



Neumann János Egyetem
Tudományos Diákköri
Konferencia

Szelektív lézerszinterézéssel gyártott korrózióálló acél alkatrészek geometriai pontosságának vizsgálata

Evaluation of the geometric accuracy
of corrosion resistant steel parts
manufactured with selective laser
sintering

Mihályi Gergő
A2C7MZ

Szabó Valentin Endre, tanszéki mérnök

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

2024

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 Szeleczkei Csabának.

Tartalomjegyzék

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	2
BEVEZETÉS	4
1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTŐ	5
1.1. ADDITÍV GYÁRTÁS ISMERTETÉSE	5
1.1.1. A 3D fémnyomtatás bemutatása	5
1.1.2. Kiemelten a DMLS bemutatása	6
1.2. NYOMTATÁSI HIBÁK	7
1.2.1. Belső feszültségek	7
1.2.2. Pórusok és klaszterek képződése:	10
1.2.3. Felületi minőség, pontosság és támasztékok	11
1.3. JAVASLAT A HIBÁK KIKÜSZÖBÖLÉSÉRE	13
1.3.1. Paraméterek optimalizálása a nyomtatás előtt és annak folyamán	13
1.3.2. Utólagos kezelések	16
1.3.3. Alternatív eljárások	17
2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK	21
2.1. DMLS GÉP BEMUTATÁSA	21
2.2. AZ ALAPANYAG BEMUTATÁSA	22
2.3. A MUNKADARABOK BEMUTATÁSA ÉS MUNKADARAB-SPECIFIKUS HŐKEZELÉS	23
2.4. HUZALSZIKRA GÉP BEMUTATÁSA	25
2.5. VSR GÉP BEMUTATÁSA	27
2.6. 3D SZKENNER BEMUTATÁSA	28
3. EREDMÉNYEK	29
3.1. AZ ELSŐ MUNKADARAB	30
3.2. A MÁSODIK MUNKADARAB	32
3.3. A HARMADIK MUNKADARAB	34
4. KONKLÚZIÓ	37
4.1. A NYOMTATÓ GYÁRTÁSI PONTOSSÁGA	37
4.2. A MUNKADARABOK GEOMETRIAI TORZULÁSA	37
5. DISZKUSSZIÓ	43
ÖSSZEFOGLALÁS	44
SUMMARY (IDEGEN NYELVŰ ÖSSZEFOGLALÁS)	45
ÁBRAJEGYZÉK	46

Bevezetés

Kutatásunk célja a korrózióálló acél alapanyagú DMLS alkatrészek geometriai deformációinak a vizsgálata. További célunk egy elő kutatás készítése, amely alapján jövőbeli kutatási irányokat jelölhetünk ki. A dolgozatban a természetes öregítés hatását hasonlítjuk össze a feszültségmentesítő hőkezeléssel és az utókezelés nélküli deformációval. A kísérlet során használható munkadarabok száma korlátozott, ugyanis gyártásuk időigényes és költséges. A méréseket és az eredmények kielemezését optikai szkennerek segítségével végezzük el.

A dolgozat során részletes szakirodalomkutatást végzünk a témában, bemutatjuk a DMLS gyártási technológiát és a gyártási részfolyamatokat. Bemutatjuk a technológia előnyeit és hátrányait. A deformációk kialakulásának a folyamatára is kitérünk, valamint ismertetjük a lehetséges megoldásokat és bemutatjuk az alternatív feszültségmentesítő eljárásokat is. Elemezzük az alternatív megoldások alkalmazásának a lehetőségét és a lehetséges jövőbeli alkalmazási megoldásokat.

Bemutatjuk a kísérleti környezet és a próbatestek gyártási folyamatát. A DMLS gyártás után készülék építést végeztünk és a huzalszikra gépen vágtuk le a munkadarabokat. Ennek előnye, hogy nincs mechanikai érintkezés a munkadarab és a huzal között, így nem visz jelentős plusz feszültséget a munkadarabba és nem módosítja az eredményeket. A méréseket optikai szkennerekkel végezzük, melynek köszönhetően részletes és látványos adatvizualizáció érhető el. A szkennerek segítségével színtérképes ábrákön vizsgálhatjuk az eltéréseket, és nagy pontosságú mérőpontokat helyezhetünk el rajtuk. Ezen adatok segítségével kielemezzük a folyamatok eredményét és megállapításokat teszünk, melyek segítenek a jövőbeli kutatások irányának a meghatározásában és a nyomtatható geometriák fejlesztésében.

1. Szakirodalmi áttekintő

1.1. Additív gyártás ismertetése

1.1.1. A 3D fémnyomtatás bemutatása

A 3D nyomtatás, másnéven az additív gyártás (AM) olyan technológiai folyamat, mely során az elkészítendő alkatrész rétegesen épül fel, egy CAD rendszerben tervezett 3D-s modell alapján. Az AM folyamat alkalmas fém, műanyag, kerámia és kompozit alapanyagú alkatrészek gyártására, valamint az otthoni felhasználástól, a szerszámipari gyors prototípusgyártáson (RP) át, az egészségügyben, a gépjármű- és repülőiparban történő kis- és közepes sorozatgyártásig egyaránt kiterjedt.

A fém additív gyártási technológia előnye, hogy elméletben hulladékmentes gyártást tesz lehetővé, hiszen a folyamat során fel nem használt alapanyag később újra felhasználható, továbbá a védőgázon kívül nem alkalmaz egyéb adalékanyagot, például kenő- vagy hűtőfolyadékot. Egy fajta fém 3D nyomtató berendezéssel a legtöbb alkatrész előállítható, nincs szükség alkatrészszerkezet specifikus szerszámokra. A hagyományos gyártási folyamatokhoz képesti kevesebb utómunka lehetőségét is magában hordozza, minimalizálva az utólagos anyageltávolítás, például fúrás vagy marás szükségességét. [2] [23]

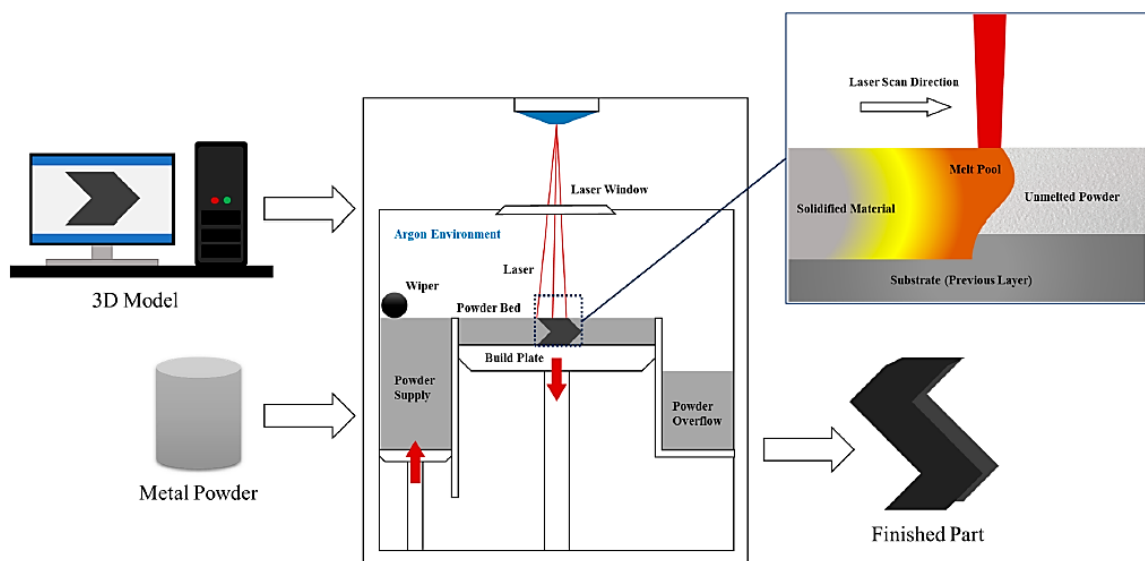
A fém 3D nyomtatási technológia két nagyobb csoportra bontható: irányított energia leválasztás alapú technológiák (DED) és porágyfúzió alapú technológiák (PBF).

A DED technológiák alkalmazása során a fémpor vagy fémhuzal alapanyagot megolvasztják fókuszált lézer- vagy elektronsugár vagy plazma segítségével, amely így rétegről-rétegre lerakódik. A népszerű DED-alapú technológiák közé tartozik a lézeres hálólakítás (LENS), a közvetlen fémleválasztás (DMD) és az elektronsugaras szabad formagyártás (EBFFF). A technológia legelterjedtebb alkalmazási területe a javítási és felújítási munkálatok.

A PBF technológia során a fémpor alapanyagból porágyat hozunk létre, melyet lézer- vagy elektronsugár hőenergiájának segítségével szelektíven olvasztunk meg, így az egyes rétegek összeolvadnak és kész alkatrészt formáznak. Ilyen folyamat a közvetlen fém lézerszinterezés (DMLS, másnéven SLM) és az elektronsugaras olvasztás (EBM). A PBF folyamatokat gyors prototípusgyártáshoz és új alkatrészek legyártásához használják. Általánosan elmondható, hogy a PDF technológiákkal nagyobb pontossággal és felületi minőséggel rendelkező, ugyanakkor kisebb maximális méretű alkatrészeket lehet előállítani, mint a DED technológiákkal, valamint az építési sebesség is lényegesen alacsonyabb. [1] Ebben a tanulmányban a DMLS módszert fogjuk részletesen tárgyalni.

1.1.2. Kiemelten a DMLS bemutatása

A DMLS vagy másnéven SLM 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 (1. ábra). A lézersugár pásztázási területén kívül eső érintetlen por később újra felhasználható. [3]



1. ábra A DMLS mechanizmus bemutatása [3]

A szinterezés argon vagy nitrogén védőgázos környezetben zajlik az oxidáció és egyéb nemkívánatos reakciók elkerülése végett. Kezdetben kétkomponensű alapanyagokat használtak (fém és polimer kötőanyag vagy két fémpor keverékének használata esetén ún. SLS technológiáról beszélünk), azonban az egykomponensű alapanyagok elterjedésével gyors prototípus gyártáson kívül már nagy bonyolultságú alkatrészek közepes sorozatgyártása esetén is alkalmazzák a DMLS módszert.

A DMLS technológia legnagyobb előnyei közé tartozik, hogy közel 100%-os tömörségű alkatrészt lehet vele elméletileg hulladékmentesen gyártani, alapvetően jó ismételhetőség és közepes vagy magas felületi minőség jellemzi, valamint megoldást nyújt alapvetően nehezen megmunkálható fémek és ötvözetek, például titán ötvözetekből készült gyártmányok precíz elkészítésére. [23]

A technológia hátránya, hogy a fém ismételt újra olvasztása jelentős belső feszültségeket eredményez a munkadarabban, melyek deformációt és repedéseket okozhatnak. Ezek már

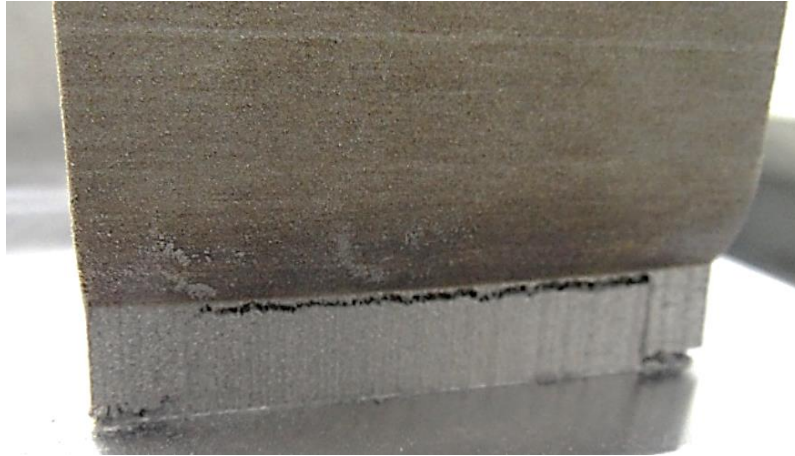
gyártás közben is jelentkezhetnek, selejtet eredményezve. A munkadarabok első rétegét hozzáolvasztják az alaplaphoz, amely egy nagy inerciával rendelkező fémtömb, így szinterezés közben rögzítésre kerül, valamint elkerülhetőek a folyamat közben fellépő elváltozások, mert a feszültségek egyenletesen eloszlanak 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. Kezdetben 100 μm méretű porokat alkalmaztak, mára a 20 μm átlagos szemcseméretű porok is elterjedtek. Simchi szerint finomabb szemcsék azért előnyösek, mert nagyobb energiát képesek elnyelni, így tömörebb alkatrészek és jobb felületi minőség nyerhető. [4] 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. [2]

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

1.2. Nyomtatási hibák

1.2.1. Belső feszültségek

A technológiából adódó hibák közül a legkritikusabb a belső feszültségek kialakulása, melyek révén a munkadarab deformálódik, illetve repedések jelennek meg rajta (2. ábra). Már a szemmel nem látható mikrorepedések is problémásak, mivel mechanikai igénybevétel hatására növekedésnek indulhatnak és kiterjedhetnek, mely ismételten a termék tönkremenetelét eredményezi. Az alaplaphoz nem megfelelően rögzített, azaz nem összeolvadt rétegek szintén hajlamosak deformációra. Ezek a deformációk már a nyomtatás folyamán is problémát okozhatnak, mivel a porterítő mechanizmus felütközhet a munkadarabban. [4]



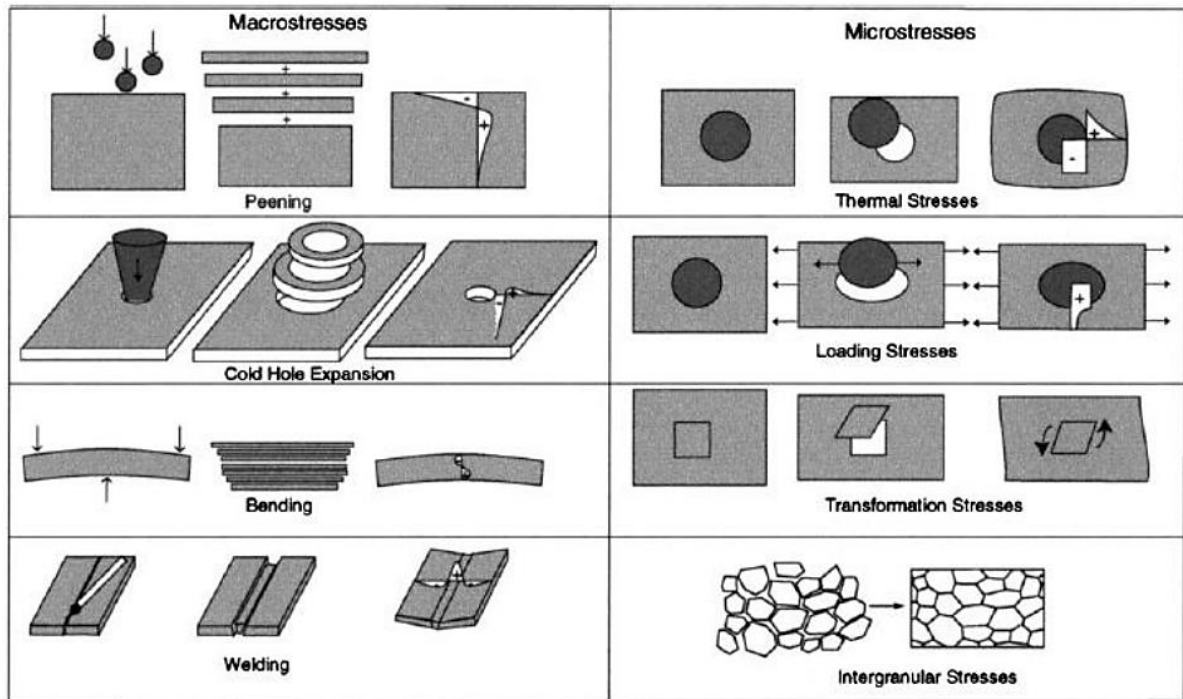
2. ábra Belső feszültségekből eredő repedés [4]

Hatótávolságuk alapján megkülönböztetünk harmadrendű szubmikroszkópikus, másodrendű mikro-, azaz rövid távú és elsőrendű makro-, azaz hosszú távú maradék feszültségeket.

A harmadrendű feszültségek okozói elsősorban a rácshibák, rácsrendezetlenségek, valamint nagyságuk az atomjai közötti távolsággal arányos.

A mikrofeszültségek okozói lehetnek anyagszerkezeti hibák, például diszlokációk, kiválások és vakanciák. Kialakulásuk magyarázható a szemcsék egyes alakító erőkre fellépő eltérő reakciójával. Az eltérően reagáló szemcsék felületükön feszültséget ébresztenek a bekövetkezett alakváltozásuk mértékének különbségével arányosan. A másodrendű feszültségek nagysága közel a szemcsék átmérőjének nagyságának megfelelő.

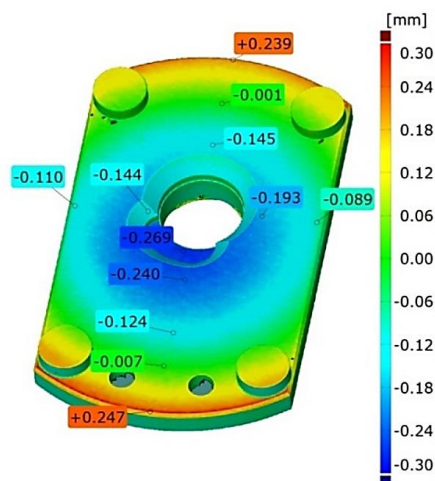
A makroszkopikus feszültségek hatótávja meghaladja a szemcseméretet és a munkadarab egészében történő véletlenszerű eloszlásuk révén okozzák az anyag deformációját, illetve változtatják meg a kész munkadarab mechanikai és fizikai tulajdonságait. Az ilyen belső feszültségek kialakulása és negatív hatása az egyes megmunkálási technológiák esetén gyakran nem kerülhető el, azok természetes velejárója (például hegesztés, forgácsolás, hidegalakítás), azonban bizonyos esetekben szándékosan hozzuk létre őket (például szemcseszórás). Utóbbi eseteket a továbbiakban részletezni fogjuk. (3. ábra) [5]



3. ábra Példák makro- és mikrofeszültségek okozóira [5]

A belső feszültségek létrejötte a DMLS során a hőtágulás jelenségéhez köthető. Az ismételt hőigénybevétel hatására rétegek tetején húzó-, az alacsonyabb hőmérsékletű területeken nyomófeszültségek lépnek fel. Egy réteg nyomtatásakor ezek a feszültségek eloszlanának, így nem jelentenének problémát, azonban több réteg esetén az alacsonyabb hőmérsékletű, már megszilárdult alsó rétegek megakadályozzák a felsőbb rétegek hőtágulását és összehúzódását, így feszültséggradiens lép fel a rétegek között, mely deformációt és repedéseket eredményezhetnek. [3] [6] A kiálló geometriák és furatok különösen ki vannak téve a deformáció veszélyének, mivel ezek a jellemzők nem kapcsolódnak közvetlenül a nagy inerciával rendelkező alaplaphoz, feszültegeloszlás szempontjából hátrányos az elhelyezkedésük. Ezeket a jellemzőket ajánlott tartószerkezetekkel hozzákapcsolni az alaplaphoz. Számos kísérlet szerint vannak a támasztékok pozitív hatással a feszültegeloszlásra, azonban ellenkező eredménnyel rendelkező tanulmányok is léteznek, például a Patterson és munkatársai által végzett kutatás. [4]

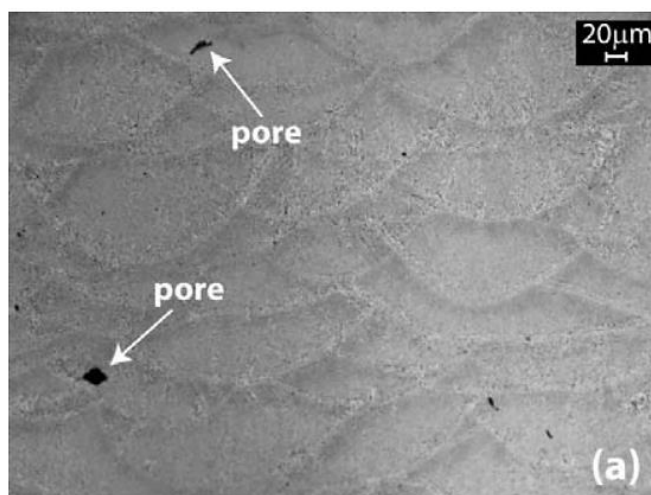
Hatos István és munkatársai megfigyelései alapján a gyártmány alaplapról történő leválasztása után a deformáció jellegzetesen a gyártmány középpontjából indulva koncentrikus körök mentén növekszik (4. ábra). [4]



4. ábra Az anyagdeformáció terjedése [4]

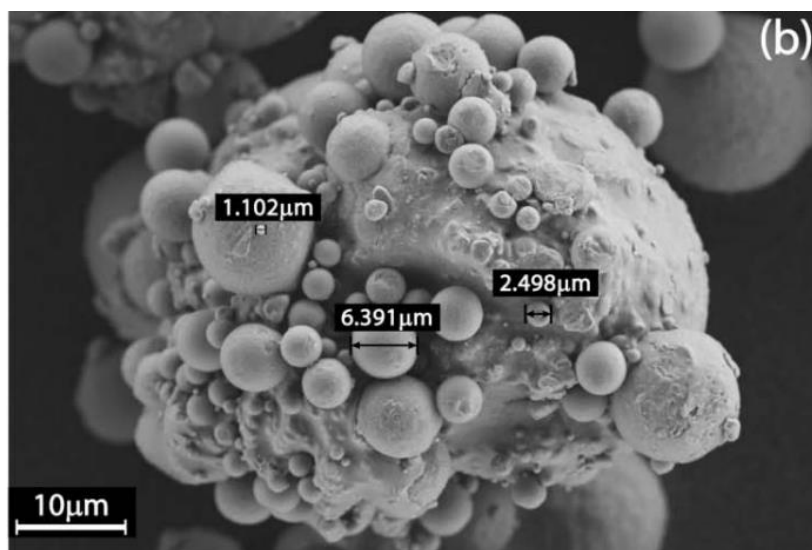
1.2.2. Pórusok és klaszterek képződése:

DMLS technológiával elméletben 100%-os tömörségű alkatrészeket lehet gyártani, azonban elkerülhetetlen a pórusok megjelenése az anyagban (5. ábra). Ezek a pórusok szennyeződések, illetve a porréteg lerakódása és a párolgás, valamint az anyag nem megfelelő mértékű olvadása miatt jelennek meg. Habár ezek a pórusok általában elég kicsik ($20\ \mu\text{m}$), jelentős feszültségnövelő hatással bírnak és fárasztó terhelés alatt meghibásodást okozhatnak. [2] Wang és munkatársai tapasztalatai szerint a munkadarab vízszintes, tehát az építési irányra merőleges felületein az átlagosnál nagyobb méretű pórusok keletkeznek, melyek mentén mikrorepedések is kialakulnak. A függőleges felületeken is, főleg a meg nem olvadt építési rétegek határa mentén jelenteznek elnyúlt pórusok, de ezek jóval kisebbek, mint az építési irányra merőleges felületeken. [4]



5. ábra Pórusok az anyagban [2]

A 10 μm és ennél kisebb szemcsék hajlamosak egymáshoz vagy nagyobb méretű szemcsékhez tapadni, ezzel szabálytalan alakú, az alkalmazott átlagos szemcsemérettől eltérő, annál akár jelentősen nagyobb méretű klasztereket létrehozni (6. ábra). Ezek a megnövekedett méretű szemcsék eltérő energiaelnyelő képességgel rendelkeznek, tehát nem képesek a technológiában részt vevő átlagos méretű szemcsékkel egyenletesen összeolvadni, nem jön létre közöttük megfelelő kötés. Tehát a klaszterek kialakulása végsősoron negatívan befolyásolja a késztermék tömörségét, és mechanikai tulajdonságait, hasonlóan a pórusokhoz. [2] A folyamat során fel nem használt porban keletkezett klaszterek kiszűréséhez és a kívánt rétegvastagság biztosításához elengedhetetlen az alapanyag egyes újrahasznosítási ciklusok előtti szitálása.

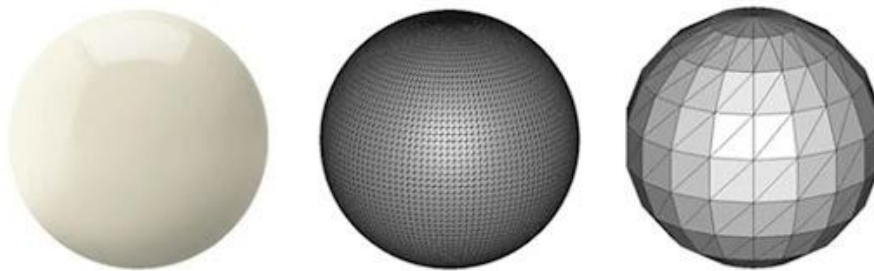


6. ábra Klaszter képződése [2]

1.2.3. Felületi minőség, pontosság és támasztékok

Bár elmondható, hogy a DMLS technológiával általánosan magas felületi minőséggel rendelkező munkadarab nyerhető, számos negatív hatással bíró tényezőt figyelembe kell venni.

A DMLS berendezések a CAD rendszerekben készített 3D-s modelleket általánosan STL fájlformátumban dolgozzák fel. Az STL fájlkiterjesztés lényege, hogy a 3D modellt háromszögekre bontja, mely háromszögek csúcspontjainak koordinátáit a fájl tárolja. Így gyártás során nem a pontos modell kerül elkészítésre, hanem annak egy közelítése. Ebből kifolyólag a késztermék felületi érdessége nagyban függ az STL modell részletességétől, a háromszögekre való felbontás sűrűségétől (7. ábra). [4]



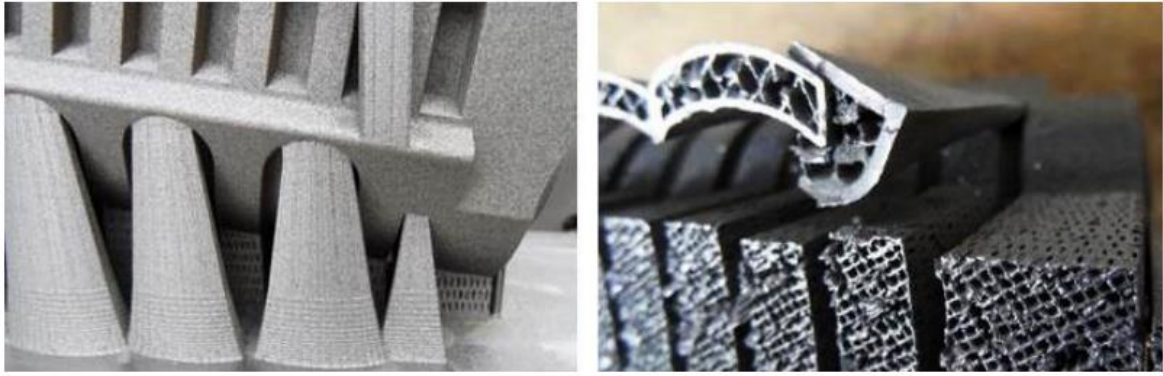
7. ábra STL szeletelés részletessége [26]

A technológia fejlődésével, az egyre kisebb szemcseméretű porok megjelenésével javult a DMLS által gyártott alkatrészek felületi minősége. Mivel ezek a porok nagyobb energiát képesek elnyelni, így csökkent a csak részlegesen megolvadt porszemcsék mennyisége, mely végül is a felületi minőség javulását eredményezte.

A Wang és munkatársai által végzett kutatás alapján előzőleg megállapítottuk, hogy a munkadarab építési orientációja is befolyásolja a kialakuló felület érdességét: az építési irányra merőleges felületek durvább, az azzal párhuzamos felületek finomabb érdességgel bírnak.

A DMLS alkatrészek felületi minősége tehát többek között függ a CAD programok szeletelési paramétereitől, a szemcsemérettől és a gyártási paraméterektől. Egyes, bonyolult geometriával vagy furatokkal rendelkező gyártmányokat tartószerkezetekkel szükséges alátámasztani nyomtatás során (8. ábra). A támasztékok alkalmazásának előnye a belső feszültségek pozitívabb eloszlása, azonban a tartószerkezetek kialakítása további optimalizálást, alapanyagfelhasználást, illetve pásztázási időt eredményez, ezzel növelve a gyártási költségeket. A támasztó szerkezetek kész termékről történő leválasztása után leromlott felületi minőség jelenik meg a munkadarabon, mely utólagos felületkezelést igényel, például polírozás, homokszórás vagy csiszolás formájában.

A tartószerkezetek anyaga megegyezik a munkadarabéval, azonban alapanyagtakarékossági szempontból jellemzően nem tömör, hanem üreges szerkezetűek. Több kutatás is foglalkozott a tartószerkezetek kialakításának optimalizálásával. Sundar és munkatársai szerint az alkatrész dróthálóra való nyomtatása segíti a vékony és apró jellemzők létrehozását, mert az alkatrész és a támaszték jelentősen egyszerűbben eltávolíthatóak róla. Jhabvala és munkatársai pulzáló lézerrel hozták létre a támogató struktúrát, mely módszer kisebb sűrűséget és puhább anyagot eredményezett, ami mégis elegendő ahhoz, hogy támogassa a gyártmány jellemzőit és elvezesse a belső feszültségeket. [3][4]

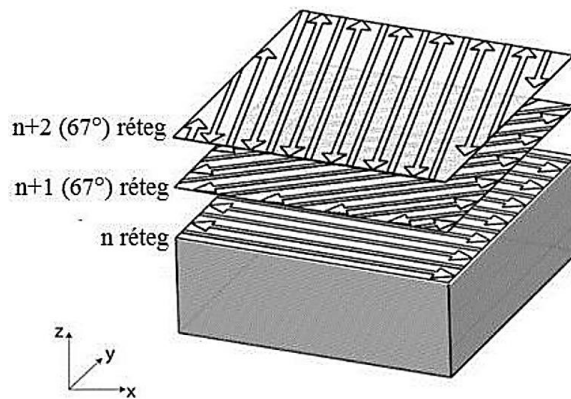


8. ábra Támasztó szerkezet a munkadarabon (bal), támaszték belső kialakítása (jobb) [4]

1.3. Javaslat a hibák kiküszöbölésére

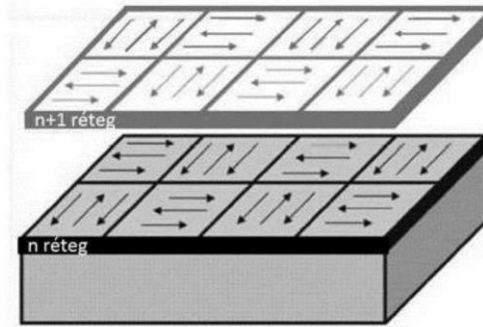
1.3.1. Paraméterek optimalizálása a nyomtatás előtt és annak folyamán

A belső feszültségek folyamat közbeni kialakulása csökkenthető alternatív pásztázási stratégia alkalmazásával. A legelterjedtebb pásztázási módszer szerint minden egyes réteg terítése után 67 fokkal elforgatjuk a pásztázási irányt az előző irányhoz képest (9. ábra). Ez a rétegek közötti jobb átfedést eredményezi és javítja az anyag izotróp tulajdonságát az egyirányú vagy 90 fokkal elforgatott lézersugár iránnyal végzett nyomtatáshoz képest.



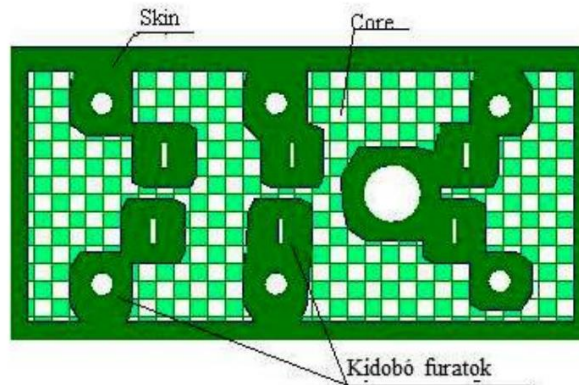
9. ábra Rétegenként 67 fokkal elforgatott pásztázási irány [4]

Egy további alternatív megoldás szerint a rétegeket szekciókra („szigetekre”) kell felbontani, mely szekciókban eltérő, 90 fokkal elforgatott, rövid pásztázási hosszokkal csökkenthető a belső feszültség. Az egyes szigetek véletlenszerű sorrendben kerülnek megolvasztásra (10. ábra). Ezt az eljárást a Concept Laser GmbH szabadalmaztatta.



10. ábra Island, másnéven "sakktábla" módszer [4]

Nagyméretű szerszámok gyártásakor a darab külső felülete a néhány mm vastagon a legkisebb rétegvastagsággal építhető, a belső része pedig az előzőleg összefoglalt „island” pásztázási módszerrel készülhet el (11. ábra). Ezzel a módszerrel csökkenthető az építési idő, az elkészült szerszám pedig maximális szilárdságú és keménységű lesz.

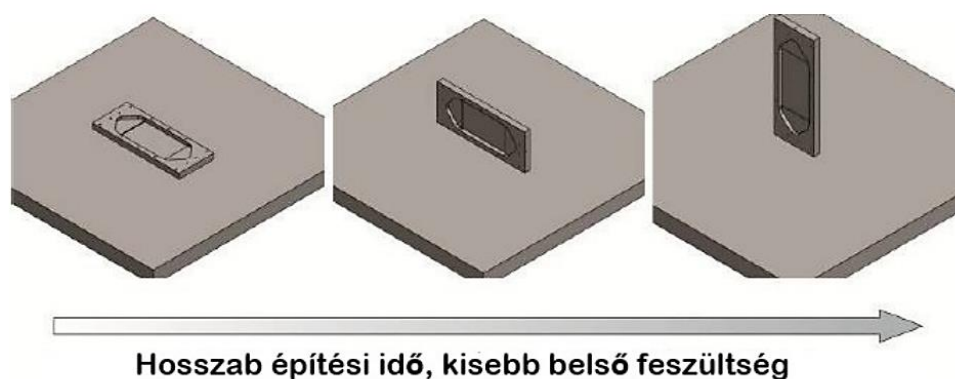


11. ábra Skin-core módszer [4]

A szemcseméret megfelelő megválasztása is fontos szerepet játszik; mint már említettük, a kisebb rétegvastagság nagyobb tömörségű és jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkező munkadarab előállítását teszi lehetővé, azonban Hatos István és munkatársai szerint nagyobb rétegvastagság alkalmazásával kisebb belső feszültségek érhetők el. Általánosan kijelenthető továbbá, hogy gyorsabb pásztázási sebesség, rövidebb pásztázási szakaszok és nagyobb pásztázási távolság esetén szintén kisebb belső feszültségek várhatóak.

A pásztázási szakaszok az „island” módszer alkalmazásán kívül csökkenthetőek a munkadarab orientációjának oly módon történő megválasztásával, hogy a darab vízszintes síkmetszeteinek területe a lehető legkisebb legyen (12. ábra). Azonban ez jelentősen növeli az építési időt a szükséges porterítések számának növekedése révén. Az építési orientáció

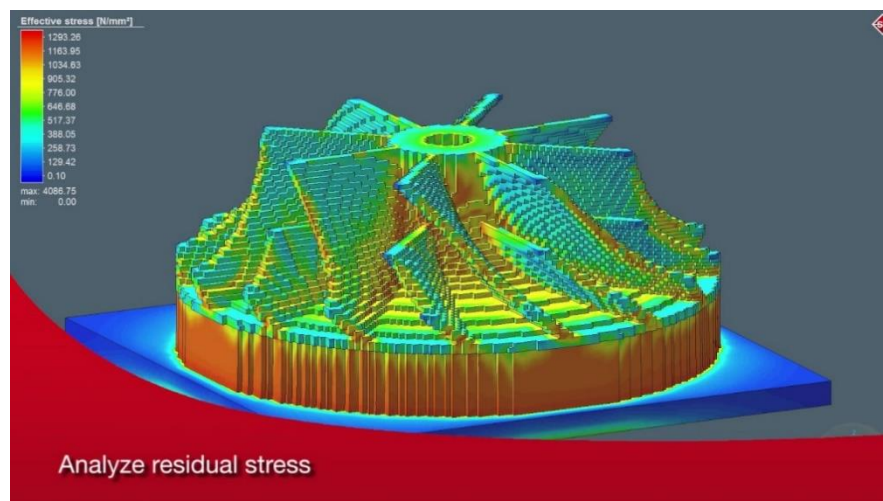
megválasztásakor ajánlott figyelembe venni a pórusok kialakulásának és a leromlott felületi minőség lehetőségét is. [4]



12. ábra Építési orientáció megválasztása [4]

Kemerling és munkatársai megfigyelései alapján a munkakörnyezet és az alapanyag előmelegítése jelentős feszültségcsökkentő hatással bír. Mivel belső feszültségek kialakulásának egyik fő oka a rétegek közötti hőgradiensek kialakulása, ezért a hőgradiensek csökkentésével együtt csökkenthető a belső feszültségek nagysága is. Kutatásuk során megállapították, hogy a hőmérséklet fokozatos növelése folyamatosan javuló eredményeket mutatott. 200 Celsius fokon a munkadarab belső feszültségei az építési magasság teljes egészében egyenletesen oszlottak el, 250 Celsius fokon gyakorlatilag megszűntek. Ez azzal magyarázható, hogy a hőmérséklet növelésével csökken a pásztázott terület körüli anyag szilárdsága, így lehetővé téve a rétegek korlátozás nélküli hőtágulását és összehúzódását. [6]

Mivel a paraméterek megfelelő beállítására nincsenek alapvető szabályok, inkább csak ajánlások, ezért az egyes termékek optimális legyártása hosszadalmas és költséges „trial and error” folyamatot vesz igénybe. Ennek kiküszöbölésére alkalmazhatjuk a Simufact Additive szoftvert, mely végelem analízissel képes adott gyártási vagy utókezelési módszer és annak beállított paraméterei mellett szimulálni és előre jelezni a munkadarabban fellépő belső feszültségeket és deformációkat (13. ábra), valamint javaslatot tenni azok megoldására. A szimuláció által számított feszültség- és deformáció értékek a végelem analízis meghatározott elemszámától függenek, és a megfelelő szoftveres beállításokkal jelentős alapanyag- és költségmegtakarítás érhető el. [7]



13. ábra Feszültségvizsgálat Simufact szoftverben [27]

1.3.2. Utólagos kezelések

Az utólagos, feszültség csökkentésre irányuló módszerek közül a legszélesebb körben elterjedt a hőmérsékleti feszültségkezelés (TSR). Hatásmechanikája szerint hőbevitellel megnöveljük az anyag részecskéinek energiáját, így azok mozgásba jönnek és egyensúlyi állapotba rendeződnek. TSR kezelés hatására a diszlokáció sűrűség is csökken az anyagban, mely csökkenti a rácsorzulást és további feszültségoldó hatással bír a munkadarabban. Továbbá a maradó belső feszültségek egyenletesen oszlanak el a munkadarabon belül, és homogenizálódnak TSR után. [8]

A hőkezelési eljárások csoportjai, melyek az izzítás, keménységnövelés, szívósságfokozás és kérgesítés további eljárásokat foglalnak magukba. Az izzítások közé tartozó eljárások elsődleges célja az alkatrész megmunkálhatóságának, hidegalakíthatóságának növelése, továbbá a gyártás során keletkezett belső feszültségek és az ezek okozta deformációk csökkentése. A feszültségcsökkentő izzítás alkalmazása ajánlott melegalakítás (vagy gyártás) után, ha más utólagos hőkezelő eljárást nem kívánunk alkalmazni, továbbá összetett geometriájú munkadarabok esetén, ahol fontos a munkadarab méretének és alakjának állandósága. A DMLS-sel gyártott munkadarabokhoz ajánlott hőkezelés típusok az öregítés és a normalizálás.

Az öregítés hatásmechanizmusa megegyezik a természetes öregítésével, azaz a belső feszültségek természetes relaxációjával, amikor az anyag mikroszerkezete stabilizálódik, a diszlokációk rendeződnek. Ez egy nagyon hosszú folyamat, mely hőközlés nélkül több hónap, vagy akár évek elteltével okozhat észrevehető pozitív változást. A folyamat mesterségesen meggyorsítható. Ilyenkor az anyagot lassan, kemencével együtt hevítik 500-700 Celsius fok közötti hőmérsékletre, a hőntartási idő 6 óra is lehet. A lehűtés kemencében

történik, így szintén lassú folyamat, azonban e módon elkerülhető a gyors hőmérsékletváltozásból eredő további feszültségek kialakulása. Azonban öregítéssel sem szüntethető meg minden belső feszültség, továbbá bekövetkezhet minimális változás az anyag mechanikai tulajdonságaiban, az acél keményebbé és ridegebbé válhat.

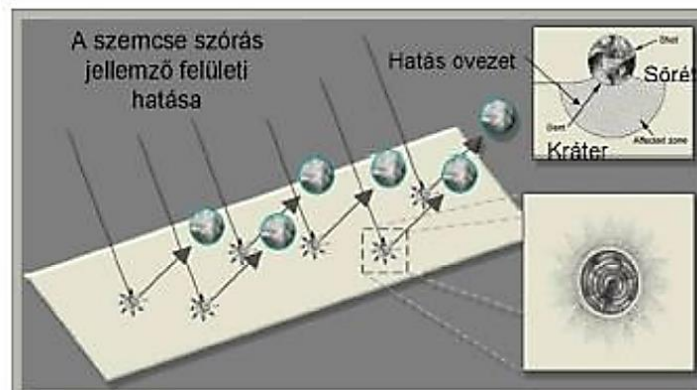
A normalizálás célja az egyenletesen finom szövetszerkezet létrehozása - mely révén a belső feszültségek csökkennek-, illetve az anyag szívósságának növelése. A legtöbb esetben a normalizálást még követi valamilyen hőkezelés, ezért a követő hőkezelésnek megfelelő szövetszerkezetet szeretnénk létrehozni, azonban alacsony széntartalmú acélok esetén a normalizálást lehet befejező műveletnek is tekinteni. Normalizálás során az anyagot a fázisátalakulási hőmérséklet fölé hevítik kb. 50 Celsius fokkal, hogy a szemcsehatárokon kialakult nemkívánatos elváltozások feloldódjanak. A hőntartás során az munkadarab teljes egészét egyenletesen szeretnénk áthevíteni, tehát az ideje a munkadarab dimenzióitól függ és általában néhány percet, maximálisan egy órát vesz igénybe. A lehűtés nyugvó levegőn, esetleg homokba ágyazva történik. [9]

Különböző kutatások rendkívül pozitív TSR kezelés utáni eredményekről számoltak be. A Li és munkatársai által 400 Celsius fokon 2 órán keresztül korrózióálló acélon végzett TSR kezelés után az anyagban maradó feszültségek közel 54 százalékkal csökkentek. Song és munkatársai 640 Celsius fokon 2,5 órán át végeztek kezelést vas alapanyagon, és a maradó feszültségek gyakorlatilag teljesen megszűntek, hasonlóképpen a Leuders és munkatársai által végzett kísérlet során, ahol 800 Celsius fokon kezeltek titán ötvözetet 2 órán keresztül. Következtetésképpen elmondható, hogy a TSR kezelés eredményessége a hőmérséklet növelésével egyenesen arányos. Azonban a TSR módszer nem minden esetben alkalmazható, mivel idő- és költségigényes eljárás. Ezen felül titán ötvözetek - melyek magas hőmérsékleten oxidációra hajlamosak – esetén speciális vákuumkemencében történő kezelés szükséges, ami tovább növeli a költségeket. További hátrány, hogy a TSR kezelés hatására megváltozhat az anyag mikroszerkezete, valamint a TSR minden esetben negatív hatással van az anyag keményégére és egyéb mechanikai tulajdonságaira. TSR alkalmazásakor különös figyelmet igényel a kezelés hőmérsékletének, idejének és kontrollált hűtésének helyes megválasztása. [10]

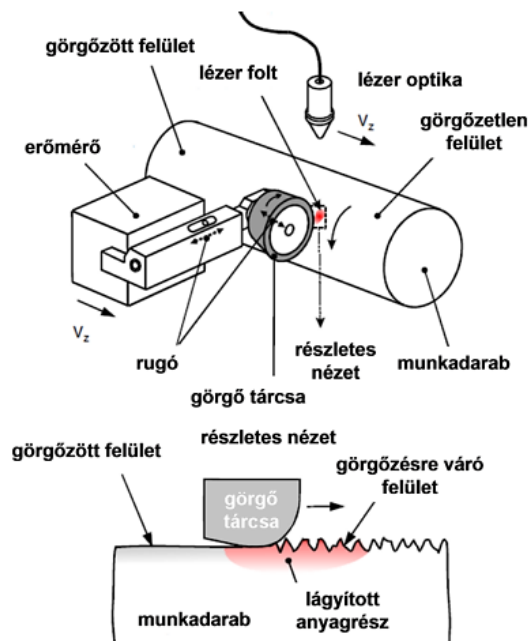
1.3.3. Alternatív eljárások

Maradó feszültség szándékos létrehozása is alkalmazott eljárás az iparban, ilyenkor a kész munkadarab felületén nyomófeszültség létrehozása a cél. Ez történhet a már jelenlevő húzófeszültségek kioltására, azonban a tisztán nyomófeszültség is pozitív hatással lehet a

munkadarab tulajdonságaira. A nyomófeszültség növeli az alkatrész fárasztó terheléssel szembeni ellenállóképességét, illetve korrózióállóságát oly módon, hogy a gyártmány felületén keletkezett mikrorepedéseket összenyomja, bezárja, így meggátolja őket a növekedésben. Nyomófeszültség létrehozása a felületen legtöbbször mechanikai beavatkozás során történik, például szemcseszórással (14. ábra), görgőzéssel (15. ábra) vagy hidegkovácsolással, azonban fárasztó igénybevétel hatására a kialakított nyomófeszültség hajlamos relaxálódni. [5]



14. ábra Szemcseszórás [5]



15. ábra Görgőzés [5]

A munkadarab kifáradási határa tovább növelhető a pórusok megfelelő kezelésével, erre a Leuders és munkatársai által TiAl6V4 anyagon végzett kutatás szerint a leghatékonyabb módszer az úgynevezett forró izosztatikus préselés (HIP) (16. ábra). [11] Ezzel a típusú utókezeléssel a pórusok mérete csökkenthető, illetve a pórusok teljesen elzárhatóak

bizonyultak. HIP kezelés során magas, akár 2200 Celsius fokos hőmérsékletre hevítik a munkadarabot, általában 100-3100 bar-os argon gázatmoszférában. Ilyenkor a belső repedések és porozitások megszűnnek az anyag képlékeny deformációja révén. A technológia hátránya, hogy nem alkalmazható belső üregekkel rendelkező munkadarabok esetén, illetve a magas hőmérsékletről való lehűlés meghosszabbítja a gyártási időt. [12]



16. ábra HIP berendezés [28]

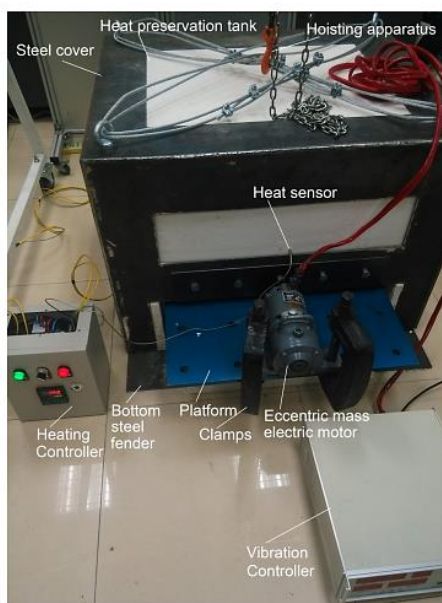
A hagyományos TSR módszer mellett manapság egyre elterjedtebb a vibrációs feszültségcsökkentő kezelés (VSR) főleg olyan esetekben, ahol a hagyományos hőkezelés nem praktikus vagy gazdaságilag nem hatékonyan kivitelezhető. Gyakori alkalmazási példák a hegesztett acélszerkezetek és csővezetékek, mivel 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.

A VSR technológia a kutatások alapján önmagában kisebb mértékben, viszont sokkal rövidebb idő alatt csökkenti a darabokban a belső feszültségeket, mint a TSR, illetve a VSR technológia hatékonysága a rezgés intenzitásával egyenes arányos. Ugyanakkor a VSR hatékonyságvizsgálata egyelőre kevésbé feltérképezett, egyben kiemelt kutatási terület. Rao és munkatársai 2005-ben végzett kutatásuk során a vizsgálandó munkadarab modelljén elhelyezett nyúlásmérő segítségével figyelték meg a dinamikus feszültségamplitúdó és a maradó feszültségek közötti mennyiségi kapcsolatot. A nyúlásmérő alkalmazása egy jelentősen könnyebben kivitelezhető hatékonyságmérési módszer a korábban használatos

drill-hole és röntgendiffrakció (XRD) módszereknél. Az eltérés a modell alapján számított és a mért eredmények között 11% volt. [13]

A VSR hátránya, hogy mivel 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. [14]

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 (17. ábra). A rázatás jellemzően rezonanciafrekvencián vagy minimálisan alatta történik, a munkadarabot felhevíteni pedig alacsonyabb hőmérsékletre is elegendő. Gao és munkatársai alumínium ötvözetben végzett kísérletük alapján megállapították, hogy a 2 órás TVSR kezelés 110 perc 175 Celsius fokon történő hűtőtartás, majd 10 perc 175 Celsius fokon végzett rázatás esetén bizonyult a leghatékonyabbnak. Így 81,7%-os feszültségcsökkenést értek el, az azonos paramétereken történő szimpla hűtőtartás közel 64%-os eredményével szemben. Chen és munkatársai kísérletei azt is kimutatták, hogy a TVSR kezelésnek az anyag fázisösszetételére gyakorlatilag minimális hatása van. [15] [16]



17. ábra TVSR berendezés [15]

2. Anyagok és módszerek

2.1. DMLS gép bemutatása

A munkadarab, melyet a kísérlet során vizsgálni fogunk Orlas Creator típusú fémnyomtatóval készült (18. ábra), mely 250W teljesítményű szilárdtest lézerrel rendelkezik.

A DMLS gyártóberendezések piacán az EOS GmbH rendelkezik a legnagyobb részesedéssel (kb. 40%), és ez a cég bocsátotta piacra az első kereskedelmi forgalomban kapható DMLS rendszert, az EOSINT M250-et, melynek utódja az M270. Mindkét berendezés 200 W-os lézerteljesítménnyel bír, a két gép közötti legnagyobb eltérés a lézer típusa: az M250 szén-dioxid-, a modernebb, 2004-ben bemutatott M270 szilárdtest lézert használ, melyek között a lézer hullámhossza a fő különbség. A szén-dioxid lézerek hullámhossza 10,6 mikron, míg a szilárdtest lézereké ennek tizede, 1,06 mikron. Utóbbi azért előnyösebb a technológiára nézve, mert a legtöbb fém abszorpciós képessége a hullámhosszal fordítottan arányos, a jobb abszorpcióval pedig nagyobb olvadási medencét, és így a rétegek közötti jobb kötést lehet elérni azonos lézerteljesítmény mellett. Azonban a szén-dioxid lézer alapú gyártórendszerek is elterjedtek, mivel alacsonyabbak a beszerzési és fenntartási költségeik, valamint nagyobb a hatékonyságuk, különösen magas teljesítményű lézersugár esetén. [4] [17]

Az Orlas Creator típusú gép 20 és 100 mikron közötti, tehát a technológiában célszerűen alkalmazott teljes szemcseméret spektrummal történő nyomtatásra alkalmas. A 17-4PH típusú korrózióálló anyagból való nyomtatáshoz megfelelő paramétereket a gép önmagának képes megválasztani és szabályozni (19. ábra). A munkaterülete 100 mm-es átmérőjű kör alapú és a maximális építési magasság 110 mm, mely az átlagosnál kisebbnek mondható. [18]

A munkadarabok elkészítésekor a technológiai paraméterek a következők voltak:

- a lézer teljesítménye 125 W
- nitrogén védőgáz került alkalmazásra
- a rétegvastagság 25 μm
- 6 m/s szkennelési sebesség
- 1200 mm/s mark speed
- 40 μm lézer átmérő
- 45° rétegenkénti forgatás



18. ábra Orlas Creator DMLS berendezés

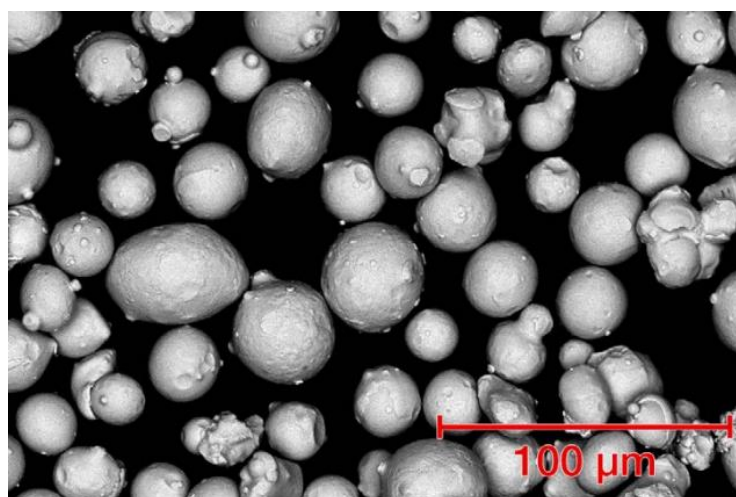


19. ábra Orlas Creator felhasználói környezet

2.2. Az alapanyag bemutatása

A munkadarab alapanyagaként a MetcoAdd 17-4PH-A jelű fémport használtuk (20. ábra), mely a gyártó leírása szerint egy edzhető, magas szilárdságú rozsdamentes acél. Az alapanyag összetétele hasonló az EN.14542 szabványacélhoz, 17% krómot, 4,5% nikkelt és 4% rezet használtak fő ötvözőanyagként. Az anyag elsősorban martenzites fázisszerkezettel rendelkezik. [19]

Az MetcoAdd 17-4PH-A jelű por lényegében megegyezik az EOS gyártó GP1 jelű porával, mely a Contaldi és munkatársai által végzett, az újrahasznosítási ciklusok alapanyagra gyakorolt hatásvizsgálatának egyik alanya volt. A kutatás szerint mivel a DMLS nyomtatás során fel nem használt alapanyag is részt vesz a folyamatban, így a porok kémiai és fizikai tulajdonságai az egyes ciklusok során elkerülhetetlenül változnak. Tehát, csak egy bizonyos fokig használhatóak fel újra anélkül, hogy a késztermék mechanikai jellemzői jelentős romlást mutatnának. A vizsgálat során megállapították, hogy ezek a tulajdonságok 10 felhasználási ciklusból csak az utolsó kettő elérésekor kezdtek rendellenesen leromlani. A kutatás másik alapanyaga, az EOS PH1 mechanikai tulajdonságai még ekkor is jelentősen állandóak voltak, azonban a GP1 porból készült próbatestek folyáshatára és szakítószilárdsága súlyos romlást mutattak. [20]



20. ábra Az anyag morfológiája [19]

A termék adatlapja szerint a legyártott munkadarabok mechanikai tulajdonságai a következőképpen alakulnak: szakadási nyúlás 15%, folyáshatár kb. 1000 MPa, szakítószilárdság kb. 1500 MPa, relatív tömörség nagyobb, mint 99,5%. [21]

2.3. A munkadarabok bemutatása és munkadarab-specifikus hőkezelés

A kísérlet során három elkészült munkadarab elváltozásait vizsgáltuk, melyek mind a fenti alapanyagból készültek, névleges külső- és belső átmérőjük 90 mm, illetve 80 mm, magasságuk 5,5 mm (21. ábra). A továbbiakban az egyes munkadarabokra elkészülésük sorrendje szerint fogunk hivatkozni.

Az elsőként elkészített gyűrű egy év természetes öregedésen ment keresztül, így elvárásaink szerint a belső feszültségekből eredő deformációk kicsik lesznek.

A másodikként elkészített munkadarab abban tér el a többitől, hogy nyomtatási hiba következtében csak 4 mm magasságig lett építve, illetve felső felületén hullám található. Ez a munkadarab nem esett át semmi féle utólagos kezelésen, a nyomtatási folyamat után frissen levágásra került az alaplapról. Az előzetes várakozások alapján ez a munkadarab fog a legnagyobb mértékben deformálódni.

A harmadikként elkészített gyűrű nyomtatás után közvetlenül hőkezelésen esett át, mely után eltávolításra került az alaplapról. Az irodalomkutatás alapján hasonló eredményeket várunk, mint a természetesen relaxálódott gyűrű esetén, vagy annál jobbakat. Eltérés a többi munkadarabhoz képest, hogy ez nagyobb, 4 milliméterrel vastagabb alaplpra lett nyomtatva.



21. ábra A munkadarabok megnevezés szerinti balról jobbra növekvő sorrendben (1;2 és 3)

A munkadarab alaplapról történő leválasztásakor a kettő közötti egyensúlyi állapot felborul, mely a nagy inerciával rendelkező alaplpra nem gyakorol különösebb negatív hatást, de a jelentősen kisebb méretű, eltérő geometriával rendelkező munkadarab maradandó deformációját eredményezi. Tehát leválasztás előtt a lehető legkisebb belső feszültségeket szeretnénk elérni, elsősorban feszültségcsökkentő hőkezelő eljárással.

A hőkezelésnek alávetett munkadarabunkat Prothermo Hofmann LK-2 típusú laboratóriumi kemencében (22. ábra) 600 Celsius fokos hőmérsékleten 24 órán keresztül hőn tartottuk, és kemencével együtt hűtöttük.

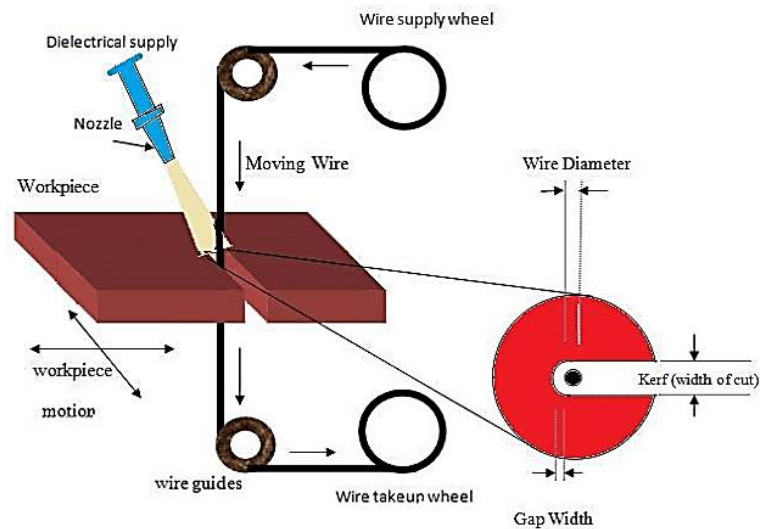


22. ábra Hőkezelő kemence

2.4. Huzalszikra gép bemutatása

A huzalszikra, azaz WEDM elektromos kisülés révén történő anyagleválasztásra alkalmas technológia. Ez az egyik legelterjedtebb nem hagyományos anyagmegmunkáló módszer, mert rendkívül kemény, nehezen megmunkálható alapanyagokból készülő gyártmányok is nagy pontossággal elkészíthetők, mivel a forgácsleválasztás nem mechanikus. A technológia működési elve szerint elsősorban elektromos energiát használ fel, melyet hőenergiává alakít át elektromos kisülések útján az elektróda - mely jellemzően egy vékony réz huzal - és a munkadarab között dielektromos folyadék környezetben. Az elektromos szikrák 8-12 ezer Celsius fokon plazmacsatornát hoznak létre, ami megolvasztja a munkadarab felületét és elpárologtatja az anyagot az adott ponton. A plazmacsatorna megszűnésekor a hőmérséklet hirtelen lecsökken, a dielektromos folyadék beáramlik a plazmacsatornába és törmelékként lemosza az olvadt anyagot a felületről (23. ábra). A huzal elektróda univerzálisan beszerezhető és felhasználható egyes megmunkálási folyamatokhoz, míg a hagyományos tömbszikra (EDM) eljárás esetén egyedi elektródák legyártása szükséges. A technológia további előnyei közé tartozik, hogy a nagy pontosság mellett kiváló felületi minőséget is biztosít, illetve finom részletekkel és bonyolult geometriával rendelkező gyártmányok készítésére is alkalmas. Hátránya a lassú megmunkálási sebesség,

így nagyobb munkadarabok elkészítésekor nem gazdaságos, valamint a magas kezdeti- és fenntartási költségek. [22][24]



23. ábra Huzalszikra gép hatásmechanizmusa [26]

A kísérlet során vizsgált munkadarabot WEDM technológiával (24. ábra) választjuk le az alaplapról, mivel minimális mennyiségű forgácsképződés és nem mechanikus forgácsleválasztás mellett nem, vagy csak elhanyagolható feszültségek ébrednek a munkadarabban, így tudjuk elemezni pusztán a DMLS során keletkezett belső feszültségeket, melyek a jelen tanulmány tárgyát képezik.



24. ábra Huzalszikra gép

2.5. VSR gép bemutatása

A VSR kezelés vibrátora általában egy excentrikus tömegű elektromos motor, amely a feszültségcsökkentést igénylő szerkezethez csatlakozik (25. ábra).

Az excenter sonkák egymáshoz képesti helyzetével állítható a vibrációs kezelés amplitúdója. Ha ezek egymással szemben állnak, akkor a tengely kiegyensúlyozatlansága elméletileg null, mert az excenter tömegek egymással szemben hatnak és kioltják egymást. Maximális rezgés amplitúdó akkor érhető el, ha az excenter sonkák egy irányba állnak, tehát a súlypontjuk egybeesik. Ilyen esetben mindkét sonka tömegközéppontja forgás közben egy irányba téríti ki a tengelyt, így hatásuk összeadódik. A két véghelyzet között a sonkák egymáshoz képesti helyzetének megváltoztatásával tetszőleges amplitúdó érték állítható be. Az amplitúdó nagyságát a centrifugál képlettel lehet kiszámolni.

A rezgés kezelési frekvenciáját a villanymotor fordulatszáma határozza meg. A percenkénti fordulatszámot elosztjuk 60-nal, így megkapjuk a fordulatszám értékét 1/s-ban vagy másnéven Hz-ben. Ez ugyanis esemény/másodpercet jelent. Ezért a tág fordulatszám tartomány és az egyszerű szabályozhatóság fontos, mert ezt munkadarab specifikusan változtatni kell. Ezt például egy frekvencia váltóval és egy 2 pólusú aszinkron motorral el lehet érni.



25. ábra VSR gép [29]

A szakirodalom kutatás során megvizsgáltuk és kielemeztük a VSR technológiát és a legújabb kutatási eredményeket. A technológiát hatékonyan alkalmazzák a hagyományosan gyártott munkadarabok feszültségmentesítésére. Általában a gyártási folyamat után kezelik a munkadarabokat. Ez a fémnyomtatás esetén is lehetséges megoldás lenne, ugyanis a gyártott alkatrészt egy mozgatható építő platformra nyomtatva a kezelés egyszerűen elvégezhető. A nyomtatott alkatrész kezelését még az előtt el kell végezni, hogy azt a platformról levágnánk és így megbontanánk a belső feszültségek egyensúlyát. Erre megfelelő megoldás lenne a mozgatható építő platform.

2.6. 3D szkennerek bemutatása

A deformációk kiértékeléséhez a munkadarabokat GOM ATOS 12 M (26. ábra) típusú szkennerral vettük fel (27. ábra). Erről az eszközről nem állt rendelkezésre nagy mennyiségben hasznosítható információ, a gyártó leírása szerint szkennelésenként 12 millió koordináta pont felvételére képes, mely a gyártó termékpalettáján szereplő többi szkennerekhez képest átlagos érték. [30]

A szkennerek pontosságára az ISO 10360-2 szabvány vonatkozik, illetve jellemezhető az úgynevezett maximálisan megengedett hibának nevezett mennyiség (MPE) két kategóriájával (MPE_E , MPE_P). Ezek szerint a szkennerek az egymástól 0,1 mikrométerre pontokat képesek beszkenyelni, de a valódi pontosságuk még ennél is jobb. [31]



26. ábra GOM ATOS Q [30]

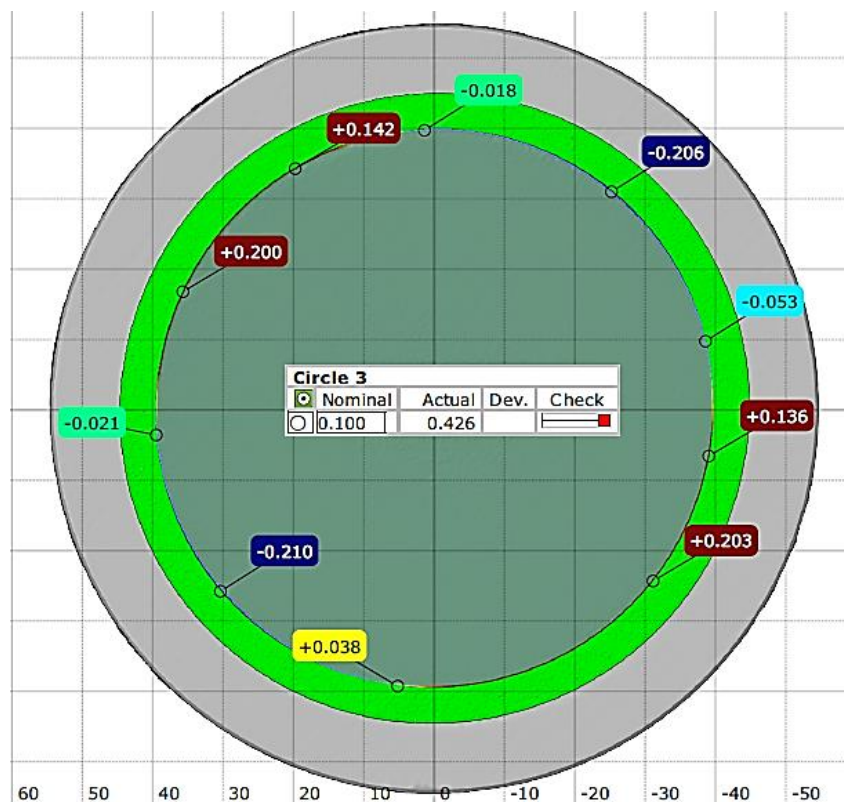


27. ábra A szkennelési folyamat

3. Eredmények

A munkadarabok 3D szkennelése nyomtatás utáni, illetve hőkezelés előtti és alaplapról történő levágás előtti és az utáni állapotokban is megtörtént, így össze tudjuk vetni az egyes beavatkozások munkadarabra gyakorolt hatását. A beszkennelt képeket GOM Inspect szoftverben elemeztük.

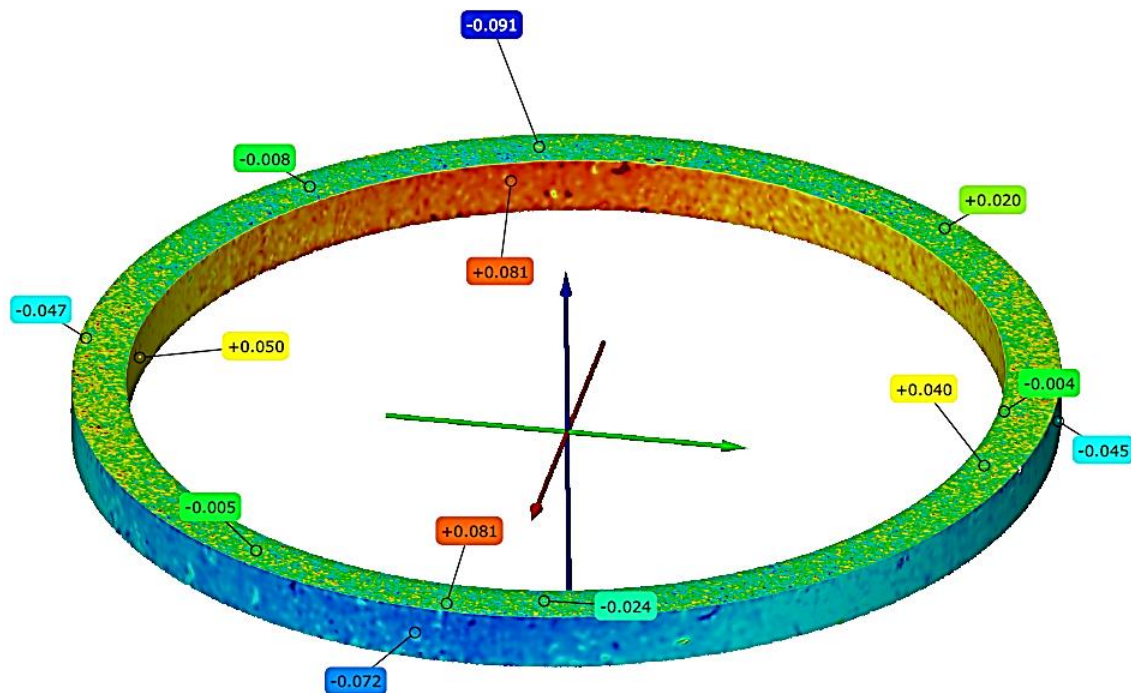
A CAD modell névleges értékeitől való eltérés már a nyomtatás során a DMLS gép pontatlanságából is következik. Ezért munkadarabok tűrését $\pm 0,1$ milliméternek adtuk meg, a nyomtatás pontossága és megfelelősége ehhez képest értendő. A 28. ábrán látható, hogy a példának vett harmadik munkadarab sugara pozitív (az alakzat kontúrján kívül eső), illetve negatív (az alakzat kontúrjától elmaradó) eltérési irányban is maximálisan 0,2 milliméterrel tér el a névleges értéktől, átmérőben tehát 0,4 mm az eltérés. A hibák elhelyezkedésének révén az alapvetően kör alakú munkadarab gyakorlatilag egy szabályos ellipszisre hasonlít, az eltérések irányának alapján négy szegmensre bontható fel úgy, hogy a szemközeti szegmensekben az eltérések iránya megegyezik és értékük is közel azonos.



28. ábra Frissen nyomtatott munkadarab körköröségi hibája hőkezelés előtt

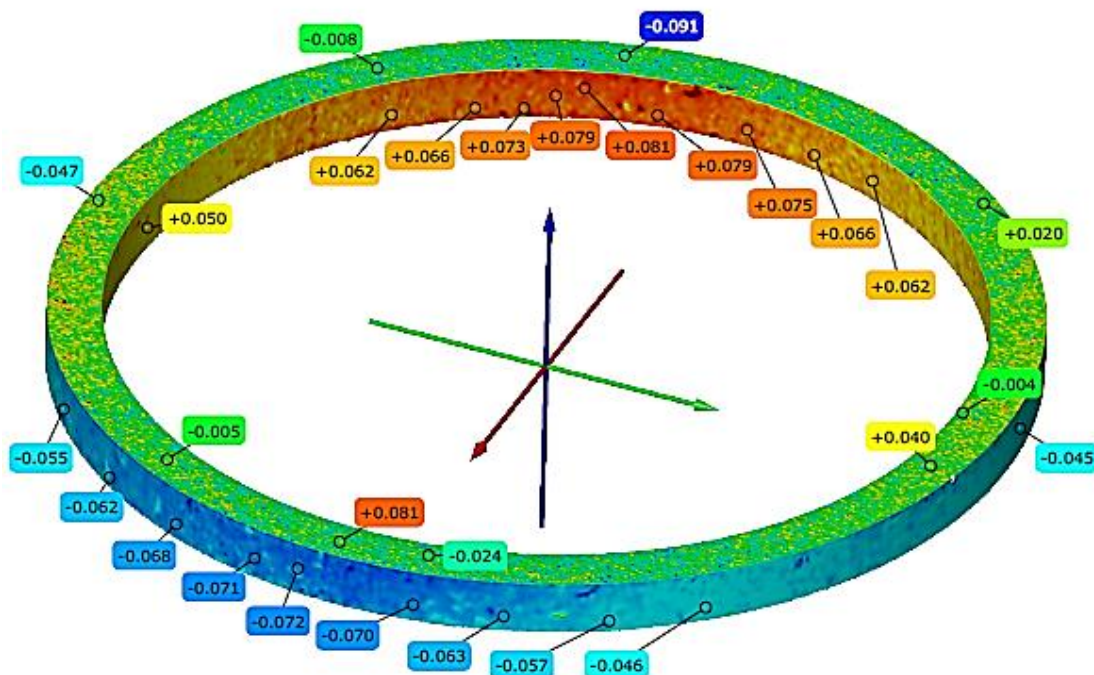
3.1. Az első munkadarab

Az első körgyűrű egy évig tartó, szobahőmérsékleten végbemenő természetes öregedése után a legnagyobb eltérés abszolút értéke a körkörösséget illetően 0,091 mm, tehát megfelel az általunk megadott $\pm 0,1$ mm-es tűrésmezőnek. A gyártmány vízszintes felületén a legnagyobb eltérés abszolút értéke 0,024 mm. (29. ábra). A vízszintes felület minősége köztudottan alacsonyabb, mint a palástfelületé, mivel a célszerű építési orientáció megválasztása miatt az előbbi esett merőleges az építési irányra. [4]



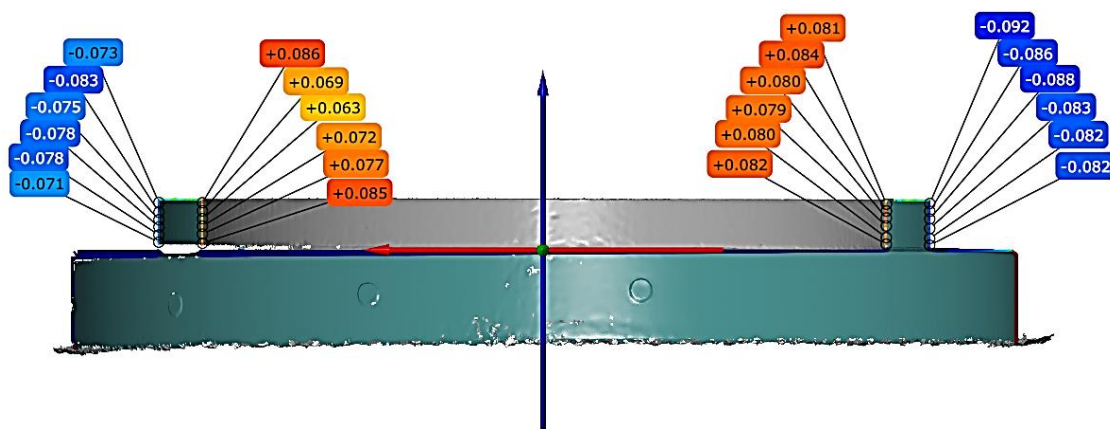
29. ábra Az első munkadarab legnagyobb eltérései

A hibák eloszlásának elemzésekor ugyan azt a következtetést tudjuk levonni, mint a példaként bemutatott munkadarab esetén. Tehát a valóságban ez a gyártmány is egy ellipszisnek felel meg, habár a körtől való eltérések ebben az esetben jóval kisebbek (30. ábra). A vízszintes felület minősége viszonylag egységes, nagyobb eltérések nélkül.



30. ábra Hibák eloszlása az első munkadarabban

A jellegre és mértékre közel azonos eltérések szemközti elhelyezkedése egymáshoz képest a darab függőleges keresztmetszetén is megfigyelhető (31. ábra).



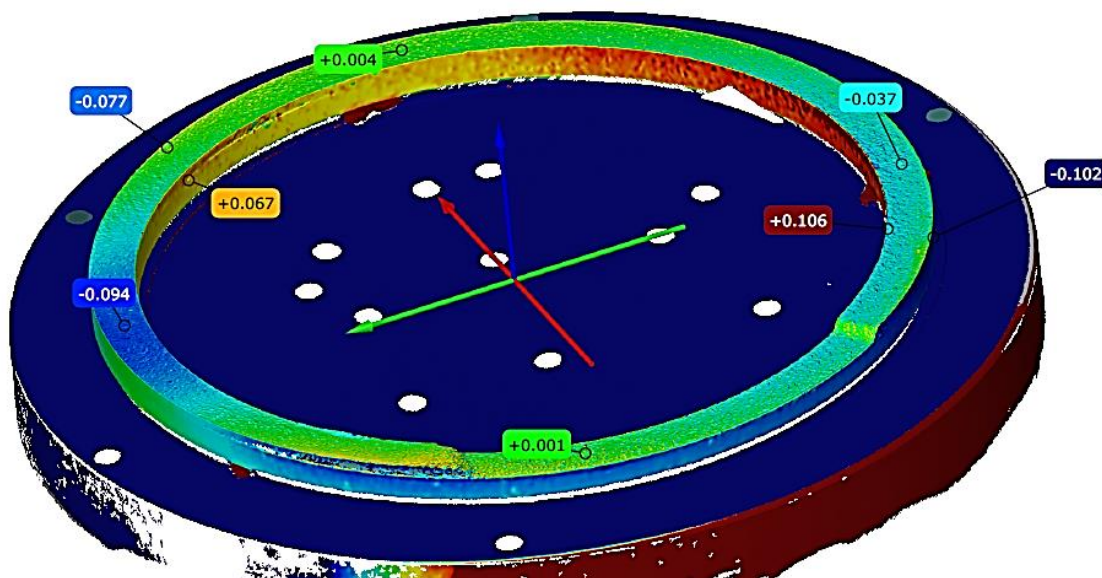
31. ábra Deformációk keresztmetszeti nézetben

Következtetésképpen levonható, hogy a természetes úton öregített munkadarab méretbeli eltérései kicsik, illetve magyarázhatóak a nyomtató és a 3D szkennerek esetleges pontatlanságával. Ezekhez az eltérésekhez a maradó belső feszültségekből eredő deformáció hozzá adódhatott, azonban ez a deformáció kis mértékű. A deformációk elenyésző mivolta arról árulkodik, hogy a belső feszültségek -habár még biztosan jelen vannak az anyagban- az eltelt idő alatt nagy mértékben relaxálódtak, tehát az öregítési folyamat sikeresen végbement.

3.2. A második munkadarab

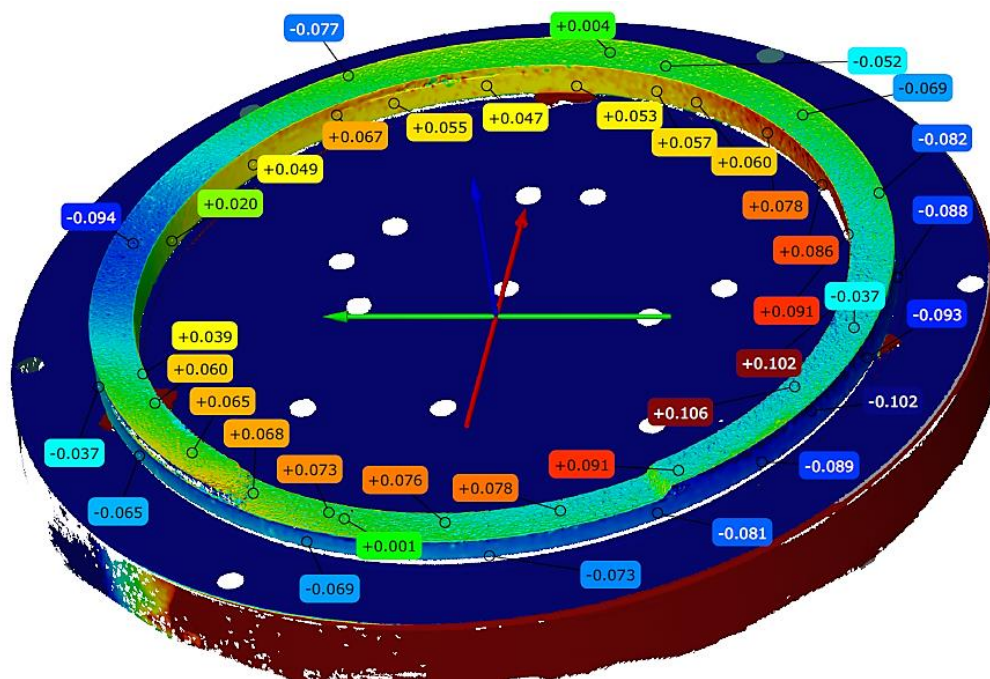
A második munkadarab hibás geometriáját a nyomtató hibája okozta. A gyártási folyamat közben a nyomtató leállt, illetve a fémpor összeolvasztott rétegei elváltak a felületen hibásan legyártott geometria közelében. Azonban úgy véltük, ebben a formában is meg fog felelni a kísérlet elvégzéséhez. Ezt a munkadarabot közvetlenül nyomtatás után eltávolítottuk az alaplapról, így szinterezés során kialakult belső feszültségeknek nem volt idejük relaxálódni. A feszültségek csillapítása utólagos feszültségmentesítő kezelések útján sem valósult meg.

A darab körköröségtől való legnagyobb eltéréseinek abszolút értéke 0,106 mm, mely ugyan nem sokkal, de meghaladja a $\pm 0,1$ mm-es tűrést. A felső felület vízszintestől való legnagyobb eltérése -0,094 mm (32. ábra), mely közel négyszerese az első darab ugyan ezen jellemzőjének abszolút értékéhez képest.



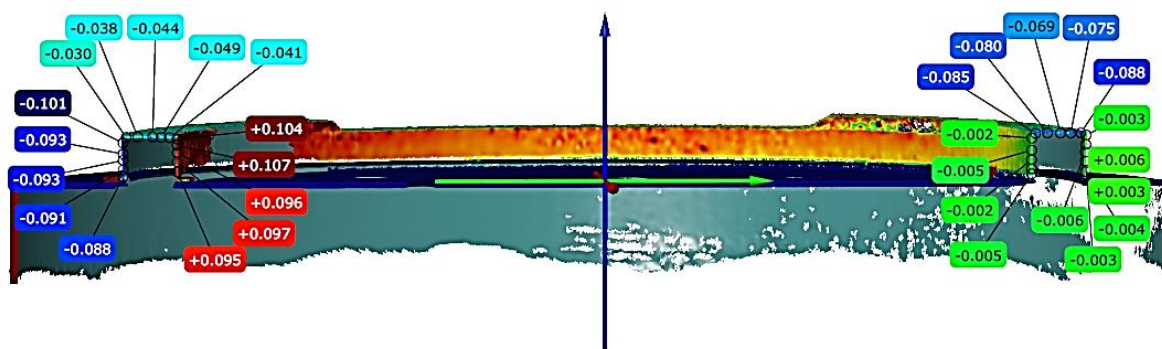
32. ábra A második munkadarab legnagyobb eltérései

A körköröségi hibák eloszlása bár hasonló, mint az előző esetekben a legnagyobb hibával szemben elhelyezkedő szekcióban csak körülbelül fele akkora eltérések mérhetőek, mely eltér az eddigi megszokottaktól. A kör tehát ezen szekció irányába nyúlt meg jelentősen. A vízszintessel párhuzamos felület deformáció némiképp hektikusan oszlanak szét, illetve tág intervallumban változnak (-0,094 millimétertől +0,004 milliméterig), szinte kizárólagosan negatív irányban (33. ábra).



33. ábra Hibák nem jellemző eloszlása

A függőleges keresztmetszeti képen (34. ábra) megfigyelhető, hogy egy bizonyos keresztmetszetben a szemközti hibák teljesen ellentétesek egymáshoz képest. A körnek a külső és belső kontúrján elhelyezkedő deformációk ellentétes előjelűek, és abszolút értékeik is teljesen eltérőek. Az ábra bal oldalán szereplő eltérések nagyok, a jobb oldalán gyakorlatilag elenyészőek.



34. ábra Ellentétes keresztmetszeti értékek

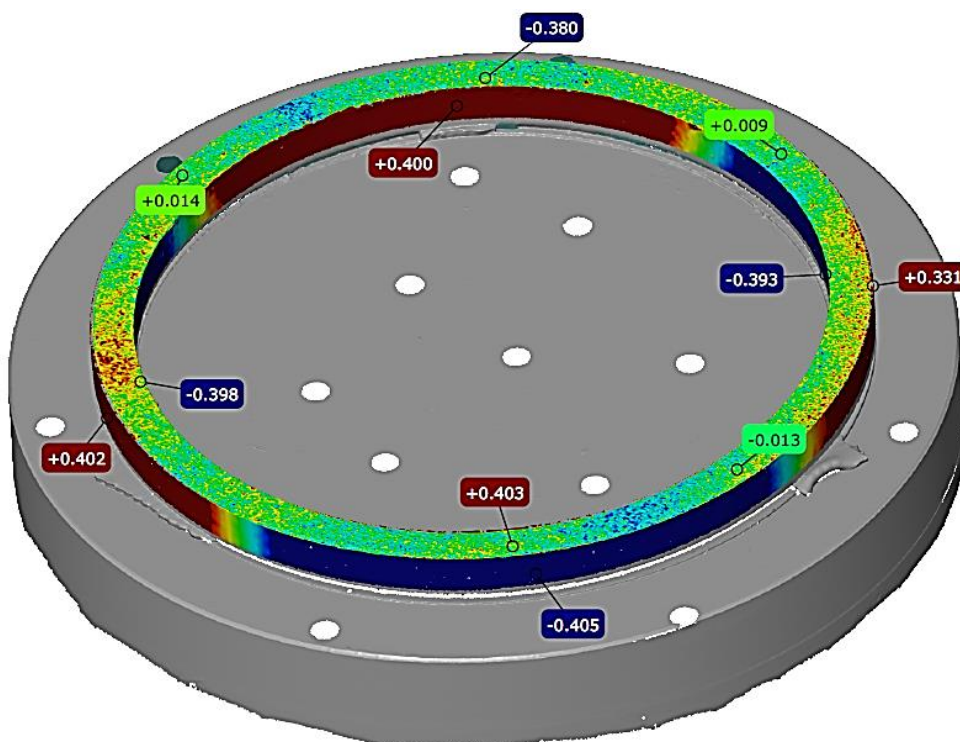
Összességében ezen, kezelés nélküli munkadarab alakhibái túlnyomó többségükben túrára belülré esnek, azonban átlagértékük nagyobb, mint az első darab esetében, valamint sokkal markánsabb a deformációk jelenléte. A körgyűrű szabálytalan, csepp szerű alakot vett fel, illetve a vízszintes felületeinek eltérései is jelentősen romlottak. Utóbbi jelenség visszavezethető az építési orientáció milyenségén kívül a nyomtatás sikertelen kimenetelére is. Azonban a belső feszültségek szintén nagy mértékben jelen vannak az anyagban, ebből

kifolyólag ilyesfajta deformációt okozhatnak. A munkadarab megnyúlása is az intenzív belső feszültségekből eredő deformációval magyarázható.

3.3. A harmadik munkadarab

Az utolsóként elkészített munkadarab nyomtatása során nem léptek fel komplikációk, így a darab elméletben teljesen megegyezik az elsőként legyártott körgyűrűvel. Ahogyan az a példában bemutattuk, a harmadik munkadarab közvetlen nyomtatás utáni legnagyobb eltérésének abszolút értéke nagyobb, mint 0,2 mm, szám szerint 0,210 mm (28. ábra). Ez jóval nagyobb érték, mint a $\pm 0,1$ milliméteres tűrésmező. Ennek a munkadarabnak a szinterezési folyamata ismeretlen okokból jóval pontatlanabban ment végbe, mint az előző esetekben.

Ezután következett a darab hőkezelése, mely után ismételten beszkeneltük elemzés céljából. Hőkezelés után azt tapasztaljuk, hogy a deformációk értékei megkétszereződtek, a legnagyobb eltérés abszolút értéke 0,405 mm. A deformációk értékei több ponton is közelítik a 0,4 millimétert (35. ábra).



35. ábra Hőkezelés utáni legnagyobb eltérések

A hibák jelentős mértékűek, értékeik gyakorlatilag csak az átmeneti pontokon felelnek meg a tűrésmezőnek. Azonban az eltérések eloszlása szabályos, és továbbra is megfelel az ellipszis szekcióinak (36. ábra).

Várakozásainkkal ellentétben hőkezelés után a darab deformációi gyakorlatilag megkétszereződtek, illetve a vízszintes felület is alacsony minőségű lett. Ennek lehetséges magyarázata az, hogy a hőkezelés kezdeti szakasza során az alaplap elvonja a hőt a munkadarabtól, emiatt hőfeszültség alakul ki. Jelen gyártmány eleve nagyobb méretű alaplapra lett nyomtatva, mely alaplapnak így a hőkapacitása is nagyobb, tehát hosszabb ideig tart neki felmelegedni és a hőfeszültségek is hosszabb ideig vannak jelen. Mivel valószínűsíthető, hogy a darab lágyulása hamarabb következik be, mint a belső feszültségek leépülése, a hőfeszültségek hozzáadódnak a még nem csillapított belső feszültségekhez a munkadarabban. Ezáltal az eredetileg is hibás geometriában további, nagy mértékű romlás következik be.

A fenti magyarázat összefüggésbe hozható az alaplap előmelegítésének fontosságával. A nyomtatás megkezdésekor alaplap előmelegítésével kiküszöbölhető az első rétegek összehúzódásából eredő torzulás és a hőmérsékleti gradiensek kialakulása. A hőkezelés megkezdésekor az alaplapnak és a munkadarabnak azonos a kiinduló hőmérséklete, azonban az alaplap munkadarabhoz képesti nagyobb mérete miatt sokkal hosszabb idő kell, hogy elérje a hőkezelés névleges hőmérsékletét, tehát hőgradiensek alakulnak ki. Ez megelőzhető lett volna, ha a körgyűrűt támasztékokkal csatlakoztatjuk az alaplaphoz a nyomtatási folyamat során. [32]

4. Konklúzió

4.1. A nyomtató gyártási pontossága

A tapasztalt méretbeli eltérések nagy része a nyomtató pontatlanságából eredeztethető. Az Orlas Creator DMLS berendezés a gyártói adatlapja szerint 40 mikron átlagos pontossággal dolgozik [18]. Az legpontosabban elkészült munkadarab esetében is körülbelül 90 mikron nagyságú eltéréseket is mérhetünk annak ellenére, hogy a belső feszültségek nagy mértékben relaxálódtak. Az egy évig tartó természetes öregedési folyamatot sikeresnek tekintjük, mert az alaplemezről történő eltávolítás után nem mértünk jelentős geometriai változásokat. Azonban a gyűrű nyomtatása során minden bizonnyal jelen voltak hőgradiensekből származó feszültségek, melyek okozhatták a darab torzulását, még a folyamat közben. Továbbá az is lehetséges, hogy a technológiai paraméterek nem a legkedvezőbbben voltak meghatározva, így nem volt adott az az optimális környezet, melyet az alapanyag igényelt volna, habár az adott alapanyaghoz gyártó által javasolt gyártási paramétereket használtuk. Ezek a paraméterek egybevágtak a DMLS gép szoftverében eltárolt, 17-4PH anyagtípushoz szánt gyártási paraméterekkel.

4.2. A munkadarabok geometriai torzulása

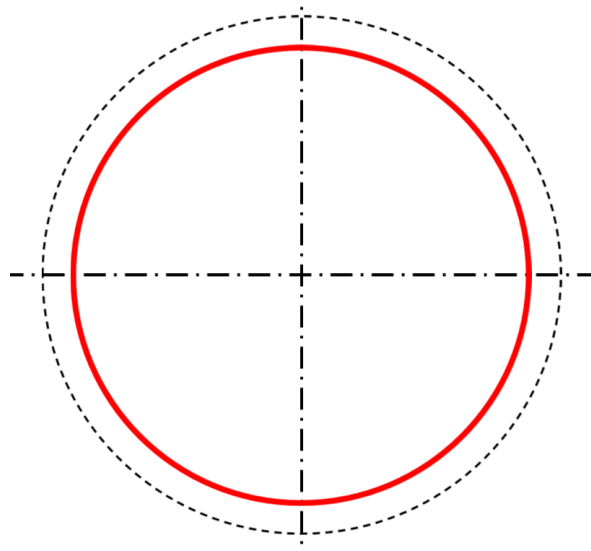
A kész munkadarabok legnagyobb eltéréseinek értékei az 1. táblázatban kerültek összefoglalásra. A táblázat alapján a legjobb értékeket a természetes öregítés után kaptuk, a gyűrű minden mérete megfelel a tűrésnek. Ezeknél valamelyest rosszabb eredmények születtek a kezeletlen munkadarab esetében, valamint itt már mindkét irányba jelentkeznek eltérések, habár az egyes átmérőkön a szekcióidegen eltérések minimálisak. A nagyobb eltérések a hőkezelt munkadarabon jelentek meg. Az eltérések minden felsorolt ponton jelentősen túllépik a hibahatárt, viszont egyes irány párokban gyakorlatilag egyforma mértékűek. Az építési irányra merőleges felület eltérései szórványosak az egyes darabok esetében.

1. táblázat: Legnagyobb eltérések értékei [mm] a névleges mérethez képest

	Külső átmérő		Belső átmérő		Építési irány	
	Pozitív irány	Negatív irány	Pozitív irány	Negatív irány	Pozitív irány	Negatív irány
Öregítés után (1. mdb.)	-	-0,092	+0,086	-	+0,020	-0,024
Kezelés nélkül (2. mdb.)	+0,006	-0,102	+0,107	-0,005	+0,004	-0,094
Hőkezelés után (3. mdb.)	+0,402	-0,405	+0,403	-0,401	+0,080	-0,081

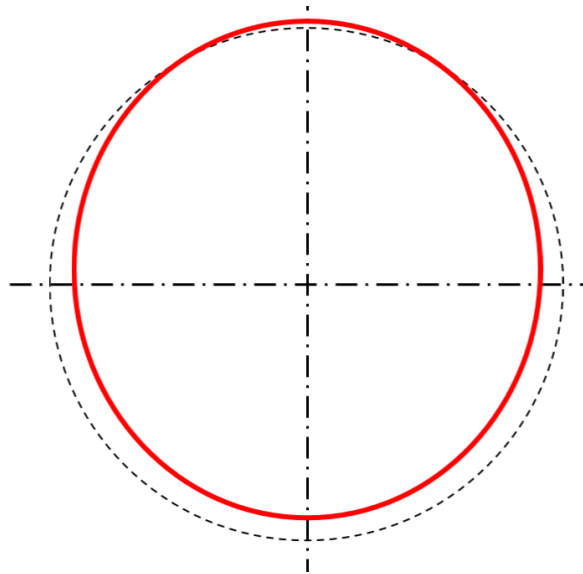
A fenti táblázatban függőlegesen láthatók az egyes munkadarabok. A kör alakú próbatestnek három jellegzetes mérete van, amelyeken a változások is megfigyelhetők. Mérhető geometriai méretei a belső átmérő, a külső átmérő és az építési irányra merőleges felső homloksík (Z-irány). A kör alakú próbatest és alaplemez miatt nehezen azonosíthatók egyértelműen az „X” és „Y” irányok, így ezek helyett pozitív és negatív irányú eltéréseket azonosítunk a táblázatban. A táblázat az egyes irányokban mérhető legnagyobb eltéréseket mutatja mm-ben.

A korábban használt definíció alapján (ami a kör kontúrjától elmarad, az negatív, ha meghaladja azt, akkor az pozitív eltérésnek számít), az öregített munkadarab külső átmérője a vágást követően átlagosan mindenhol zsugorodott (tehát csökkent a külső átmérő abszolút értéke), a belső átmérő változása átlagosan pozitív (tehát szintén csökkent a belső átmérő abszolút értéke). Ezek alapján az öregített munkadarab átmérőben egységesen zsugorodott, nagyságrendileg 0,1 mm-t. Ez a legpontosabb geometria, mely egy zsugorodott szabályos körgyűrűnek felel meg. Ez szemléltetésképpen a 38. ábrán látható. Az építési irányra merőlegesen a szintérkép nem jelez jelentős eltéréseket. DMLS technológiával ezen felületen rosszabb minőség érhető el, ezért nem határozható meg egységes tendencia, azonban az átmérőkkel ellentétben itt nincsenek kiugró foltok a szintérképen (30. ábra).



38. ábra Az első munkadarab jellegzetes alakhibája

A második munkadarab nem kapott semmi féle utókezelést. A nyomtató a gyártási folyamat során leállt és hibás geometriát készített. Ezért a gyűrű magassága elmarad a másik két gyűrűtől, illetve található benne egy lépcső is. Azonban a szkennelés előnye, hogy önmagához hasonlítja a munkadarabokat, és hibás nyomtatás esetén is lehetővé teszi a kiértékelést. A hibás nyomtatás miatt azt gondoltuk, hogy a belső feszültségek jelentős deformációt fognak okozni. Az eredményeink alapján a külső átmérő szinte minden ponton zsugorodott (tehát az abszolút értéke csökkent), kivéve egy zónát, ahol kis mértékben növekedett, azonban ez a növekedés a mérési pontosság határán belül található. A geometria elemzése ebben a zónában egységes törvényszerűséget mutat, ugyanis kimutatható az anyagmegmaradás törvénye a szintérkép alapján (34. ábra). Az építési irányra merőlegesen nagyságrendileg 0,09 mm-es zsugorodás látható, és ebben a zónában a külső átmérő irányában egységes anyagtöbblet mutatható ki. Továbbá a belső átmérő abszolút értéke növekedett. A többi pontban a belső átmérő abszolút értéke azonban csökkent. Ezek alapján, a munkadarab átmérő méretei egységesen változtak, egy kis zóna kivételével mindenhol egységes zsugorodás figyelhető meg. Ez a geometria egy zsugorodott „tojás” formát vesz fel (39. ábra). Az építési irányban a változás szintén hektikus. A szintérkép alapján csak a fent említett zónában látható egyértelmű változás (33. ábra). A nyomtatási hiba révén keletkezett geometriai elváltozás levágás után nem deformálódott, és látszólag nincsen hatása a munkadarabra. Ugyanis a munkadarab felső felületén korábban említett nagy mértékű zsugorodás nem a lépcsős szakasz mentén történt meg, hanem körülbelül 90 fokkal arrébb.



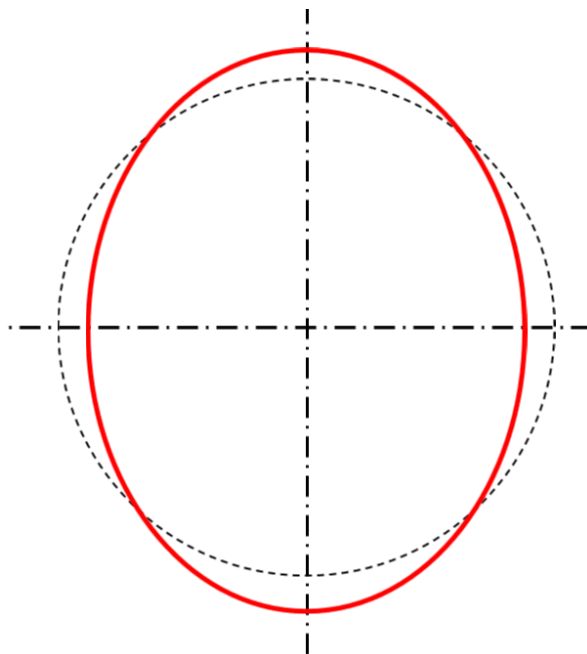
39. ábra A második munkadarab jellegzetes alakhibája

A harmadik munkadarab esetén jelentős eltéréseket tapasztaltunk, ezért összevetettük a CAD modellel a hőkezelés előtti szkennelt geometriát. Az eredmények alapján a kör geometria szinte egy szabályos ellipszis formát vett fel. Az abszolút átmérő csökkenés és az abszolút átmérő növekedés szabályos mintát követ, pontosan egymással szemben helyezkedik el. Az eltérés nagyságrendileg 0,2 mm pozitív és negatív irányban egyaránt (28. ábra). A szkennelési vizsgálat előnye ugyanakkor az, hogy nem abszolút méreteket vizsgál, hanem eltérést, így ezen a munkadarabon is elvégezhető a kiértékelés. A hőkezelés során 24 órán át tartottuk 600 Celsius fokon, majd hagytuk kemencével együtt kihűlni. Azt vártuk, hogy a természetes öregedés során mért változásokhoz hasonló értékeket kapunk., tehát egy egységes zsugorodást, amely megtartja a geometriai jelleget (ebben az esetben az ellipszis formát). Ezzel szemben a méréseink alapján további romlás volt megfigyelhető. A szabályos ellipszis, geometriai torzulása nagyságrendileg 200%-kal tovább romlott. Az eltérések nagysága így 0,4 mm-re nőtt abszolút értékben. A 2. táblázat a harmadik körgyűrű hőkezelés előtti és az utáni állapotait mutatja be. A nyomtatási hibából adódóan a munkadarab kiindulási méretei is jelentősen eltértek a névleges értéktől, azonban hőkezelés után a deformációk méretei 191-198,5 százalékkal nagyobbak lettek.

2. táblázat: A harmadik munkadarab belső átmérőjének deformációja

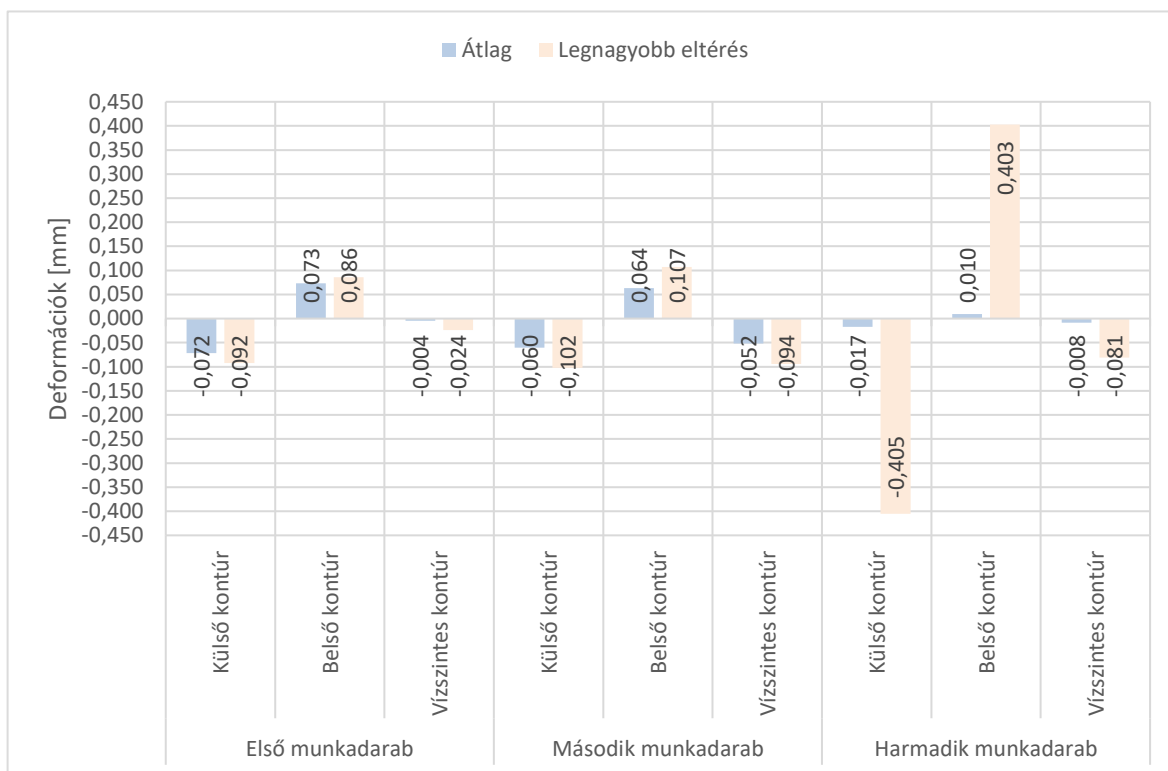
	Eltérések	
	Pozitív irány	Negatív irány
Hőkezelés előtt [mm]	+0,203	-0,210
Hőkezelés után [%]	198,5	190,95

A geometria az ellipszis jelleget megtartotta, de az eltérések maximális és minimális mértékei tovább romlottak (40. ábra). Ez a hőkezelés során a kialakuló lágyulásnak köszönhető, ugyanis a munkadarabban lévő belső feszültségek egyensúlyt tartanak a geometria inerciájával. Azonban a hőmérséklet növekedésével az anyagok szilárdsága csökken, ekkor a belső feszültségek valószínűleg még nem épülnek le, így egy jelleghelyes torzulás következik be. Az építési irányban felfedezhetők minimális pozitív és negatív változási zónák, de ezek nem egységes területek a szintérképen (37. ábra). Ezért a hatásuk egyértelműen nem definiálható.



40. ábra A harmadik munkadarab jellegzetes alakhibája

Az alábbi diagrammon az egyes körgyűrűk deformációjának átlaga és az egyes geometriai jellemzők legnagyobb eltérése hasonlítható össze (38. ábra). Különösen érdemes megfigyelni a harmadik munkadarab mutatószámait: míg az eltérések átlagértékei még a DMLS berendezés tipikus pontosságának is megfelelnek, addig a legnagyobb eltérések elfogadhatatlanul nagyok. A tendencia alapján elmondható, hogy a munkadarabok főleg a kör középpontja felé terjeszkedtek.



41. ábra Egyes darabok deformációinak összehasonlítása

5. Diszkusszió

Mind a három munkadarab ugyan azon a DMLS nyomtató berendezésen készült el, az első munkadarab egy évvel ezelőtt, a második és a harmadik pedig egymás után. A nyomtatási paraméterek nem változtak, ugyanazt a nyomtatási programot használtuk. Az alapanyagaik ugyan attól a gyártótól származnak és egyszerre szereztük be őket. A gyártott alkatrészek geometriája ugyanakkor eltérő jellegű lett, még az utolsó kettőnek is, amelyek egymás után készültek. Ezen eredmények kis nehézséget okoztak az adatok elemzése során, azonban a szkenneléssel ezek valamelyest kikerülhetők, mivel a szkennelvel képesek vagyunk saját magukhoz hasonlítani a munkadarabokat. Az eltérő legyártott geometria a nyomtató gyártási pontatlanságából fakad, ez megakadályozta a három munkadarab érdemleges összehasonlítását. Az okok kivizsgálása a későbbi kísérletek előtt indokolt, ugyanakkor a szakirodalom is megállapítja, hogy az egymás utáni nyomtatások sohasem tökéletesen egyformák.

A hőkezelés hatása nem várt mérési eredményeket okozott. 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. A másik kutatás alapján a hőkezelés paramétereinek meghatározása és folyamata megfelelően lett elvégezve.

A harmadik munkadarab esetén az alaplemez vastagsága nagyobb 4 milliméterrel, mint az első két esetben. Ebből kifolyólag a hőkezelés során a hőelvonó képessége valószínűleg nagyobb, mint a másik két esetben. Ennek a hatása nem tisztázott ebben a kutatásban.

Összefoglalás

Kutatásunkban korrózióálló acél alapanyagú DMLS alkatrészek geometriai deformációit vizsgáltuk. Célunk egy elő kutatás készítése és a technológiához tartozó tapasztalatszerzés volt. Alapvetően a DMLS alkatrészek előállítása egy költséges és időigényes feladat, ezért korlátozott számú alkatrésszel kellett dolgoznunk. A szakirodalomkutatás alapján megtudtuk, hogy még az egymást követően gyártott munkadarabok között is lehetnek különbségek. Ezért olyan mérési és kiértékelési formát választottunk, ami nem elsősorban egymáshoz, hanem önmagához képes hasonlítani a munkadarabokat. Erre nagyszerű választásnak bizonyult a 3D szkennelés. A GOM ATOS Q optikai szkennelssel kikerülhet a nyomtatási hibák eredményt befolyásoló hatásai, ugyanis a hibás alape geometria változásait önmagához tudja viszonyítani, mivel az eltéréseket méri, nem pedig az abszolút méreteket. Így kevesebb számú mintával is lehetséges dolgozni, ha a változásokat szeretnénk megfigyelni.

A kutatás során alapvetően a nyomtatás saját pontosságát és a különböző utókezelések hatását szerettük volna megfigyelni és összehasonlítani a kezelés nélküli állapottal. Összehasonlítottuk a természetes öregítés hatását a feszültségmentesítő hőkezeléssel és az utókezelés nélküli állapottal.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a legkevesebb deformáció és zsugorodás a természetes öregítésen átesett munkadarabnál következett be. A zsugorodás nagysága egységesen 0,1 mm, ami szinte elhanyagolható érték. A geometriai alakpontosság megfelelő, a levágott geometria egy zsugorodott körgyűrű.

A második, lépcső alakú hibával gyártott munkadarab nem esett át utókezelésen, a geometriája levágás után egy „tojás” alakot vett fel, egy zóna kivételével mindenhol zsugorodott. A sajátos hibájának nem volt hatása a végső torzulásra.

A harmadik esetben a munkadarab ellipszis hibával készült, amelyen a hőkezelés egyik irányban 198,5 %-ot, másik irányban 190,95%-ot rontott. 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.

Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a körgyűrűk inerciája meglehetősen nagy és képes jól ellenállni a gyártás során kialakuló belső feszültségek hatásainak. Ez még a lépcsőhibával gyártott munkadarab esetén is igaz. Jelentősebb deformációk kimutatásához tehát egy új és gyengébb munkadarab geometriát kell meghatározni.

Summary (idegen nyelvű összefoglalás)

In our research, we investigated the geometric deformations of corrosion-resistant steel-based DMLS components. Our goal was to prepare a preliminary study and to gain experience in the technology. Basically, the production of DMLS parts is a costly and time-consuming task, so we had to work with a limited number of parts. Based on the literature research, we learned that there can be differences even between parts produced in subsequent runs. We therefore chose a form of measurement and evaluation that could compare the workpieces not primarily to each other, but to themselves. 3D scanning proved to be a great choice for this. With the GOM ATOS Q optical scanner, the effects of printing errors on the result can be avoided, because it can compare the changes in the defective base geometry to itself, as it measures the deviations, not the absolute dimensions. It is therefore possible to work with a smaller number of samples to observe the differences.

In this research, we wanted to observe the accuracy of the printing itself and the effect of different post-treatments and compare it with the untreated condition. We compared the effect of natural ageing with and without stress relief heat treatment.

The results show that the workpiece that has undergone natural ageing has the least deformation and shrinkage. The amount of shrinkage is generally 0.1 mm, which is almost negligible. The geometrical accuracy is good, the cut geometry is a shrunken circular ring.

The second workpiece with a step-shaped defect has not undergone any post-processing, its geometry after cutting has taken on an "egg" shape, with shrinkage in all but one zone. Its specific defect had no effect on the final distortion.

In the third case, the workpiece was produced with an ellipse defect, which was distorted by the heat treatment by 198.5% in one direction and 190.95% in the other. These results show that the heat treatment had a negative effect on the final result, due to the presence of internal stresses in the material. With these stresses, the inertia of the material can be kept in balance, but heat treatment is likely to soften the material before the stresses are relieved, and therefore can further deform the geometry.

The results show that the inertia of the rings is quite high and can withstand the effects of internal stresses during manufacturing. This is true even in the case of a workpiece manufactured with a step shaped defect. Therefore, to detect significant deformations, a new and weaker workpiece geometry must be determined.

Ábrajegyzék

1. ábra: A DMLS mechanizmus bemutatása	7
2. ábra: Belső feszültségekből eredő repedés	9
3. ábra: Példák makro- és mikrofeszültségek okozóira	10
4. ábra: Az anyagdeformáció terjedése.....	11
5. ábra: Pórusok az anyagban	11
6. ábra: Klaszter képződése	12
7. ábra: STL szeletelés részletessége	13
8. ábra: Támasztó szerkezet a munkadarabon (bal), támaszték belső kialakítása (jobb)	14
9. ábra: Rétegenként 67 fokkal elforgatott pásztázási irány	14
10. ábra: Island, másnéven "sakktábla" módszer	15
42. ábra: Skin-core módszer	15
43. ábra: Építési orientáció megválasztása	16
44. ábra: Feszültségvizsgálat Simufact szoftverben	17
45. ábra: Szemcseszórás	19
46. ábra: Görgőzés.....	19
47. ábra: HIP berendezés	20
48. ábra: TVSR berendezés	21
18. ábra: Orlas Creator DMLS berendezés.....	23
19. ábra: Orlas Creator felhasználói környezet	23
49. ábra: Az anyag morfológiája	24
21. ábra: A munkadarabok megnevezés szerinti balról jobbra növekvő sorrendben (1;2 és 3)	25
22. ábra: Hőkezelő kemence	26
50. ábra: Huzalszikra gép hatásmechanizmusa	27
24. ábra: Huzalszikra gép	27
51. ábra: VSR gép.....	28
52. ábra: GOM ATOS Q	29
27. ábra: A szkennelési folyamat.....	29
28. ábra: Frissen nyomtatott munkadarab körköröségi hibája hőkezelés előtt	30
29. ábra: Az első munkadarab legnagyobb eltérései	31
30. ábra: Hibák eloszlása az első munkadarabban	32
31. ábra: Deformációk keresztmetszeti nézetben	32
32. ábra: A második munkadarab legnagyobb eltérései	33

33. ábra: Hibák nem jellemző eloszlása	34
34. ábra: Ellentétes keresztmetszeti értékek	34
35. ábra: Hőkezelés utáni legnagyobb eltérések	35
36. ábra: A hőkezelt gyűrű hibáinak eloszlása	36
37. ábra: Körköröségi és felületi hibák hőkezelés után	36
38. ábra: Az első munkadarab jellegzetes alakhibája	40
39. ábra: A második munkadarab jellegzetes alakhibája	41
40. ábra: A harmadik munkadarab jellegzetes alakhibája	42
41. ábra: Egyes darabok deformációinak összehasonlítása	43

Irodalomjegyzék

- [1] Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D metal printing technology. IFAC PapersOnLine, 49(29), 103-110.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Hatos, I., Hargitai, H., & Kovacs, J. G. (2015). Műanyag fröccsöntő szerszámberendezések szinterelési technológiája.
- [5] Lenkeyné B. Gy. – Dr. Száva Sz. – Rózsahegyi P. – Bézi Z. – Baptisza B. – Kelenföldi B. – Matusz P.: 5. Technológiai maradó feszültségek modellezése és azok hatása a járműipari szerkezetek integritására, Miskolc, 2013.
- [6] Kemerling, B., Lippold, J. C., Fancher, C. M., & Bunn, J. (2018). Residual stress evaluation of components produced via direct metal laser sintering. *Welding in the World*, 62, 663-674.
- [7] Çelebi, A., & Appavuravther, E. Z. (2018). Analyzing the effect of voxel mesh and surface mesh application on residual stress by simufact additive software. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 930-940.
- [8] 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>
- [9] Fenyvessy T. – Fuchs R. – Plósz A.: Műszaki táblázatok, Budapest, 2007.
- [10] 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.
- [11] Riemer, A., Leuders, S., Thöne, M., Richard, H. A., Tröster, T., & Niendorf, T. (2014). On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. *Engineering Fracture Mechanics*, 120, 15-25.
- [12] Zentay, P. Z., Hegedűs, E., & Végvári, Z. (2023). A 3D-s nyomtatás és katonai alkalmazásának lehetőségei III. rész. *Haditechnika*, 57(2), 57-62.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Lv, T., & Zhang, Y. (2015). A combined method of thermal and vibratory stress relief. *Journal of Vibroengineering*, 17(6), 2837-2845.

- [16] 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.
- [17] Santos, E. C., Shiomi, M., Osakada, K., & Laoui, T. (2006). Rapid manufacturing of metal components by laser forming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12-13), 1459-1468.
- [18] Orlas Creator termék adatlap
Elektronikus forrás: <https://www.anima.eu/content/download/0000097.pdf>
Megtekintés dátuma 2024. 11. 01.
- [19] MetcoAdd 17-4PH-A termék adatlap
Elektronikus forrás:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjYt7TBpruJAXUgv0HHXX9CEcQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.oerlikon.com%2Fecoma%2Ffiles%2FDSMA-0004.0_HighStrengthSS_AM.pdf%3Fdownload%3D1&usg=AOvVaw1L8eHXXIO_n-OxpKqHZj2Zf&opi=89978449
Megtekintés dátuma 2024. 11. 01.
- [20] Contaldi, V., Del Re, F., Palumbo, B., Squillace, A., Corrado, P., & Di Petta, P. (2019). Mechanical characterisation of stainless steel parts produced by direct metal laser sintering with virgin and reused powder. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105, 3337-3351.
- [21] MetcoAdd 17-4PH-A gyártói weblap
Elektronikus forrás: <https://mymetco-europe.oerlikon.com/en-us/product/metcoadd174pha>
Megtekintés dátuma 2024. 11. 01.
- [22] Ho, K. H., & Newman, S. T. (2003). State of the art electrical discharge machining (EDM). *International journal of machine tools and manufacture*, 43(13), 1287-1300.
- [23] 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.
- [24] Ho, K. H., Newman, S. T., Rahimifard, S., & Allen, R. D. (2004). State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44(12-13), 1247-1259.
- [25] MFG-246 Application Of Taguchi Design Method To Optimize The Wire Electrical Discharge Machining Parameters - Scientific Figure on ResearchGate.
Elektromos forrás: https://www.researchgate.net/figure/Working-Principle-of-WEDM_fig1_342146546
Megtekintés dátuma: 2024.11.06.
- [26] Elektromos forrás: <https://i.materialise.com/blog/en/how-to-choose-the-perfect-file-resolution-when-turning-your-3d-model-into-a-3d-print/>
Megtekintés dátuma: 2024.11.10.
- [27] Elektromos forrás:
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.youtube.com%2F>

[watch%3Fv%3DI9n6AheyI2E&psig=AOvVaw0ramTGKxFqq_7glkS0Y9-2&ust=1731346211399000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBQ QjRxqFwoTCLCgybSI0okDFQAAAAAdAAAAABAY](https://www.royce.ac.uk/equipment-and-facilities/hot-isostatic-press/)

Megtekintés dátuma: 2024.11.10.

- [28] Elektronikus forrás: <https://www.royce.ac.uk/equipment-and-facilities/hot-isostatic-press/>

Megtekintés dátuma: 2024.11.10.

- [29] Elektronikus forrás: <https://www.indiamart.com/sinexprimemovers/foot-mounted-vibration-motor.html>

Megtekintés dátuma: 2024.11.10.

- [30] GOM 3D szkennelő gyártói lapja

Elektronikus forrás: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-scanning/atos/atos-q.html#technical-data>

Megtekintés dátuma: 2024.11.13.

- [31] Yahya, A. E. M., & Halaj, M. (2013). Evaluation of CMM accuracy by using capability indexes. *Applied Mechanics and Materials*, 281, 282-286.

- [32] Buchbinder, D., Meiners, W., Pirch, N., Wissenbach, K., & Schrage, J. (2014). Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting. *Journal of laser applications*, 26(1).