

3D fémnyomtatással gyártott alkatrészek feszültségállapotának vizsgálata

Stress state analysis of 3D printed
metal parts

Szigeti Botond
OKS46S

Szabó Valentin Endre, tanársegéd

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

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.”

Külön köszönjük a mérések elvégzésének a támogatását a 3D Technology Kft.-nek és Szeleczkei Csabának.

Tartalomjegyzék

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	6
1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTŐ	9
1.1. A 3D FÉMNYOMTATÁS FEJLŐDÉSTÖRTÉNETE ÉS A KÜLÖNBÖZŐ TECHNOLÓGIÁK BEMUTATÁSA	9
1.1.1. Járműipari alkalmazások	12
1.2. DIRECT METAL LASER SINTERING (DMLS) ISMERTETÉSE	13
1.2.1. Újrahasznosítási lehetőségek	16
1.3. NYOMTATÁSI HIBALEHETŐSÉGEK	16
1.4. BELSŐ FESZÜLTSEGEK TÍPUSAI ÉS TULAJDONSÁGAI	20
1.4.1. Belső feszültségek kialakulása és meghatározási módszerek	21
1.4.2. A feszültségek hatása, repedések kialakulása	23
1.5. A NYOMTATÁSI HIBÁK MEGOLDÁSI LEHETŐSÉGEI	24
1.5.1. Nyomtatási elrendezés	24
1.6. UTÓLAGOS FESZÜLTSEGMENTESÍTŐ HŐKEZELÉS	25
1.6.1. Előmelegítés	26
1.6.2. Természetes öregítés	26
1.7. ALTERNATÍV FESZÜLTSEG CSÖKKENTŐ LEHETŐSÉGEK	27
1.7.1. Szemcseszórás	27
1.8. VIBRÁCIÓS FESZÜLTSEGMENTESÍTÉS	28
1.9. TVSR	32
2. ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK BEMUTATÁSA	34
2.1. EOSINT M270 FÉMNYOMTATÓ GÉP BEMUTATÁSA	34
2.2. ALAPANYAG (Fe-4542; 1.4542) BEMUTATÁSA	35
2.3. HŐKEZELÉS BEMUTATÁSA	36
2.4. HUZALSZIKRA GÉP BEMUTATÁSA	37
2.5. 3D SZKENNER BEMUTATÁSA (GOM ATOS Q 12M)	38
2.6. KUTATÁSI MÓDSZER BEMUTATÁSA	40
3. KÍSÉRLETI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA	42
3.1. A MÉRÉSI PONTOK BEMUTATÁSA	42
3.2. ÖSSZEVETÉS CAD MODELLEL:	43
3.2.1. Anyagtöbblet a kontúron	43
3.2.2. Támaszeltolódás hiba	45
3.3. MUNKADARABOK DEFORMÁCIÓ VIZSGÁLATAI	47
3.3.1. Az első bevágás hatása	47
3.3.2. A hőkezelés hatása a bevágott oldalakra	48
3.3.3. A hőkezelést követő bevágás hatása	49
4. KONKLÚZIÓ	51
4.1. AZ ALKATRÉSZ GEOMETRIAI PONTOSSÁGA	51
4.2. GEOMETRIAI DEFORMÁCIÓ MÉRTÉKÉNEK ÉRTÉKELÉSE	53
5. DISZKUSSZIÓ	56
ÖSSZEFOGLALÁS	57
SUMMARY	58
ÁBRAJEGYZÉK	59

Bevezetés

A 3D fémnyomtatás, mint additív gyártási technológia, az ipari gyártás egyik legdinamikusabban fejlődő területe, amely lehetővé teszi bonyolult geometriájú és egyedi fémalkatrészek gyors és hatékony előállítását. Azonban az additív gyártás során, különösen a direkt fém lézeres szinterezés (DMLS) és a szelektív lézeres olvasztás (SLM) eljárások esetében, a rétegezett felépítés és a lézeres hevítés miatt jelentős belső feszültségek keletkezhetnek az alkatrészekben. Ezek a maradó feszültségek jelentős hatással lehetnek az alkatrészek mechanikai tulajdonságaira, tartósságára és méretpontosságára, ezért pontos vizsgálatuk és megfelelő hőkezelési eljárásokkal történő csökkentésük kulcsfontosságú az ipari alkalmazások szempontjából.

A belső feszültségek jelenléte fontos szerepet játszik az additív gyártású alkatrészek szerkezeti integritásában, mivel ezek a feszültségek nemcsak a nyomtatási folyamat során alakulnak ki, hanem az anyag hűlése és a geometria komplexitása is befolyásolja azokat. A feszültségállapot megfelelő értékeléséhez olyan vizsgálati módszerek szükségesek, amelyek lehetővé teszik az alkatrészek különböző pontjainak pontos mérését, a keletkező maradó feszültségek eloszlásának feltérképezését, valamint azok hatásának elemzését a végső anyagtulajdonságokra. A hőkezelés és egyéb utófeldolgozási eljárások hatékonyan csökkenthetik a feszültségeket, és biztosíthatják az alkatrészek kívánt mechanikai stabilitását.

A szakdolgozat célja, hogy részletesen vizsgálja a 3D fémnyomtatással készült alkatrészek feszültségállapotát a deformációk alapján, feltárja a nyomtatási paraméterek és a belső feszültségek közötti összefüggéseket, valamint bemutassa a feszültségcsökkentésre alkalmazott hőkezelési eljárások hatékonyságát. Ez a kutatás hozzájárul a 3D fémnyomtatási technológia alkalmazási lehetőségeinek bővítéséhez, különösen olyan ipari területeken, ahol a tömeg optimalizált alkatrészek alkalmazása elengedhetetlen.

Kutatásunk célja a tapasztalatszerzés, a DMLS alkatrészek gyártásában és az optikai szkennelésen alapú deformáció vizsgálatban és adatelemzésben.

1. Szakirodalmi áttekintő

1.1. A 3D fémnyomtatás fejlődéstörténete és a különböző technológiák bemutatása

A 3D fémnyomtatás története az 1970-as években indult, amikor az első 3D nyomtatási technológiák megjelentek. (Az egyik legkorábbi technológia a sztereó litográfia volt, amely műanyagok nyomtatására szolgált, de a fémnyomtatás iránti igény hamar felmerült.) A 90-es évek közepére megjelentek az első fém alapú technikák, például a szelektív lézeres szinterezés (SLS, Selective Laser Sintering) és a direkt fém lézeres szinterezés (DMLS, Direct Metal Laser Sintering), amelyek lehetővé tették a fémek pontos rétegekben történő nyomtatását. 1995-ben jelent meg az első kereskedelmi forgalomban kerülő DMLS rendszer, ez a direkt eljárás kötőanyag nélküli fémporokat használt. A bronz-nikkel alapú porokkal dolgozó, CO₂ lézerrel felszerelt gépek 100 mikron rétegvastagsággal dolgoztak, majd 1999-ben jelentek meg az első vas alapú fémport használó eszközök, amelyek kezdetben 50 mikron rétegvastagsággal, a későbbiekben pedig 20 mikron építési rétegvastagsággal üzemeltek. [1]

Az elmúlt években jelentősen megnőtt az érdeklődés a fémalkatrészek additív gyártására szolgáló technológiák iránt. Ez a tendencia az úgynevezett gyors prototípusgyártási (RP) technológiák felemelkedéséből indult ki az 1990-es években, és az a jövőkép hajtotta, hogy az additív gyártás ugyanolyan elterjedt és elfogadottá válhat, mint a mai anyageltávolításon alapuló gyártási módszerek. Különösen figyelemre méltó, hogy az elmúlt időszakban elért óriási fejlődés hatására több vállalat is elkezdte fejleszteni a direkt fémlézeres szinterezés (DMLS) módszerének különböző változatait. Ezek a technológiák alapvetően hasonló célokat szolgálnak, és ugyanazon alapelvet követik, de a részletekben jelentősen eltérnek. [2]

Az elmúlt évtizedekben a fémnyomtatás jelentős fejlődésen ment keresztül, különösen az autóipar, repülőgépgyártás és egészségügy területén, ahol nagy pontosságú, egyedi alkatrészek előállítására van szükség. Ma már számos különböző fémötvözetet használnak, és a technológia folyamatosan fejlődik, egyre nagyobb méretű és bonyolultabb szerkezetek gyártását téve lehetővé.

Mivel az ismertett technológiacsalád a világ különböző tájain párhuzamosan fejlődött egymással, ezért nem alakult ki egységesen elfogadott nevezéktan a különböző eljárásokra vonatkozóan. Ezzel szemben minden fejlesztő és technológiai beszállító hajlamos volt saját

elnevezéseket alkotni megkülönböztetés céljából, még akkor is, ha lényegében azonos technológiákra utalnak. Ennek eredményeképpen a földrajzi elhelyezkedéstől függően használják az „SLM” kifejezést, mely Európában, míg a „DMLS” az Amerikai Egyesült Államokban terjedt el. Napjainkra a két kifejezés szinonimaként van jelen a köztudatban az eljárás elterjedésének köszönhetően. [3] [4]

A fém additív gyártási technológiák két nagy fő csoportra oszthatók – porágyfúzió alapú technológiák (PBF, Powder Bed Fusion) és irányított energia leválasztás (DED, Directed Energy Deposition) alapú technológiák.

A porágy alapú (PBF) technológiák során hőenergia alkalmazásával szelektíven olvasztják meg a porágy bizonyos részeit. A legjelentősebb eljárások, amelyek ide tartoznak a szelektív lézeres szinterezés (SLS) és olvasztás (SLM), a közvetlen fém lézerszinterezés (DMLS), a lézer cusing, illetve az elektronsugaras olvasztás (EBM) [7]

Ezek közül a DMLS egy olyan gyors prototípus gyártási (RP) eljárás, amelynek során a fémporok összeolvasztásához nagy teljesítményű lézersugarat alkalmaznak. Ezzel a technikával nagy sűrűség érhető el, de sok esetben további utókezelést igényel, többek között a gyengébb felületi minőség miatt. Habár a köztudatban különféle elnevezések is használatosak (lézerszinterezés), ezek alapvetően ugyanazt a technológia eljárást jelentik. A DMLS eljárás hasonló a szelektív lézerszinterezéshez (SLS), azonban az SLS polimereket vagy bevonatos fémporokat alkalmaz, míg a DMLS előötvözött, bevonat nélküli fémporokkal dolgozik (Gratton, 2015). Az elektronsugaras olvasztás során az alkatrész elkészítése vákuumban történik, ahol a felhevített porágyat egy nagyenergiájú elektronsugárral olvasztják össze rétegről rétegre többek között úgy, ahogyan azt az elektronsugaras hegesztésnél vagy az elektronmikroszkópos eljárásoknál teszik. [7]

A DED-alapú technológiák során az anyagok (fémpor vagy huzal formájában) a lerakódás során történő megolvasztására használják a fókuszált hőenergiát. Néhány népszerű AM eljárás a DED- alapú technológiák közül a lézeres hálólakítás (LENS, Laser Engineered Net Shaping), a közvetlen fémleválasztás (DMD, Direct Metal Deposition), az elektronsugaras szabadformagyártás (DBFFF, Direct Build Fused Filament Fabrication).

A DMD kiválóan alkalmazható a már elkészült szerszámok javítására, nagyméretű alkatrészek funkcióinak hozzáadására vagy új alkatrészek gyártására egyaránt. Ez a technológia egy robotkarra felerősített lézerrel összekapcsolt porbefecskendező rendszeren alapul. A DBFFF a leterített fémporréteg megolvasztásához egy fókuszált elektronsugarat használ vákuum környezetben. Az gyors plazma leválasztási technológia (RPD) során

argonplazmát használva egy fémhuzalt megolvasztanak és az argongáz a fém olvadék cseppeket az alaplemez felé hajtja, ahol az alkatrész rétegről rétegre jön létre.

A kisebb pontosság és a szükséges utófeldolgozás miatt az irányított energetikai leválasztás a fém AM technológia esetében kevésbé elterjedt a teljes alkatrész gyártását tekintve, ezzel szemben a DED-nek a javítási alkalmazásokban régóta nagy szerepet vállalnak. Ezen a területen a legelterjedtebb technológiák a többek között a hideggázos permetezés, a nagy sebességű oxigén üzemanyaggal történő permetezés és lézeres fémleválasztás. [7]

Az additív gyártástechnológiákat 3D nyomtatásnak és gyors prototípus gyártásnak is nevezik. A 3D fémnyomtatás, mint a modern gyártástechnológia egyik leginnovatívabb ága, forradalmasítja a hagyományos ipari gyártási folyamatokat. Ez a technológia rétegenként építi fel az anyagot háromdimenziós modelladatok alapján, CAD rendszerek segítségével. Így lehetővé teszi komplex, egyedi és nagy pontosságú fémalkatrészek előállítását szerszámok felhasználása nélkül, minimalizálva az anyagpazarlást, melyeket hagyományos módszerekkel nehéz vagy lehetetlen lenne elkészíteni. A közvetlen additív gyártási eljárások (például DMLS, SLM) olyan fémporokat alkalmaznak, amelyek nem tartalmaznak kötőanyagot. Napjainkban a 20 µm-es rétegvastagságú nyomtatási technológia is elérhető. 2004-ben került piacra az EOSINT M270 típusú nyomtató, amely már szilárdtest lézerrel volt felszerelve. Jelenleg több gyártó is kínál különböző elnevezésű, de hasonló műszaki tartalommal rendelkező, közvetlen nyomtatási technológiákat, mint például a DMLS, SLM, DMLM és Laser CUSING. Ezek a rendszerek a fémnyomtatás területén hasonló elveken alapulnak, és mindegyikük lehetővé teszi a precíziós fém alkatrészek rétegről rétegre történő előállítását.

Az AM egyik kulcsfontosságú eljárása a szelektív lézerszinterezés (SLS), ahol egy lézersugár szelektíven szinterezi össze a finom por részecskéket rétegenként. Ez technológia jövőben fontos lehet a járműiparban, mert lehetővé teszi a könnyű, mégis szilárd fém alkatrészek gazdaságos előállítását, javítva a járművek teljesítményét és energiahatékonyságát. Azonban ezek a technológiák nem mentesek a kihívásoktól. A nyomtatás során fellépő hibák, mint például a porozitás, a geometriai pontatlanságok és a belső feszültségek, komoly problémákat jelenthetnek a végtermékekre. [5] [6] [7] [8] [9]

Az AM lehetőséget biztosít a könnyűfém alkatrészek közvetlen előállítására a digitális tervezési adatok alapján. Ez a technológia közel végleges geometriájú alkatrészeket hoz létre. Az RP (Rapid Prototyping) technológia segítségével nagy szilárdságú, körülbelül

99,99% sűrűségű alkatrészeket állíthatunk elő egy szoftveresen megalkotott 3D modell alapján. Az ilyen gyártási eszközökben hatalmas lehetőség nyílik számos ipari szektor számára, mint például a repülőgépipar, az orvostechika, az gépjárműipar, a hidrogéntechológia, az űripár és az energiatermelési szektor. [5] [6] [7] [10]

1.1.1. Járműipari alkalmazások

A Bugatti a 3D fémnyomtatást a Chiron modell féknyergeinek gyártásához használja, lehetővé téve olyan összetett titánalkatrészek létrehozását, amelyek alacsony tömegük mellett extrém szilárdságot nyújtanak. Az kész alkatrész 41 cm hosszú és mindössze 2,9 kg tömegű. Az eljárás során közel 400 wattos lézerekkel dolgoztak és a féknyereg 2313 rétegből épült fel. A tesztlések során a darabot körülbelül 1000 °C hevítették, bizonyítva a 3D fémnyomtatott titán alkatrészek tesztelése során azok kivételes hő- és mechanikai terheléssel szembeni kiváló ellenálló képességét, amely jelentős előrelépés az autó ipari alkalmazások terén. [11]

A Porsche a 3D fémnyomtatási technológiát fejleszti a nagy igénybevételű autóipari komponensek, például a 911 GT2 RS dugattyúi számára, együttműködve a Mahle, Trumpf és Zeiss cégekkel. Az additív gyártás bionikus kialakítást tesz lehetővé, így csak a szükséges helyeken alkalmaz anyagot, csökkentve az alkatrészek tömegét és javítva a hőelvezetést. Az alkalmazott DMLS technológia révén a dugattyúk több mint 20°C-kal alacsonyabb hőmérsékleten működnek, optimalizálva az égési folyamatot, és akár 30 lóerő teljesítménynövekedést biztosítanak, miközben rövidebb fejlesztési időt és optimalizált gyártási folyamatokat eredményeznek. [12]

A Ferrari az F80 modelljében úttörő módon alkalmazza a 3D fémnyomtatást strukturális alkatrészek előállítására, főként a felfüggesztési rendszerben, ahol nagy szilárdságú és könnyű komponenseket készítenek. Az additív gyártás lehetővé teszi a bonyolult geometriák létrehozását, amelyeket hagyományos módszerekkel nehéz lenne megvalósítani. A 3D nyomtatott felső lengőkarok az F80 aktív felfüggesztésének részeként a kerékszabályozást és a rugózatlan tömeg csökkentését szolgálják, növelve ezzel a jármű stabilitását és kezelhetőségét nagy sebességnél. Az új technológia révén az autó aktív aerodinamikai rendszere képes alkalmazkodni a különféle út- és pályakörülményekhez, míg a 48V-os elektromos motorokkal működő felfüggesztés precíziós szabályozást biztosít, lehetővé téve a stabilizátor és egyéb hagyományos alkatrészek eltávolítását. [12]

1.2. Direct Metal Laser Sintering (DMLS) ismertetése

A Direct Metal Laser Sintering (DMLS) egy additív gyártási eljárás, amely során finom fémporrétegeket nagy energiájú lézersugár segítségével szelektíven összeolvasztanak. Ez a módszer lehetőséget biztosít összetett geometriájú fémalkatrészek nagy pontosságú és anyaghatékony előállítására, kiküszöbölve a hagyományos gyártási eljárások korlátait. A DMLS különösen alkalmas olyan területeken, ahol a nagy pontosság, az anyagtakarékosság és a szerkezeti integritás kritikus fontosságú.

Az additív gyártási technológiák eredetileg a gyors prototípusgyártás támogatására lettek kifejlesztve, azonban az utóbbi években alkalmazási területük kiterjedt az ipari kis sorozatgyártásra is. A közvetlen fém lézeres szinterezés (Direct Metal Laser Sintering, DMLS) a porágy fúzió (Powder Bed Fusion, PBF) elvét alkalmazza. Ebben az eljárásban egy Yb (ytterbium) szálalás lézert használnak a fémport lokálisan megolvasztó eszközként, a számítógépes tervezési adatok alapján. Ez lehetővé teszi bonyolult, háromdimenziós, szilárd szerkezetek rétegenkénti hozzáadásos felépítését.

A lézeres szinterező a szakaszos működési módot a rétegről-rétegre történő építésnek köszönheti. Első lépésként a porterítő mechanizmus a rétegvastagságnak megfelelő finomszemcséjű fémport terít szét a porágyon. A por felhordása után az adott rétegbe eső munkadarab keresztmetszetét egy irányított lézersugár olvasztja („szintereli”) meg. A lézersugár először a kontúrokon halad végig, majd a teljes belső keresztmetszeten. Ezt követően minden terítés után a munkaasztal egy rétegvastagságnyi lecsúsz és a gép egy újabb adag fémport terít le. Ez a körfolyamat egészen addig folytatódik, amíg a teljes munkadarab el nem készül. Azért, hogy megelőzzék az oxidációt és a nem kívánt reakciókat, az egész folyamat védőgázban zajlik. A kapott szilárd, tömör munkadarab mechanikai tulajdonságai hasonlóak a tömbből készült anyagokéhoz, mivel a felhasznált fémpor kötő- és folyasztószerves, illetve minden rétegvastagságban olvadási hőmérsékletre hevül az anyag. [6]

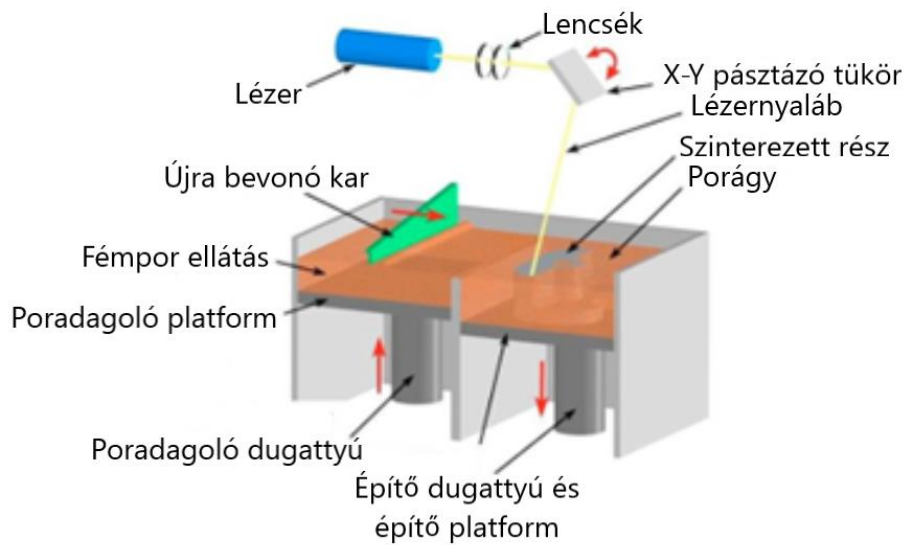
A rétegstruktúra kontúrjának elsődleges feltárása után a kontúr által határolt teljes belső területet sraffozással pásztázzák. Ebben a folyamatban a lézersugár több, egymást követő vonalat rajzol, a vonalak közötti távolságot pedig sraffozási távolságnak nevezzük. Ezt követően az alkatrész külső kontúrját egy második lézeres expozícióval dolgozzák fel annak biztosítása érdekében, hogy az alkatrész élei pontosan megfeleljenek a CAD-modelleknek, ezáltal garantálva a pontos méretbeli reprodukálhatóságot. A rétegvastagság és a szkennelési stratégia egyaránt kulcsfontosságú paraméterek, amelyek jelentős hatást gyakorolnak a

gyártási eljárás minőségére és hatékonyságára. Ugyanakkor, ha a rétegvastagság túl kicsi, a termelési folyamat sebessége jelentősen lelassul, ami növeli a költségeket.

A belső és külső rétegekhez kapcsolódó pásztázási stratégia tekintetében a rétegek közötti forgatás bizonyos mértékben javítja a rétegek közötti átfedést. Ennek következtében a létrehozott alkatrészek mechanikai tulajdonságai izotrópabbá válnak, összehasonlítva a hagyományos pásztázási stratégiákkal, amelyek jellemzően egyirányú vektorokkal vagy keresztirányú rétegekkel operálnak. Manfredi és társai szerint a jelentős hőmérsékleti grádiensek miatt ez a folyamat magas maradó hőfeszültséggel rendelkező alkatrészeket eredményez. Az alkatrészek deformálódásának megakadályozása érdekében, mielőtt eltávolították őket az építőplatformról, szükséges volt egy 300 °C-on, 2 órán át tartó hőkezelésre.

A megfigyelések szerint a DMLS technológiájának gyors és lokalizált olvadási, valamint hűlési folyamatai rendkívül finom mikroszerkezetek létrejöttét idézik elő, habár a 10 µm-nél kisebb átlagos átmérőjű részecskék hajlamosak agglomerálódni a nagyobb részecskék felületén, mintegy 60-80 µm-es klaszterek kialakításával. Ez a jelenség kedvezőtlen hatással lehet a DMLS technológiával készült alkatrészek végső sűrűségére. A részecskék mérete és eloszlása mellett a kémiai összetételük is jelentős hatással van a DMLS folyamat során végbemenő sűrítési mechanizmusokra, amint azt Olakanmi és munkatársai is megfigyelték. [12]

A technológia során használt lézersugár intenzitása úgy van modulálva, hogy az új porréteg megolvadjon és behatoljon az előző rétegbe, ezzel újraolvasztva azt, és egyidejűleg biztosítva a rétegek közötti megfelelő kapcsolatot (és az alatta lévő réteg nedvesítését). A lézersugárzás expozíciós ideje a milliszekundumos tartományban mozog. A folyamatot jellemzően „nagy teljesítménysűrűség és rövid kölcsönhatási idő” elnevezéssel illetik [12]. A PBF-alapú eljárások egyik jelentős korlátja, mind a lézeres, mind az elektronnyalábos olvasztási technikák esetében, hogy az építési tér teljes térfogatát meg kell tölteni fémporral az adott objektum legmagasabb pontjáig, függetlenül attól, hogy egyetlen darabot gyártanak-e. Noha az építési térfogatban fel nem használt por visszanyerhető és újra felhasználható, ezen por fizikai és kémiai tulajdonságai az ismétlődő újrahasznosítási ciklusok során elkerülhetetlenül változnak. Ez a folyamat közvetlen hatást gyakorolhat az anyag minőségére és az elkészített alkatrész végső jellemzőire. [13]



1. ábra DMLS gép felépítése [7]

A 3D fémnyomtatás új lehetőségeket nyit meg az ipari terméktervezésben. Az alábbiakban bemutatásra kerülnek az előnyök és a hátrányok.

Lehetséges könnyebb, de erősebb alkatrészek létrehozása, összetett alkatrészek előállítás, amelyek költséghatékonyak és szerkezeti szempontból is előnyösek. Ezek hozzájárulhatnak a járművek teljesítményének, energiahatékonyságának és megbízhatóságának javításához. [6]

A hagyományos gyártási folyamatokhoz képest az alapanyag-felhasználás hatékonysága jelentősen javul, aminek következtében a gyártási hulladék mennyisége minimális. Az iparágban alkalmazott anyagok széles spektruma, mint például acélok, rozsdamentes acélok, titán- és alumíniumötvözetek, valamint nikkelalapú ötvözetek, hozzájárulnak ahhoz, hogy az additív gyártás egyre nagyobb szerepet töltsön be [11]

Az RP technológia meghatározó különbsége a hagyományos gyártási technológiával szemben, hogy lehetőség van a szerszámok kiküszöbölésére, így növelve az idő- és költséghatékonyságot. Ez a gyártási módszer lehetővé teszi a kész munkadarabok könnyűszerkezetes kivitelezését és súlycsökkentését, mindezt topológiai optimalizálással, így elérve a közel tömbszerű anyag sűrűségét és szilárdságát. A legyártott alkatrészek egyetlen komponensbe történő konszolidációjával az összeszerelési követelmények jelentős mértékben csökkenthetők, ez pozitív hatással van a költségek optimalizálására, kifejezetten akkor, amikor teljes mozgó alkatrészeket tartalmazó összeállításokat kell létrehoznunk. A technológia további előnye, hogy a korábban említett nagy komplexitású és összetett

munkadarabok gyártása egyetlen folyamatban készül el, ezzel kiiktatva a gyártási lépéseket. [7]

A 3D fémnyomtatási technológia számos előnnyel bír, de nem hagyhatjuk figyelmen kívül azokat a kihívásokat és korlátokat, amelyek ezt az új technológiát a hagyományos eljárásokkal szemben érintik.

A szelektív lézerolvasztás folyamata során fellépő hibák, mint például a mikroszkopikus méretű pórusok és a maradó feszültségek, figyelmet érdemelnek. [10]

A nyomtatási folyamat egy lassú építési folyamat és a finomszemcséjű fémporok ára, magas gyártási költségeket eredményeznek. Az elkészített végtermék felülete, méretpontossága és anizotrópiája jelentősen eltérhet a hagyományos megmunkálási technikákétól, amely a gyártási folyamat után utókezelést igényel. Az alkatrész gyártásához szükséges feltételek megteremtése jelentősen több időt igényel, mivel az alkalmazás tervezése és a folyamatparaméterek beállítása időigényes, hiszen egy gyártási ciklus előtt körülbelül 180 anyag-, folyamat- és egyéb paraméter komplex beállítása is szükséges lehet. Az építési tér mérete alapvetően meghatározza az előállítani kívánt munkadarab méretét, így a 3D fémnyomtatott komponensének mérete erősen korlátozott. [7]

1.2.1. Újrahasznosítási lehetőségek

DMLS vagy SLM eljárások során a felhasznált por egy része nem kerül teljes mértékben beolvasztásra, így a fennmaradó anyag újra felhasználható, de csak egy bizonyos határig. A por kémiai és fizikai tulajdonságai az ismételt használat során elkerülhetetlenül változnak, ami korlátozza az újra felhasználhatóságot anélkül, hogy a végtermék mechanikai tulajdonságai jelentősen romlanának. Contaldi és munkatársai kutatása rámutatott, hogy ezek a tulajdonságok a 8-9-ik újra felhasználási ciklus után kezdenek rendellenesen romlani. Ugyanakkor a martenzites szerkezetű acél (PH1) még ebben a fázisban is megőrizte jelentős stabilitását, míg az ausztenites szerkezetű por (GP1) az utolsó két ciklusban martenzites szerkezetre váltott át. [13]

1.3. Nyomtatási hibalehetőségek

A fémnyomtatási eljárások, mint például a szelektív lézeres olvasztás (SLM), a direkt fémlézeres szinterezés (DMLS), és az elektronsugaras olvasztás (EBM), egyedi lehetőségeket kínálnak az ipar számára. Azonban ezek a technológiák nem mentesek a kihívásoktól. A nyomtatás során fellépő hibák, mint például a porozitás, a geometriai

pontatlanságok és a belső feszültségek, komoly problémákat jelenthetnek a végtermék minőségére nézve.

A DMLS/SLM eljárással gyártott alkatrészek mechanikai tulajdonságait nemcsak a felhasznált fémpor alapanyaga, hanem a nyomtatási paraméterek széles köre is jelentősen befolyásolja, beleértve a lézerteljesítményt, a rétegvastagságot, a pásztázási sebességet és stratégiát, a védőgáz összetételét, a munkatér hőmérsékletét, a közegáramlást, az építési orientációt, valamint az utólagos hőkezelési folyamatokat. Ha az építési paraméterek nem optimálisak, különféle belső hibák alakulhatnak ki, például részben vagy teljesen meg nem olvadt porszemcsék, gáz zárványok, repedések, illetve inhomogén mikroszerkezetek. Ezek a hibák negatívan befolyásolják a végtermék mechanikai teljesítményét, mint például a szilárdságot és a szívósságot, ami kiemeli az optimális folyamatparaméterek fontosságát a megbízható alkatrészgyártásban. [9] [1]

Sajnos az SLM/DMLS technológia során kimutathatóan nagy esély van a folyamat során egy kiegyensúlyozatlan feszültségprofil beépülésére a munkadarabba. Ezért is akadályozza meg az iparban széles körben való elterjedését, mint gyártási folyamat. A maradófeszültségek és deformációk megoldását napjainkban is kutatják. [6]

A DMLS 3D nyomtatási technológiával gyakorlatilag porozitásmentes alkatrészek állíthatók elő, amit a fémpor hatékony átolvasztásával biztosított nagy anyagsűrűség tesz lehetővé. A lézer és a fémpor vagy olvadék találkozása nagyon rövid ideig és kis területre korlátozódik, miközben a lézer pozíciója folyamatosan változik az építés során. A rétegenkénti felépítés és a lokális hőhatások következtében jelentős belső feszültségek alakulhatnak ki az alkatrészben. Ezek a belső feszültségek gyártási hibákhoz vezethetnek, mint például deformációk, repedések vagy rétegleválások, amelyek kedvezőtlenül befolyásolhatják a késztermék mechanikai tulajdonságait. [9]

Az átalános vagy regionális maradékfeszültségek az alkatrészekben való felhalmozódása komoly problémákat eredményezhet, ha nem oszlanak el megfelelően, mint ahogy az a nem fémes additív gyártási technológiáknál előfordul. Ezek a feszültségek repedéseket, deformációkat vagy rétegleválást okozhatnak. Ennek következményeképp az alkatrész fáradási szilárdsága akár tízszer alacsonyabb is lehet, mint a tömbből készült daraboké. [6]

A DMLS technológiának köszönhetően közel 100%-os tömörségű alkatrészeket tudunk létrehozni, azonban elkerülhetetlen a pórusok megjelenése az anyagban. Habár a pórusok elég kicsinek tekinthetők (20mikron), feszültségnövelő hatásuk jelentős és könnyen

meghibásodást okozhatnak, ha az alkatrész fárasztó igénybevételnek van kitéve. Ezek a megjelenhetnek a szennyeződések, illetve a porréteg lerakódása és a párolgás miatt is az anyagban. [10]

A technológia további hátránya, hogy a fém újra olvasztása során a munkadarabban jelentős belső feszültségek ébrednek, ennek következtében deformációk és repedések alakulhatnak ki. Ez a jelenség könnyen a selejt munkadarabokat eredményezhet. A nyomtatási folyamat első lépéseként a fémport egy nagy inerciával rendelkező fémtömbhöz (alaplap) olvasztják hozzá, ezzel rögzítve a munkadarabot a szinterezési folyamat során, elkerülhetők a folyamat közben fellépő elváltozások, leválások. A belső feszültségek kialakulását pozitívan befolyásolja a nagyobb rétegvastagság alkalmazása, illetve kisebb szemcsemérettel jobb mechanika és fizikai anyagtulajdonságok érhetőek el, Hatos István és munkatársai szerint. A belső feszültségek tovább csökkenthetők a gyártás során alkalmazott nagyobb pásztázási sebesség, illetve rövidebb pásztázási szakaszok alkalmazásával, valamint, ha a hagyományos rétegenkénti 67 fokkal elforduló pásztázási irány helyett például a „sakktábla” módszert alkalmazzuk. További megoldás lehet a munkadarab síkmetszet területének minimalizálása, de ez megnöveli a rétegek terítésének számát és az építési időt is. [1]

A fémek lézeres szinterezése során a gyártani kívánt munkadarab minden esetben igényli a felépítendő daraboknak egy síkfelülethez való rögzítését, illetve az építési szempontból kritikus felületek támasztékkal való biztosítását, ellentétben a polimerek szinterezésével. A támasztékokat szoftveres segítséggel alkotják meg, anyaguk pedig az alkatrész anyagával megegyező, de üreges szerkezetű.

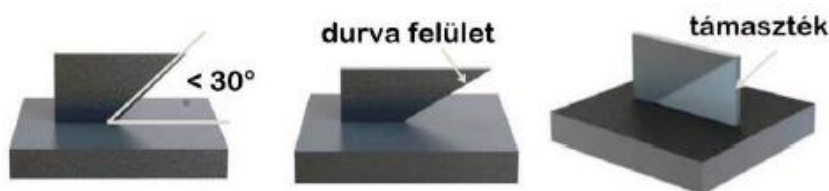
Ahhoz, hogy a szinterezett rétegek között a megfelelő kötést tudjuk létrehozni, akkora hőbevitel szükséges, hogy a bevitt hőhatás több rétegre is kiterjedjen. Ha az éppen szinterezett réteg alatt nincsen tömör anyag, jelentős számú részlegesen kötött szemcse tapad a felülethez, valamint a megszilárduló porréteg meghaladja a kívánt rétegvastagságot. Következésképpen rossz felületi érdességet és jelentős geometriai eltérést kapunk. A terített por 20 μm -es rétegvastagsága a szinterezett felület felületi érdességének nagyságrendjével megegyező. A szinterezett részek deformálódhatnak a belső feszültségek hatására, ha a munkadarab nem megfelelően van rögzítve a porágyhoz. Ez pontatlan gyártást és a porterítővel való ütközést eredményezhet, de az alkatrész könnyedén le is válhat, ha a támaszték nem megfelelő erősségű. [1]

A tartószerkezetek kialakításával és optimalizálásával korábban több kutatás is foglalkozott. Jhabvala és munkatársai a kisebb sűrűségű és puhább anyagtulajdonságú tartószerkezeteket hoztak létre melyek így is elegendőek voltak ahhoz, hogy támogassák a gyártmányt és eloszlassa a hőgradienst, mindezt a pulzáló lézertechnológiának a segítségével. Továbbá Sundar és munkatársai szerint jelentősen egyszerűbben eltávolíthatóak az alkatrészek a munkaasztalról, ha az alkatrészt egy dróthálóra nyomtatják, ez segíti a vékony és apró felületek létrehozását is. [6]

A DMLS technológia gyártási korlátait befolyásolja, hogy a különböző ipari igényeknek megfelelő munkaterű szinterezőket kínálnak a gyártók. A standard méretű gépek alaplapja, melyet a szerszámgyártás területén is használnak, 250x250mm, a maximális építési magasság 200-300 mm.

Számos szakirodalom foglalkozott már a DML technológiával gyártott munkadarabok felületi szerkezetének vizsgálatával. Wang és társai EOSINT M250 berendezéssel épített alkatrészek struktúráján vélték felfedezni, hogy az építési irányra merőleges felület durvább, mint az oldalsó felületek, valamint az átlagosnál nagyobb pórusok is fellelhetők a felületen. Ezek a darabok a durva felület mellett, mikrorepedések hálózatával is rendelkeznek, melyek a hőterhelés következtében alakultak ki. [1]

A túlnyúló felületek esetén fokozott körütekintés ajánlott a lézer szinterezett alkatrészek gyártása során. Az instabil gyártási folyamat eredményeképpen az alsó felületek 30°-os dőlésszögig rossz felületet eredményeznek, ennek kiküszöbölésére megtámasztás szükséges. A technológiától alapesetben elvárható pluszminusz 0,1 mm-es tűrésen belüli terméket és jó felületi érdességet az alfa nagyobb egyenlő 45° esetén kaphatunk.

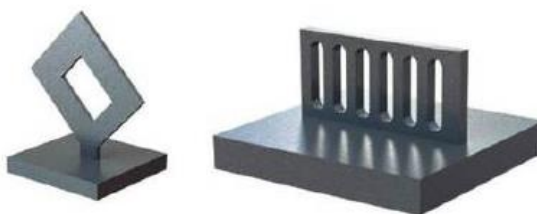


2. ábra Kritikus felületek [1]

A furatok gyártása közben is nehézségekbe ütközhetünk, ami a kritikus dőlésszögű alsó felületek építési problémájával magyarázható. A furatátmérő növelésével megnövekszik a furat felső szakaszának azon része, melynek nincsen meg a kellő meredeksége. A furatok építhetők támasszal vagy támasz nélkül, ez függ a geometriai pontosságtól, a felületi érdességtől és a gyárthatósági korláttól egyaránt. A 10mm-nél kisebb furatok általában

támasz nélkül építhetők. A korábban említett probléma megoldható a geometria módosításával, amennyiben azt a használati funkciók megengedik.

Támaszték nélkül nem gyártható az alaplappal alulról párhuzamos felületek. Alternatív megoldásként szolgálhat, ha megszüntetjük az alaplappal alulról párhuzamos szakaszokat az alkatrész 30foknál nagyobb szöggel való elforgatásával. Az összetett alkatrészek esetében, amennyiben a konstrukció engedi, könnyebb gyártást tesz lehetővé, ha a munkadarabokat nyomtatási szempontból öntámasztóvá tervezzük.



3. ábra Elforgatási stratégia [1]

A lézerrel szinterelt munkadarabok a hagyományos megmunkálási módokkal (öntés, forgácsolás) készített alkatrészekhez képest gyengébb felületi minőséggel rendelkeznek. A felületi érdesség átlagos értéke a gyártás után $Ra\ 10\text{-}15\mu\text{m}$, emiatt szükség lehet a felületek utókezelésére, finomítására (sörétezés, csiszolás, forgácsolás, polírozás). [1]

1.4. Belső feszültségek típusai és tulajdonságai

A 3D fémnyomtatás új távlatokat nyitott a komplex alkatrészek gyártása terén, ám az eljárás során jelentős belső feszültségek keletkezhetnek az anyagban a rétegzett felépítés és a gyors hűlési folyamatok következtében. Ezek a maradó feszültségek kritikus szerepet játszanak a repedésképződésben, amelyek negatívan befolyásolhatják az alkatrészek mechanikai tulajdonságait és tartósságát.

A maradó feszültségek olyan belső feszültségek, amelyek az anyagban terheletlen állapotban is fennállnak, és egyensúlyt tartanak a testben. Ezek a feszültségek mechanikai vagy hőterhelés, szilárd fázisú átalakulások, valamint eltérő hőtágulási tényezők hatására alakulhatnak ki. A járműiparban jellemzően lemezalakítás, öntés, hegesztés, hőkezelés és kompozit anyagok gyártása során keletkeznek, és jelentős hatással vannak az alkatrészek élettartamára és teljesítményére. [16]

A maradó feszültségek két alapvető típusa létezik: a mikroszkopikus feszültségek, amelyek kristályhibákból, például diszlokációkból és kiválásokból erednek, valamint a makroszkopikus feszültségek, amelyek nagyobb területekre terjednek ki, gyakran

szándékosan, a szilárdság növelése érdekében. Míg a nyomófeszültségek növelhetik az alkatrészek tartósságát, a húzófeszültségek hajlamosítanak repedésképződésre és -terjedésre, különösen fáradásos és korróziós károsodás esetén.

A járműiparban a maradó feszültségek minimalizálása kritikus jelentőségű, mivel ezek befolyásolják az alkatrészek élettartamát és korrózióállóságát. Korszerű módszerek, mint a szemcseszórás és az autofrettázs, nyomófeszültségeket generálnak kritikus területeken, ezáltal javítva az alkatrészek teljesítményét. [14]

Az I. rendű feszültségek a belső feszültségeket olyan típusa, amelyek nagyságrendileg a munkadarab méreteivel hasonlíthatók össze. Gyakran jellemzőek olyan gyártási eljárások során, mint a forgácsolás, a képlékeny hidegalakítás, a hegesztés vagy az öntés. E feszültségek kialakulásának legfőbb oka a hűtési folyamatok elégtelen szabályozása, amely a munkadarab méretéből adódóan különböző irányokban egyenlőtlen hőelvonást eredményezhet. [3]

A II. rendű feszültségeket a szakirodalom mikroszkopikus feszültségekként is említi, amelyek kiterjedése közelíti a szemcsék átmérőjét. Ezek a feszültségek értékükben, előjelükben és irányukban is változhatnak a szemcsehatárok mentén. Az eltérések oka abban rejlik, hogy a szomszédos szemcsék különböző kristályorientációjuk vagy fázisaik miatt eltérő módon reagálnak egy adott irányú alakító erőre. Az ilyen szemcsék, amelyek mértékükben eltérően deformálódnak környezetüktől, határfelületeiken feszültségeket hoznak létre, amelyek arányosan növekednek az alakváltozások közötti különbséggel. [3]

A III. rendű feszültségek a szubmikroszkópos feszültségek. Ezek néhány atomnyi távolságon belül hatnak, és kialakulásukért a kristályszerkezeten belüli jelenségek felelnek, mint például a vakanciák, az interstíciós vagy szubsztitúciós atomok, illetve a különböző kétdimenziós rácshibák, közzismert nevükön diszlokációk. Ha a kristályrácsba beépülő idegen atom nagyobb, akkor lokálisan nyomó, míg kisebb esetében húzó feszültség lép fel. Éldiszlokáció jelenlétében a kristályszerkezet extra atomrétege mentén a nyomott és húzott területek váltakoznak, ahol a diszlokációs vonal két oldalán nyomó-, míg azzal szemben húzó feszültségek alakulnak ki. [3]

1.4.1. Belső feszültségek kialakulása és meghatározási módszerek

A belső feszültségek kialakulása a hőtágulás jelenségéhez köthető. A hőközlés hatására a rétegek tetején húzófeszültség, az alacsonyabb hőmérsékletű területeken pedig nyomófeszültség alakul ki. Ezek a feszültségek egyenletesen eloszlának egyetlen réteg nyomtatása esetében és nem okoznának semmiféle problémát, azonban több réteg

nyomtatása során az alacsonyabb hőmérsékletű, már szilárd alsó rétegek gátolják a felsőbb rétegek hőtágulását és zsugorodását, azért a rétegek között feszültséggradiens lép fel. A kinyúló geometriákkal vagy furatokkal rendelkező munkadarabokra nézve még nagyobb veszélyt jelentenek a belső feszültségek, mert ezeken a pontokon a munkadarab különösen könnyen deformálódik, mivel nem állnak közvetlen kapcsolatban az alaplappal. Ezekkel a jellemzőkkel rendelkező alkatrészeket támasztékokkal kell ellátni, ahogyan a korábbiakban is említettem, azonban a támasztékok nyomtatása extra alapanyag felhasználást és hosszabb gyártási időt igényel. Számos kísérlet bebizonyította a támasztékok pozitív hatását a feszültségeloszlásra, azonban léteznek ellenkező eredménnyel rendelkező tanulmányok is. Patterson és munkatársainak kutatása szerint a támasztékok leválasztása után a kész termék felületén leromlott anyagminőség jelei mutatkoznak. [6]

A megmunkálások során a feszültségek átrendeződnek, amely új egyensúlyi állapothoz vezet, ezáltal a munkadarab maradandóan vetemedik. Az anyagleválasztás során a maradó feszültségek egyensúlya felborul az anyag torzulást szenved, ebből egyértelműen következtethetünk a makroszkopikus maradó feszültségek jelenlétére. Ezeknek a problémáknak az orvosolása növeli a gyártási költségeket hiszen technológiai többletműveletekkel jár. Az ilyen problémák elkerülése érdekében kiemelten fontos a maradó feszültségek pontos ismerete, azok közvetlen és közvetett mérése, valamint lehetőség szerinti csökkentése. [14]

A szakirodalom számos módszert és technikát kínál a maradó feszültségek mérésére, de a gyakorlatban csak néhány eljárás bizonyult széles körben alkalmazhatónak. Ezek a módszerek különböző méretű szerkezeti elemek vizsgálatára alkalmasak, a kis alkatrészekről egészen a nagyobb struktúrákig, például repülőgépek esetében. A járműiparban elterjedten alkalmazott módszerek közé tartozik a röntgendiffrakció, valamint a zsákfurat-fúrési technika, amely elektromos ellenállású nyúlásmérő bélyegeket használ. E technikák lehetővé teszik a járművek szerkezeti elemeinek maradó feszültségeinek pontos vizsgálatát, hozzájárulva az alkatrészek megbízhatóságának és élettartamának növeléséhez.

A fizikai törvények szerint az alkatrészekben jelenlévő feszültségek egyensúlyban vannak nyugalmi állapotban, azaz a húzó- és nyomófeszültségek kiegyenlítik egymást (Newton első törvénye). Ezért kulcsfontosságú a maradó feszültségek mérése a fémalkatrészek esetében, mivel ezek nagysága és eloszlása közvetlenül befolyásolja a szerkezeti integritást és a hosszú távú megbízhatóságot és lehetővé teszi a térbeli eloszlás meghatározását.

Az autóiparban, ahol egyre nagyobb jelentősége van a könnyű, erős és fenntartható anyagok alkalmazásának a könnyűsúlyú anyagok használata elősegíti az üzemanyag-hatékonyság javítását és a környezeti terhelés csökkentését. Ezzel párhuzamosan alapvető követelmény, hogy az anyagcsökkentés ne veszélyeztesse az alkatrészek élettartamát vagy szerkezeti szilárdságát. [14]

Withers, P. J.: *Residual stress and its role in failure* című 2007-ben megjelent tanulmányában az alábbi következtetéseket vonta le: a maradó feszültség egy a külső terheléstől független feszültség típus, aminek a jelenlétével számolni kell. Az anyagra vagy alkatrészeire ható külső terhelések egyértelműen fontosak, habár vannak más hozzájáruló tényezők is, beleértve a kedvezőtlen anyagmikroszerkezetet, a már meglévő hibákat.

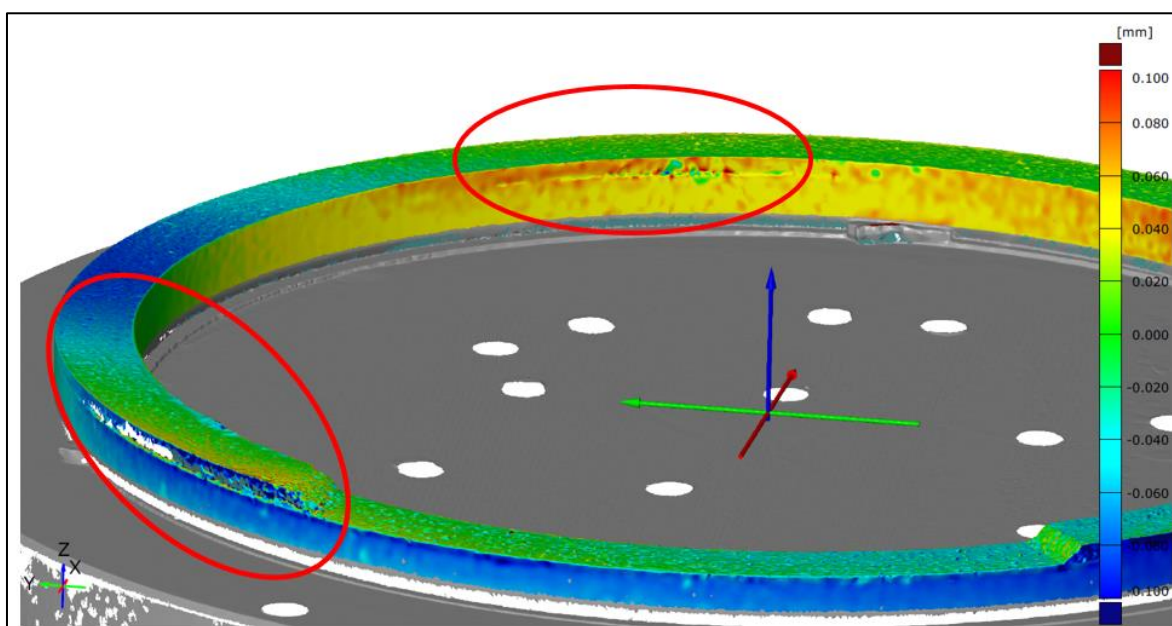
A maradó feszültségek növelhetik vagy csökkenthetik az alkatrész szilárdsági tulajdonságait. Tehát a váratlan meghibásodások kiküszöböléséhez meg kell értenünk az anyagban keletkező maradó feszültségeket. Sok esetben a terhelésből adódó feszültségek kritikusan kombinálódnak a maradó feszültségekkel és élettartam előtti tönkremenetelhez vezetnek. Következésképpen fontos, hogy a maradó feszültségek eredetét megértsük, a káros hatású feszültségeket eltávolítsuk vagy jelentősen csökkentsük, ugyanakkor az előnyös maradó nyomó feszültségeket növeljük. Szükség szerű lenne a fejlődésük felismerésére, valamint az üzem közbeni alakulásuk előre jelzése, a tönkremeneteli folyamatokra gyakorolt hatásuk megértése. Ezáltal a szerkezeti integritást nagyobb biztonsággal lehetne megjósolni, értékeléseket végezni és az alkatrészeket még a meghibásodás előtt el lehetne távolítani, vagy korrekciós intézkedéseket lehetne bevezetni az élettartam meghosszabbítása érdekében. [15]

1.4.2. A feszültségek hatása, repedések kialakulása

Összegzésként kijelenthető, hogy a megmunkálás során visszamaradó feszültségeket figyelembe kell venni, mivel ezek pozitív és negatív hatásokkal is járhatnak. Különösen a képlékeny megmunkálások után jellemző a húzó feszültségek kialakulása, amelyek az alkatrész idő előtti tönkremenetelét okozhatják. Ennek megelőzésére nyomófeszültségek bevitelére vagy feszültségmentesítő eljárások alkalmazása szükséges, ami további gyártási lépéseket és költségeket jelent. Az anyagfelhasználás hatékonyságának növelésére irányuló törekvések miatt a túlméretezés lehetősége korlátozott, ezért a nem kívánt feszültségek hatása fokozott figyelmet igényel.

(Az alacsony lézerteljesítmény alkalmazása a 3D fémnyomtatás során jelentős hatással lehet az alkatrészek mechanikai tulajdonságaira, különösen a maradó feszültségek

kialakulására.) A gyártási folyamatban a finom porrétegek megfelelő összeolvadása alapvető fontosságú a rétegek közötti erős kötés létrejöttéhez. Ha a lézer energiája nem elegendő a por teljes összeolvasztásához, az gyenge kötéseket eredményezhet, ami a rétegek közötti delaminációhoz, vagyis elváláshoz vezethet. A rétegek elválása komoly strukturális gyengeséget okoz, mivel az alkatrész mechanikai integritása sérül, és csökken a terhelés elviselésének képessége. Ezen elválások mentén a feszültségkoncentrációk alakulhatnak ki, amelyek elősegíthetik repedések növekedését és az alkatrész idő előtti meghibásodását. A rétegek közötti gyenge kötésből fakadó maradó feszültségek tovább ronthatják a szerkezeti stabilitást, különösen dinamikus vagy ciklikus terhelések esetén. Emiatt az optimális lézerteljesítmény beállítása kritikus fontosságú, hogy biztosítsa a rétegek megfelelő összeolvadását és ezáltal az alkatrész mechanikai megbízhatóságát. [18]



4. ábra Rétegelválások

1.5. A nyomtatási hibák megoldási lehetőségei

1.5.1. Nyomtatási elrendezés

A RP technológiával készített alkatrészekben ébredő belső feszültségek okát és mértékét befolyásoló tényezőket számos irodalom vizsgálja. A kutatásokból arra lehet következtetni, hogy a nagyobb bevitt energia nagyobb belső feszültséget generál. Ez csökkenthető a gyorsabb pásztázási sebesség alkalmazásával, a pásztázási távolság növelésével és a nagyobb rétegvastagság megválasztásával. Hosszabb pásztázási szakaszok esetén a belső

feszültség is növekedni fog. Az alaplappal párhuzamosan épített sík alkatrészek, az alaplapról történő levágása után jelentősen deformálódhatnak. [19]

A belső feszültségek csökkenthetők módosított pásztázási stratégiákkal, a hagyományos változó irányú párhuzamos pásztázás helyett. A feszültségek minimalizálását a pásztázási irányok változtatásának és a pásztázási hosszok csökkentésének eredménye. A Skin-Core építési módnak köszönhetően a nagyméretű szerszámok az építési idő és a belső feszültségek csökkentésével gyárthatók. A geometria külső részeit néhány milliméter szélességben a legkisebb rétegvastagsággal (0,02-0,025 mm) nyomtatják, a lézer belső magrészt pedig minden második rétegben sakktábla stratégia szerint pásztázza. A külső réteg egy nagyon kemény és nagy szilárdságú eleme az alkatrésznek, míg a belső rész rövidebb idő alatt készül el. A pásztázási hosszokat csökkenteni lehet még a munkadarab síkmetszetének területét minimalizáló nyomtatási pozícióba való forgatással. Ez a fajta elrendezés jelentősen megnövelheti az építési időt és a rétegek terítésének számát. [1] [14]

1.6. Utólagos feszültségmentesítő hőkezelés

Az utólagos feszültségmentesítő eljárások olyan technológiai megoldások, amely során a fémekben, különösen a mechanikai megmunkálási folyamatok során keletkező belső feszültségek csökkentése, szabályozása vagy megszüntetése a cél. A legelterjedtebb és legkiforrottabb stresszoldó eljárás a TSR (Thermal Stress Relief). Az utólagos feszültségmentesítő hőkezelés az órákig tartó lágyítási kezelésnek köszönhetően homogenizálhatja az egyenetlen mikroszerkezetet és a maradó feszültségmezőt az anyagban. Magas hőmérsékleten az anyag folyáshatárának és feszültségrelaxációjának csökkenése miatt a feszültség is enyhül a kezelt alkatrészben. A TSR eljárással kezelt maradó feszültség egyenletes eloszlást mutat az anyag teljes keresztmetszetében, azonban ez egy idő- és energiaigényes folyamat, amely könnyen megváltoztathatja a mikroszerkezetet és csökkentheti az anyag mechanikai tulajdonságát.

Song és munkatársai megállapították, hogy az SLM eljárással készült vas munkadarabok szemcséi a TSR eljárást követően finomodnak a maradó belső feszültségek újra eloszlása miatt. Továbbá Hönnige és munkatársai arra a megállapításra jutottak, hogy a Ti-6Al-4V ötvözetének dörzshegesztését követően az anyagban ébredő 300-400 MPa maradó feszültség 760 fokon 45 percig tartó TSR-rel történő hőkezelés után szinte elhanyagolható szintre csökkentek.

A feszültségek megszüntetésének nem csak a magas hőmérsékleten történő hőkezelés az egyetlen módja, mivel megállapították, hogy a mesterségesen csökkentett alacsony

hőmérsékletű kezelés is hatásos feszültségcsökkentő eljárásnak bizonyul. Senthilkumar 24 órán át tartó -196 fokos DCT-t (Deep Cryogenic Treatment) alkalmazva kimutatta, hogy az eljárás 33,94%-kal növeli a szakítószilárdságot és jelentősen növeli a nyomó maradó feszültséget. A hőkezelési folyamatok kedvező hatásának eredményeképp csökkentik a diszlokációsűrűséget az anyagban. A TSR eljárás a feszültségcsökkentő hatását a folyáshatár és a rugalmassági modulus magas hőmérséklet okozta csökkenésének köszönheti, de emellett a feszültségrelaxáció is nagy szerepet játszik a kívánt feszültség szint elérésében. [16] [20] [21]

1.6.1. Előmelegítés

A munkaasztal előmelegítésének hőhatása alapvető szerepet játszik a termikus feszültségek csökkentésében, valamint az alkatrész és az alapanyag közötti jobb kohézió elősegítésében egyaránt.

Az előmelegítéshez alkalmazott módszerek közé tartozik a kemencés kezelés, az elektromos szalagmelegítők használata, valamint az indukciós vagy sugárzó fűtőberendezések használata. Ezen folyamatok során a lokalizált, magas hőmérsékletű hőforrás alkalmazása következtében meredek hőmérséklet-gradiens alakul ki a hőhatás alá eső terület és a környező anyag között, az előmelegítés ezt a magas hőmérsékletkülönbséget kívánja kiküszöbölni. Ennek eredményeképpen megvalósítható a maradó belső feszültségek felhalmozódásának csökkenése a szobahőmérsékletre történő lehűléskor.

Kemerling és munkatársai a beépítőlap előmelegítésének a maradó feszültségprofilra gyakorolt hatását vizsgálták. A DMLS technológiával készített munkadarab építése közben az előmelegítési hőmérséklet a teljes építési magasságban egyenletes feszültségértéket eredményezett, amely körülbelül -10 MPa volt. A 250 fokos előmelegítési hőmérséklet hatására gyakorlatilag a belső maradó feszültségek teljesen megszűntek. Továbbá megfigyelhető volt, hogy az előmelegítési hőmérséklet növekedésével csökkentek a húzó maradó feszültségek az építőlemezen belül. Az építőlemez előmelegítése a hőgradiens csökkenés miatt hatékony módszernek bizonyult a maradó feszültségek csökkentésére. [11]

1.6.2. Természetes öregítés

A természetes öregítés olyan spontán folyamat, amely során a 3D nyomtatott alkatrészek mechanikai tulajdonságai idővel változnak szobahőmérsékleten, hőkezelési beavatkozás nélkül. Ez a jelenség elsősorban a belső maradó feszültségek relaxációjával és az ötvözőelemek diffúziós mozgásával magyarázható, amely a nyomtatási eljárás során keletkező nem egyensúlyi szövetszerkezet fokozatos stabilizálódását eredményezi. A

természetes öregedés során a szilárdság növekedése és a szívósság csökkenése figyelhető meg. A mérnöki gyakorlatban azonban létezik egy mesterségesen előidézett alternatíva is, amely a természetes öregedéshez hasonló tulajdonságváltozásokat ér el gyorsított formában. Ebben az eljárásban az alkatrészt 200-300 °C hőmérsékletre hevítik, és ezen a hőmérsékleten 4-12 órán át tartják, így jelentősen felgyorsítva a természetes öregedési folyamatot. A hőmérséklet kiválasztásakor kiemelten fontos szempont, hogy az acél korábbi hőkezelési eljárásokkal kialakított szövetszerkezete ne károsodjon.

A mesterséges öregítés, mint hőkezelési eljárás célja az anyag szilárdságának növelése az ötvözőelemek kontrollált kiválása révén. Az eljárás egy oldó hőkezeléssel indul, amelynek során az ötvözetet meghatározott hőmérsékleten tartják, hogy az egyes alkotóelemek szilárd oldatot képezzenek. Ezt követi az ötvözet gyors lehűtése, amely biztosítja, hogy az alkotóelemek oldott állapotban maradjanak. Az ezt követő kiválásos hőkezelési folyamat lehetővé teszi az összetevők szabályozott felszabadulását, amely természetes úton (szobahőmérsékleten) vagy mesterségesen (magasabb hőmérsékleten) történhet. Az öregítési eljárás során a Mg-Si kiválások képződése és növekedése révén nemcsak az anyag szilárdsága növekszik, hanem csökken a maradó feszültségek mértéke is. [23] [17]

1.7. Alternatív feszültség csökkentő lehetőségek

Az alternatív feszültségcsökkentő eljárások hatékonyan mérséklék a gyártási folyamat során fellépő feszültségeket, és javítják az anyagszerkezet stabilitását. Ezek a mechanikai és felületi kezelési módszerek célzottan csökkentik a feszültségkoncentrációkat, ezáltal növelve az alkatrészek megbízhatóságát és ellenálló képességét.

Újabban a mérnökök olyan gyártási módszereket alkalmaznak (szemcseszórás, görgőzés, felületi vasalás, autofrettázs technika), amelyek során az anyagban maradó nyomófeszültséget hoznak létre az alkatrész azon területein, ahol a használat során kis repedések keletkezhetnek. Így növelik a kritikus alkatrész élettartamát és a mechanikai igénybevétellel szembeni tűrőképességét. A maradó feszültségek tehát okozhatnak káros vagy akár kedvező hatást is a szerkezetben, attól függően, hogy hogyan szuperponálódik a hatásuk az üzemelés közben fellépő terheléssel. [14]

1.7.1. Szemcseszórás

A maradó feszültségek szándékos létrehozásának egyik módszere a szemcseszórás, amely eljárás közben a munkadarabra nagy sebességgel, nagyszámú, legfeljebb néhány

milliméter átmérőjű szilárd szemcsét röpítünk. Felhasznált anyagokat tekintve beszélhetünk acélszemcsékkel történő szórásról, homokszórásról, valamint szárazjéggel történő szórásról. Az eljárás célja a további megmunkálásra váró félkész termékeknek a megtisztítása volt a felületen megtapadó szennyeződésektől. Többek között az öntött vagy meleg képlékenyen alakított oxidációra hajlamos vasötvözetekről, a hőkezelést követően keletkezett reve réteg eltávolítására kiválóan alkalmas, így elősegítve a gazdaságosabb gyártást.

A maradó feszültség nehezebben hozható létre a kisebb szilárdságú anyagok esetében, mivel könnyebben relaxál és kisebb mértékű változásokat okoz az anyagban. Továbbá problémaként merül fel, hogy fárasztó igénybevétel hatására a maradó feszültség fokozatosan lecsökken. Illetve, ha nem megfelelően választjuk meg a szemcseméretet, akkor az a felületi minőség romlását is okozhatja. [15] [14]

Az ipari alkalmazás tekintetében az eljárásnak egy másik felhasználása, amikor az alkatrészben maradó nyomó feszültséget hoznak létre. Ilyenkor a munkadarabot elsősorban acélgolyókkal szórják (sörétszórás), melynek célja, hogy a darab felületéhez közeli rétegben, néhány mikron mélységben szubmikroszkopikus maradó feszültséget generáljanak. A becsapódó szemcsék hatására apró kráterek alakulnak ki a felszínen, így a sörétek hatása a becsapódási pontok közvetlen környezetére korlátozódik. A szemcsék egyrészt az anyag plasztikus deformációját okozzák, a kinetikus energiájuknak köszönhetően, másrészt az anyagban maradó feszültségeket ébresztenek. A folyamat képes növelni az alkatrészek kifáradással szembeni ellenállóképességét. A darab felületén kialakuló húzófeszültséget a sörétezés által létrejövő maradó nyomófeszültség kiegyenlíti. [14] [17] [20]

1.8. Vibrációs feszültségmentesítés

A vibrációs feszültségmentesítés (VSR) napjaink energia- és alapanyaghiányos környezetében hatékony alternatív módszerként kínálkozik az alkatrészek maradó feszültségének csökkentésére. A VSR egy dinamikus, rezgésalapú eljárás, amelyet világszerte több, mint 40 éve alkalmaznak, azonban a hatásmechanizmusa és a kezelés eredményességének pontos matematikai modellezése még nem teljesen tisztázott. Bár a módszer hatékonyságát a kísérleti eredmények alátámasztják, a hatásosság mennyiségi értékelése továbbra is kihívást jelent. A legfrissebb kutatások, mint például Rao és csapata által 2007-ben végzett vizsgálatok, hozzájárulnak a VSR modellezésének és hatékonyságának jobb megértéséhez. [17]

A vibrációs feszültségmentesítő eljárás képes olyan mértékű feszültségcsökkentést előidézni a fémek szerkezetében, amely a termikus feszültségmentesítő technológiák

eredményességével is összemérhető. Ezért potenciálisan hatékony alternatívát kínálhat a hagyományos termikus feszültségmentesítési eljárásokkal szemben. [18]

Az elméleti háttér a hőkezelési eljárások hatásának inverz folyamatával magyarázható. Hőkezelés során az anyag hőenergiával való ellátása hevítéssel történik, amely során a részecskék fokozott rezgésbe kezdenek és visszarendeződnek. Minél magasabb a hőmérséklet, annál intenzívebb az energiaátadás, ami a részecskék rezgési frekvenciájának növekedését eredményezi. A VSR technológia ezen folyamat leegyszerűsített változatát alkalmazza, mivel hőbevitel nélkül, mechanikai rezgések révén éri el a kívánt hatást. A maradó feszültség csökkentését a diszlokációk elmozdulása és szaporodása idézi elő az anyag kristályrácsában, amely mikro deformációval jár. E folyamat során a rácsszerkezetben keletkező belső energia folyamatos felszabadulása hozzájárul a maradó feszültségek relaxációjához. A Song és társai által végzett kutatások szerint a diszlokációs mozgások az atomok energiájának csökkenését is eredményezik, különösen akkor, ha a diszlokációs elcsúszások vagy felhalmozódások beindulnak. [19] [17] [20] [18]

A VSR hatékonysága nagymértékben függ a gerjesztési paraméterektől, például a frekvenciától, az amplitúdótól és a vibráció időtartamától. A Walker és társainak kutatásai kimutatták, hogy a vibráció rezonanciafrekvencián történő működtetése a legjobb eredményt (40%-os feszültség csökkenés) nyújtja, mivel a rezonanciaállapot maximalizálja a dinamikus feszültségek amplitúdóját, így elősegítve a maradó feszültségek nagyobb mértékű csökkentését. [21] [22] [23]

A VSR eljárás során általában egy excentrikus tömeget forgató elektromos rezgőmotor kerül alkalmazásra, amelyet a feszültségcsökkentést igénylő alkatrészhez rögzítenek. A dinamikus feszültségek kombinálódnak a maradó feszültségekkel és együttesen meghaladhatják az anyag folyáshatárát, ezáltal helyi képlékeny alakváltozást és a maradó feszültségek relaxációját eredményezve. [17]

Wang és munkatársai megállapították, hogy a vibrációs feszültségmentesítés elsősorban a hidegen hengerelt AZ31 Mg ötvözetek feszültségkoncentrációs zónáira hat, nem pedig az összes maradó feszültségre. Ebrahimi és társai kimutatták, hogy az AZ31 Mg ötvözetek hosszirányú maradó feszültsége több, mint 80%-kal csökkenthető, ha VSR során az alkalmazott terhelés frekvenciája a sajátfrekvencia 95%-áig növelik. Gao és kollégái bebizonyították, hogy a fáradási élettartam 11,11%-kal növekszik 0,04 mm-es rezgési amplitúdó mellett.

Gong és munkatársai arra a következtetésre jutottak, hogy VSR alkalmazásával az alumíniumötvözetből készült vékonyfalú alkatrészek méretstabilitása jelentősen javítható. [16]

A VSR technológia a kutatások alapján önmagában kisebb mértékben, viszont sokkal rövidebb idő alatt csökkenti a darabokban a belső feszültségeket, illetve a VSR technológia hatékonysága a rezgés intenzitásával egyenesen arányos. A VSR hátránya, hogy mivel a kezelést sajátfrekvencia alatt végzik, a munkadarabban a dinamikus feszültség egyenetlenül oszlik el, így a belső feszültségek attól függően csökkennek, hogy hol helyezkednek el a munkadarabon belül. Továbbá VSR kezelés miatt az anyagban növekedik a diszlokációk sűrűsége. [24]

A maradó feszültségek csökkentése során kulcsfontosságú megőrizni a munkadarabban kialakított szemcseszerkezetet és fizikai tulajdonságokat, különösen, ha az alkatrész megfelel az elvárásoknak. Ilyen esetekben célszerű olyan megoldásokat keresni, amelyek nem igényelnek hőbevitelt. Azonban az ilyen eljárások száma korlátozott és sok esetben a felhasználási területek is szűkösnek bizonyulnak. [26]

Az alábbi elméleti folyamat leírást, az egyik ismert VSR technológiai berendezést fejlesztő és forgalmazó cég több évtizedes tapasztalatán alapul. A vibrációs eljárás során, sinuszoidális rezgés hullámokat indukálunk, ezzel vibrációs energiát hozunk létre. A vibrációs rezgés amplitúdó frekvenciája a rezonancia frekvencia érték alatt kell, hogy legyen. Tehát szubharmonikus tartományon belül. A rezonancia frekvencián (sajátfrekvencia, illetve annak felharmónikusait nevezzük rezonancia frekvenciának) történő vibrációs kezelés, a rezonancia („összegegyedés”) jelensége miatt rendkívül káros hatású, ezért ebben a tartományban nem lehetséges a kezelés. [36] [37] [38]

A vibrációs kezelés általában 20 és 60 perc között már megvalósul, de extrém esetekben több óráig is eltarthat. Ez nagyban függ az alkatrész mechanikai tulajdonságaitól (szilárdság, rugalmassági modulus, hőkezelési állapot), a méretétől.

A lényeg, hogy kellő időt kell hagyni a belső feszültségeknek az eloszlásra, egymás hatásainak a kiegyensúlyozására. A sikeres kezelésnek az alábbi fontos alapszabályai vannak:

- Szubharmonikus frekvencián kell kezelni a munkadarabot, vigyázva, hogy ne legyünk túl közel a rezonancia frekvenciához.

- A szubharmonikus frekvencián indukált vibrációs energia az egész alkatrészben képes szétterjedni és képes kellő energiát szolgáltatni a részecskéknek a visszarendeződéshez.
- Amennyiben a kezelés előtt mért sajátfrekvencia az eljárás után eltolódik, akkor megtörtént a feszültség csökkenés. [36] [37] [38]

A hagyományos rezgéses feszültségcsökkentés során a maradó feszültségek csökkentése alacsony frekvenciájú és nagy amplitúdójú dinamikus feszültség alkalmazásával történik, ami különösen hatékony a nagy térfogatú munkadarabok esetében. A kísérleti adatok statisztikai elemzése szerint a feszültségcsökkentés mértéke közvetlen összefüggésben áll a rezgés amplitúdójával és a kezelés időtartamával. A vibrációs energia molekuláris szinten mozgásokat idéz elő az anyagban, ezáltal elősegítve a feszültség csökkenését. A csökkenés mértékét a szerkezet sajátfrekvenciájának visszatéréseivel lehet ellenőrizni, amely a természetes rezgési tartományba kerülve igazolja a feszültségcsökkentés sikerességét. [20] [21] [23]

A VSR alkalmazása számos előnnyel jár a hagyományos hőkezeléshez képest. Először is, a VSR költséghatékony és gyors módszer, amely kevesebb energiafelhasználással jár. Hordozhatósága miatt bármely gyártási fázisban alkalmazható, így akár helyszíni kezelésekre is alkalmas. Továbbá, mivel nincs szükség magas hőmérsékletre, a VSR elkerüli az oxidréteg-képződést és a méretbeli torzulásokat, amelyek a hőkezelés során gyakran előfordulnak. A VSR eljárás kisebb hatással van az alkatrészek mikroszerkezeti integritására, így szélesebb anyagkörre alkalmazható, beleértve az alumíniumötvözeteket és az acélokat is, miközben megőrzi az anyag mechanikai tulajdonságait.

A technológia fő előnyei az energiahatékonyság és a széles felhasználási spektrum, amely magában foglalja az anyagok minőségét és méretét. Az eljárás nem módosítja a fémek szöveti szerkezetét és nem okoz hőkezelés utáni revésedést, így utólagos megmunkálás nem szükséges. Energiaigénye lényegesen alacsonyabb, mivel a vibrációs kezelés mindössze 2kW/h-t igényel, míg a Hőkezelés 935 kW/h-t, ami több mint 400-szoros megtakarítást jelent. További előnyei közé tartozik, hogy nem okoz vetemedést, kilágyulást vagy a mechanikai tulajdonságok degradálódását, emellett minimális időt igényel. Széleskörűen alkalmazható fémeken, például acéloknak, alumínium és öntvények kezelésére alkalmas, valamint hegesztett szerkezetekre is alkalmazható, akár hegesztés közben is. Kézi, hordozható méretben is elérhető és aszimmetrikus szerkezetek kezelésére is képes. [17] [24] [22]

1.9. TVSR

Termikus feszültségcsökkentést (TSR) és vibrációs feszültségcsökkentés (VSR) eljárást széles körben alkalmaznak a gyártási folyamatok során fellépő maradó feszültségek mérséklésére és szabályozására. Az újonnan kifejlesztett termikus-rezgéses feszültségcsökkentés (TVSR, Thermal Vibration Stress Relief) módszer az utóbbi évek egyik ígéretes innovációja, amely számos előnyt biztosít a hagyományos technikákkal szemben. Ugyanakkor a TVSR eljárás során a hő és vibráció együttes hatására bekövetkező feszültségváltozások mögöttes mechanizmusai további kutatások tárgyát képezik. [24]

Bár a TVSR-t, mint innovatív feszültségcsökkentési eljárást már vizsgálták, a feszültségcsökkentés mechanizmusát, a hő és rezgés interakcióját, valamint azok mikroszerkezetre és feszültségforrásra gyakorolt hatását további kutatásoknak kell feltárniuk. Továbbá a jelenlegi hőkezelési célú végeelem modell (FE-modell) elsősorban a feszültségképződés és a fázisátalakulás folyamatainak szimulációjára szolgál, azonban a feszültségrelaxáció figyelembevételével kialakított FE-modell ritkán kerül alkalmazásra a TVSR és TSR feszültségcsökkentési folyamatainak szimulálására. [16]

A dinamikus feszültségcsökkentés mechanizmusának két fő elmélete létezik. Az egyik elmélet szerint a maradó feszültség csak akkor csökken, ha a dinamikus és maradó feszültségek összege eléri az anyag folyáshatárát, ami lokális, mikroszkopikus képlékeny alakváltozást eredményez. Ezzel ellentétben, ha a feszültségek összege nem haladja meg a folyáshatárt, akkor a feszültség nem csökken.

A vibrációs lágyulás hatása nemcsak a mechanikai tulajdonságaitól függ, hanem a vibráció frekvenciájától, amplitúdójától és ciklusrátájától is. Ez magyarázza, hogy rugalmas deformáció és maradék feszültség csökkenése tapasztalható még akkor is, ha a PVRS (Peak Vibration Response Stress - csúcsvibrációs válaszfeszültség), vagyis az anyagban létrejövő maximális mechanika feszültség alacsonyabb az anyag folyáshatáránál. Hasonlóan a magas hőmérséklet is hozzájárulhat az anyag lágyulásához. A TVSR folyamat során a vibrációs lágyulás és a magas hőmérséklet hatása összekapcsolódik és kölcsönösen erősíti egymást, ezáltal tovább csökkentve a képlékeny alakváltozás kritikus folyáshatárát és fokozva a feszültségcsökkenés mértékét. Ennek eredményeképpen a TVSR eljárás hatékonyabb feszültségcsökkentést biztosít, mint a hőkezelés vagy a vibrációs hatás önálló alkalmazása.

Gao és munkatársainak kísérletei során megállapították, hogy a Ti6Al4V TVSR folyamata közben a csúcshőmérséklet és a fűtési hőmérséklet is meghatározó egy bizonyos tartományon belül. Amennyiben bármelyik érték csökken, a másik értéknek jelentősen

magasabbnak kell lennie ahhoz, hogy az eredeti feszültségcsökkenési hatás fenntartható legyen. [24]

A külső, nem homogén hőmérsékleti és mechanikai terhelések hatására a rácscok között torzulások, hibák és egyensúlyhiányok keletkeznek, amelyek maradék feszültséget generálnak. Az anyag viszonylag stabil állapotba kerül a mikrostruktúra fejlődése révén, miközben a maradékfeszültség kialakulása során rugalmas alakváltozási energia halmozódik fel. Amennyiben a megmunkálás vagy hőkezelés során megbomlik ez az egyensúlyi állapot, a felhalmozódott deformációs energia felszabadulása torzulásokhoz, repedésekhez vagy más meghibásodásokhoz vezethet. Ezért a feszültségcsökkentés folyamata a rugalmas alakváltozási energia csökkentésére, valamint stabilabb energiatartalom elérésére irányul, amely hozzájárul az anyag méret- és szilárdsági stabilitásának javításához. [24]

A VSR és TVSR feszültségcsökkentő mechanizmusait az alábbiakban foglaljuk össze. Amikor a PDS (csúcs dinamikus feszültség – Peak Dynamic Stress) eléri a Ti6Al4V ötvözet folyáshatárát a vibrációs és hőhatások együttes hatására a mikrostruktúra mikropasztikus deformáción megy keresztül szobahőmérsékleten, ami diszlokációs csúszáshoz vezet. A tárolt belső energia felszabadul és a rugalmas alakváltozásból származó feszültség, képlékeny anyagváltozásból eredő feszültséggé alakul. A fűtés és vibráció következtében a diszlokációs nyírási ellenállás csökken, elősegítve a diszlokációk mozgását, így azok halmozódnak fel. Ez a folyamat az a folyáshatár és vibrációs folyáshatár csökkenésében tükröződik, miközben a kristályok közötti egyensúlyhiányok és torzulások helyreállnak, jelentősen csökkentve a maradék feszültségeket. [24] [16]

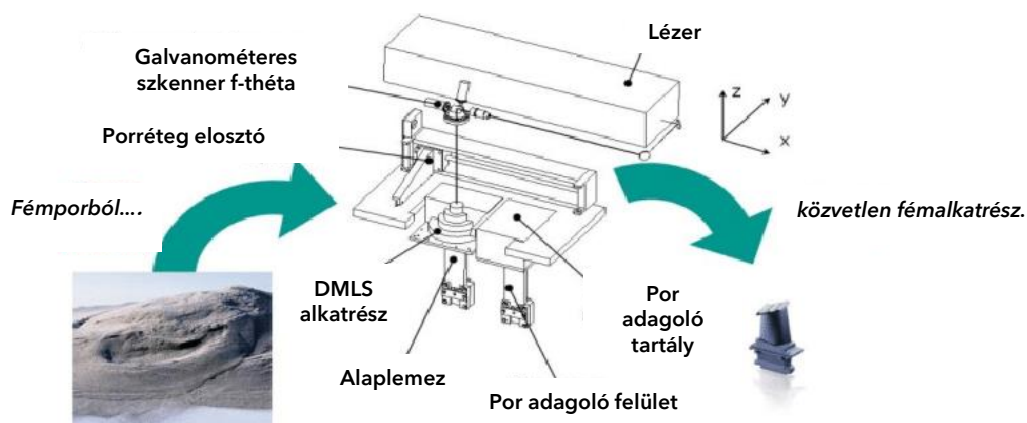
2. Anyagok és módszerek bemutatása

2.1. EOSINT M270 fémnyomtató gép bemutatása

Az általunk vizsgált 3D fémnyomtatással készült próbatestek a Széchenyi István Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Tanszékének Lézerszinterező és Nanotechnológiai Laboratóriumában készültek. Az igénybe vett gép egy német EOS gyártmányú, EOSINT M270 típusú fém 3D nyomtató, amely a direktfém lézerszinterezés (DMLS) eljárást alkalmazza.

Az EOSINT M270 típusú 3D nyomtató névleges teljesítménye 200 W, lézerforrása pedig egy IPG YLR-200 itterbium szállézer, amelynek hullámhossza $1,07\ \mu\text{m}$. A berendezés munkatere $250 \times 250 \times 215\ \text{mm}$ méretű. A berendezés megfelelő működéséhez szükséges egy szűrő-cirkuláló rendszer, melynek feladata a munkatérbe képződő füst eltávolítása. Az elszívórendszer nélkül jelentős mennyiségű felszálló részecske kerülne a lézernyaláb útjába, csökkentve ezzel a nyomtatási hatékonyságot.

Az EOSINT M rendszerek egyetlen, közvetlen eljárással alakítják át a fémport kész fémalkatrészekké.



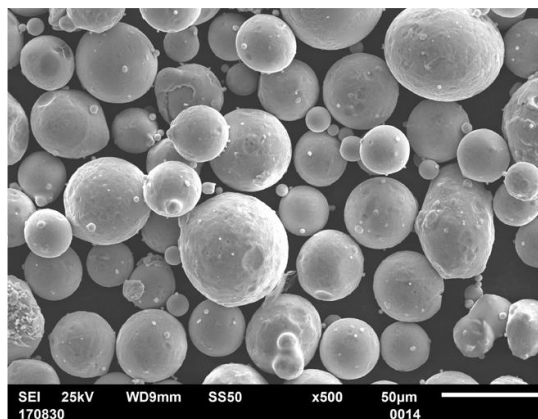
5. ábra DMLS berendezés [1]

2.2. Alapanyag (Fe-4542; 1.4542) bemutatása

A próbatetek nyomtatása során használt anyag a Fe-4542 rozsdamentes acél, amely kiváló korrózióállóságot és mechanikai tulajdonságokat kínál, különösen az additív gyártási technológiákkal, mint a szelektív lézeres olvasztás (SLM) vagy direkt fém lézerszinterezés (DMLS) révén gyártott alkatrészek esetében. Ez az ötvözet főként krómot, nikkelt, rezet és nióbbiumot tartalmaz, amelyek hozzájárulnak a kiváló keménységhez és a korrózióállósághoz. Az SLM és DMLS eljárások gyors hevítési és hűtési ciklusai révén az anyagban finom martenzites és ausztenites fázisok alakulnak ki, ami nagyobb duktilitást és szakítószilárdságot biztosít. (A további hőkezelések, például a 450 °C-on végzett öregítés vagy az alacsony hőmérsékletű nitrokarburálás (LTNC), tovább növelik a keménységet és kopásállóságot, míg az oldatos hőkezelés segít csökkenteni a maradó feszültségeket és javítani a korrózióállóságot.) Ezek a jellemzők különösen alkalmasak teszik a 17-4PH acélt olyan iparágakban, mint a repülőgépgyártás és az orvosi eszközök gyártása, ahol összetett formák és nagyfokú tartósság szükséges [25] [26] [33]

Fe-4542 összetétele [35]

Anyag	Mennyiség	Jellemző
Króm (Cr)	15-17%	korrózióállóság biztosítása
Nikkel (Ni)	3-5%	keménység és szívósság fokozása
Réz (Cu)	3,5-5%	martenzites-precipitációs keményítési folyamat elősegítése
Szén (C)	max 0,07%	martenzites szerkezet stabilizálása finomabb precipitátumok kialakításához és a keménység fokozása
Nióbbium (Nb)	max 0,45%	finomabb precipitátumok kialakítása és a keménység fokozása
Szilícium (Si) és Mangán (Mn)	max 1%	



6. ábra Fe-4542 [40]

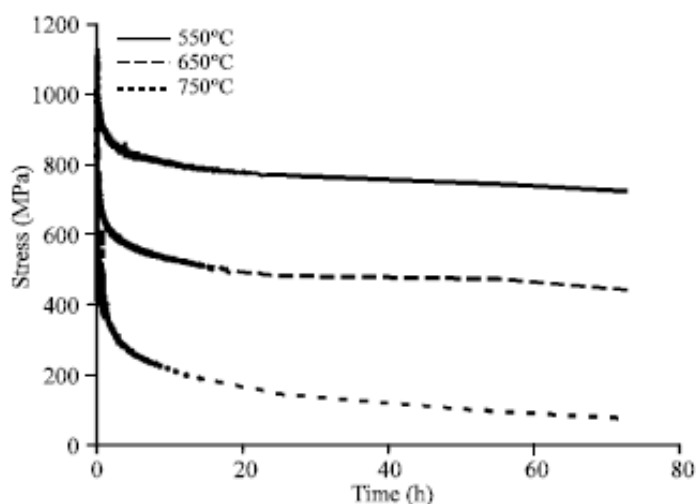
2.3. Hőkezelés bemutatása

A feszültségmentesítő hőkezelés alapvető szerepet játszik a 3D fémnyomtatással készült, valamint a hagyományos úton előállított fémalkatrészek belső feszültségeinek csökkentésében, ami elengedhetetlen a mechanikai stabilitás és az anyagtulajdonságok javítása érdekében. Az additív gyártási technológiával, például a DMLS eljárással készült alkatrészek esetében a belső feszültségek gyakran jelentősen magasabbak lehetnek a hagyományos gyártási módszerekhez képest. Muiruri és munkatársai megállapították, hogy a DMLS technológiával gyártott alkatrészek 650 °C-on, három órán át argon atmoszférában végzett hőkezelése hatékonyan csökkenti a maradék feszültségeket, ami az anyag ütésállóságának 20–32%-os növekedését eredményezi, valamint a ridegség enyhülését is elősegíti. Ezen hőkezelési eljárás csökkentette a képlékeny-rideg átmeneti hőmérsékletet (DBTT), lehetővé téve az alkatrészek számára, hogy szélesebb hőmérséklettartományban megőrizzék szerkezeti integritásukat.

Az Fe 4542 acél optimális feszültségmentesítő hőkezeléséhez hasznos támpontot adnak a hasonló alacsony ötvözetű acélokra vonatkozó hőkezelési diagramok és irányelvek, amelyek alapján a feszültségmentesítést 450–650 °C közötti hőmérsékleten ajánlott végezni. Fontos azonban, hogy a hőkezelés után lassú, szabályozott lehűtést alkalmazzunk, így elkerülve az esetleges újabb feszültségek kialakulását. Ezen hőmérsékleti és időbeli paraméterek betartása lehetővé teszi a feszültségek leépülését anélkül, hogy jelentős fázisátalakulás következne be, amely károsan befolyásolhatná az anyag szerkezeti integritását és mechanikai tulajdonságait.

A Fe 4542 rozsdamentes acél feszültségmentesítő hőkezelését optimálisan 600 °C körüli hőmérsékleten végzik, ami homogén szövetszerkezetet eredményez, amely fokozza az

anyag szívósságát és ellenállóképességét a dinamikus igénybevételekkel szemben. Ez különösen előnyös az additív gyártási technológiával készült alkatrészek esetében, ahol a belső feszültségek magasabbak lehetnek. A 600 °C-on 24 órán keresztül végzett kísérleti hőkezelés során az általunk vizsgált Fe 4542 munkadarabokon feszültségcsökkenést sikerült elérni anélkül, hogy a kristályszerkezetben káros változások következtek volna be, elkerülve a szemcsedurvulás okozta mechanikai tulajdonságromlást (nem értük el a fázisátalakulási hőmérsékletet). [27]



2

7. ábra Feszültségrelaxációs görbék [36]

A 7-es ábrán látható feszültségrelaxációs görbék szemléltetik, hogy a belső feszültségek csökkenésének mértéke szoros összefüggésben áll a hőkezelés hőmérsékletével. Magasabb hőmérsékleteken a feszültségcsökkenés gyorsabb, mivel az anyag képlékeny deformációra való hajlama fokozódik. Emellett a görbék azt is megmutatják, hogy egy bizonyos hőntartási idő, körülbelül 24 óra után a feszültségek csökkenése jelentősen lassul, és a relaxációs folyamat lényegében telítődik.

2.4. Huzalszikra gép bemutatása

A 3D fémnyomtatott próbatestek precíz leválasztása érdekében huzalszikra forgácsolás technológiáját alkalmaztunk, mivel ez minimalizálja a vágás során bevitt feszültséget. Az alacsony hőbevitel segít elkerülni a munkadarabban kialakuló, nemkívánatos feszültségeket, ezáltal megőrizve az alkatrész stabilitását. A huzalszikra forgácsolás (WEDM – Wire Electrical Discharge Machining) technológia során anyagleválasztás gyors és ismétlődő elektromos kisülések segítségével történik a folyamatosan mozgó, 0,01–0,3 mm átmérőjű huzalelektroda és a munkadarab között. E huzalátmérő biztosítja a szükséges rugalmasságot

a vezető görgőkön való áthaladáshoz, miközben a huzal magas szakítószilárdsággal és hajlítósilárdsággal rendelkezik a folyamat igénybevételeinek elviseléséhez.



8. ábra Huzalszika forgácsolás

Az eljárás alatt kialakuló extrém magas hőmérséklet, amely elérheti az 50 000 °C-ot is, megolvasztja és elpárologtatja a munkadarab legfelső rétegét; ezt a keletkező olvadt fémcseppeket a dielektromos folyadék mossa el a munkaterületről. A WEDM hatékony kemény, összetett geometriai formájú anyagok, például szerszámacélok megmunkálásában, amelyeknél a hagyományos forgácsolási technológiák nem hatékonyak. A technológia nagy előnye, hogy a munkadarab minimális mechanikai terhelést és hőhatást szenved el, ami különösen fontos a precíziós alkatrészek gyártásánál. A megmunkálás minősége szorosan függ a beállított paraméterektől, mint például a kisülési idő, az áramerősség és a szünetidő, melyek optimális szabályozása lehetővé teszi a magas felületi minőség elérését és az anyagvesztés minimalizálását. [28]

2.5. 3D szkennelés bemutatása (GOM ATOS Q 12m)

A kutatás során a mérési dokumentációt és vizuális adatokat a robotkarra szerelt, automatizált GOM ATOS Q 12M ipari 3D szkennelőrrel végeztük, a 3D Technology Kft. támogatásával, ez a 9-es ábrán látható. Az ATOS Q innovatív technológiái – például a Triple Scan és a Blue Light Equalizer – pontos és részletgazdag adatokat biztosítanak, még bonyolult geometriájú felületek esetén is. Cserélhető lencséinek köszönhetően a rendszer rugalmasan alkalmazkodik a mérési terület méretéhez, így kis és közepes alkatrészek esetén is magas felbontású eredményeket nyújt.

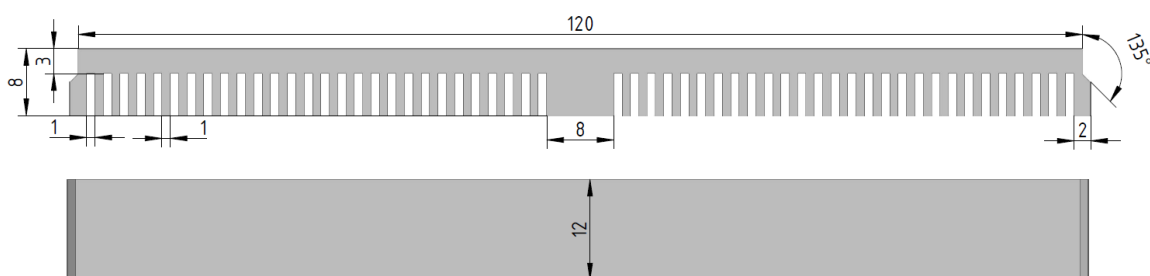


9. ábra Alkatrész bemérése GOM rendszerrel

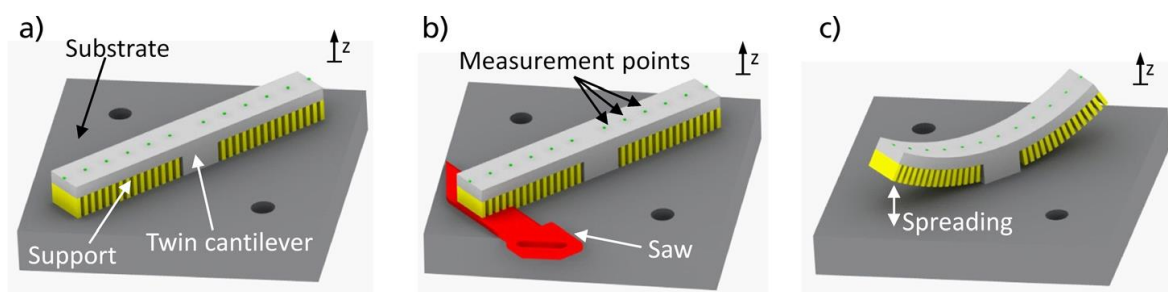
Az optikai szkennerek rendkívüli pontosságát az ISO 10360 és a VDI/VDE 2634 szabványok szigorú követelményei és a kalibrációs eljárások biztosítják. Az ISO 10360 szabvány meghatározza a mérőberendezések, például a szkennerek teljesítményének ellenőrzéséhez szükséges tesztelési módszereket, ideértve a lineáris hibát, a tapogatási hibát és a térfogati hibát (Volumetric error). A VDI/VDE 2634 irányelv kiegészíti ezt az optikai rendszerek, különösen 3D szkennerek teljesítményének és pontosságának részletes értékelésével, például a gömbök közötti távolság (SPH - Sphere Spacing Error) és a maximális megengedett gömbtávolság-hiba (MPESPH - Maximum Permissible Error for Sphere Spacing) mérésével. Az optikai szkennerek kalibrációja egy ismert hőtágulási együtthatóval és hibával rendelkező kerámia etalonlappal kezdődik, amelynek segítségével a rendszer beállítja paramétereit és ellenőrzi a digitalizált felület eltérését a referenciaértékektől. Ezt követően gömbteszteket végeznek, ahol különböző formákban és szögekben helyeznek el, hogy az eszköz teljes mérési tartományában igazolják a pontosságot. A kalibráció során a pixelalapú eltérések dokumentálásával meghatározzák az MPPE-t (Maximum Permissible Error of the Equipment). A rendszer maximális hibahatára mindössze 0,01 mm, amit a mérés előtti kalibráció biztosít, garantálva a specifikációknak megfelelő, pontos és ismételhető eredményeket. Az optikai szkennerek nemcsak egyedi pontokat, hanem teljes felületeket is analizálnak statisztikai módszerek alkalmazásával, megfelelve a legszigorúbb ipari szabványoknak. Ez a megközelítés precizitást és megbízhatóságot nyújt a mérések során.[38] [39]

2.6. Kutatási módszer bemutatása

Kutatásunkban a belső feszültségek elemzését a deformáció mérésére alapozva végeztük, amelyhez egy hordozható alaplemezre rögzített twin cantilever munkadarabot használtunk. A twin cantilever egy olyan speciálisan kialakított kísérleti eszköz, amely két párhuzamosan elhelyezett és rögzített konzolos karból áll, amelyeket egy közös alaplemez kapcsol össze. E konstrukció lehetőséget nyújt arra, hogy ugyanazon mintadarabon belül két eltérő kezelési módszer hatásait párhuzamosan vizsgáljuk és hasonlítsuk össze. A módszer alapját az képezi, hogy a támaszok alaplemezhez rögzített állapotában a belső feszültségek kiegyenlítettek, míg a támaszok elvágása egyenlőtlen feszültségeloszlást idéz elő, amely a munkadarab maradandó deformációját okozza. A deformáció mértéke közvetlen kapcsolatban áll a belső feszültségek nagyságával, így a háromdimenziós szkennelés révén pontosan feltérképezhető a teljes munkadarab. E módszer alkalmazásával kutatásunkban a hagyományos feszültségmentesítő hőkezelési eljárás hatásait vizsgáljuk.



10. ábra Munkadarab rajz



11. ábra Vizsgálat folyamata [39]

A hordozható alaplemez előnyös a twin cantilever típusú vizsgálata során, mivel elősegíti a mintadarab könnyű mozgatását és áthelyezését, miközben stabil és merev tartást biztosít, amely fontos a pontos mérési eredmények eléréséhez. A stabilitás minimalizálja a külső rezgések és elmozdulások hatását, így javítja a deformáció mérések megbízhatóságát.

Az alaplemez kialakítása egyszerűsíti a minta rögzítését és eltávolítását, lehetővé téve a kezelések közötti gyors váltást, miközben a hordozhatóság különböző tesztkörnyezetekben való alkalmazást is biztosít. Ezen tulajdonságok hozzájárulnak a mérési elrendezés rugalmasságához és a kísérletek reprodukálhatóságához.

A vizsgálat során a munkadarabokat a huzalszakra vágó berendezésre a technológiai előírásoknak megfelelően pozícionáltuk, majd a mozgási sík mentén mérőórával pontosan beállítottuk. Elsőként a munkadarab egyik felét vágtuk be horizontális sík mentén, vagyis leválasztottuk az alaplemezről. Ezt követően a munkadarabokat optikai szkennerral bemértük, és az így kapott eredményeket dokumentáltuk. A kezdeti mérés után a mintákat 600 °C-on, 24 órán keresztül feszültségmentesítő hőkezelésnek vetettük alá, majd a korábbi lépéseknek megfelelően a munkadarab másik felét is elválasztottuk az alaplemezről. A második vágás után újra bemérést végeztünk a koordinátamérőgéppel, és rögzítettük az új adatokat. A folyamat végén a mért eredményeket részletes elemeztük, összehasonlítva a hőkezelés előtti és utáni állapotokat.

3. Kísérleti eredmények bemutatása

A kiértékeléshez szükséges adatokat a GOM ATOS Q ipari 3D optikai szkennerral készített részletes mérési dokumentációkból és a szkennerek által generált nagy felbontású képekből nyertük. Az ATOS Q szkennerek lehetővé tették az alkatrész komplex geometriai jellemzőinek pontos felmérését és rögzítését, így a nyomtatott alkatrész és a CAD modell közötti eltérések kvantitatív elemzését. Az eszköz által generált részletes adatkészletek és vizuális megjelenítések precíz összehasonlítást tesznek lehetővé, amely hozzájárul a 3D nyomtatási technológia pontosságának és megbízhatóságának tudományos alapú értékeléséhez.

3.1. A mérési pontok bemutatása

Az ikerkonzolos geometrián két jellegzetes mérési pont van. A geometria lehetővé teszi két különböző munkadarab állapot összehasonlítását egy geometrián belül. Így a munkadarabok gyártásából adódó eltérésekre a kísérlet nem lesz érzékeny, mert önmagához lehet hasonlítani a munkadarabon történt változásokat. A geometria két mérési ponttal rendelkezik, de három mérési adatot tudunk kinyerni belőle. Az egyes mérési pontot a hőkezelés előtt bevágtuk és megmértük a felhajlás hatását a 3D optikai szkennerral, majd hőkezelést végeztünk rajta. A hőkezelés után bevágtuk a munkadarab másik oldalát is. Ezt követően újra beszkenneltük a munkadarabot és meg tudtuk figyelni az egyes mérési pont változását a hőkezelés hatására, illetve a hőkezelés után bevágott 2. mérési pont torzulását. Így három adat nyerhető ki a munkadarabból. A jellegzetes mérési pontokat a 20. ábra tartalmazza.



12. ábra Munkadarab mérési pontjai

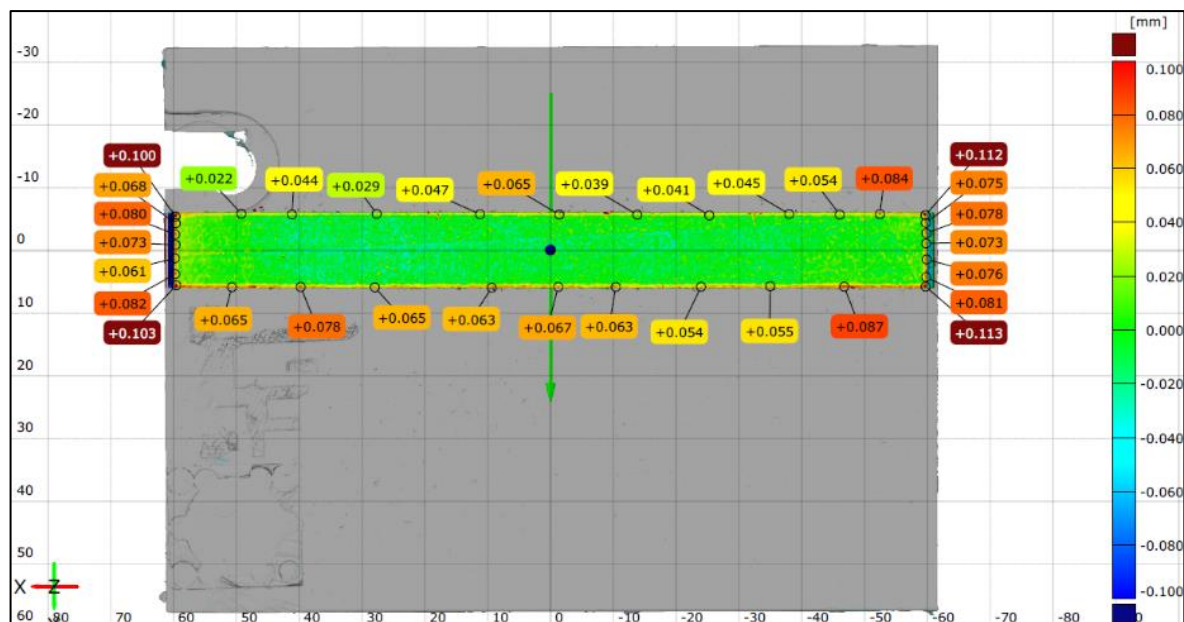
3.2. Összevetés CAD modellel:

A következő vizsgálat során célunk a 3D fémnyomtatással készült alkatrész méreteinek és geometriai jellemzőinek részletes elemzése, amelyeket a tervezési fázisban készített CAD modellel hasonlítunk össze. Elsődleges szempontom a gyártott alkatrész valós méretei és a CAD modell ideális értékei közötti eltérések feltárása, különös tekintettel azokra az esetleges deformációkra, amelyek a nyomtatási technológia sajátosságaiból, az anyagi jellemzőkből, valamint a hőhatásokból adódhatnak. Az eredmények alapján értékeljük a 3D fémnyomtatási eljárás pontosságát és megbízhatóságát. Ezen megállapítások hozzájárulhatnak a 3D nyomtatott alkatrészek tervezési és gyártási folyamatainak finomításához, elősegítve a gyártási pontosság növelését és a végtermék minőségének optimalizálását.

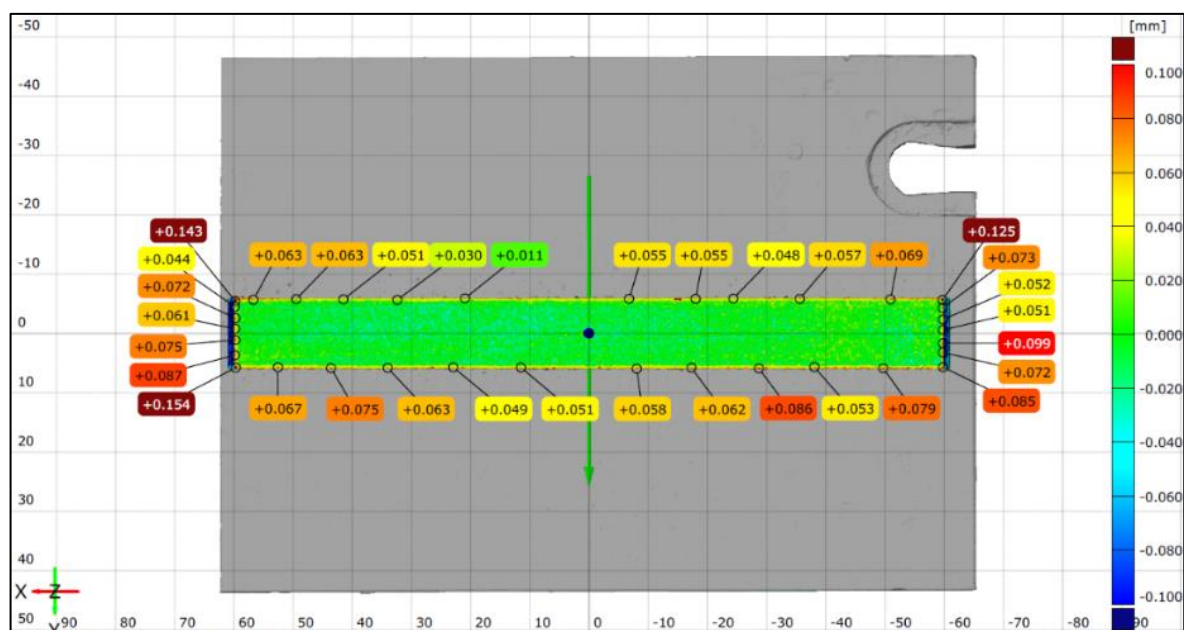
A jelen vizsgálat során a gyártott alkatrészek tényleges geometriai paramétereit összehasonlítottuk az eredeti CAD-modelljeikkel.

3.2.1. Anyagtöbblet a kontúron

Az alkatrészt a felső felületén vett síkon a kontúr mentén változás figyelhető meg mindkét munkadarab esetében, melyeknek számszerűsített értékeit és eloszlását az 1. táblázat szemlélteti. Az utolsó réteg nyomtatásakor megfigyelhető anyagtöbblet a berendezés pásztázási stratégiájának következménye lehet, amely a kontúrok pályája mentén haladva magasabb lézerteljesítményt alkalmaz. Ez intenzívebb hevítést és részleges megolvadást okozhat a belső területekre szánt porban is, így homogén anyagtöbblet alakul ki a kontúrvonal mentén. A jelenség a hőmérsékleti különbségekből és a hűlési sebességek eltéréseiből adódik, amit a technológiai paraméterek és a pásztázási stratégia határoz meg. Az egységes anyagtöbblet mértékét a 13-as és 14-es ábra mutatja.



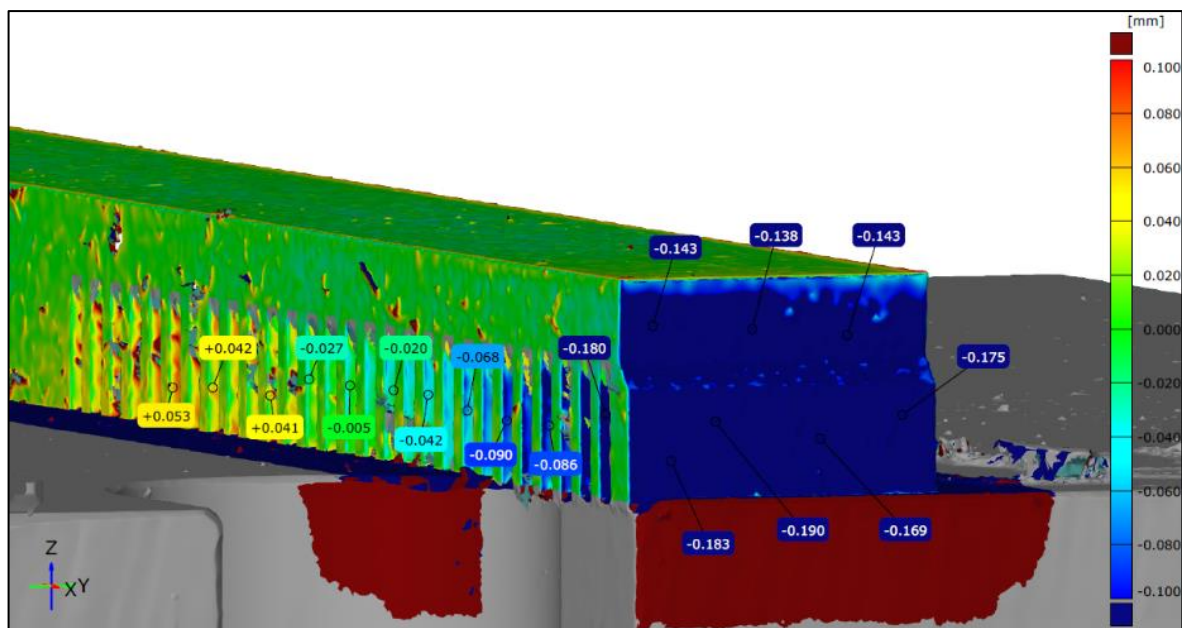
13. ábra 1-es munkadarab kontúr hibájának értékei



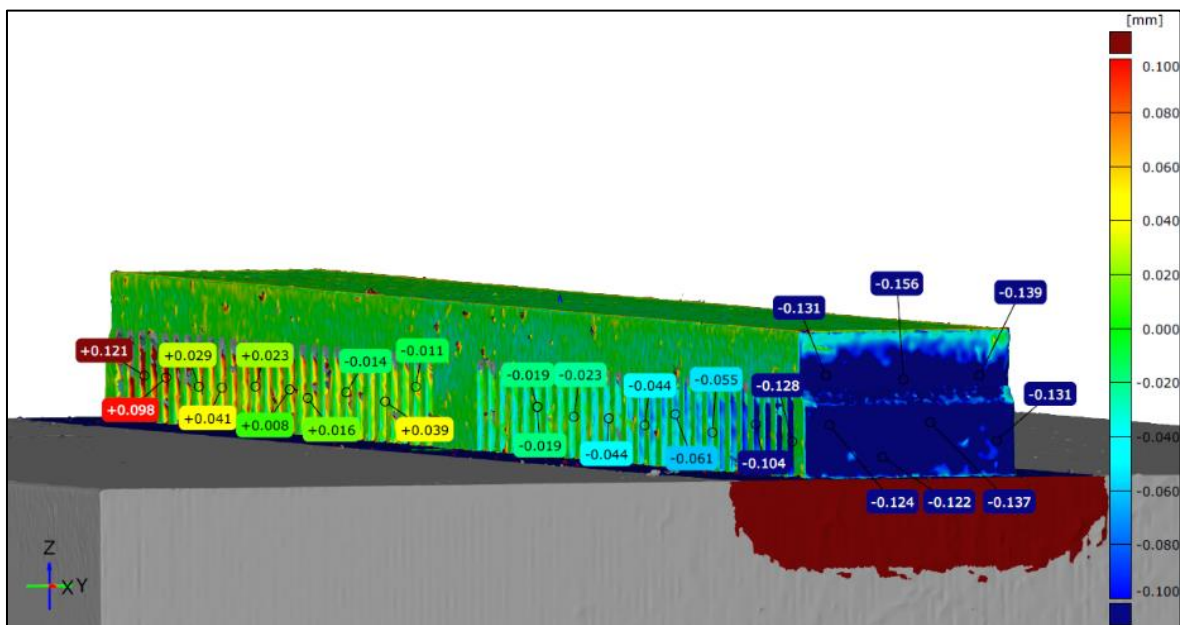
14. ábra 2-es munkadarab kontúr hibájának értékei

3.2.2. Támaszeltolódás hiba

A képek elemzése során megfigyeltük az alkatrész támasztékainál jelentkező szisztematikus geometriai eltérést, amely a 14-es és 15-ös ábrán látható. Az általunk vizsgált ikeronizolos munkadarabokon tapasztalt támaszeltolódás a szelektív lézeres olvasztás (DMLS) folyamatában fellépő maradék feszültségekkel magyarázható, amelyeket a réteges felépítés során fellépő hőmérsékleti változások indukálnak. A támasztékok egyik fő feladata, hogy biztosítsák a hő elvezetését és egyenletes eloszlását az alaplap felé, ezáltal csökkentve a hőkülönbségekből adódó belső feszültségek kialakulását. Az SLM technológia során minden új réteg lerakása lokális hevítést igényel, ami az anyagban gyors hőmérsékletváltozásokat okoz. Ezek a hőingadozások akadályozzák a szabad hőtágulást, és képlékeny alakváltozást idéznek elő a frissen lerakott rétegekben, amelyek az egyes rétegekben és a szerkezet egészében belső feszültségeket generálnak. A jelenséget részletesen tárgyaló Buchbinder és társai szerint a hőmérsékleti gradiens következtében kialakuló képlékeny anyagváltozásból eredő feszültségek különösen érzékenyen befolyásolják az ikeronizolos geometriákat. Az első rétegek gyors hűlése zsugorodást eredményez, amely a támaszokat elhajlítja. A későbbi rétegek ennél kisebb mértékben zsugorodnak, de a felhalmozódó képlékeny deformációk az alkatrész szabad részein, például a konzolvégeken, makroszkopikus torzulást eredményeznek, azaz jelentős támaszeltolódásokat figyelhetünk meg. Ezeket az eredményeket a 15-ös és 16-os ábra is kiválóan tükrözi. [29]



15. ábra 1-es munkadarab



16. ábra 2-es munkadarab

Az elemzett adatok alapján a munkadarab oldalirányban nem mutatott jelentős eltérést, és egyéb szakaszain is a CAD modellhez képest pontos méretbeli egyezést tapasztaltunk.

Az alábbi táblázat a nyomtatási geometria vizsgálatának eredményeit tartalmazza. A bemutatott értékek a mért adatokból számított átlagok alapján kerültek meghatározásra, így a táblázatban szereplő adatok a mérési eredmények átlagolt értékeit mutatják.

1. táblázat: Nyomtatási hibák átlagos értékei

Vizsgált irányok	Érték	1-es munkadarab [mm]	2-es munkadarab [mm]	Hiba jellege
X homlokfelület	Min.	0,023	0,017	Rövidülés
	Max.	0,190	0,156	
	Átlag	0,101	0,119	
Y homlokfelület	Min..	-	-	Nincs
	Max.	-	-	
	Átlag	-	-	
Z homlokfelület	Min.	0,022	0,011	Anyagtöbblet a kontúr mentén
	Max.	0,113	0,154	
	Átlag	0,075	0,069	

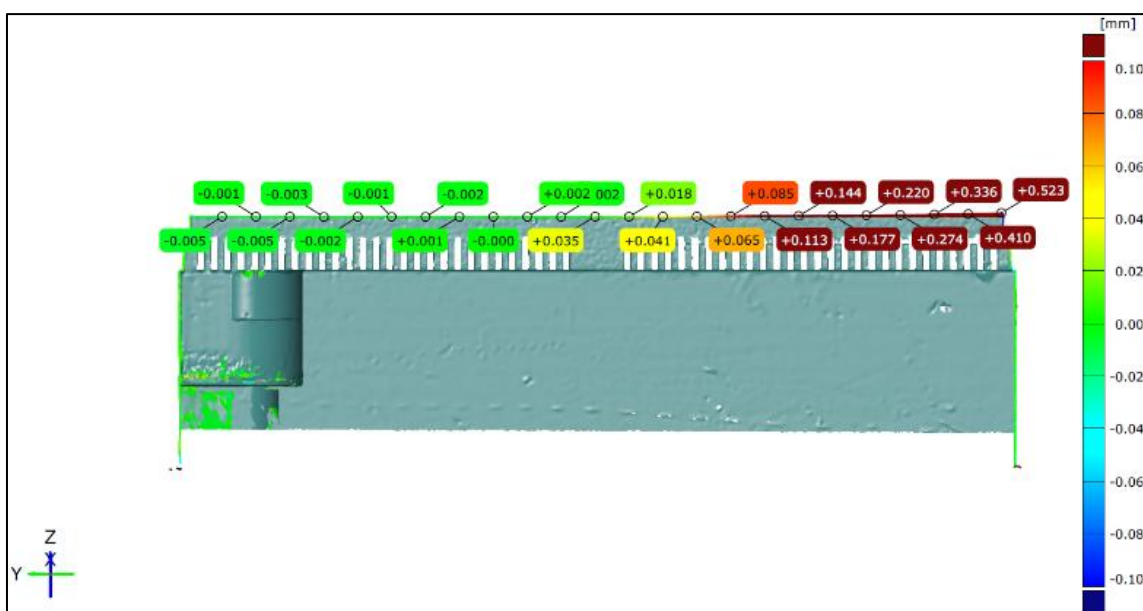
A vizsgált munkadarabok mérései alapján a támaszoknál kialakuló hibától eltekintve megállapítható, hogy az EOSINT M270 3D fémnyomtató nyomtatási pontossága megfelel a

geometria függvényében megadott 0,05–0,2 mm-es tűréshatárnak, ami igazolja a nyomtatás pontosságát és stabilitását.

3.3. Munkadarabok deformáció vizsgálatai

3.3.1. Az első bevágás hatása

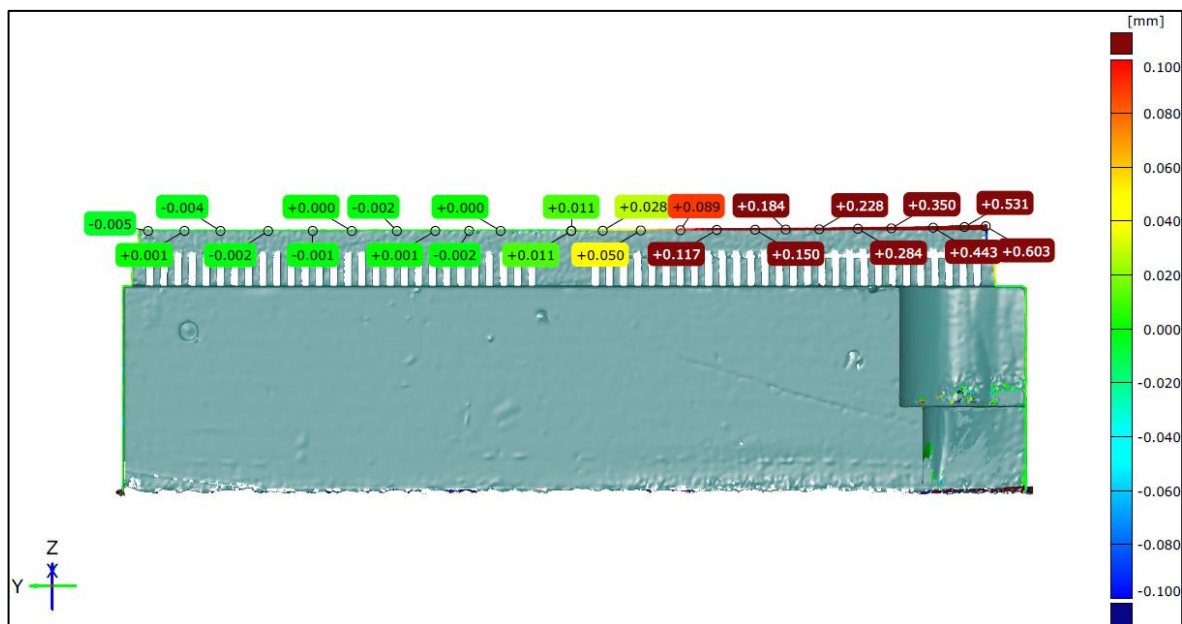
A bevágott munkadarabok vizsgálata során megfigyeltük, hogy mindkét esetben a várt módon következett be a felhajlás a hőkezelés előtt: az egyes munkadarab felhajlásának mértéke 0,523 mm, míg a kettes munkadarabé 0,603 mm volt. Ezek az eredmények egyértelműen igazolták az anyagban lévő belső feszültségek jelenlétét, lehetőséget biztosítva azok demonstrálására és mérésére mindenféle feszültségcsökkentő eljárás nélkül. A felhajlás mértékének számszerűsítése alapvetően fontos volt, mivel így pontosan dokumentálhattuk az egyes munkadarabok belső feszültségeit, ami később referenciaértékként szolgálhat a hőkezelési eljárások hatékonyságának értékeléséhez. Az első munkadarab a bevágás után a várakozásoknak megfelelően felhajlott, ennek nagyságát és eloszlását a 17. ábra mutatja be.



17. ábra 1-es munkadarab felhajlása és annak eloszlása

Bár a munkadarabok ugyanazon a gépen és egyszerre készültek, felhajlásuk mértékében mutatkozó eltérések arra utalnak, hogy a 3D fémnyomtatási folyamat során kialakuló belső feszültségek és mikrostruktúra eloszlása finom, de különbségeket eredményezhet. Az ilyen eltérések nemcsak a gép működéséből fakadhatnak, hanem a rétegezés során fellépő lokális hőmérséklet-ingadozások, a környezeti feltételek kismértékű változásai vagy az egyes rétegek eltérő hűlési dinamikája is befolyásolhatják az anyagban felgyülemelő feszültségek

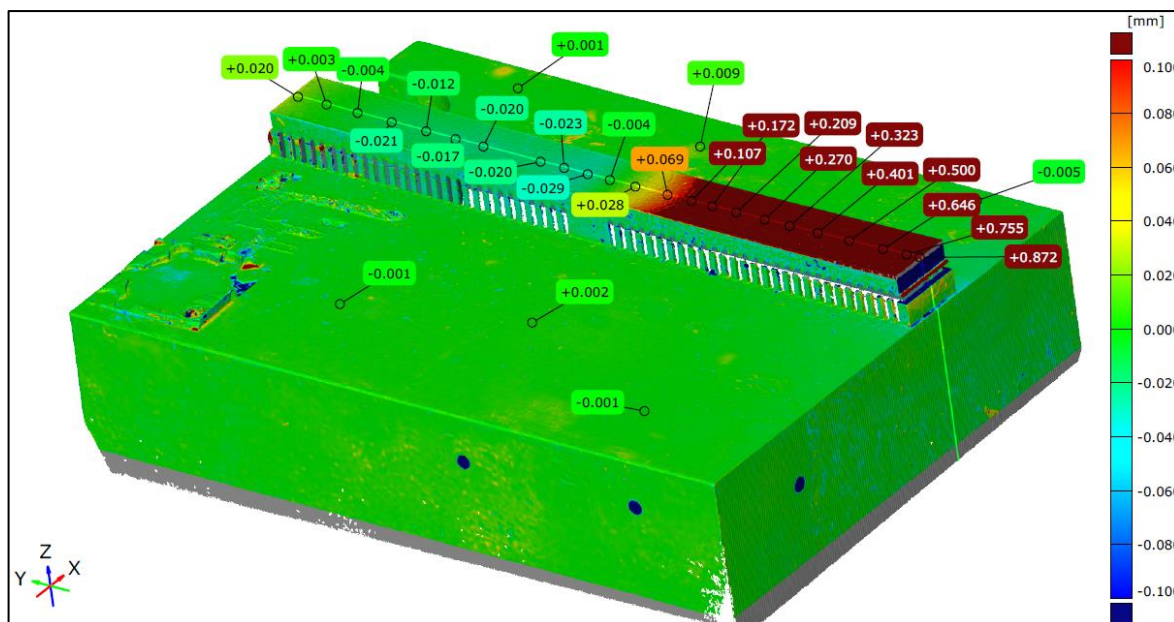
eloszlását. Ez az érzékeny reakció mechanikai különbségeket eredményez a végső deformációs válaszban, és rávilágít arra, hogy a 3D fémnyomtatási folyamat során az anyag belső szerkezetének és feszültségeloszlásának kialakulása apró eltérésekre is érzékeny. A 18. ábra a 2. munkadarab felhajlásának mértékét és eloszlását mutatja be.



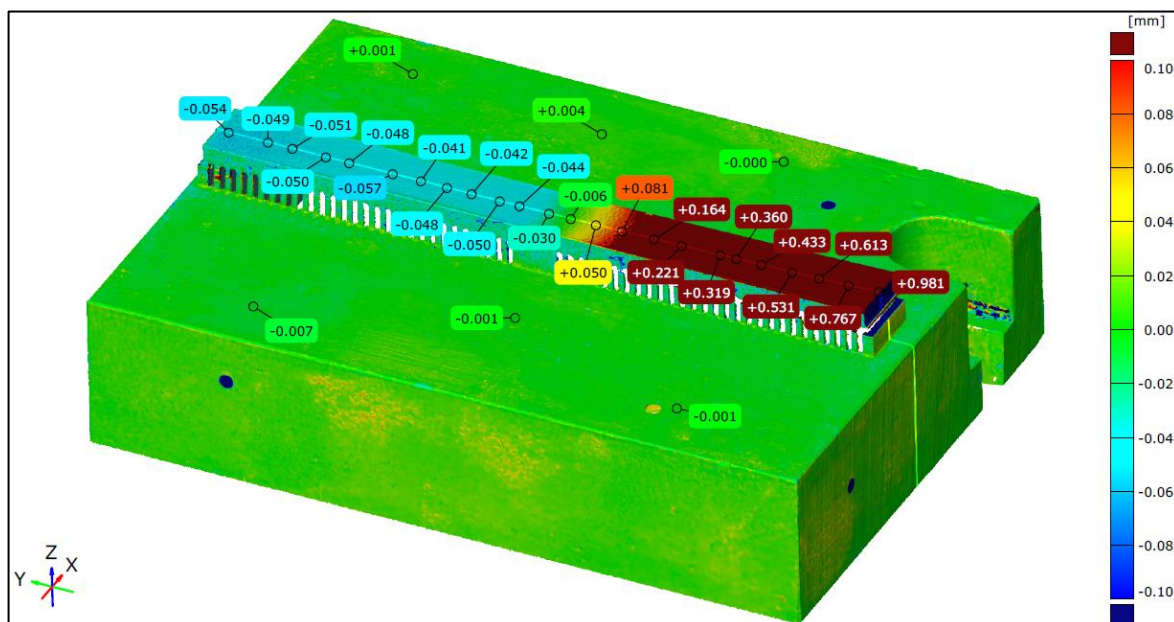
18. ábra 2-es munkadarab felhajlásának mértéke és eloszlása

3.3.2. A hőkezelés hatása a bevágott oldalakra

A következő vizsgálatok során az alkatrészeket már a hőkezelés utáni állapotukban elemezzük, hogy pontosabb képet kapjunk a feszültségmentesítő hőkezelés hatékonyságáról. A 3D fémnyomtatás rétegenkénti felépítése és a gyors hűlés jelentős lokális belső feszültségeket generált az anyagban, amelyek a bevágás után részlegesen felszabadultak, ezzel kezdeti felhajlást okozva. A felhajlás hatására a belső feszültségek egyensúlyt tartanak a felhajlott geometriával, de még mindig jelen vannak az anyagban. A hőkezelés során elkezdjük melegíteni a munkadarabot. A melegítés hatására az anyagok szilárdsági jellemzői romlanak. A melegítés során tehát az anyag ellenállása csökken, de a feszültségek jelen vannak az anyagban és újra az egyensúlyi állapotra törekednek. Így még tovább képesek hajlítani a munkadarabot. Ezt követően újra kialakul az egyensúlyi állapot. Ezen kísérlet alapján kijelenthető, hogy hőkezelés során előbb lágyul ki az anyag, mint ahogy a feszültség leépülése megtörténne. A hőkezelés utáni állapotot mutatja be a 19-es és a 20-as ábra. Az ábrákon egységes tendencia figyelhető meg, a felvágott oldal további romlása. A romlás mértéke mindkét esetben jelentős.



19. ábra 1-es munkadarab hőkezelés utáni állapota



20. ábra 2-es munkadarab hőkezelés utáni állapota

3.3.3. A hőkezelést követő bevágás hatása

A hőkezelést követően végzett bevágás a munkadarab másik oldalán nem vagy számottevően kis értékben eredményezett felhajlást, ami azt jelzi, hogy a hőkezelés hatékonyan csökkentette a belső feszültségeket és stabilizálta az anyag szerkezetét. A hőkezelés során az anyagban eredetileg jelenlévő feszültségek nagymértékben relaxálódtak és egyenletesebben oszlottak el, ezáltal minimalizálva a bevágás utáni lokális alakváltozások kockázatát. A feszültségek jelentősen csökkentek, de a munkadarabok kis mértékben mégis

eltérően viselkedtek. Míg a hőkezelés előtti bevágásnál a felhalmozódott feszültségek azonnal mechanikai deformációt idéztek elő, addig a hőkezelés után az anyag szerkezete már nem mutatott jelentős reakciót. Ez a viselkedés jól szemlélteti a hőkezelés hatékonyságát a belső feszültségek csökkentésében, és megerősíti, hogy a hőkezelés nélkül az anyag hajlamosabb lenne alakváltozásra.

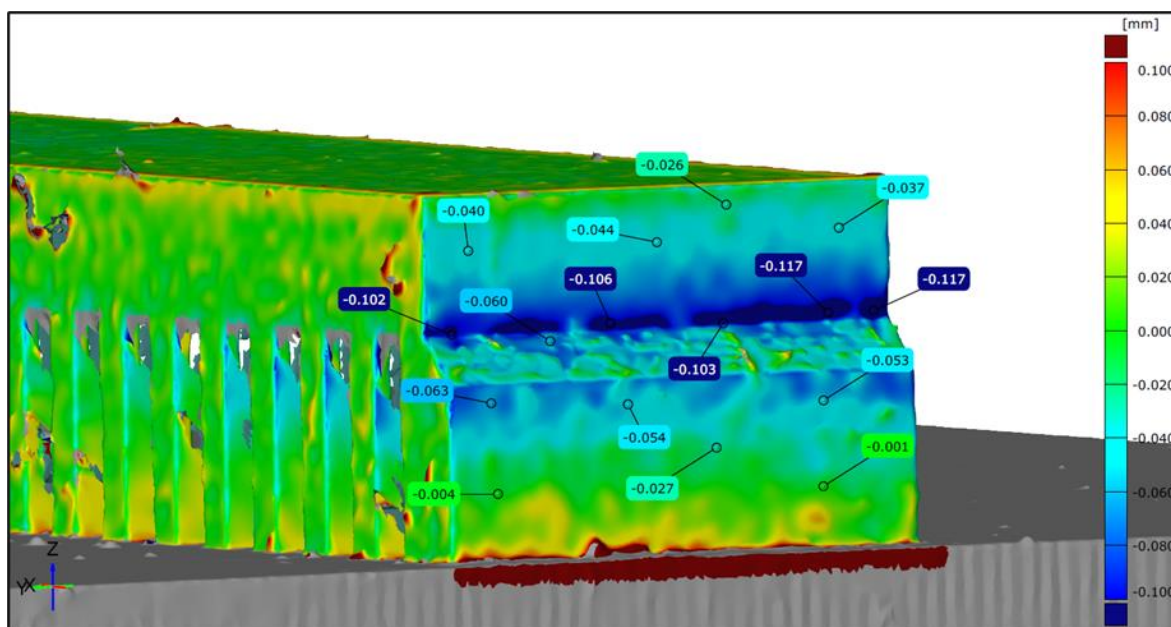
Ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy az egyes munkadarab esetén eltérés tapasztalható, ez jól látszódik a 19-es és a 20-as ábrák bal oldalán. Az egyes munkadarab esetén a 19. ábra bal oldalán a szintérváltozás egységes, a mért értékek is alátámasztják, hogy szinte nem történt alakváltozás. A második munkadarab esetén az eltérés a felhajlás irányával ellentétes irányú, ez 20. ábra bal oldalán figyelhető meg. A szintérváltozás jól jelzi az eltéréseket. A bal oldal eltérése egységes, de a változás látványos a szintérváltozásnak köszönhetően, ezt alátámasztják a mérési eredmények is. Az optikai szkennelés megengedett maximális hibája 0,01 mm, ami azt jelenti, hogy a 2. munkadarab bal oldalán tapasztalt lehajlások értéke nagyobb, mint a mérési hiba határ. A lehajlás nagysága a felhajláshoz képest jelentősen alacsonyabb és a szokásos alaktűrések nagyságával összemérhető, így a hőkezelés sikeressége igazolható. Ugyanakkor a két munkadarab eltérően viselkedett a hőkezelés után, ez az eltérés nem jelentős és nagyságrendileg a tűrések tartományába esik, de tudományos értelemben további vizsgálatok elvégzése indokolt.

4. Konklúzió

4.1. Az alkatrész geometriai pontossága

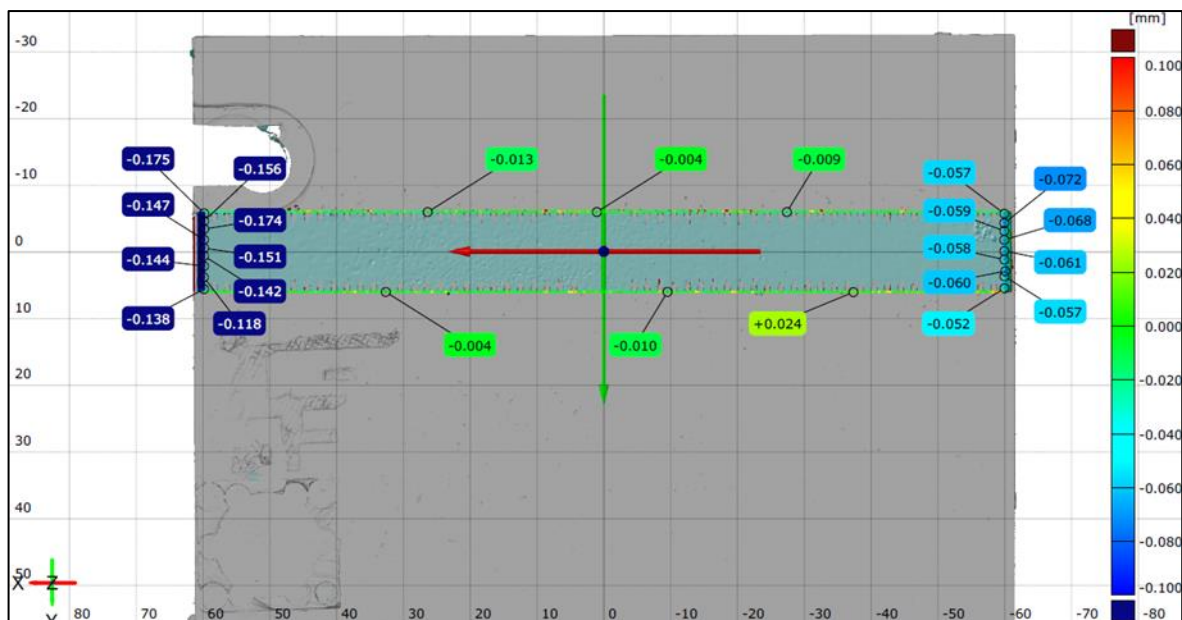
A legyártott alkatrészeket beszkenneztük és összevetettük a CAD modellel. Ezzel meg tudtuk határozni az alkatrészek gyártási pontosságát. A GOM optikai szkennert ezt követően az elméleti geometriához hasonlította a felvágás előtti pontfelhőt. Ennek segítségével meg tudtuk határozni az eltéréseket. Az elméleti geometriától két jellegben tért el a nyomtatott munkadarab. Az eltérések jelen voltak, de kijelenthető, hogy a mérési eredményeket nem befolyásolták. Az optikai szkennert előnye, az, hogy eltéréseket detektál, ezért nem érzékeny a hibákra, kizárja a geometriai hibák hatását a mérési eredményekre.

A mérési eredmények alapján azonosítottunk rövidülési hibát, az X tengely mentén. Ezáltal a két X irányú homlokfelület nagyságrendileg oldalanként 0,05 és 0,175 mm közötti rövidülést szenved. Ez látható a 21. ábrán.

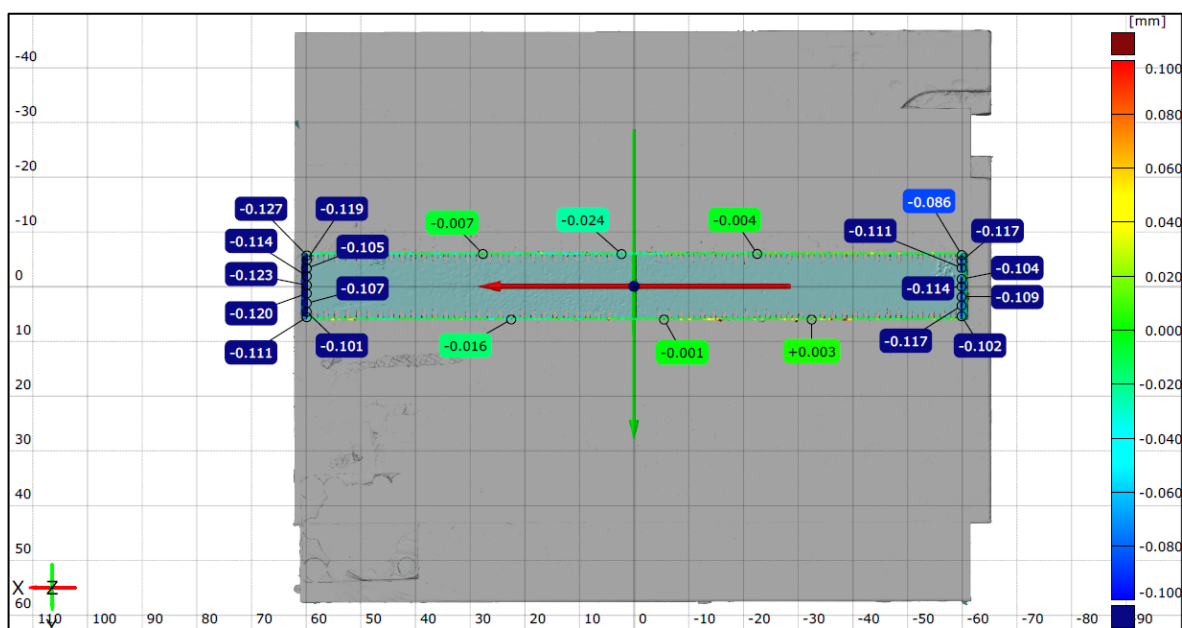


21. ábra X irányú rövidülés

A rövidülési hiba okozza a támaszok eltolódásának a hibáját is. Ugyanis a támaszok a munkadarab széle felé haladva egyre nagyobb mértékben tértek el a CAD modelltől, ez látható a 21. ábrán. A 22. és 23. ábra mutatja be az egyes és a kettes munkadarab rövidülését és ezeknek a jellegét. Ezt a támasz hibát tehát a zsugorodásból adódó feszültségek torzító hatásának tulajdonítjuk.

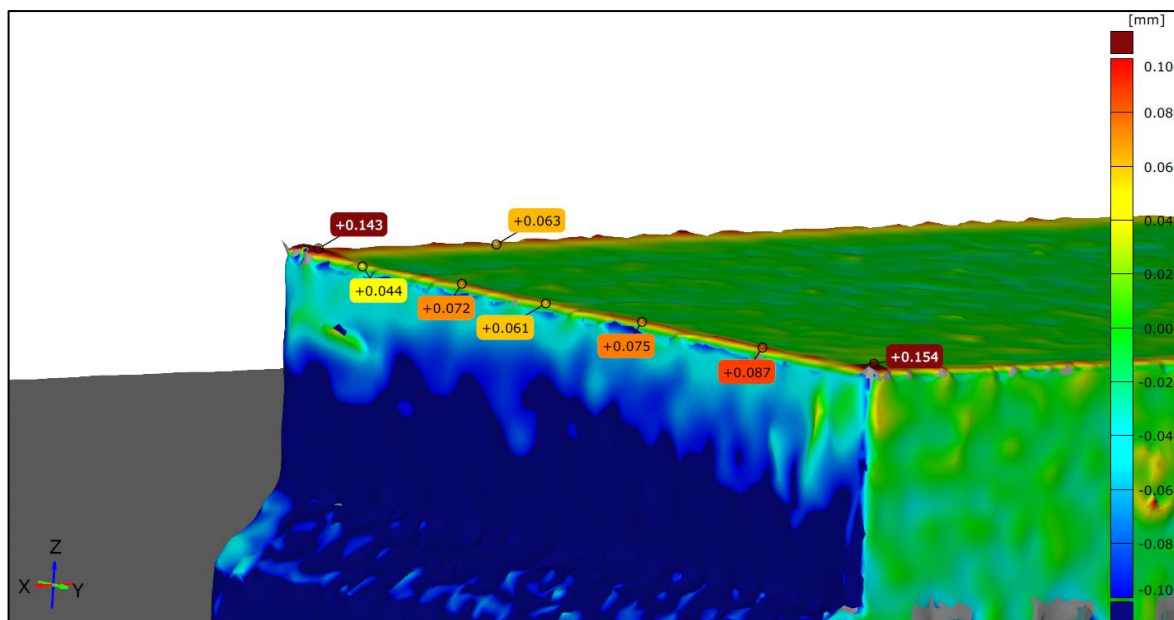


22. ábra X irányú rövidülés az 1. munkadarab esetén



23. ábra X irányú rövidülés a 2. munkadarab esetén

A munkadarab Z irányában is tapasztaltunk kontúrhibát. Ez egy anyag többlet a kontúr mentén. Ez a munkadarab gyártása során alkalmazott technológiából fakad, ugyanis először a munkadarab kontúrját pásztázza végig a lézer. Ez a folyamat egy rádiusz jellegű geometriát okoz a munkadarab közvetlen szélén és egy anyagtöbbletet kicsit beljebb. Ez a jelenség látható a 24. ábrán.

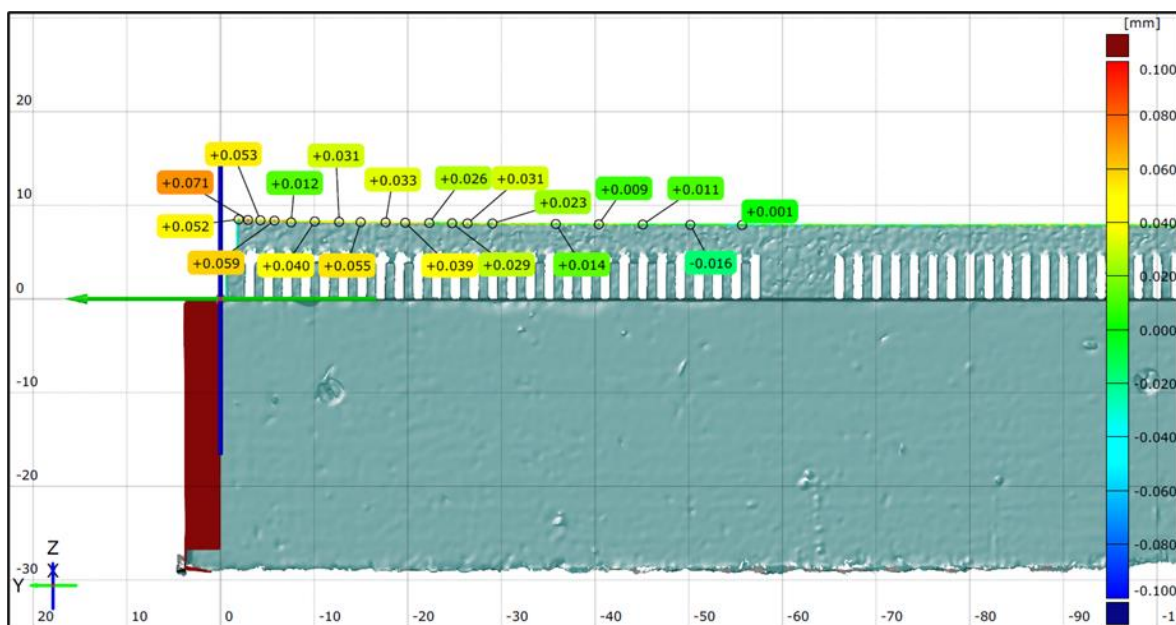


24. ábra Z irányú kontúreltérés

4.2. Geometriai deformáció mértékének értékelése

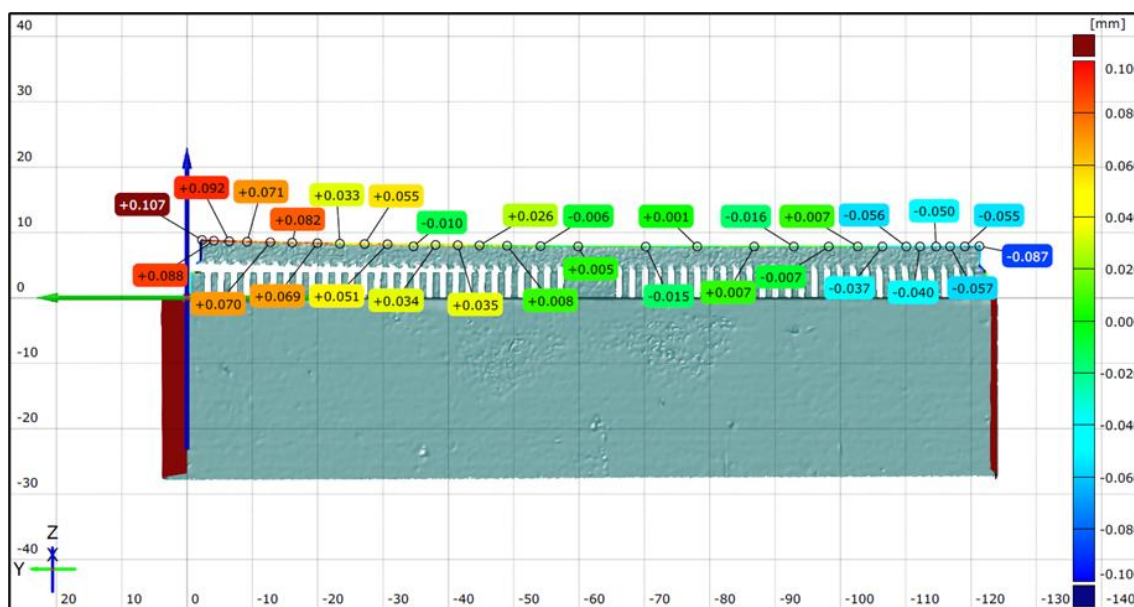
A 3D nyomtatást követően az alkatrészek egyik oldalát felvagtuk és optikai szkennert segítségével a CAD modellhez viszonyítva megfigyeltük a változásokat. A felhajlás mértéke és jellege mind a két esetben azonos jelleget és hasonló mértékeket mutat.

A 25. ábrán látható a hőkezelés előtti bevágás jellege és méretei egymáshoz viszonyítva. Az ábrán a két munkadarab felvágott oldalának a különbségét figyelhetjük meg. Az ábra alapján kijelenthető a hogy a deformáció jellege megegyezik.



25. ábra A két munkadarab egymáshoz viszonyított eltérése hőkezelés előtt

A 26. ábrán a hőkezelés utáni állapotban vannak összehasonlítva egymáshoz képest a munkadarabok. Az ábra alapján kijelenthető, hogy a hőkezelés előtt felvágott és deformálódott oldal a hőkezelés során még tovább deformálódott mind a két munkadarab esetén. A deformáció jellege és nagyságrendje is megegyezik. A hőkezelés után felvágott oldal jellegében eltérés van. A számszerű egzakt eltérés nagyságrendileg 0,05 - 0,06 mm, ez a normál alaktűrésekkel összeegyeztethető nagyságú. De az egyik munkadarab esetén szinte 0 a deformáció nagysága hőkezelés után, a másik esetben viszont egységesen lehajlás tapasztalható. Ennek a jelenségnek a vizsgálata további kísérleteket igényel.



26. ábra A két munkadarab egymáshoz viszonyított eltérése hőkezelés előtt

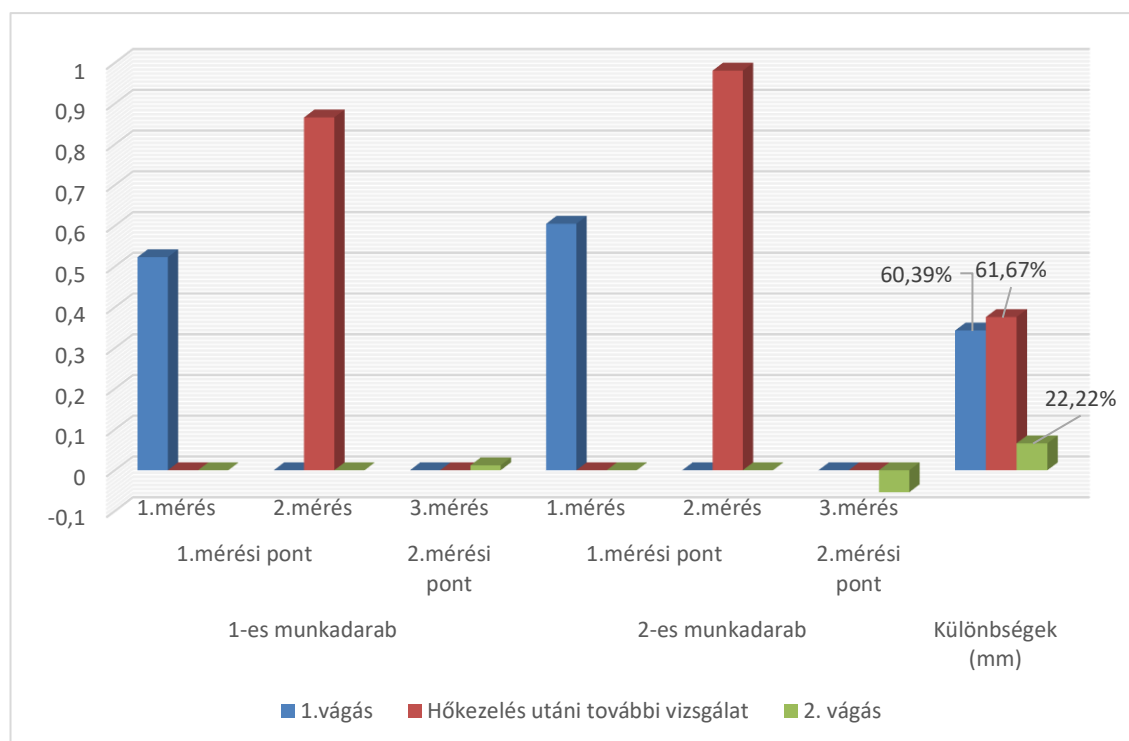
A mérési pontokban dokumentált eltéréseket az 1. táblázat mutatja be. A táblázat a maximális értékeket tartalmazza a jellegzetes pontokon. Az első vágás során az első mérési pontban mért értéket az első méréshez rögzítettük. Majd a hőkezelés utáni tovább változott értéket a 2. méréshez rögzítettük, de ez ugyan az a mérési pont, két külön állapotban. Ezeknek az értékeknek az eltérését (tovább változását) a táblázat végén jelöltük mm-ben és %-ban is. Az eltérések értéke az első felhajláshoz képest értendő.

A második mérési pontban a hőkezelés után elvégzett második vágás utáni változásnak az adatai szerepelnek. A 2. munkadarab 2. mérési pontjában szereplő -0,054 mm-es változás azért negatív előjelű, mert felhajlás irányát vettük pozitív irányának, a lehajlás pedig ezzel ellentétes értelmű, így táblázatban negatív különbség adatként szerepel.

2. táblázat: *Hőkezelés utáni vizsgálati eredmények*

Mérési paraméterek			1. vágás [mm]	Hőkezelés utáni további vizsgálat	2. vágás [mm]	Eltérés [mm]	Eltérés [%]
1-es mdb.	1. mp.	1.mérés	0,523	-	-	0,343	60,39%
		2.mérés	-	0,866	-		
	2. mp.	3.mérés	-	-	0,012	-	-
2-es mdb.	1. mp.	1.mérés	0,603	-	-	0,378	61,67%
		2.mérés	-	0,981	-		
	2. mp.	3.mérés	-	-	-0,054	-	-

A fenti táblázat adatait tartalmazza a lenti ábra. A lenti ábra értelme megegyezik a táblázat értelmezésével, de jobban vizualizálja a mérési adatok által jelentett különbséget.



27. ábra *Hőkezelt geometria vizsgálata*

A fenti adatok alapján kijelenthető, hogy az először felvágott és deformálódott oldalon a hőkezelés tovább romlott, az ellentétes, lekötött oldalon a hőkezelés sikeres volt és feszültség leépülés sikeresen lejátszódott és a deformáció megszűnt vagy nagyságrendekkel kisebb lett.

5. Diszkusszió

A kutatásban a megvizsgált alapeometrián, a munkadarab tetején Z irányú leolvadást és anyagtöbbletet figyeltünk meg. Ezt a gyártási technológia első, kontúrpasztázó lépésével magyaráztuk. A pontos tudományos magyarázat számunkra nem derült ki a szakirodalomból így további kutatást igényelhet.

A munkadarabon elvégzett feszültségmentesítő hőkezelést sikeresnek tekintettük, ugyanis az első esetben a hőkezelést követő felvágás nem okozott deformációt. A második esetben azonban a deformáció jellege a felhajlással ellentétes értelmű lett. Ennek nagysága a szokásos alaktűrések nagyságrendjébe esik, de tudományosan a szakirodalmi információk alapján nem tudtuk megmagyarázni, ezért ennek további vizsgálata indokolt lehet.

Összefoglalás

Ez a kutatás a 3D nyomtatás alapvető problémája köré épült. A DMLS technológiával gyártott alkatrészek a gyártási folyamat során jelentős hőterhelést kapnak. Ebből adódóan a munkadarabok jelentős belső feszültséggel rendelkeznek, amely az alapról történő levágás után deformációs hatást fejt ki. Ezért kijelenthető, hogy az alkatrészek deformációja és a belső feszültségek között kapcsolat áll fent, ezt a szakirodalomkutatásunk is alátámasztja.

A dolgozatban a célunk a DMLS alkatrészek belső feszültségének a vizsgálata volt, amelyre a deformációmérést alkalmaztuk. A DMLS alkatrészek gyártási költsége magas, még a kutatási célú munkadarabok esetén is. Ezért korlátozott számú próbatest állt rendelkezésünkre, de ezek jó geometriával rendelkeztek, ugyanis az egyes munkadarabokon 2 mérési hely állt rendelkezésre (a két oldal tulajdonképpen) és ezeken a köztes kezelési folyamatnak köszönhetően 3 mérési eredményt tudtunk dokumentálni és a hatásokat vizsgálni. A munkadarabnak köszönhetően ugyan azon a darabon tudtuk vizsgálni a hőkezelés és a belső feszültségek hatását.

A mérési módszer megválasztása a GOM optikai szkennerre esett, ugyanis a szkennelés lehetőséget biztosít az eltérések vizsgálatára. Ennek köszönhetően a geometria hibával rendelkező munkadarabok vizsgálata is lehetséges, tehát a drága próbatestek nem vesznek el. A kutatás elején gyártási pontosságot is megvizsgáltuk, ebben az esetben a beszkennt geometriát a CAD modellel hasonlítottuk össze. A talált eltérések minimálisak voltak, de azonosítottuk őket a szakirodalomban megismert hatások függvényében.

Az eredményeink alapján kijelenthető, hogy belsőfeszültségek jelen voltak a munkadarabban és a felvágást követően jelentős deformációt okoztak. Ugyanez az oldal a hőkezelés hatására még tovább deformálódott. Ennek oka valószínűleg az, hogy hőkezelés során az anyag kilágyulása előbb játszódik le, mint a feszültségek leépülése, tehát a felvágott oldalt a hőkezelés negatívan befolyásolta. A hőkezelés során az alaplemezhez támaszokkal rögzített oldal belső feszültségei nagyrészt leépültek. Tehát erre az oldalra a hőkezelés pozitív hatást fejtett ki. A felvágás után ez az oldal az egyik esetben szinte egyáltalán nem deformálódott, a másik esetben pedig az alaktűrések nagyságával összemérhető értékkel, nagyságrendileg 0,05 mm.

A kutatásban megfigyelt jelenségek referenciaként szolgálnak a jövőbeli megfigyelések számára.

Summary

This research was built around one of the fundamental problems of 3D printing. Parts produced using DMLS technology undergo significant thermal loads during the manufacturing process. Consequently, the workpieces develop substantial internal stresses, which cause deformation once they are cut off from the base. Therefore, it can be stated that there is a relationship between the parts' deformation and their internal stresses, a conclusion supported by our literature review.

Our aim in this study was to investigate the internal stresses present in DMLS parts, for which we applied deformation measurement. The production costs of DMLS parts are high, even for test specimens used in research. Thus, we had a limited number of test pieces, but they featured suitable geometries. Each workpiece provided two measurement locations (the two sides essentially), and thanks to an intermediate treatment process, we were able to document three sets of measurement results and analyse the effects. With the chosen workpiece geometry, we could examine the impact of heat treatment and internal stresses on the same part.

We selected a GOM optical scanner as the measurement method, as it enables the analysis of deviations. As a result, even workpieces with geometric imperfections can be examined, meaning that the expensive test specimens are not lost. At the beginning of our research, we also assessed manufacturing accuracy by comparing the scanned geometry to the CAD model. The detected deviations were minimal, and we identified them in the context of effects noted in the literature.

Based on our results, it can be concluded that internal stresses were present in the workpiece and caused significant deformation once it was cut off. The same side underwent even further deformation due to heat treatment. The likely reason is that during heat treatment, material softening occurs before the release of internal stresses, which negatively affected the already cut-off side. On the other hand, the internal stresses in the side that remained fixed to the baseplate with supports largely dissipated during heat treatment, resulting in a positive effect. After the cut, this side hardly deformed in one case, and in the other case the deformation remained within a magnitude comparable to standard dimensional tolerances, around 0.05 mm.

The phenomena observed in this research can serve as a reference for future investigations.

Ábrajegyzék

1. ábra DMLS gép felépítése [7]	15
2. ábra Kritikus felületek [1]	19
3. ábra Elforgatási stratégia [1]	20
4. ábra Rétegelváltások.....	24
5. ábra DMLS berendezés [1].....	34
6. ábra Fe-4542 [40]	36
7. ábra Feszültségrelaxációs görbék [36]	37
8. ábra Huzalszakra forgácsolás.....	38
9. ábra Alkatrész bemérése GOM rendszerrel.....	39
10. ábra Munkadarab rajz	40
11. ábra Vizsgálat folyamata [39]	40
12. ábra Munkadarab mérési pontjai	42
13. ábra 1-es munkadarab kontúr hibájának értékei	44
14. ábra 2-es munkadarab kontúr hibájának értékei	44
15. ábra 1-es munkadarab.....	45
16. ábra 2-es munkadarab.....	46
17. ábra 1-es munkadarab felhajlása és annak eloszlása	47
18. ábra 2-es munkadarab felhajlásának mértéke és eloszlása	48
19. ábra 1-es munkadarab hőkezelés utáni állapota	49
20. ábra 2-es munkadarab hőkezelés utáni állapota	49
21. ábra X irányú rövidülés	51
22. ábra X irányú rövidülés az 1. munkadarab esetén	52
23. ábra X irányú rövidülés a 2. munkadarab esetén.....	52
24. ábra Z irányú kontúreltérés.....	53
25. ábra A két munkadarab egymáshoz viszonyított eltérése hőkezelés előtt.....	53
26. ábra A két munkadarab egymáshoz viszonyított eltérése hőkezelés előtt.....	54
27. ábra Hőkezelt geometria vizsgálata.....	55

Irodalomjegyzék

- [1] I. Hatos, H. Hargitai és J. G. Kovács, „Műanyag fröccsöntő szerszámbetétek szinterezési technológiája”.
- [2] M. Shellabear és O. Nyrhilä, „DMLS-Development history and state of the art,” 2024.
- [3] V. Dr. Mertinger, J. Sólyom és D. Cseh, „Maradó feszültségek vizsgálata röntgendiffrakcióval,” *Miskolci Egyetem*, 2010.
- [4] L. Dr. Katula, L. Kovács, F. Dr. Gyimesi, A. Szigethy és V. Dr. Borbély, „Hegesztési maradó feszültségek kísérleti vizsgálata,” 2015.
- [5] T. Duda és V. L. Rhagavan, „3D Metal Printing Technology”.
- [6] V. E. Szabó és K. Kun, „Laser sintering of metal powders: identification of defects and solution strategies,” *Materials*, 2024.
- [7] E. P. Albert, L. M. Sherri és A. F. Philip, „Overhanging Features and the SLM/DMLS Residual Stresses Problem: Review and Future Research Need,” *Technologies*, 2017.
- [8] F. Calignano, D. Manfredi, P. E. Ambrosio és L. Iuliano, „Influence of process parameters on surface roughness of aluminium parts produced by DMLS,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012.
- [9] I. Hatos, „Additív szerszámgártás technológiájának fejlesztése járműipari alkatrészek gyártásához,” Széchenyi István Egyetem, 2020.
- [10] S. Leuders, M. Thöne, A. Riemer, T. Niendorf, T. Tröster, A. H. Richard és J. H. Maier, „On the mechanical behaviour of titanium alloy TiAl16V4 manufactured by selective laser melting: Fatigue resistance and crack growth performance,” *International Journal of Fatigue*, 2012.
- [11] „<https://techworld.hu/>,” 27 12 2018. [Online]. Available: <https://techworld.hu/2018/12/27/3d-nyomtatott-feknyerget-keszitett-a-bugatti/>. [Hozzáférés dátuma: 2 10 2024].
- [12] „media.porsche.com,” [Online]. Available: <https://media.porsche.com/mediakit/porsche-innovationen/en/porsche-innovationen/3d-printed-pistons>. [Hozzáférés dátuma: 5 10 2024].
- [13] „<https://3dprinting.com/>,” 21 10 2024. [Online]. Available: <https://3dprinting.com/news/ferrari-f80-showcases-additive-manufacturing-in-suspension-system/>. [Hozzáférés dátuma: 2 11 2024].
- [14] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, P. E. Ambrosio és E. Atzeni, „From Powders to Dense Metal Parts: Characterization of a Commercial AlSiMg alloy Processed through Direct Metal Laser Sintering,” *Materials*, 2013.
- [15] V. Contaldi, F. Del Re, B. Palumbo, A. Squillace, P. Corrado és P. Di Petta, „Mechanical characterisation of stainless steel parts produced by direct metal laser sintering with virgin and reused powder,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019.
- [16] B. Kemerling, C. J. Lippold, M. C. Fancher és J. Bunn, „Residual stress evaluation of components produced via direct metal laser sintering,” in *Welding in the world*, 2018.
- [17] G. Lenkeyné Bíró, S. Dr. Szávai, P. Rózsahegyi, Z. Bézi, B. Baptisza, B. Kelenföldi és P. Matusz, „Technológiai maradó feszültségek modellezése és azok hatása a

- járműipari szerkezetek integritására,” Bay Zoltán Alkalmazott Kutatási Közhasznú Nonprofit Kft.-Logisztikai és Gyártástechnikai Intézet, Miskolc, 2013.
- [18] P. J. Withers, „Residual stress and its role in failure,” *Reports on Progress in Physics*, 2007.
- [19] B. Mondal, T. Mukherjee és T. DebRoy, „Crack free metal printing using physics informed machine learning,” *Acta Materialia*, 2022.
- [20] H. Gao, S. Wu, Q. Wu, B. Li, Z. Gao, Y. Zhang és S. Mo, „Experimental and simulation investigation on thermal-vibratory stress relief process for 7075 aluminium alloy,” *Materials nad Desing*, 2020.
- [21] J. Aschenbrenner, Fémötvözetek tulajdonságainak megváltoztatása hőkezeléssel, Budapest: Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet, 2008.
- [22] E. G. Totten, Steel heat treatment handbook, U.S.A.: Taylor & Francis Group, 2006.
- [23] D. W. Callister és G. D. Retwisch, Materials Science and Engineering: An Introduction, U.S.A.: Wiley, 2013.
- [24] D. Rao, D. Wang, L. Chen és C. Ni, „The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress,” *International Journal of Fatigue*, 2007.
- [25] C. Y. Lin és C. S. Chen, „Effect of residual stress on thermal fatigue in a type 420 martensitic stainless steel weldment,” *Journal of Materials Processing Technology*, 2003.
- [26] H. Song, Z. Gao, X. Zhou, Q. Zhang és B. Zhang, „Research on the evolution law and control mechanism of residual stress under vibration stress relief,” *Materials Today Communications*, 2024.
- [27] R. Dawson és G. D. Moffat, „Vibratory Stress Relief: A Fundamental Study of Its Effectiveness,” *Joournal of Engineering Materials and Technolgi*, 1980.
- [28] D. Serranti, R. Silva, D. Souza, J. Wiesel, D. Cunha, D. Araújo és L. Vilarinho, „Variation of the vibrational treatment on mechanical properties and weld residual stress,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024.
- [29] J. Song és Y. Zhang, „Effect of vibratory stress relief on fatigue life of aluminium alloy 7075-T65I,” *Advances in Mechanical Engineering*, 2016.
- [30] A. C. Walker, A. J. Waddell és J. D. Johnston, „Vibratory stress relief an investigation of the underlying process,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 1995.
- [31] V. Z. Gyóni és Z. Dr. Weltsch, „Maradó feszültségek csökkentése ultrahangon alapuló kezeléssel,” Kecskemét, 2019.
- [32] H. Gao, X. Li, B. Li, Q. Wu, Y. Ma, X. Jian, H. Song és S. Chen, „Residual stress and microstructure of Ti6Al4V treated by thermal-vibratory stress relief process,” *Journal of Materials Research and Technology*, 2022.
- [33] A. Swietlicki, M. Walczak, M. Szala, M. Turek és D. Chocyk, „Effects of ageing heat treatment temperature on the properties of DMLS additive manufactured 17-4PH steel,” *Material Science and Nanotechnology*, 2023.
- [34] Z. Wang, M. Grimm, T. Lindner, F. Schubert, K. Winkler, R. Berger és T. Lampke, „Wear and corrosion properties of low-temperature nitrocarburized 17-4PH SLM components,” *Surface & Coatings Technology*, 2024.
- [35] „<https://www.kipp.hu/>,” [Online]. Available: <https://www.kipp.hu/hu/hu/Szolg%C3%A1ltat%C3%A1s/Anyag->

- %C3%A1ttekint%C3%A9s/Nemesac%C3%A9l/pid.1097.1108.1244.8092.8204/1-4542-Nemesac%C3%A9l.html. [Hozzáférés dátuma: 1 11 2024].
- [36] O. Bapokutty, Z. Sajuri és J. Syarif, „Stress Relaxation Behavior of Heat Treated Inconel 718,” *Journal of Applied Sciences*, 2012.
- [37] L. Tóth, „Huzalos szikraforgácsolással megmunkált szerszámacélok felületminőségi vizsgálatai,” *Műszaki Tudományos Közlemények*, 2021.
- [38] „<https://www.zeiss.com/>,” [Online]. Available: <https://www.zeiss.com/metrology/en/systems/optical-3d/3d-scanning.html>.
- [39] D. Buchbinder, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach és J. Schrage, „Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting,” *Journal of Laser Applications*, 2014.
- [40] S. Leuders, „On the mechanical...”.
- [41] C. Liu, D. Chen és J. Zou, „Effects of ultrasonic impact treatment on weld microstructure, hardness, and residual stress,” *Materials Science and Technology*, 2017.
- [42] „<https://www.metals4printing.com/>,” [Online]. Available: https://www.metals4printing.com/wp-content/uploads/2019/11/05_m4p_Datenblatt_Fe-4542_DE.pdf. [Hozzáférés dátuma: 1 11 2024].