

# SZELEKTÍV LÉZERSZINTEREZÉSSEL GYÁRTOTT KORRÓZIÓÁLLÓ ACÉL ALKATRÉSZEK GEOMETRIAI PONTOSSÁGÁNAK VIZSGÁLATA

## EVALUATION OF THE GEOMETRIC ACCURACY OF CORROSION RESISTANT STEEL PARTS MANUFACTURED WITH SELECTIVE LASER SINTERING

Mihályi Gergő<sup>0009-0000-1908-2948</sup><sup>1</sup>, Szabó Valentin Endre<sup>0009-0006-2970-9904</sup><sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Innovatív Járművek és Anyagok Tanszék, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Neumann János Egyetem,  
Magyarország

<https://doi.org/10.47833/2025.1.ENG.011>

### Kulcsszavak:

DMLS  
3D fémnyomtatás  
belső feszültség  
rozsdamentes acél  
deformáció  
optikai szkennel

### Keywords:

DMLS  
3D metal printing  
internal stress  
stainless steel  
deformation  
optical scanner

### Cikk történet:

Beérkezett 2024. december 13.  
Átdolgozva 2025. március 31.  
Elfogadva 2025. április 10.

### Összefoglalás

Kutatásunkban 3D fémnyomtatással készült korrózióálló acél körgyűrű alakú munkadarabok deformációit vizsgáltuk. Ezek jó indikátorok a belső feszültségek meghatározására. A darabok geometriáját hőkezelés előtt és hőkezelés után is megvizsgáltuk. A méréseket 3D optikai mérőgéppel végeztük el és értékeltük ki. A berendezés segítségével a darabok teljes területe vizsgálható volt, így nem néhány pont alapján értékeltük ki a darabot. A szkennelést hőkezelés előtt és után is elvégeztük, majd a kiértékelés során a CAD modellhez hasonlítottuk.

### Abstract

In our research, we examined the deformations of corrosion-resistant steel ring-shaped workpieces produced [1] by 3D metal printing. These are good indicators for determining internal stresses. We studied the geometry of the pieces both before and after heat treatment. The measurements were performed and evaluated using a 3D optical measuring device. With the help of the equipment, the entire surface area of the pieces was examined, rather than evaluating only a few points. The scanning was performed both before and after heat treatment, and during the evaluation, we compared the results to the CAD model.

## 1. Bevezetés

A DMLS (Direct Metal Laser Sintering) olyan additív gyártástechnológia, amely során fémpor rétegeket olvasztunk össze irányított lézerekkel. A technológia előnyei közé tartozik, hogy lehetővé teszi az elméletben hulladékmentes gyártási folyamatot. Ezen felül nehezen megmunkálható alapanyagokból képes nagy pontosságú és tömörségű munkadarabokat előállítani. Elsősorban az orvostudományban, a járműiparban és az űripárban használják bonyolult geometriával rendelkező alkatrészek gyártására.

A technológia széles körű elterjedését elsősorban a ciklikus hőigénybevétel okozta belső feszültségek kialakulása gátolja. Ezek a maradó feszültségek kezelés nélkül gyakran okozzák a munkadarab deformációját, meghibásodását. A belső feszültségek csökkentésére különböző

\* Kapcsolattartó szerző.  
E-mail cím: [szabo.valentin@nje.hu](mailto:szabo.valentin@nje.hu)

utókezelési eljárások léteznek. Kutatásunk célja a korrózióálló acél alapanyagú DMLS alkatrészek geometriai deformációinak a vizsgálata. További célunk a kutatási folyamat előkészítése és megalapozása, amely alapján jövőbeli kutatási irányokat jelölhetünk ki. A cikkben a nyomtatás utáni geometriai pontosságot, a hőkezelés utáni geometriai pontosságot vizsgáljuk meg és hasonlítjuk össze a CAD modellel. A kísérlet során használható munkadarabok száma korlátozott, ugyanis gyártásuk időigényes és költséges. A méréseket és az eredmények kiértékelését optikai szkennel segítségével végezzük el.

A DMLS vagy másnéven SLM (Selective Laser Melting) olyan additív gyártási folyamat, mely folyamán fémpor rétegeket olvasztunk össze lézersugárral. A gyártás során az acél alaplap teljes területére egy rétegnek megfelelő mennyiségű port terítünk, amelyet egy irányított lézersugár egybeolvaszt. Ezután a munkaterület egy rétegnyi távolságot lejjebb mozdul, és újabb porréteg kerül terítésre, melyet a lézersugár az előző réteggel együtt olvaszt meg, így a két réteg között kötés alakul ki. A lézersugár pásztázási területén kívül eső érintetlen por később újra felhasználható [1]. A DMLS technológia legnagyobb előnyei közé tartozik, hogy közel 100%-os tömörségű alkatrészt lehet vele közel hulladékmentesen gyártani, alapvetően jó ismételtelőség és közepes vagy magas felületi minőség jellemzi, valamint megoldást nyújt a nehezen megmunkálható fémek és ötvözetek, például titán ötvözetekből készült gyártmányok precíz elkészítésére [2].

A technológia hátránya, hogy a fém ismételt újra olvasztása jelentős belső feszültségeket eredményez a munkadarabban, melyek deformációt és repedéseket okozhatnak. Ezek már gyártás közben is jelentkezhetnek, selejtet eredményezve. A munkadarabok első rétegét hozzáolvasztják az alaplaphoz, amely egy nagy inerciával rendelkező fémtömb, így az első réteg rögzítésre kerül. Ezáltal elkerülhetőek a folyamat közben fellépő elváltozások, mert a feszültségek egyenletesen eloszlának az alaplap és a gyártmány között. Hatos István és munkatársai szerint a nagyobb rétegvastagság használata pozitívan befolyásolja a belső feszültségek kialakulását, ugyanakkor kisebb szemcsemérettel jobb fizikai és mechanikai tulajdonságokkal bíró munkadarab készíthető [3]. Kezdetben 100 µm méretű porokat alkalmaztak, mára a 20 µm átlagos szemcseméretű porok is elterjedtek. Patterson és munkatársai szerint finomabb szemcsék azért előnyösebbek, mert nagyobb energiát képesek elnyelni, így tömörebb alkatrészek és jobb felületi minőség nyerhető [1]. Azonban a végtelenül kis méretű szemcsék alkalmazása nem javasolt, mert így a gyártási sebesség jelentősen lelassul, valamint már 10 µm méretű szemcsék is képesek agglomerálódni és szabálytalan alakú klasztereket létrehozni, melyek megváltozott energiaelnyelő képességgel rendelkeznek és hátrányosan befolyásolják a folyamatot. Klaszterek keletkezhetnek úgy is, hogy a kisméretű szemcsék hozzátapadnak a nagyobb méretű szemcsékhez. [4]

A gyártási folyamat megkezdése előtt elengedhetetlen a fémpor szitálása, hogy a gyártási rétegvastagságnak megfelelő méretű porszemcsék kerüljenek be a DMLS-gépbe.

### 1.1. Feszültségek csökkentése

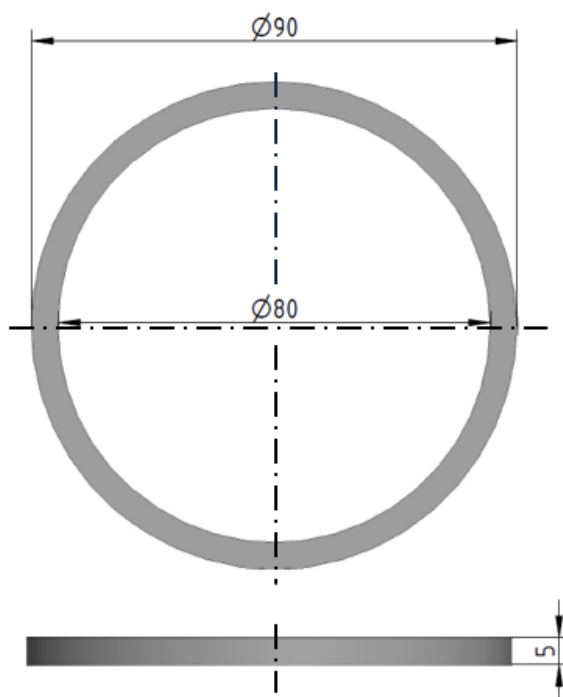
A belső feszültségek utólagos csillapítására a legelterjedtebb eljárások a feszültségmentesítő hőkezelés (TSR-Thermal Stress Relief), a rázatás (VSR-Vibratory Stress Relief), illetve ezek kombinációja (TVSR-Thermal Vibratory Stress Relief). A TSR hatásmechanikája szerint hőbevitellel megnöveljük az anyag részecskéinek energiáját, így azok mozgásba jönnek és egyensúlyi állapotba rendeződnek. Hőkezeléssel tehát a feszültségek természetes relaxációjának folyamatát szeretnénk felgyorsítani. TSR kezelés hatására a diszlokáció sűrűség is csökken az anyagban, mely csökkenti a rácsstorzulást és további feszültségoldó hatással bír a munkadarabban. Továbbá a maradó belső feszültségek egyenletesen oszlanak el a munkadarabon belül, és homogenizálódnak TSR után [5]. A TSR alkalmazásakor különös figyelmet igényel a kezelés hőmérsékletének, idejének és kontrollált hűtésének helyes megválasztása [6]. A VSR-t főleg olyan esetekben célszerű alkalmazni, amikor a hagyományos hőkezelés praktikai vagy gazdasági okokból nem kivitelezhető hatékonyan. Gyakori alkalmazási terület a hegesztett acélszerkezetek vagy csövezetékek, mivel VSR-rel megelőzhető a hegesztési varratok deformációja. A hatásmechanizmus szerint VSR kezelés során rezgő dinamikus terhelést helyezünk a munkadarabra. Ezen dinamikus feszültségek a maradó feszültségekkel kombinálva meghaladják az anyag folyáshatárát, így helyi plasztikus alakváltozást és a maradó feszültségek relaxációját idézik elő [7]. A VSR hátránya, hogy a kezelést sajátfrekvencia alatt végzik, a munkadarabban a dinamikus feszültség egyenletlenül oszlik el, így a belső feszültségek attól

függően csökkennek, hogy hol helyezkednek el a munkadarabon belül. Továbbá VSR kezelés miatt az anyagban növekszik a diszlokációk sűrűsége [8].

A TVSR technológia a VSR és a TSR egyidejű alkalmazását jelenti úgy, hogy előbbinél nagyobb mértékben csökkenti a belső feszültségeket, utóbbinál pedig nagyobb a hatékonysága. A rázatás jellemzően rezonanciafrekvencián vagy minimálisan alatta történik, a munkadarabot felhevíteni pedig alacsonyabb hőmérsékletre is elegendő [9]. Gao és munkatársai alumínium ötvözetben végzett kísérletük alapján megállapították, hogy a 2 órás TVSR kezelés 110 perc 175 Celsius fokon történő hőntartás, majd 10 perc 175°C-on végzett rázatás esetén bizonyult a leghatékonyabbnak. Így 81,7%-os feszültségcsökkenést értek el, az azonos paramétereken történő szimpla hőntartás közel 64%-os eredményével szemben [10]. Chen és munkatársai kísérletei azt is kimutatták, hogy a TVSR kezelésnek az anyag fázisösszetételére gyakorlatilag minimális hatása van [6].

## 2. A kísérlet és a munkadarabok bemutatása

Kísérletünk során egy munkadarabot hőkezeltünk és vizsgáltunk meg, ennek névleges méreteit az 1. ábra mutatja be.



1. ábra. A munkadarab geometria

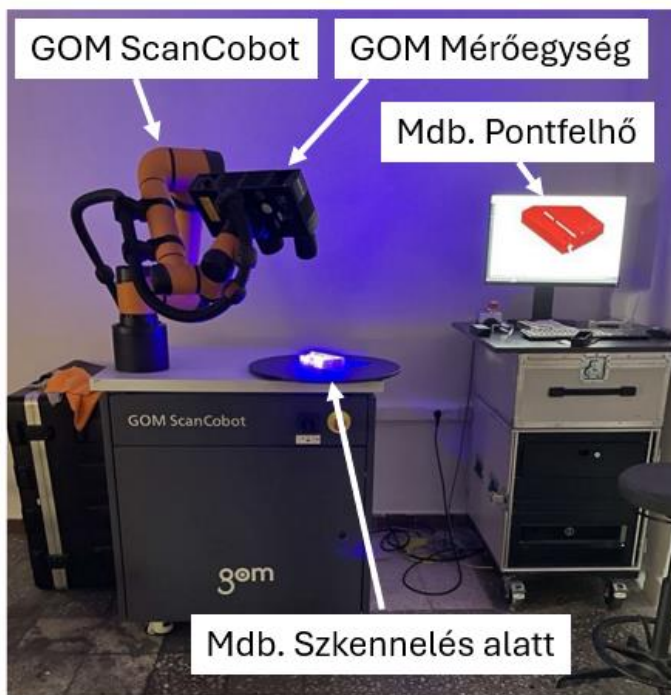
A körgyűrű a MetcoAdd 17-4PH-A jelű fémporából készült, mely a gyártó leírása szerint egy edzhető, magas szilárdságú rozsdamentes acél. [11] A nyomtatás Orlas Creator típusú DMLS berendezésen ment végbe, annak gyártója által erre az anyagra előírt nyomtatási paraméterekkel (1. táblázat). [12]

**Táblázat 1. Nyomatási paraméterek az Orlas Creator 250 gépen**

Paraméter	Érték
Lézer teljesítmény	107 W
Pásztázási sebesség	1000 mm/s
Beam Expander átmérő	40 $\mu$ m
Laser Power Percentage	50%
Gáz közeg	Nitrogén
Oxigén koncentráció	1,4%
Átfedés	80%
Rétegvastagság	25 $\mu$ m

A gyártmányt a nyomatás után különböző utókezelésnek vetettük alá. A hőkezelésnek alávetett munkadarabunkat Prothermo Hofmann LK-2 típusú laboratóriumi kemencében 600 Celsius fokos hőmérsékleten 24 órán keresztül hőntartottuk és a kemencével együtt hűtöttük. A munkadarabot a gyártás után beszkeneltük. Végül a kiértékelést GOM ATOS Q széria 12M típusú 3D szkennelvel végeztük, a kész darabok pontos méretét és alakját a CAD-modell méreteihez hasonlítottuk. A rendszer az ISO 10360-2 szabványnak megfelelően biztosítja a valós felületek precíz digitalizálását és kiértékelését. A kalibrációs folyamat ismert hőtágulási együtthatójú kerámia etalonlappal kezdődik, amely referenciapontként szolgál a mérésekhez. A kalibráció a mérési tartomány különböző pontjain, eltérő betekintési szögek mellett zajlik, figyelembe véve a geometriai torzításokat és a nemlineáris hibákat. A térfogati hibák értékeléséhez kalibrált etalonokat, például gömböket használnak, az SPH (Sphere Spacing Error) és MPESPH (Maximum Permissible Sphere Spacing Error) paraméterek alapján ellenőrizve a tűréshatárok betartását. A rendszer maximális hibahatára mindössze 0,01 mm, amit a mérés előtti kalibráció biztosít, garantálva a specifikációknak megfelelő, pontos és ismételhető eredményeket.

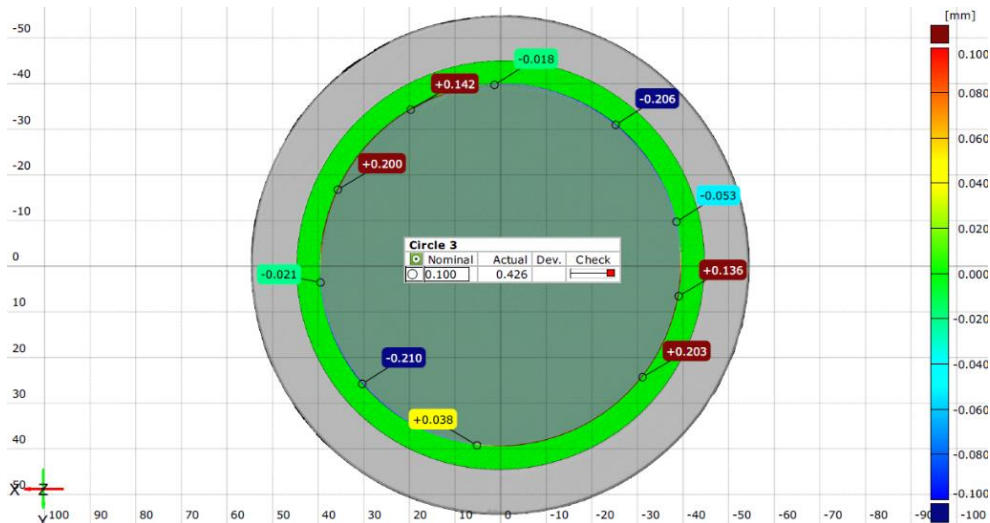
A rendszer képes precízen meghatározni az objektumok térbeli helyzetét és geometriai jellemzőit az X, Y és Z koordináták mentén, miközben szélsőséges környezeti tényezők hatására is stabilan működik, folyamatosan monitorozva az adatokat, mint például a hőmérsékletet, használati időt és dőlési értékeket, biztosítva ezzel a mérési folyamat megbízhatóságát. Az eltéréseket pixelalapú dokumentációval rögzítik, amely az MPEE (Maximum Permissible Error of the Equipment) meghatározását is magában foglalja. A pontosság igazolására a gömbtesztet alkalmazzák, melynek során különböző méretű és helyzetű etalonokat használnak, a VDI/VDE (Verein Deutscher Ingenieure/ Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik) szabvány szerint. A homogén, speciális bevonattal ellátott gömbök biztosítják a megfelelő mérési felületet, az ezred milliméteres pontosságot pedig dokumentált eredmények igazolják. A statisztikai módszerekkel rekonstruált felületek és az optikai mérőgép-szkennel funkciók kombinációja garantálja a szabványok által megkövetelt maximális precizitást. A szkennelés folyamatát mutatja be a 2. ábra.



2. ábra. A szkennelési folyamat

### 3. Eredmények

A szkennelési eredmények alapján eltérő nagyságú és jellegű köralakhibákat fedeztünk fel. A munkadarab nyomtatás után már alakhibával rendelkezett (3. ábra).

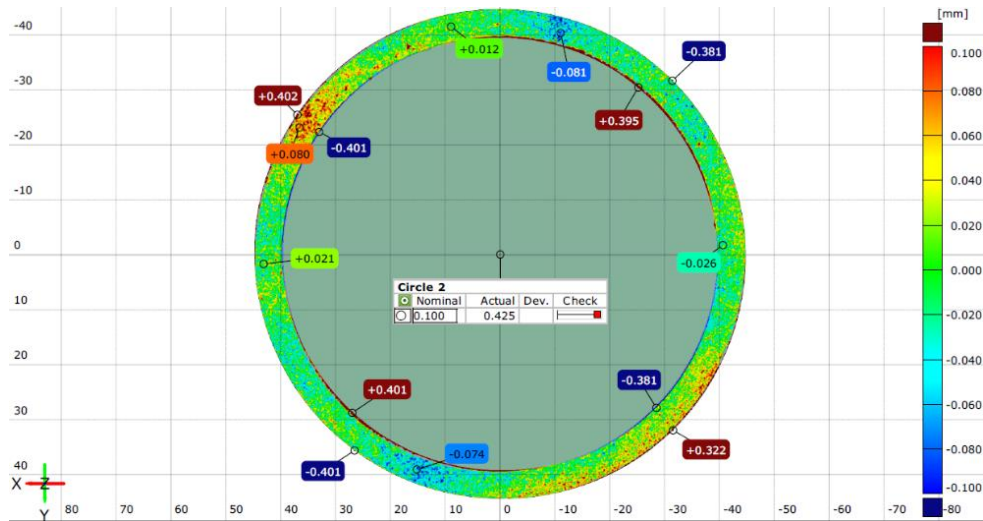


3. ábra. A munkadarab körkörösségi hibája hőkezelés előtt

A CAD modell névleges értékeitől való eltérés már a nyomtatás során a DMLS gép pontatlanságából is következik. Ezért a munkadarabok tűrését  $\pm 0,1$  mm-ben határoztuk meg és a nyomtatás pontosságát ehhez viszonyítva értékeltük. A munkadarab sugara pozitív (az alakzat kontúrján kívül eső), illetve negatív (az alakzat kontúrjától elmaradó) eltérési irányban is maximálisan 0,2 mm-rel tér el a névleges értéktől, átmérőben tehát 0,4 mm az eltérés.

A hibák elhelyezkedése az alapvetően kör alakú munkadarabot gyakorlatilag egy szabályos ellipszisre torzította. Az eltérések iránya alapján négy szegmensre bontható fel a kör úgy, hogy a szemközti szegmensekben az eltérések iránya megegyezik és értékük is közel azonos.

A hőkezelés utáni körkörösségi hibát a 4. ábra mutatja be.



4. ábra. A hőkezelés utáni köralakhiba

A hőkezelést úgy végeztük el, hogy a munkadarabot még nem távolítottuk el az alaplemeztől, így nem szabadítottuk fel a feszültségeket. A vizsgálat így tehát csak a hőkezelés hatásait mutatta ki a deformációra és a belső feszültségekre. Az eltérések az ábrán láthatók, és megállapítható, hogy a gyártási hibák a hőkezelés után szinte megkétszereződtek. A tűrésmezőt 0,1 mm-re állítottuk és az eltérések ettől értendők, nagyságrendileg sugár irányban 0,3-0,4 mm, ez átmérőben 0,6-0,7 mm-t jelent.

#### 4. Összegzés

Célunk a technológiához tartozó tapasztalatszerzés és egy elő kutatás készítése volt. Alapvetően a DMLS alkatrészek előállítását egy költséges és időigényes feladat, ezért korlátozott számú alkatrésszel kellett dolgoznunk. A szakirodalom áttekintése során kiderült, hogy más kutatók kísérletei is arra mutatnak, hogy még az egymást követően gyártott munkadarabok között is jelentkezhetnek eltérések. Olyan mérési és kiértékelési formát választottunk, ami nem elsősorban egymáshoz, hanem önmagához képes hasonlítani a munkadarabokat. A GOM ATOS Q optikai szkener alkalmazásával elkerülhetők a nyomtatási hibák eredményt befolyásoló hatásai, mivel a szkener képes az alapgeometria változásait önmagához viszonyítva mérni, az eltérések alapján, nem pedig az abszolút méretek alapján, így lehetőség nyílik a kisebb számú mintával történő mérésre, ezáltal növelve a mérési hatékonyságot.

A kutatás során a nyomtatás sajátosságát és egy utólagos hőkezelés hatását figyeltük meg és hasonlítottuk össze a kezelés nélküli állapottal. Esetünkben a munkadarab ellipszis hibával készült, amely a hőkezelés után jelentősen romlott. Ezen eredmények alapján a hőkezelés negatívan befolyásolta a végeredményt, ennek oka a belső feszültségek megléte az anyagban. Ezen feszültségekkel az anyag inerciája egyensúlyt képes tartani, de hőkezelés során valószínűleg az anyag előbb lágyul meg, mint ahogy a feszültségek leépülnek, ezért képes tovább deformálódni a geometria. A hőkezelés sikerességét ezen egy mérés alapján nem lehet egyértelműen meghatározni. Esetünkben nem kívánt hatást ért el annak ellenére, hogy kutatásunkkal párhuzamosan más geometrián, de ugyan ilyen alapanyag esetén, az alaplemezről történő eltávolítás előtti hőkezelés kedvezőbb eredményeket mutatott.

#### Köszönetnyilvánítás

„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.”

Ezenkívül szeretnénk megköszönni a mérések elvégzésében nyújtott segítséget a 3D Technology Kft.-nek és Szelezckei Csabának.

## Irodalomjegyzék

- [1] Patterson, A. E., Messimer, S. L., & Farrington, P. A. (2017). Overhanging features and the SLM/DMLS residual stresses problem: Review and future research need. *Technologies*, 5(2), 15.  
DOI:10.20944/preprints201703.0202.v2
- [2] Leuders, S., Thöne, M., Riemer, A., Niendorf, T., Tröster, T., Richard, H. A., & Maier, H. J. (2013). On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl6V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance. *International journal of fatigue*, 48, 300-307., DOI:10.1016/j.ijfatigue.2012.11.011
- [3] Hatos, I., Hargitai, H., & Kovacs, J. G. (2015). Műanyag fröccsöntő szerszámberakások szinterelési technológiája.
- [4] Manfredi, D., Calignano, F., Krishnan, M., Canali, R., Ambrosio, E. P., & Atzeni, E. (2013). From powders to dense metal parts: Characterization of a commercial AlSiMg alloy processed through direct metal laser sintering. *Materials*, 6(3), 856-869., DOI:10.3390/ma6030856
- [5] Song, H., Gao, H., Wu, Q., & Zhang, Y. (2022). Residual stress relief mechanisms of 2219 Al-Cu alloy by thermal stress relief method. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 61(1), 102-116.  
<https://doi.org/10.1515/rams-2022-0019>, DOI:10.1515/rams-2022-0019
- [6] Chen, S., Ma, J., Gao, H., Wang, Y., & Chen, X. (2023). Research on residual stresses and microstructures of selective laser melted Ti6Al4V treated by thermal vibration stress relief. *Micromachines*, 14(2), 354.,  
DOI:10.3390/mi14020354
- [7] Rao, D., Wang, D., Chen, L., & Ni, C. (2007). The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress. *International Journal of Fatigue*, 29(1), 192-196., DOI:10.1016/j.ijfatigue.2006.02.047
- [8] Gao, H., Wu, S., Wu, Q., Li, B., Gao, Z., Zhang, Y., & Mo, S. (2020). Experimental and simulation investigation on thermal-vibratory stress relief process for 7075 aluminium alloy. *Materials & design*, 195, 108954.,  
DOI:10.1016/j.matdes.2020.108954
- [9] Lv, T., & Zhang, Y. (2015). A combined method of thermal and vibratory stress relief. *Journal of Vibroengineering*, 17(6), 2837-2845.
- [10] Gao, Z., Zhang, Y., Gao, H., & Wu, Q. (2023). Experimental study and simulation analysis of thermal-vibratory stress relief treatment of Al-Cu-Mg alloy plate. *Journal of Manufacturing Processes*, 92, 124-134.  
DOI:10.1016/j.jmapro.2023.02.049
- [11] MetcoAdd 17-4PH-A termék adatlap  
Elektronikus forrás:  
[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjYt7TBpruJAxXUgV0HHXX9CEcQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.oerlikon.com%2Fecoma%2Ffiles%2FDSMA-0004.0\\_HighStrengthSS\\_AM.pdf%3Fdownload%3D1&usq=AOvVaw1L8eHXXI0n-OxpKqHZj2Zf&opi=89978449](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjYt7TBpruJAxXUgV0HHXX9CEcQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.oerlikon.com%2Fecoma%2Ffiles%2FDSMA-0004.0_HighStrengthSS_AM.pdf%3Fdownload%3D1&usq=AOvVaw1L8eHXXI0n-OxpKqHZj2Zf&opi=89978449)  
Megtekintés dátuma 2024. 11. 01.
- [12] Orlas Creator termék adatlap  
Elektronikus forrás: <https://www.anima.eu/content/download/0000097.pdf>  
Megtekintés dátuma 2024. 11. 01.