

3D FÉMNYOMTATÁSSAL GYÁRTOTT ALKATRÉSZEK VIZSGÁLATA OPTIKAI SZKENNER SEGÍTSÉGÉVEL

TESTING OF 3D METAL PRINTED PARTS USING AN OPTICAL SCANNER

Szigeti Botond⁰⁰⁰⁹⁻⁰⁰⁰⁵⁻³⁶⁰⁵⁻⁸⁵⁴⁰¹, Szabó Valentin Endre⁰⁰⁰⁹⁻⁰⁰⁰⁶⁻²⁹⁷⁰⁻⁹⁹⁰⁴^{1*},

¹ Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,
<https://doi.org/10.47833/2025.1.ENG.007>

Kulcsszavak:

DMLS
3D fémnyomtatás
belső feszültség
deformáció
optikai szkennel

Keywords:

DMLS
3D metal printing
residual stress
deformation
optical scanner

Cikk történet:

Beérkezett 2024. december 13.
Átdolgozva 2025. február 24.
Elfogadva 2025. március 20.

Összefoglalás

A DMLS technológia jelentős kihívása a gyártási folyamat során keletkező belső feszültségek kezelése, amelyek deformációkat és geometriai hibákat idézhetnek elő, rontva a végtermék mechanikai tulajdonságait és megbízhatóságát. A tanulmány célja a belső feszültségek keletkezésének és csökkentésének vizsgálata, a gyártási folyamat után. A deformációk detektálását nagy pontosságú optikai szkennel végeztük, így képesek voltunk a belső feszültségek elemzésére, külső állapotjellemzők vizsgálatával. A kísérleti eredmények igazolják, hogy az általunk használt technológia alkalmas a belső feszültségek feltérképezésére a deformációk megfigyelése által a munkadarab teljes területén.

Abstract

A major challenge for DMLS technology is the management of internal stresses during the manufacturing process, which can cause deformations and geometric defects, degrading the mechanical properties and reliability of the final product. The aim of this study is to investigate the generation and reduction of internal stress after the manufacturing process. The detection of deformations was carried out using a high precision optical scanner, so that we were able to analyse internal stresses by examining external sub-strate properties. The experimental results demonstrate that the technology we use is suitable for mapping internal stresses by observing deformations over the entire area of the workpiece.

1. Bevezetés

Az ipari termelés területén a 3D fémnyomtatás az additív gyártástechnológiák egyik legdinamikusabban fejlődő ágazata, amely jelentősen eltér a hagyományos anyageltávolításon alapuló eljárásoktól. A technológia előnyei között szerepel a bonyolult geometriájú, egyedi alkatrészek gyors és költséghatékony előállításának, miközben minimalizálható az anyagvesztés. Azonban a fémnyomtatási eljárások során gyakran jelentős belső feszültségek keletkeznek, amelyek kedvezőtlenül hatnak az alkatrészek mechanikai tulajdonságaira, tartósságára és méretpontosságára.

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: szabo.valentin@nje.hu

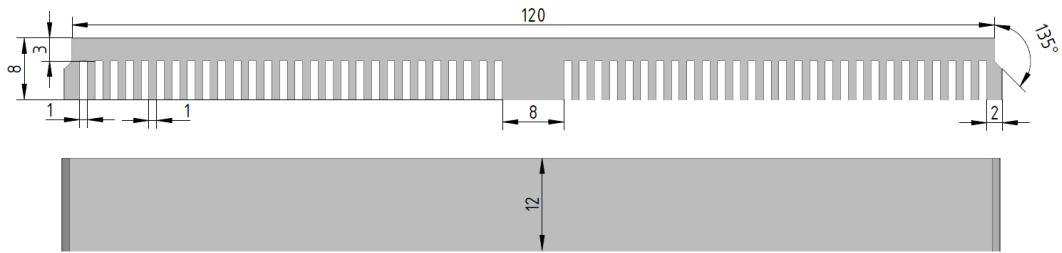
A kutatás célja a 3D fémnyomtatott alkatrészek belső feszültségeinek külső állapotjellemzők alapján történő vizsgálata és a hőkezelés hatékonyságának értékelése. Jelen cikk célja továbbá a 3D fémnyomtatás technológiai alapjainak bemutatása, a belső feszültségek keletkezésének és kezelésének vizsgálata. A vizsgálatok középpontjában a Direct Metal Laser Sintering (DMLS) áll, amely az egyik legelterjedtebb technológia az ipari gyártásban. [1] [2] [3].

A 3D fémnyomtatás története az 1990-es években kezdődött, amikor megjelentek az első, fém alapú gyors prototípus-gyártási technológiák, például a szelektív lézeres szinterezés (SLS) és a direkt fém lézeres szinterezés (DMLS). Ezek az eljárások a porágy-fúzió elvén működnek: finomszemcsés fémport szelektíven olvasztanak meg nagy energiájú lézersugarakkal, rétegről rétegre építve fel az alkatrészeket. A DMLS technológia egyik legfontosabb előnye az anyagtakarékosság, mivel az eljárás minimális hulladékképződéssel jár, jelentősen csökkentve az anyagvesztést a kis szériás és egyedi alkatrészek gyors és hatékony gyártása során. Emellett lehetővé teszi összetett geometriák előállítását, amelyeket hagyományos technológiákkal nehezen vagy egyáltalán nem lehetne megvalósítani. A technológia alkalmazása azonban kihívásokkal is jár, mint például a belső feszültségek és geometriai hibák, amelyek jelentősen befolyásolják a végtermék minőségét. [3] [4]

A DMLS folyamat során a lézer energiája lokálisan megolvasztja a fémport egy-egy rétegét. Az olvasztás után a fém gyorsan lehűl és megszilárdul, miközben az alsó rétegek már szilárd állapotban vannak. Ez a gyors hűlés és a hőmérséklet gradiensek belső feszültségeket generálnak az alkatrészben. Ezek a feszültségek gyakran repedésekhez, deformációkhoz és rétegleválásokhoz vezetnek, különösen az összetett geometriák esetén [5] [7]. A maradó feszültségek két fő kategóriába sorolhatók, amelyek eltérő hatással vannak az alkatrészek mechanikai tulajdonságaira és tartósságára. A húzófeszültségek a repedések kialakulását és terjedését segíthetik elő, míg a nyomófeszültségek bizonyos esetekben növelhetik az alkatrészek szívósságát, de túlzott mértékben deformációt is eredményezhetnek. Ezek a feszültségek különösen kritikusak az olyan iparágakban, mint a repülőgépipar és az autóipar, ahol a szerkezeti elemek hosszú távú megbízhatósága és mechanikai stabilitása alapvető követelmény [6] [1]. A belső feszültségek csökkentése érdekében számos módszer áll rendelkezésre, amelyek közül kiemelkedő szerepet kap a hőkezelés. A termikus stresszmentesítés (TSR-Thermal Stress Relief) az egyik legelterjedtebb eljárás, amely során magas hőmérsékleten végzett lágyítással homogenizálják az anyagszerkezetet. Ezáltal csökkennek a maradó feszültségek, miközben az alkatrészek mechanikai tulajdonságai jelentősen javulnak. Ennek ellenére a hőkezelés energia- és időigényes folyamat, ami korlátozhatja széles körű alkalmazását. A nyomtatási folyamat során alkalmazott előmelegítés szintén hatékony módszer a belső feszültségek mérséklésére. Az előmelegítés csökkenti a hőmérséklet-gradienst, ami különösen nagyobb méretű alkatrészek esetén fontos, ahol a termikus különbségek jelentős szerepet játszanak a feszültségek kialakulásában. Az optimalizált nyomtatási stratégia további lehetőséget nyújt a feszültségek kontrollálására. A nyomtatási elrendezés és a pásztázási mintázat módosítása, mint például a "sakktabla", módszer egyenletesebb hőeloszlást biztosít, amely hozzájárul a deformációk mérsékléséhez. Végül az utófeldolgozási eljárások, mint a szemcseszórás és a vibrációs stresszmentesítés, hatékonyan csökkentik a feszültségeket, miközben növelik az alkatrészek élettartamát. [6] [7] [8] [10]

2. Kísérlet leírása

A kísérlet során twin cantilever munkadarabokat alkalmaztunk, amely alkalmas több eljárás eredményeinek demonstrálására egy próbatesten belül, ezt az 1-es ábra mutatja. Az alkatrészeket EOSINT M270 típusú 3D fémnyomtatón gyártották, Fe-4542 korrózióálló acél felhasználásával. A munkadarabok egyik oldalát eltávolítottuk az alaplapról huzalszakra forgácsolással, amely megfelelő vágási pontosságot eredményezett, miközben hatékonyan minimalizálta a hőhatás által indukált további belső feszültségek kialakulásának lehetőségét. Ezt követően a munkadarabokat 600°C hőmérsékleten, 24 órán át tartó feszültségcsökkentő hőkezelésnek vetettük alá, majd az iktartó másik felét is felvagtuk. A folyamatok közötti geometriai változásokat nagy pontosságú GOM ATOS Q típusú optikai szkennelével vizsgáltuk. Az így nyert adatokat a GOM Inspect szoftver segítségével elemeztük és dokumentáltuk, biztosítva a mérések precíz kiértékelését.



1. ábra: Twin cantilever próbatest

A GOM Atos Q 12 M dolgoztunk, amely kiemelkedő pontossága az ISO 10360 és a VDI/VDE 2634 szabványok szigorú követelményein és a kalibrációs eljárásokon alapul. Az ISO 10360 szabvány előírja a mérőberendezések teljesítményének ellenőrzéséhez szükséges tesztelési módszereket, ideértve a lineáris hibát, a tapogatási hibát és a térfogati hibát (Volumetric Error), míg a VDI/VDE 2634 irányelv részletes értékelést biztosít az optikai rendszerek, különösen a 3D szkennerek teljesítményéről. A kalibráció első lépése egy ismert hőtágulási együtthatóval és hibával rendelkező kerámia etalonlap alkalmazása, amely segítségével a rendszer beállítja paramétereit, és ellenőrzi a digitalizált felület eltérését a referenciaértékektől. A kalibráció során a kamera paramétereit finomhangolják, biztosítva a projektor fénycsíkainak élességét és a lencsék pontos beállítását. A folyamat végén a rendszer pixelalapú eltéréseket dokumentál, amely alapján meghatározzák az MPEE-t (Maximum Permissible Error of the Equipment), a rendszer precizitásának kulcsfontosságú mérőszámát.

A kalibráció érvényességének ellenőrzésére gömbteszteket végeznek, amelyek során különböző formákban, szögekben és magasságokban elhelyezett fényes felületű gömböket használnak. A teszt során a rendszer többszöri méréssel elemzi a gömbök közötti távolságokat, amelyeket szoftveres script segítségével értékel ki, garantálva a szisztematikus hibák minimalizálását és a térbeli pontosság érvényesítését. Az SPH (Sphere Spacing Error) és az MPESPH (Maximum Permissible Error for Sphere Spacing) mérések igazolják, hogy a maximális eltérés nem haladja meg a 0,002 mm-t. Az eredmények egy VDI/VDE riportban kerülnek rögzítésre, amely tartalmazza a minimális és maximális alakhibákat, a szórásértékeket és az átmérők ezred milliméteres pontosságát. Az optikai szkennerek így nemcsak pontokat, hanem teljes felületeket vizsgálnak statisztikai módszerekkel, a legszigorúbb szabványoknak megfelelően, biztosítva a mérési eredmények precizitását. A gyakorlati tapasztalatok azt mutatják, hogy a Az alkatrészek digitalizálását mutatja be a 2. ábra.



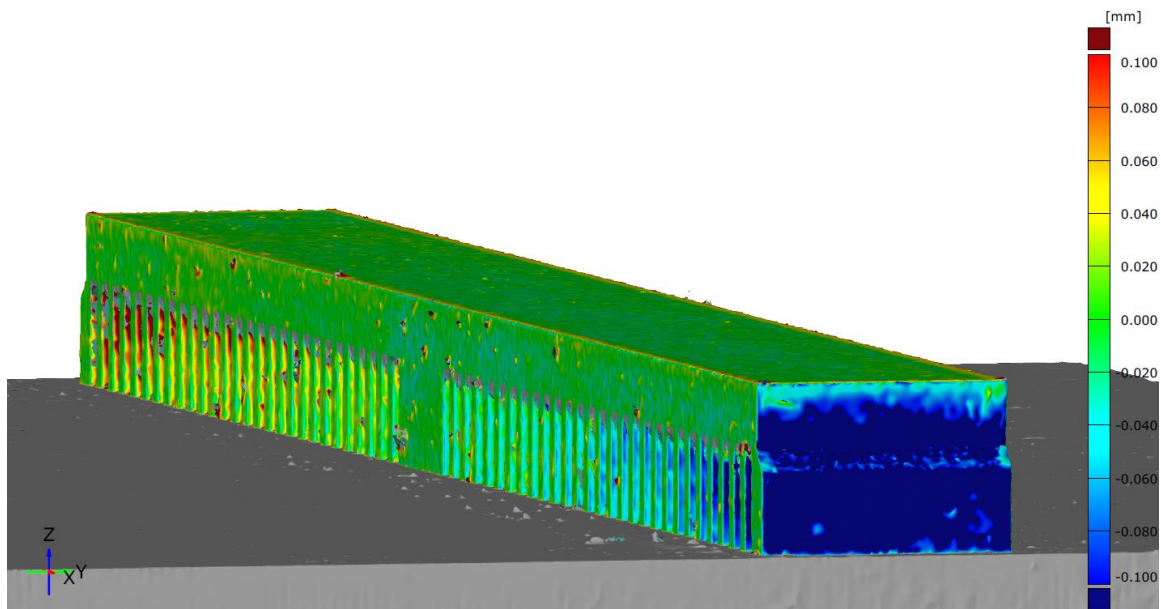
2. ábra: Az alkatrész szkennelése

3. Kísérleti eredmények

A kísérlet eredményei alapján következtetni tudunk a nyomtatási technológiából adódó jellegzetes hibákra, geometriai deformációkra és torzulásokra.

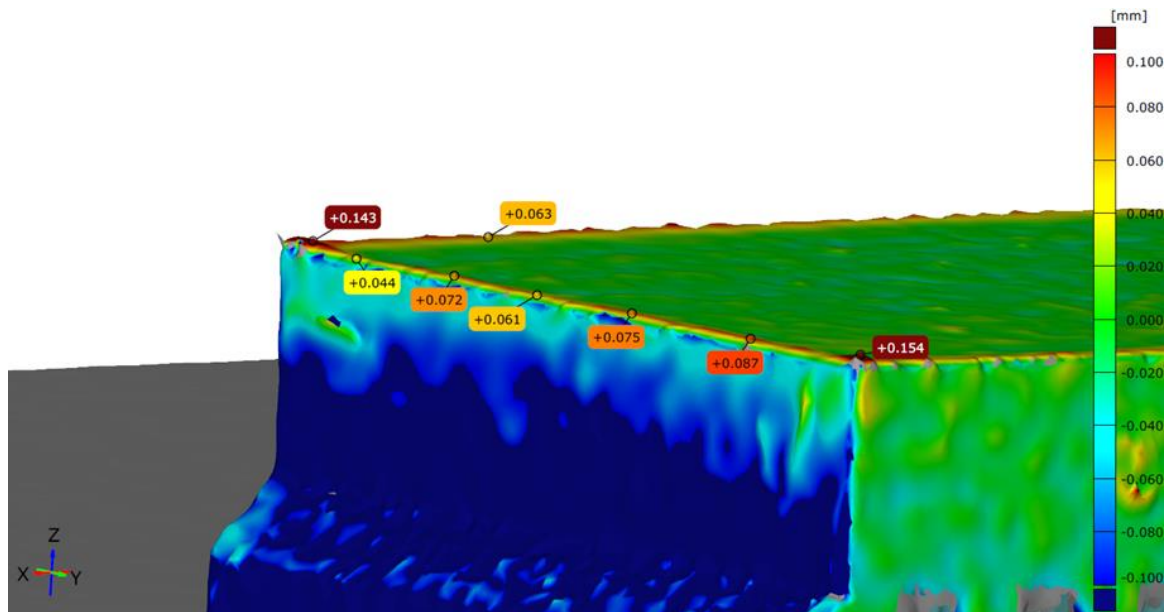
A CAD-moddal végzett összehasonlítás eredményei alapján szisztematikus támaszhibát azonosítottunk a munkadarabok hossz tengelye mentén, amely egy egységes hosszirányú rövidülés megjelenéséhez vezetett. Ez a jelenség az első rétegek nyomtatása során bekövetkező zsugorodásnak tulajdonítható, amely a támaszokat a munkadarab közepe felé húzta. Ezt a jelenséget korábbi szakirodalmi eredmények is alátámasztják, például Buchbinder és munkatársainak kutatásai is hasonló következtetésekre jutottak [9]. A 3. ábra színtérképe alapján kirajzolódik az egységes és szimmetrikus rövidülés a munkadarab középpontja felé, ami az ábra alapján a maximális értéke a homlokfelületen nagyságrendileg 0,1 mm, ami mindkét homlokfelületen azonos nagyságrendű.

Az alkalmazott illesztési módszer biztosítja az eltérések pontos meghatározását és minimalizálja a fűzési hibákat. A szoftver a Best-Fit Alignment elv alapján működik, algoritmusokkal optimalizálva az illesztést. A Global Best-Fit a teljes szkennelt adathalmazt igazítja a CAD modellhez, míg a Local Best-Fit egy adott területre fókuszál. Referencia sikként többek között a munkadarab középső, deformációmentes része és az Y-sík menti oldalak szolgálták. A szoftver a CAD modell alapján azonosítja és referencia-pontként kezeli a megfelelő pozícióban lévő pontokat, így biztosítva az illesztés pontosságát.



3.ábra: Támaszeltolódás hiba

A munkadarab felső felületén, a kontúr mentén Z irányú anyag többlet figyelhető meg, amely az utolsó réteg nyomtatási folyamatának a következménye lehet. Ez a jelenség a berendezés pásztázási stratégiájára vezethető vissza, amely során a kontúrokat előnyben részesítve, általában magasabb lézerteljesítménnyel halad végig. Ennek eredményeként a pásztázási útvonal mentén a por részben a belső felületekre szánt anyagból is megolvad, ami homogén anyag többletet eredményez a kontúrvonal mentén.



4. ábra: Anyagtöbblet a kontúr mentén

4. Összegzés

A kutatás a 3D nyomtatás alapvető problémáira fókuszált, különös tekintettel a DMLS technológiával gyártott alkatrészek hőterheléséből fakadó belső feszültségekre, amelyek deformációt okoznak az alapról történő levágás után. A szakirodalmi vizsgálatok is alátámasztják a belső feszültségek és a deformáció közötti kapcsolatot. A kutatás célja a DMLS alkatrészek belső feszültségeinek vizsgálata volt deformációmérések alkalmazásával. A költséges gyártási folyamat miatt korlátozott számú, de jó geometriájú próbatest állt rendelkezésre, amelyek segítségével a hőkezelés és a belső feszültségek hatását ugyanazon munkadarabon tudtuk vizsgálni. A mérési módszer alapja a GOM optikai szkennelő volt, amely lehetővé tette a geometriai eltérések vizsgálatát és a CAD modellel való összehasonlítást. A gyártási pontosság eltérései minimálisak voltak, és illeszkedtek a szakirodalmi eredményekhez.

- A leggyártott alkatrészek geometriai pontosságát a CAD modellel összehasonlítva vizsgáltuk optikai szkennelési eljárással. Az elemzés során két fő eltérést azonosítottunk: az X-tengely menti rövidülési hibákat és a kontúrt érintő anyagtöbbletet.
- Az X irányú homloklapok rövidülése (nagyágrendűleg 0,1 mm oldalanként) a gyártási folyamat közben kialakuló belső feszültségek zsugorító hatásának tulajdonítható. Ez a jelenség támaszeltolódást is okozott.
- A kontúron megfigyelt anyagtöbblet a lézeres pártázási technológiából ered, amely a munkadarab szélén rádiuszos geometriát és kissé beljebb anyagtöbbletet hoz létre. A pontos tudományos ok nem ismert, további kutatást igényel.
- A mérések során az eltérések számszerűsítésével értékeltük a rövidülési hibákat és a kontúr deformációkat, amelyek további kutatást igényelnek
- A Z irányú kontúr leolvadás és lerakódás vizsgálatát fizikai tapintó elvű mérésekkel is szükséges lehet alátámasztani, de a szkennelési fájlban semmi nem utal hibára.

A kutatás eredményei referenciaként szolgálhatnak a jövőbeli vizsgálatokhoz, különösen a belső feszültségek és deformációk összefüggéseinek további feltárásához.

Köszönetnyilvánítás

Jelen publikáció a 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 projekt keretében jött létre.

A 2024-2.1.1-EKÖP-2024-00008 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a 2024-2.1.1-EKÖP pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Továbbá külön köszönjük a mérések elvégzésének támogatását a 3D Technology Kft.-nek és Szelezkei Csabának.

Irodalomjegyzék

- [1] V. E. Szabó és K. Kun, „Laser sintering of metal powders: identification of defects and solution strategies,” *Materials*, 2024.
DOI: 10.1088/2053-1591/ad9240
- [2] E. P. Albert, L. M. Sherri és A. F. Philip, „Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need,” *Technologies*, 2017.
DOI: 10.3390/technologies5020015
- [3] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, P. E. Ambrosio és E. Atzeni, „From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering,” *Materials*, 2013.
DOI: 10.3390/ma6030856
- [4] T. Duda és V. L. Rhagavan, „3D Metal Printing Technology”.
DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.11.111
- [5] M. Shellabear és O. Nyrrhilä, „DMLS-Development history and state of the art,” 2024.
- [6] I. Hatos, „Additív szerszámgyártás technológiájának fejlesztése járműipari alkatrészek gyártásához,” Széchenyi István Egyetem, 2020.
- [7] S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, T. Niendorf, T. Tröster, A. H. Richard és J. H. Maier, „On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl16V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance,” *International Journal of Fatigue*, 2012.
DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
- [8] V. Contaldi, F. Del Re, B. Palumbo, A. Squillace, P. Corrado és P. Di Petta, „Mechanical characterisation of stainless steel parts produced by direct metal laser sintering with virgin and reused powder,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019. DOI: 10.1007/s00170-019-04416-4
- [9] H. Gao, S. Wu, Q. Wu, B. Li, Z. Gao, Y. Zhang és S. Mo, „Experimental and simulation investigation on thermal-vibratory stress relief process for 7075 aluminium alloy,” *Materials nad Desing*, 2020.
DOI: 10.1016/j.matdes.2020.108954
- [10] J. Aschenbrenner, Fémötvözetek tulajdonságainak megváltoztatása hőkezeléssel, Budapest: Nemzeti Szakkpzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.
- [11] H. Song, Z. Gao, X. Zhou, Q. Zhang és B. Zhang, „Research on the evolution law and control mechanism of residual stress under vibration stress relief,” *Materials Today Communications*, 2024. DOI: 10.1016/j.mtcomm.2024.110072
- [12] D. Buchbinder, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach és J. Schrage, „Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting,” *Journal of Laser Applications*, 2014.
DOI: 10.2351/1.4828755