módosított maradó feszültség mérő próbatestek, a 3D nyomtató tárgyasztalán, .	33
36. ábra, Módosított maradó feszültség mérő próbatestek főbb méretei, [mm]-ben.....	33
37. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának mértéke [mm], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint alapállapotban (I, J, K)	34
38. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának görbülete [1/m], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint alapállapotban (I, J, K)	34
39. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának mértéke [mm], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint 2X olvasztott állapotban (L, M, N)	35
40. ábra, 1, 2 és 3 mm vastag próbatestek felhajlásának görbülete [1/m], a módosított maradó feszültség mérő próbatestek szerint 2X olvasztott állapotban (L, M, N)	35
41. ábra, Előnyomtatással és kétszeres olvasztással nyomtatott darabok görbületeinek sorba állítása.....	36
42. ábra, Instron 5980-as szériájú szakítógépp.....	38
43. ábra, Orientációs különbségeket vizsgáló szakítópálcák méretei.....	39
44. ábra Az „YX” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatest eredményei	39
45. ábra, Az „YX” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló, a tárgyasztalra 45°-ban döntött próbatestek eredményei.....	40
46. ábra, Az „YZ” orientációjú, orientációs különbségeket vizsgáló próbatestek eredményei	40
47. ábra, A vizsgált szakítópálcák főbb méretei, ahol a „C” és „ δ ” értékek változók	41

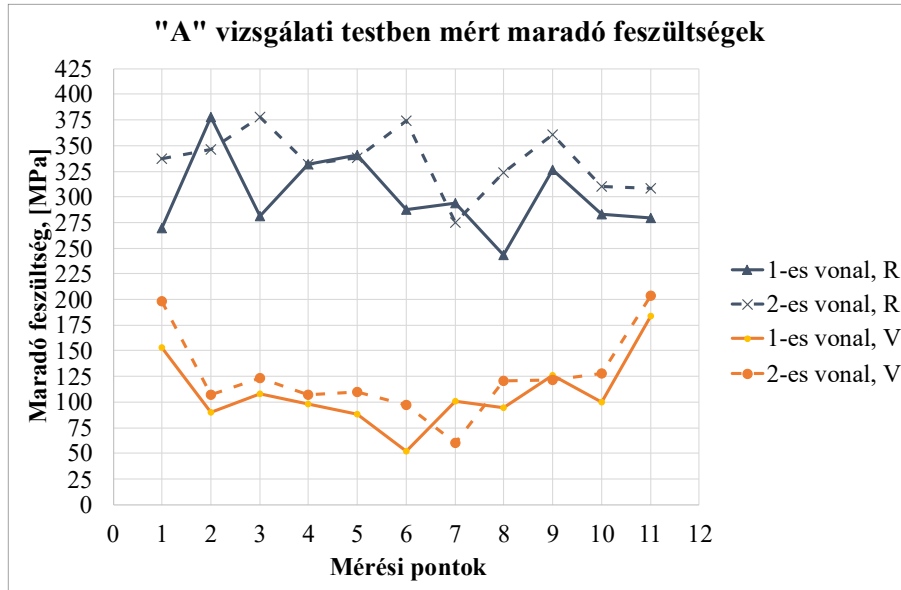
48. ábra, A vizsgált szakítópálcák felületei értékei: a) 8 mm befogási szélességű, 402,39 mm ² ; b) 12 mm befogási szélességű, 583,05 mm ² ; c) 16 mm befogási szélességű, 762,86 mm ²	41
49. ábra, Maradó feszültségek a különböző felületi kiterjedésű szakítópálcákban, illetve ezen értékek szórása.....	42
50. ábra, Az „YX” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei.....	42
51. ábra, Az „YX” orientációjú, 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási eredményei.....	43
52. 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	43
53. ábra, 12 mm befogási szélességű szakítópálcák méretei	44
54. ábra, Az „YZ” orientációban 3D nyomtatott 2 mm és 3 mm vastag szakítópálcák	45
55. ábra, Az „YZ” orientációjú, 2 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági eredményei.	45
56. ábra, Az „YZ” orientációjú, 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági eredményei.	46
57. ábra, Az „YZ” orientációjú, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsági és nyúlási értékei.....	46
58. ábra, Töretfelületek SEM felvételeinek különbségei az a) nyomtatott; b) lágyított; és c) öregített darabok között	47
59. ábra, Az „YZ” orientációs előnyomtatás és H900-as hőkezelésű 3D nyomtatás értékei összehasonlítva különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [63]-[72].....	48
60. ábra, 2 mm-es, kétszeres olvasztási cikluson készített szakítópálcák eredményei.....	49
61. ábra, Húzófeszültségi terhelés rétegekhez képesti iránya az a) „YX” és b) „ZX” orientációkban	50
62. ábra, Zeis EVO MA 10 típusú SEM berendezés	50
63. ábra, Bruker D8 Discovery XRD berendezés.....	51
64. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek szakítószilárdsága és nyúlása előnyomtatási állapotban	52
65. ábra, 2 mm vastag, előnyomtatással gyártott próbatest töretfelületi felvétele.....	53
66. ábra, 3 mm vastag előnyomtatással gyártott próbatest töretfelületi felvétele.....	53
67. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatest nyomtatási hibája a) 2 mm és b) 3 mm vizsgálati vastagság esetében, ahol a porszemcsék nem olvadtak meg	54
68. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatestről készült próbatest mikroszerkezetének SEM felvétele	54

69. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye	55
70. ábra, Előnyomtatással gyártott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye .	55
71. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek kétszer olvasztott állapotban	56
72. ábra, 2mm vastag, kétszeres olvasztású próbatest töretfelületi felvétele	57
73. ábra, 3 mm vastag kétszeres olvasztású próbatest töretfelületi felvétele	57
74. ábra, 2 és 3 mm vastag kétszeresen olvasztott próbatest szívós törése	58
75. ábra, Kétszer átolvasztva nyomtatott próbatestről készült próbatest mikroszerkezetének SEM felvétele	58
76. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye.....	59
77. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye.....	59
78. ábra, 2mm és 3mm vastag próbatestek H900 állapotban	60
79. ábra, 2 mm vastag, H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele	61
80. ábra, 3 mm vastag H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele	61
81. ábra, Az a) 2 mm és b) 3 mm vastag H900 hőkezelt próbatest megmaradó nyomtatási hibájának felvétele.....	62
82. ábra, Előnyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestről készült próbatest mikroszerkezetének SEM felvétele.....	62
83. ábra, Előnyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye	63
84. ábra, Előnyomtatással gyártott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye	63
85. ábra, 2 mm és 3 mm vastag próbatestek egyszerre kétszer olvasztott és H900 állapotban	64
86. ábra, 2 mm vastag egyszerre kétszeresen olvasztott és H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele.....	66
87. ábra, 3 mm vastag egyszerre kétszeresen olvasztott és H900-as hőkezelésű próbatest töretfelületi felvétele.....	66
88. ábra, Az a) 2mm és b) 3 mm vastag egyszerre kétszeresen átolvasztott és H900 hőkezelt próbatest szívós és rideg törési felülete	67
89. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatestről készült próbatest mikroszerkezetének SEM felvétele	67

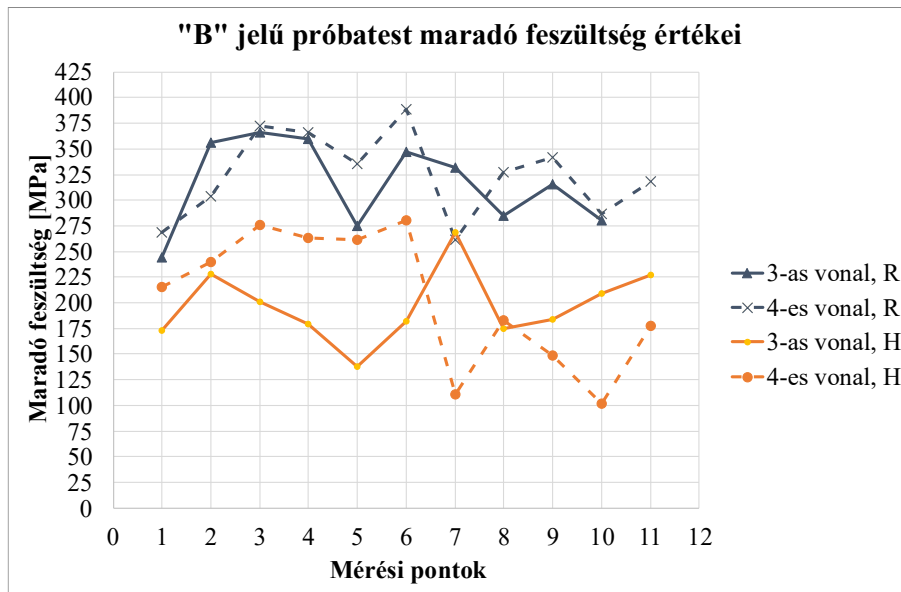
90. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest kontúr rétegének XRD fázisanalízis eredménye	68
91. ábra, Kétszeres átolvasztással nyomtatott, majd H900-as hőkezeléssel kezelt próbatest térfogatának XRD fázisanalízis eredménye	68
92. ábra, A „ZX” orientációban nyomtatott darabok szakítószilárdsága a különböző vizsgálati állapotokban	69
93. ábra, A „ZX” orientációban nyomtatott darabok nyúlása a különböző vizsgálati állapotokban	70
94. ábra, Módosított 76. ábra, a „ZX” orientációs darabok összehasonlítva különböző szakirodalomban megjelent értékekkel [63]-[72].....	71
95. ábra, „A” jelű, 1 mm vastag próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után	96
96. ábra B jelű, 1 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve	96
97. ábra C jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után.....	97
98. ábra, D jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után	97
99. ábra, E jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve	98
100. ábra, F jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve	98
101. ábra, G jelű, 3 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után	99
102. ábra, H jelű, 3 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve	99

Függelék

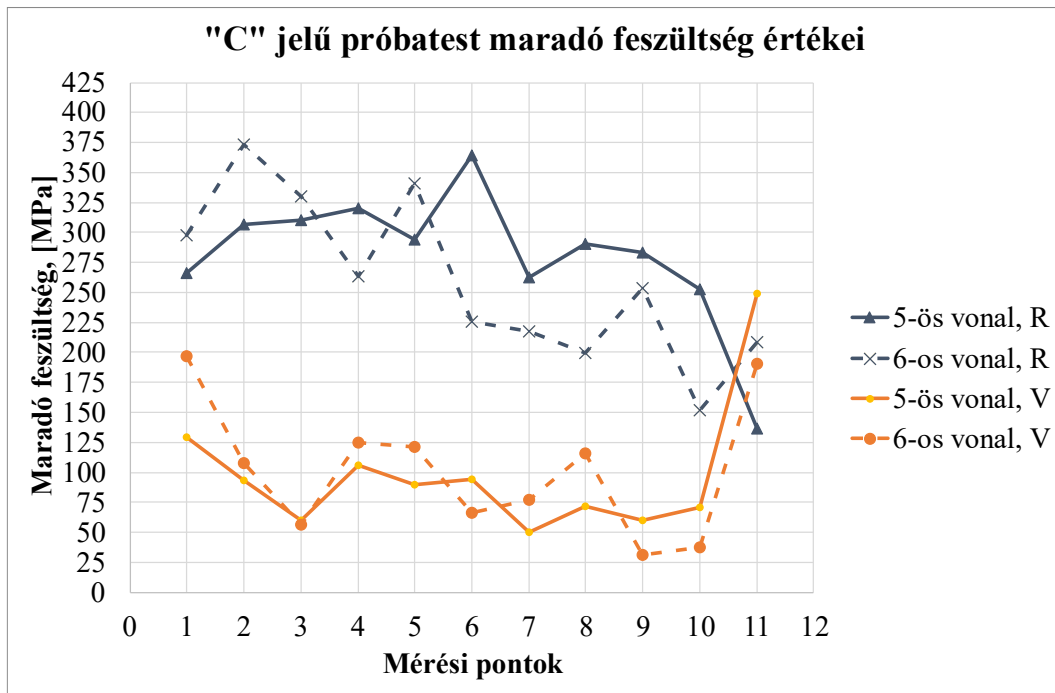
1. Melléklet



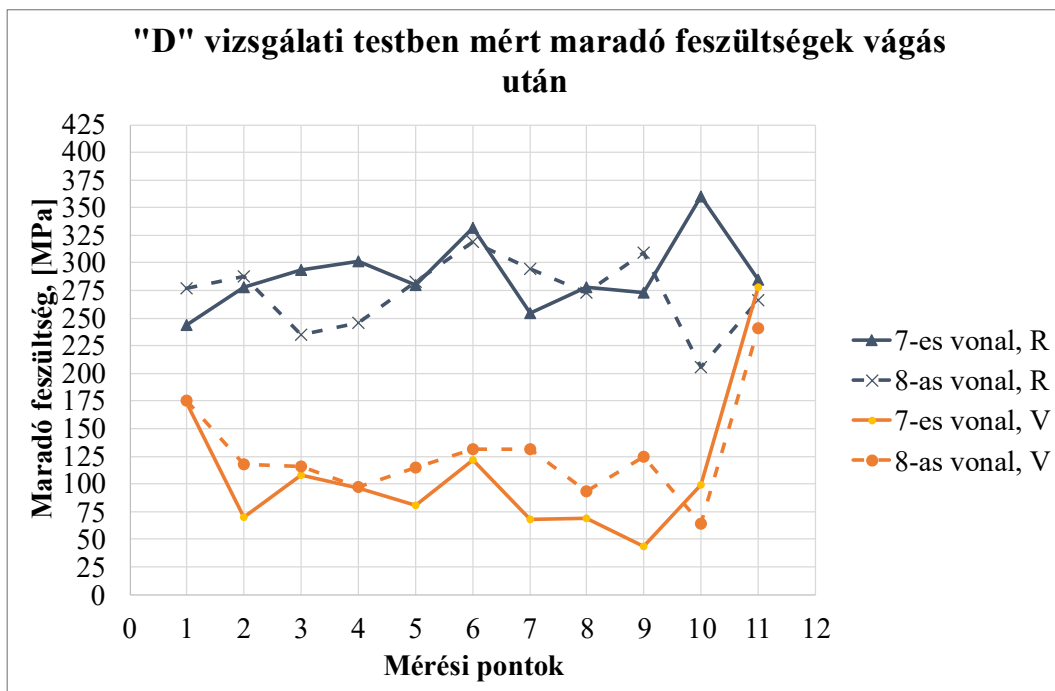
95. ábra „A” jelű, 1 mm vastag próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



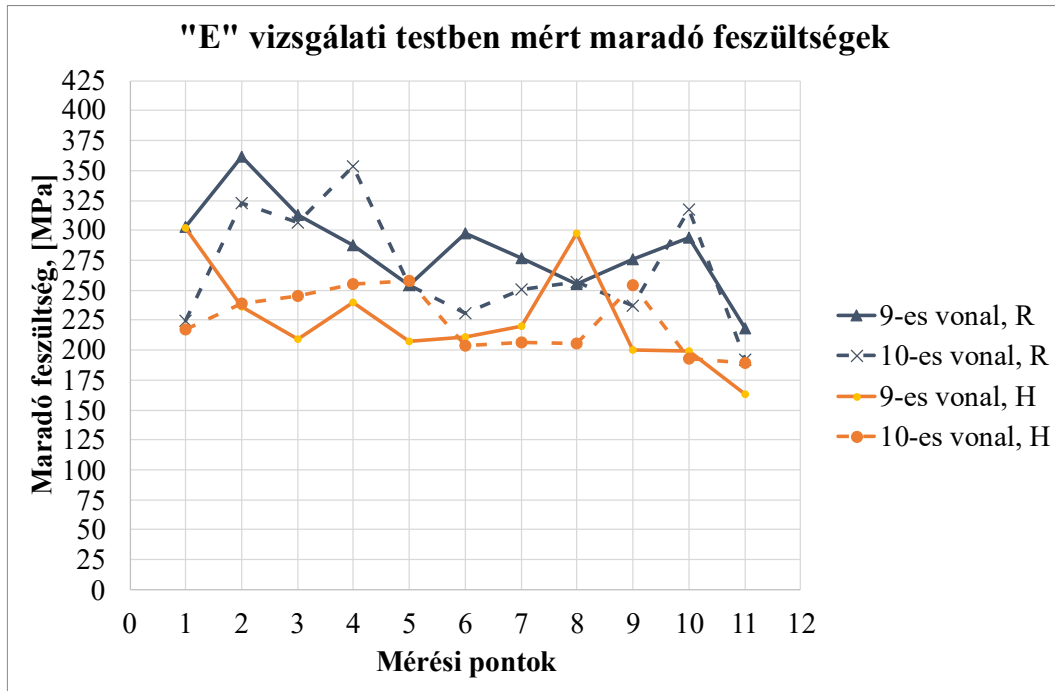
96. ábra B jelű, 1 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve



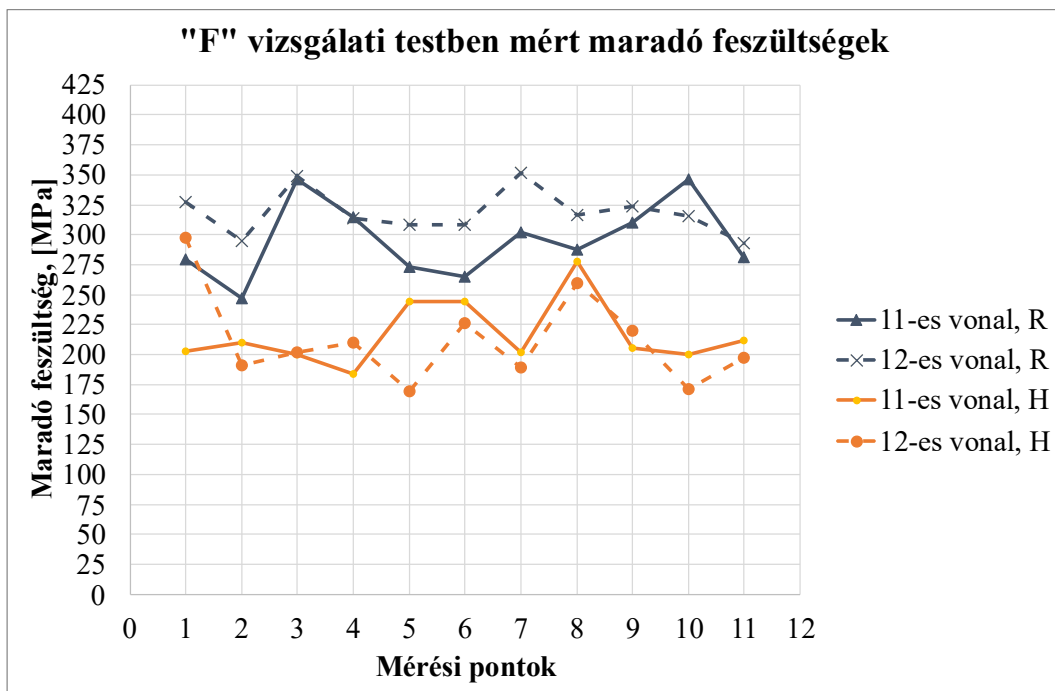
97. ábra C jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú próbatest maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



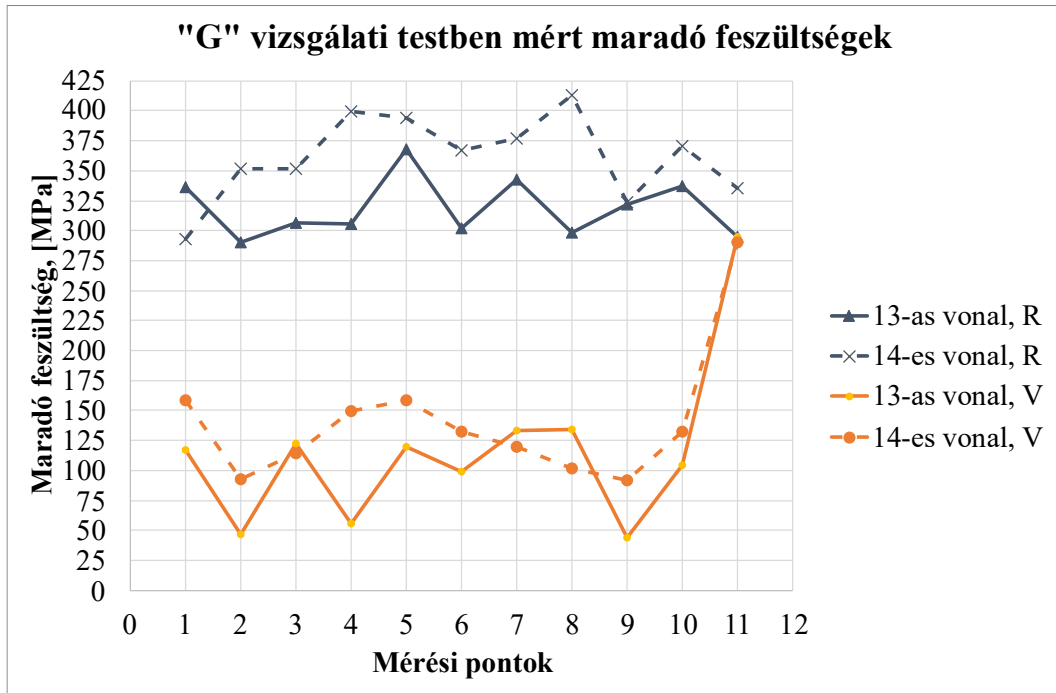
98. ábra, D jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint a támaszok oldása után



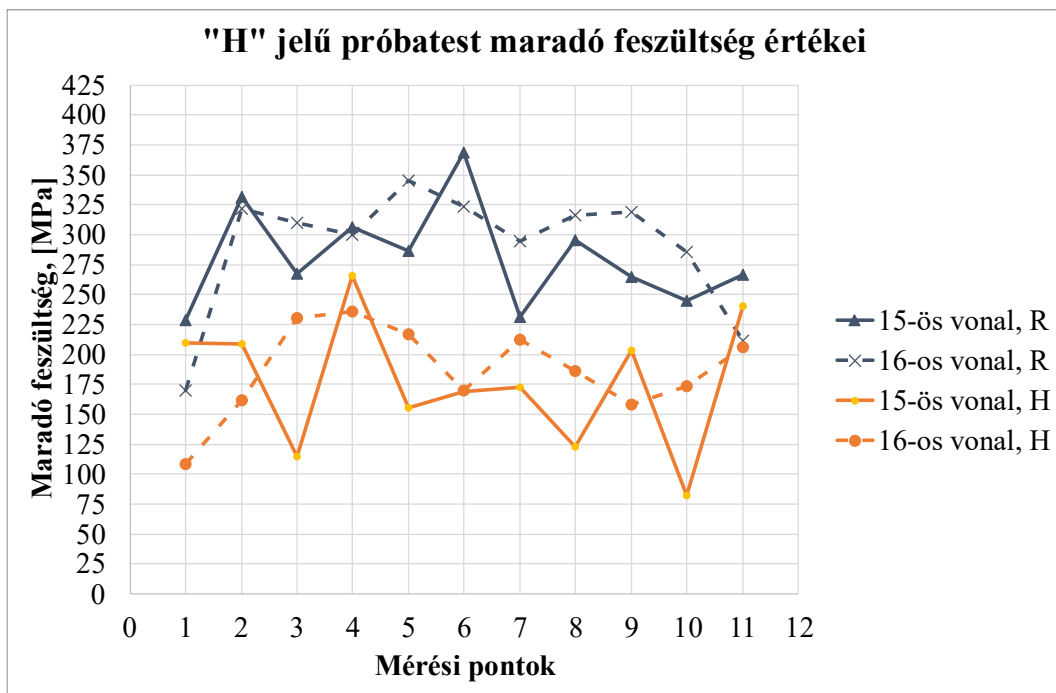
99. ábra, E jelű, 2 mm vizsgálati vastagságú test maradó feszültség értékei, a tárgyasztalra rögzítve, valamint hőkezelve



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



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



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