

Miskolci Egyetem

Kerpely Antal Anyagtudományok és

Technológiák Doktori Iskola

Anyag- és Vegyészmérnöki Kar



3D fémnyomtatással előállított próbatestek tulajdonságainak vizsgálata

PhD értekezés tézisei

KOVÁCS SÁNDOR ENDRE

okl. kohómérnök

Tudományos témavezető:

Dr. Varga László, PhD

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

Miskolc

2025

1. Bevezetés

Az additív gyártástechnológia az elmúlt harminc év egyik leggyorsabban fejlődő iparága, mely összefoglalja a gyors prototípusgyártást 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. A hagyományos 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 gyártott testek végső formáját, rétegről rétegre való építési stratégiát alkalmazva [2][3]. Ennek az építési stratégiának köszönhetően lehetőség nyílik topológiailag optimalizált, kikönnyített szerkezeti alkatrészek elkészítésére, melyek geometriai módosítása nem von maga után plusz költségeket, mivel nincs szerszám, amit módosítani kell minden egyes változtatást követően. A rugalmas karakterisztikája miatt lett egyre keresettebb és így vált napjaink egyik csúcstechnológiájává. 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 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. Ez az újfajta kialakítás vékony szegmensekből áll össze, amelyek 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.

2. A kitűzött kutatási feladat, nyitott kérdések

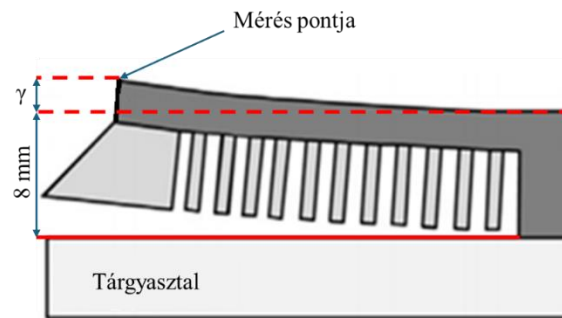
A feldolgozott szakirodalom összefoglalása alapján arra a megállapításra jutottam, hogy valóban létezik a szakirodalomban is tárgyalt optimális nyomtatási orientáció. A szakirodalom továbbá kimondja, hogy egytengelyű húzófeszültség esetében, kedvezőbb szakítószilárdsági eredményeket fog mutatni a próbatest, ha a lerakott rétegekre párhuzamosan történik a húzóerő bevitele, mint ha ezekre a rétegekre merőlegesen [4][5]. 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 folyamatból 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.

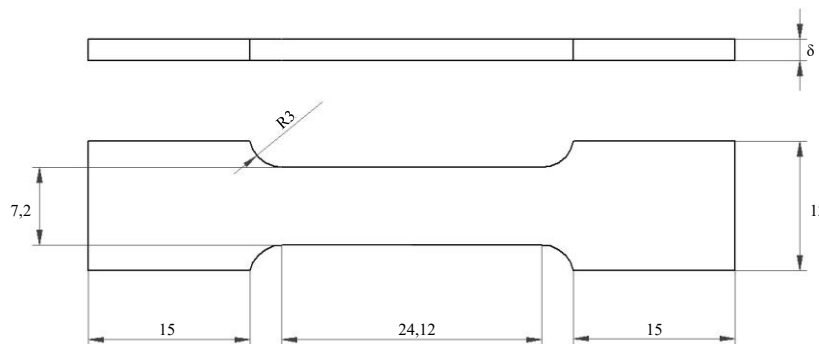
3. Vizsgálati módszerek

Vizsgálataim két fő csoportba sorolhatók. Első sorban vizsgáltam az „YX” nyomtatási orientáción elkészített próbatestek tárgyasztaltól való eltávolítást követő maradó alakváltozását. A próbatestek alakváltozásának „Z” irányú mérését az 1. ábra alapján végeztem el. A méréseket elvégeztem előnyomtatási és kétszeres átolvasztási beállítással.



1. ábra, Az „YX” orientációban nyomtatott próbatestek felhajlás mérésének vázlata

Másik fő vizsgálati csoport a 2. ábrán bemutatott darabok szakítószilárdsági vizsgálata volt.



2. ábra, A szakítószilárdsági vizsgálatok során alkalmazott próbatest méretei

Az elkészített próbatestek vastagságai $\delta = 2$ mm és 3 mm voltak. 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 [6]. A vizsgálati állapotok a következők voltak:

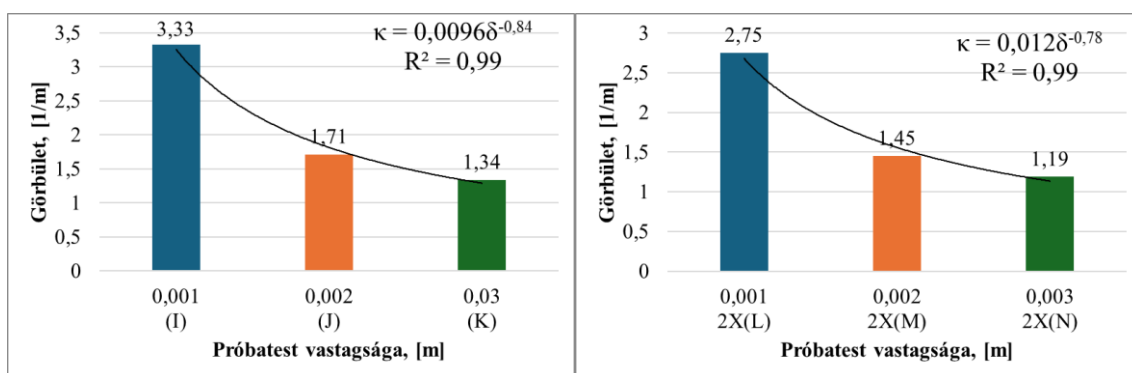
- előnyomtatás
- kétszeres átolvasztási ciklus
- előnyomtatás, majd H900-as hőkezelés
- kétszeres átolvasztási ciklus, majd H900-as hőkezelés.

4. Új tudományos eredmények – 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 energia 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 logaritmikus 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.

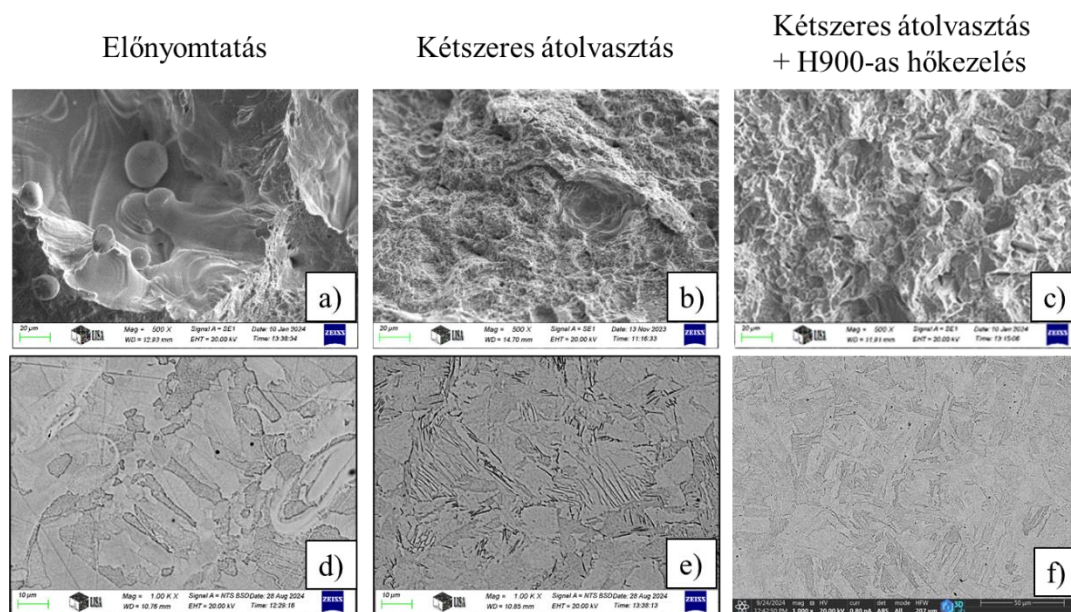
Ezen eredmények alapján az alábbi tézisek fogalmazhatók meg:

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 találhatók 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 porszemcséket 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 réteggépzésre 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.

5. Összefoglalás

A 3D nyomtatás egy olyan gyártástechnológiai irányzat, mely sok esetben az ipari szereplők számára ismeretlen eljárás, 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. Ezen folyamatok ipari mértékű megvalósításával már számos cég foglalkozik, valamilyen szálerősített, nagy teherbírású kompozit alapanyagokkal, vagy bonyolult, egyedi szériatermékekkel. Munkámmal elsősorban az alkatrészek legyárthatóságának kívántam új metódusokat feltárni, főképp az orientációs különbségekre koncentrálva.

Kutatómunkám egyik főbb eredménye, hogy a maradó feszültség mérő próbatestek felhajlását 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.

Summary

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 are being ejected to the atmosphere of the printing volume, thus not defocusing the laser, allowing the energy introduced to the system to be used more efficiently. The biggest result of my “ZX” orientation tests is that the tensile strength and elongation results for parts printed in this orientation are similar to those for parts printed using the conventional processes and the preferred “YZ” orientation. Of this phenomenon, I found that the combination of double remelting and H900 heat treatment makes the printing orientation negligible, eliminating one of the most significant 3D printing design factors.

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

6. Egyéb, a témában megjelent tudományos közlemények

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; Gácsi 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.

8. Felhasznált irodalom

- [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]. 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.
- [5]. Pelin, Cristina-Elisabeta, et al. "Mechanical properties of 3D printed metals." INCAS Bulletin 13.1 (2021): 123-129.
- [6]. 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.

9. 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.