

Additív technológiával előállított termékekben kialakuló maradó feszültségek vizsgálata

Examination of residual stresses in products produced with additive technology

KOVÁCS SÁNDOR ENDRE

kohómérnök, tanszéki mérnök

DR. VARGA LÁSZLÓ

kohómérnök, egyetemi docens



Az additív gyártástechnológia (AM), elterjedtebb nevén 3D nyomtatás, az egyik leggyorsabban fejlődő gyártási terület. Azonban bármilyen fejlett technológia, nem mindenható. Minden AM eljárással gyártott alkatrész maradó feszültségeket hordoz magában, melynek forrása a gyártási technológia lényegében keresendő [1]. Ahhoz, hogy a 3D nyomtatás létrejöhesse, a gyártóberendezésnek fókuszált termikus energiát kell előállítania, hogy a beadagolt nyersanyagot képes legyen feldolgozni. Ez az energia azonban hatással bír a korábban felhelyezett rétegekre is. Ez az egyedi termikus ciklus befolyásolja a maradó feszültségek mértékét [2, 3].

Kulcsszavak: 3D nyomtatás, rozsdamentes acél, fémpor, maradó feszültség, röntgendiffrakció

Additive manufacturing, more commonly known as 3D printing, is one of the fastest growing industries of our time. In the past decades, after making its grand debut, it has grown into one of the most frequently researched manufacturing methods existing today. No matter how powerful this method might be, it is not omnipotent. Every part made by additive methods carries residual stresses, which phenomena can be traced back to the main characteristics of layer-by-layer deposition of materials. For metal-based machines, the machine requires a great deal of energy, to be able to execute a sintering or melting processes. However, the process requires not only power, but also accuracy. To make this possible, each machine has a focused thermal energy source supplied by an optical system. This optical part makes it possible to connect the power of the energy source with the base material and scan the cross-section fast and evenly. The energy input after the first deposition, will not only affect the layer in work, but the previously deposited ones as well. During our work, we used a Laser Power Bed Fusion (LPBF) technique, with Selective Laser Melting (SLM) method. The basic requirement for powder bed techniques is the ability to ensure a continuous supply of the base material, especially for metals, where the system is sealed and under shield gas, which does not allow further modifications inside the build chamber until the part is done. Inside the machine, there is a building platform taking place under the scanning optics together with a powder reservoir and a powder delivery system. In our instance, the machine works in a circular composition, which means, that our powder delivery system rotates counterclockwise. For each successive lasers, the building platform descends one set distance, which is the layer height, and the powder reservoir ascends. This way, the rotating arm, delivering the base material with a rubber coater, picking up the excess material and making an even layer on the top is the building platform, where the melting phase will start. The SLM process works with molten material, however, this melt only exists for a very short period, until it solidifies again. This will cause the powder material to change phases twice in an instant. The phase change will also include a change in volume. All this, combined with the fact that the source of energy affects the previously deposited layers too, will create a unique thermal cycle further influencing the occurrence of residual stresses as well.

Keywords: 3D printing, stainless steel, metal powder, residual stress, x-ray diffraction

1. Maradó feszültségek kialakulása

A definíció szerint maradó feszültség alatt azokat a mechanikai feszültségeket értjük, melyek valamely munkadarabban, illetve szilárd testben léteznek, és úgy vannak egyensúlyban, hogy a darabra semmilyen külső erő vagy nyomaték nem hat [4].

Ezek a feszültségek mértéküktől függően többféle módon képesek kifejteni a hatásukat, a szemcsék szintjétől egészen a teljes struktúráig. Szemcse szinten mikromechanizmusokat fog befolyásolni, és az ebből eredő hibák nem vagy ritkán fejtik ki hatásukat közvetlenül a testek tulajdonságaira, azonban nagyobb volumenű megjelenései képesek hatni az anyagfolytonosságra, amely hosszú repedésekben, törésekben, vetemedésekben jelenik meg [5]. A méretskála alapján három fő fajtájuk van:

- ❑ makrofeszültség,
- ❑ szemcse szintű feszültségek,
- ❑ molekuláris feszültségek.

Ezenkívül kialakulásuk szerint szintén három fő csoportba sorolhatók:

- ❑ mechanikai feszültség alapján,
- ❑ hőmérséklet-gradiens alapján,
- ❑ kémiai indukált feszültség alapján kialakuló feszültségek.

Az évek során számos kutatás foglalkozott a maradó feszültségek karakterisztikájának vizsgálatával. Mérésekkel megállapították, hogy a geometriai viszonyok szoros összefüggésbe hozhatók a maradó feszültségek mértékének felépülésével. Fémek esetében a támaszelemek kettős célt játszanak. Egyrészt rögzítik az épített geometriát a tárgyasztalhoz, másrészt ezeken keresztül hővezetés is végbemegy. Így éri el a rendszer, hogy működés közben ne tudjon túlmelegedni a munkatér, valamint hogy a megszilárdulás lejátszódjék [6]. Amennyiben a támaszgeometriák nem elég erősek, és azok építés közben elengednek, ez befolyással lehet a terelőegységre, mely a porbeadagolásért felel, és a nyomtatás sikertelen lesz. Azonban minden esetben a támasz – nyomtatott darab kapcsolat nagy maradó feszültségeket fog magában hordozni. Ez a folyamat bizonyos mértékben valamennyi paraméterétől függ. Szerepet játszik a nyomtatási orientáció, a lézerteljesítmény, ennek mozgási sebessége stb. Különböző alapanyagok között ez a kapcsolat drasztikusan változhat [7].

Az anizotrópia elkerülése céljából számos beépített megoldás is létezik, melyet a gyártók különböző kialakításokkal értek el. Mivel SLM¹ technológiával

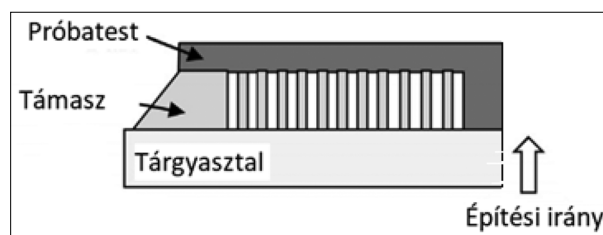
¹ Selective Laser Melting (SLM) – A szelektív lézerolvasztás egyike a sok szabadalmaztatott névnek, az additív gyártási technológiának (AM), amely hőforrással ellátott porágyat használ fémalkatrészek előállításához. (<https://link.springer.com/book/10:1007/978-1-4939-2113-3>)

nem lehet üreges elemeket építeni, mert a bezárt port nem lehetséges a geometria roncsolása nélkül eltávolítani, így olyan tömbi elemeket célszerű tervezni, amelyek nyomtatása során rövid lézerútvonalak alkalmazhatók [8]. További maradó feszültséget csökkentő módszer a munkatér emelt hőmérsékleten tartása. Ezzel az eljárással a maradó feszültségek 85%-a távolítható el a térfogatból. Azonban az emelt hőmérséklet hatására a porágy maradandó változáson mehet keresztül. Szomszédos szemcsék szintereződhetnek, ezzel emelve az átlag szemcseméretet és rontva a viszszajáráthatósági tulajdonságokat [9].

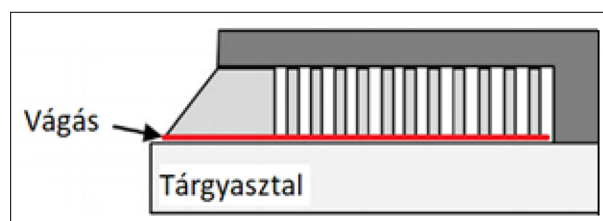
2. 3D-nyomtatott maradó feszültséget mérő próbatetek

A próbatetek nyomtatásának gyakorlati lényege, hogy megvastagított támaszelemekkel közvetlenül a tárgyasztalra kerülnek kinyomtatásra, majd a támaszokat egy horizontális vágással távolítják el, aminek következtében a testek engedni fognak a maradó feszültségeknek, és maradó alakváltozáson mennek keresztül. Ezt a folyamatot mutatja be az 1., 2. és 3. ábra.

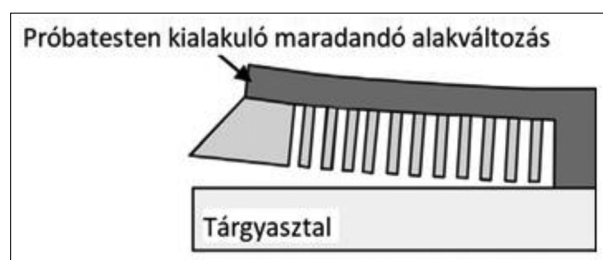
Roncsolásos és roncsolásmentes vizsgálati lehetőségek is rendelkezésre állnak a maradó feszültség mérésére. Azonban számunkra – mivel fontos szem-



1. ábra. AM eljárásoknál alkalmazott maradófeszültség-mérő próbatest



2. ábra. Horizontális vágás bemutatása



3. ábra. Maradó alakváltozás a vágás után

pont a nyomtatási idő és felhasznált alapanyag-mennyiség is – a roncsolásmentes vizsgálatok voltak kedvezőek. Ahhoz, hogy számszerű értékeket kapjunk, a leggyorsabb és leginkább népszerű roncsolásmentes megoldásnak a röntgendiffrakciós (XRD) analízis bizonyult.

3. Maradó feszültség analízise XRD-vel

Az XRD-eljárás a kristálysíkok közötti távolságot használja feszültségmérési alapnak. A deformációk hatására a rácssíkok távolsága a feszültségmentes értékükről egy új értékre változik, amely megfelel a maradó feszültség nagyságának. Ha húzófeszültséget alkalmazunk, a Poisson-szám hatása miatt a rácsháló távolsága a feszültség irányára merőleges síkok esetében nő, a feszültség irányával párhuzamos síkok esetében pedig csökken. Ez az új távolság az alkalmazott feszültséghez képest minden hasonlóan tájolt síkban azonos lesz, ezért a módszer csak kristályos, polikristályos és félkristályos anyagok esetén alkalmazható. A diffrakciós szöget (2θ) kísérletileg határozzák meg, majd a rácstávolságot ebből a diffrakciós szögből és az ismert értékekből számítják ki a Bragg-törvény segítségével [10, 11]. A próbatetek gyártási paramétereit és anyagtulajdonságát az 1. és 2. táblázat szemlélteti.

A port gázporlasztásos eljárással készítették sferoidikus morfológiával. Korrózióálló, 3D-nyomtatásos alkalmazásra kifejlesztett különleges ötvözet, melyet a 4. ábra mutat be.

A maradófeszültség-vizsgálatok készültek nyomtatás után, közvetlenül és hőkezelve is. A választott hőkezelés a gyártó által ajánlott 1 órás, 500 °C-os feszültségmentesítő program volt, amelyet egy lassú, levegőn történő lehűlés követett.

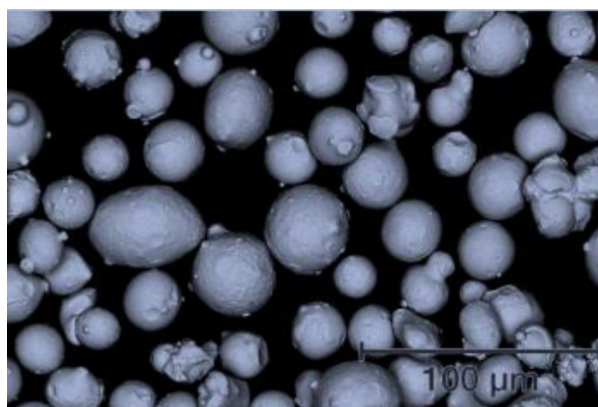
1. táblázat. A 3D nyomtatás paramétereit

| Gyártási paraméter | Érték |
|------------------------|---|
| Lézer és energiatípusa | Yb: szálas, 250 W |
| Lézer hullámhosszúsága | 1070 nm |
| Tárgasztal méretei | 100 mm átmérő, 110 mm magasság |
| Részletpontosság | $x = 80 \mu\text{m}$, $y = 80 \mu\text{m}$, $z = 20 \mu\text{m}$ |
| Általános pontosság | 40 μm |
| Adagoló rendszer | Simító lapát, 200%-os adagolási ráta* |
| Védőgáz | Nitrogén |

*Nagyobb mennyiségű porbejuttatás nagyobb felületek nyomtatása során ajánlott annak érdekében, hogy minden felvitt réteg por egyenlően legyen elosztatva a teljes felületen.

2. táblázat. A 17-4ph rozsdamentes acélpor kémiai összetétele

| Összetétel | Tömegszázalék (m/m%) |
|------------|----------------------|
| Karbon | 0,07 |
| Mangán | 1,00 max. |
| Kén | 0,030 max. |
| Szilícium | 1,00 max. |
| Króm | 17,00 |
| Nikkel | 5,00 |



4. ábra. A 17-4ph acélpor SEM-felvétele

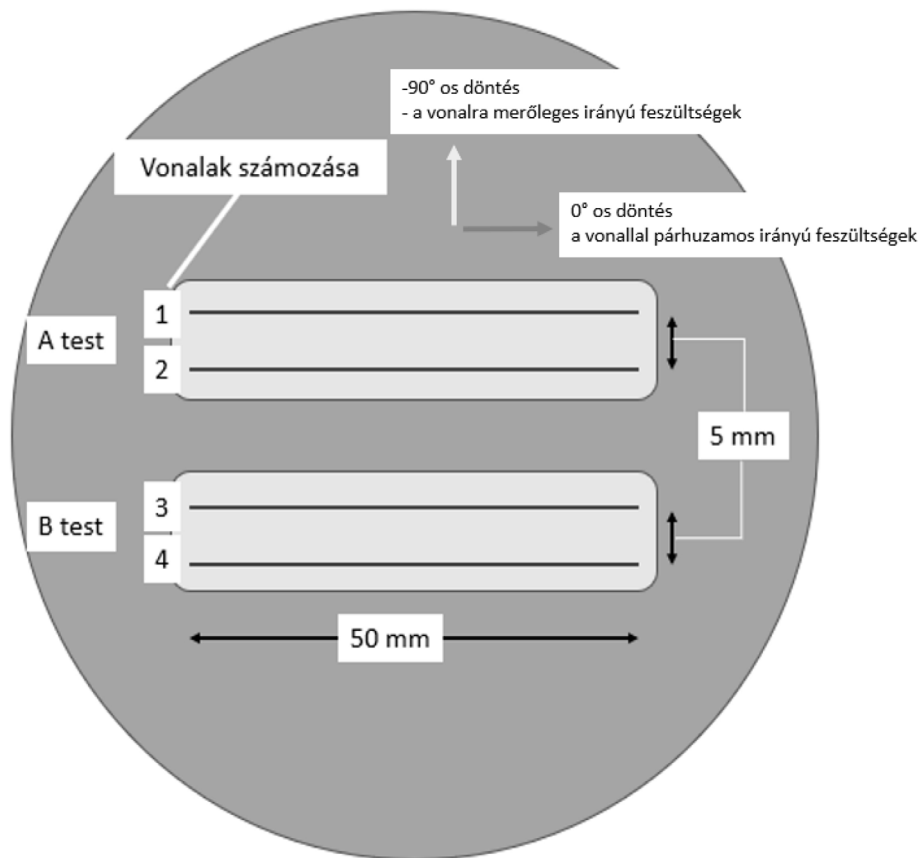
A 17-4ph porból kinyomtatott próbatetekeken az XRD-vizsgálat során minden esetben két vonal mentén, tizenegy különböző mérési pontot vettünk fel, ezt szemlélteti az 5. ábra.

A felvett vonalakra minden esetben 11 db mérési pont definiálása történt. A megkapott értékek között szerepelnek a vonalra párhuzamos és merőleges irányú feszültségek, azonban geometriai megkötések miatt merőleges irányban a próbatest nem vagy csak elhanyagolható szinten képes az alakváltozásra, így a kiértékelés során minden esetben a párhuzamos értékek láthatók. Az első mérési sor eredményeit mutatja be a 6. és 7. ábra.

Ahogy az a mérési eredményekből látszik, egy időben készített próbatetek esetében is rendkívül nagy különbségek jelentkezhetnek. Az „A” jelű próbatestet tovább vizsgálva megállapítható, hogy vágás után mekkora feszültségkülönbség jelentkezik a rögzített és a maradó alakváltozást szenvedett darabok között.

Ezeket a mérési értékeket később összehasonlítottuk a hőkezelt értékekkel. A hőkezelés célja a maradó feszültség csökkentése volt a térfogatban, ennek az eredményeit mutatja be a 9. ábra.

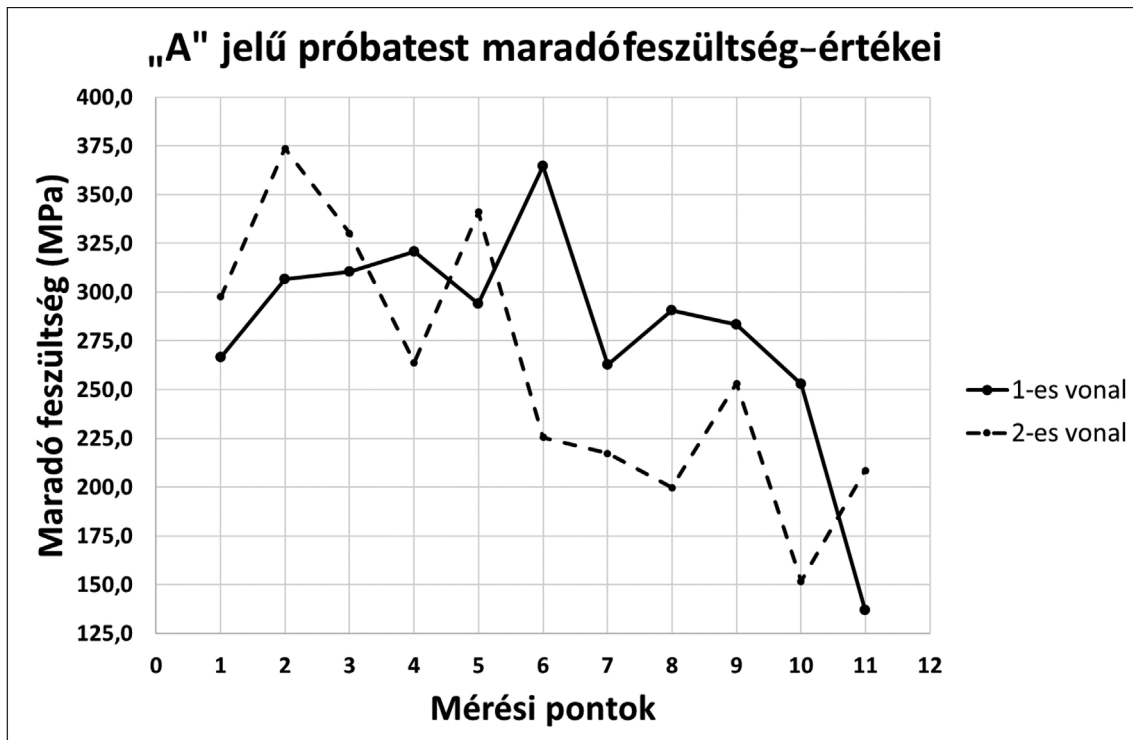
Ahogy a 8. és 9. ábrán látható, a maradó feszültség hőkezeléssel a maradó alakváltozásnál fel-



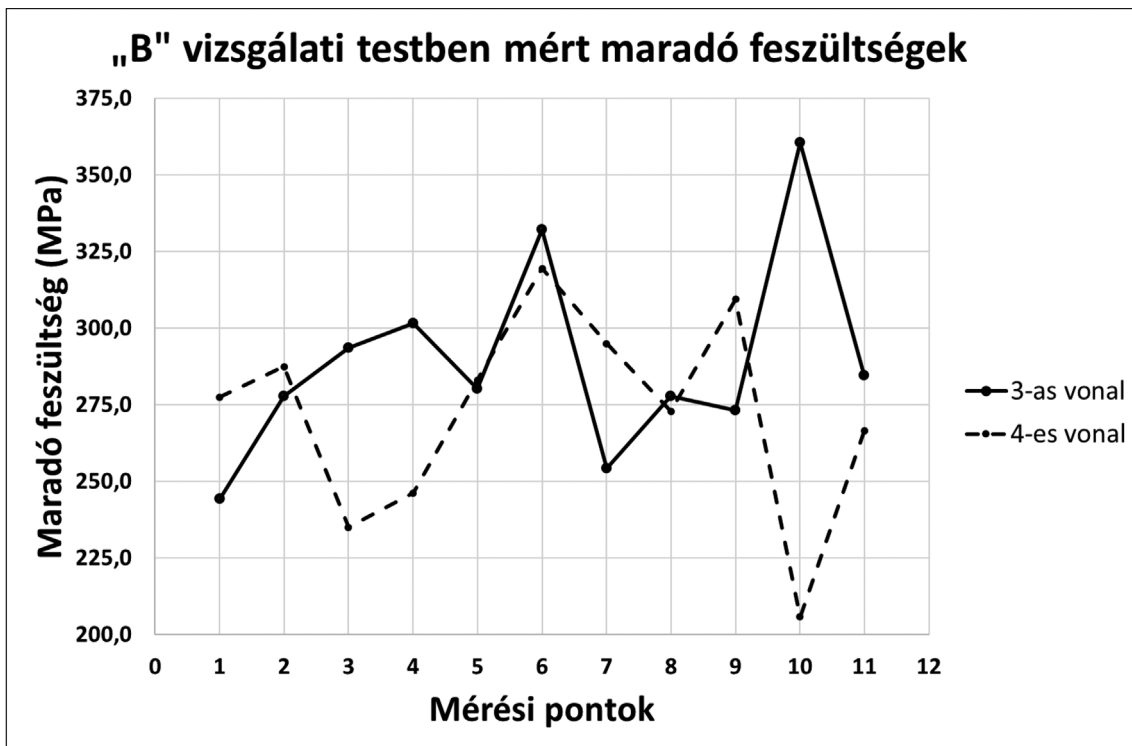
5. ábra. Az XRD-vizsgálathoz a próbatesten felvett mérési vonalak

vett értéket közelíti meg. Ezzel kijelenthető, hogy egy alaphőkezelés is rendkívül nagy hatással van az

AM-eljárással készített alkatrészek beépíthetőségi tulajdonságaira.



6. ábra. „A” jelű próbatest maradófeszültség-értékei



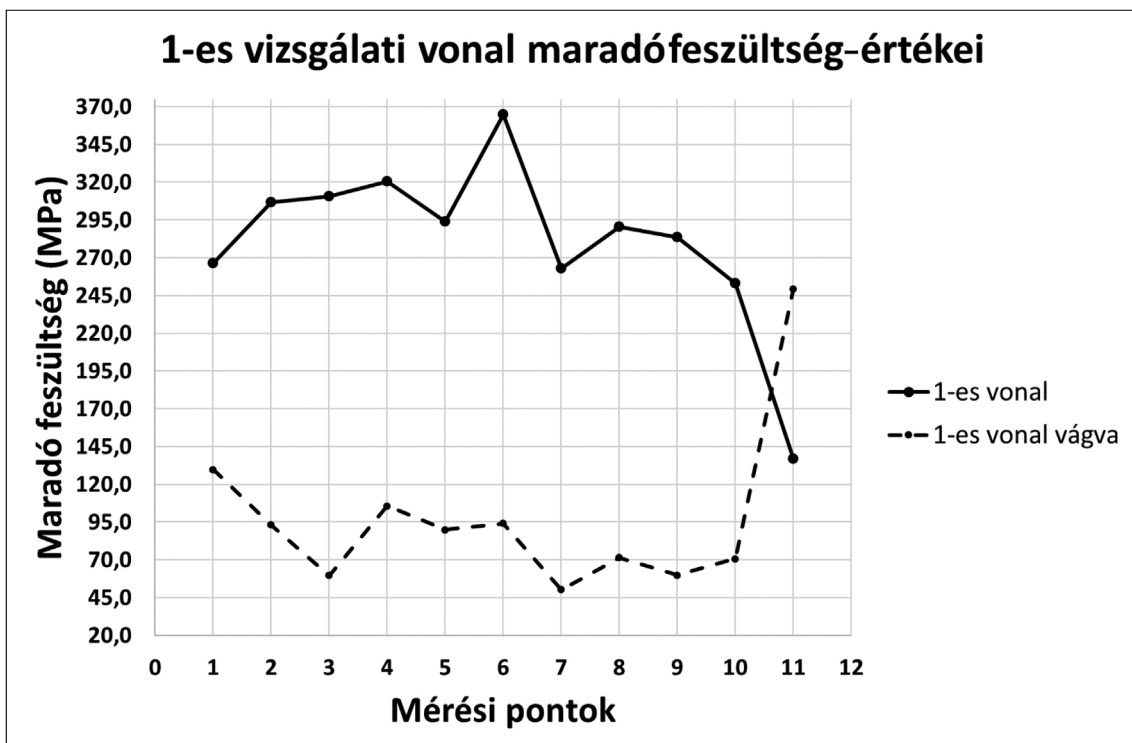
7. ábra. „B” testben mért maradó feszültségek

Összefoglalás

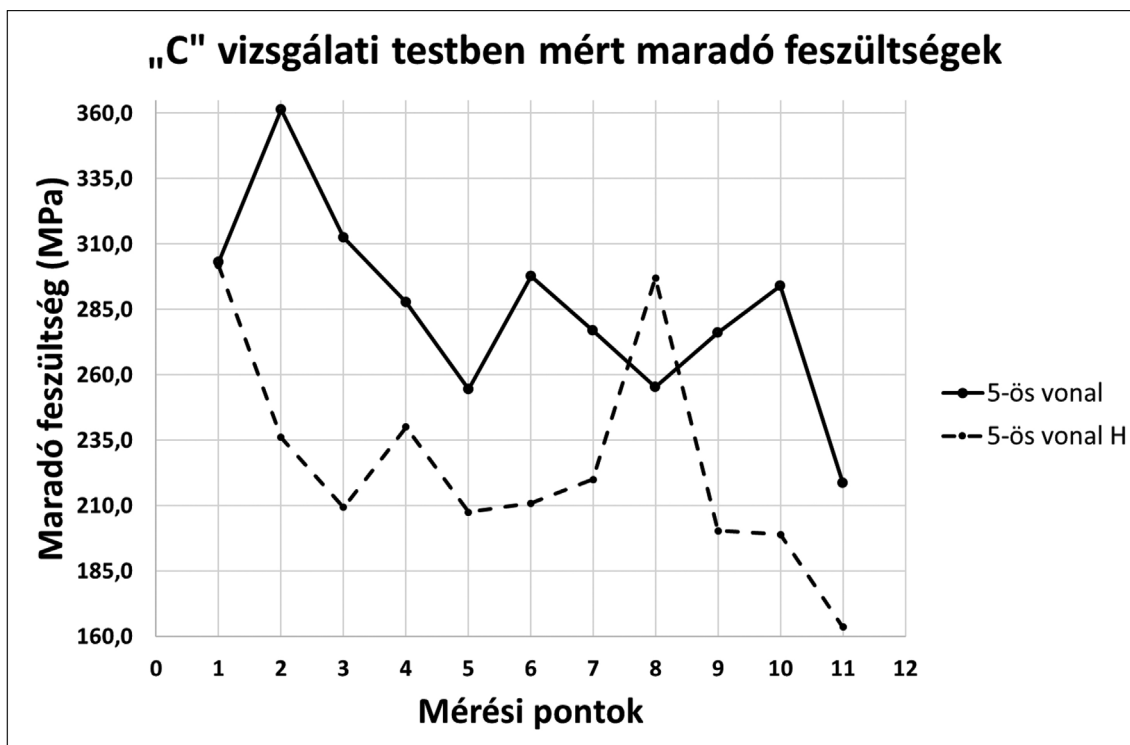
3D nyomtatás során a maradó feszültségek elkerülhetetlenek, ez a folyamat velejárója. A precíz, gyorsan mozgó energiaforrás rendkívül bonyolult termikus és fizikai folyamatokat hoz létre, amelyeknek a teljesen

pontos leírása továbbra is napjaink egyik fő kihívása.

Az eredményekből látható, hogy egy nyomtatás során – de akár egy próbatesten belül is – hatalmas eltérések jelentkezhetnek a feszültségek terén. Nagyon fontos a beépítésre szánt alkatrészek tervezése során ezekre a feszültségekre figyelemmel lenni, hogy



8. ábra. Az 1-es vizsgálati vonal vágás előtt és vágás után



9. ábra. „C” test 5-ös vonalának vizsgálati értékei

a későbbiekben ez ne legyen hatással az eszköz élettartamára.

Az additív gyártástechnológia sosem lesz igazán utómunkálást nélkülöző folyamat. Fémek esetében ez hatványozottan igaz. A támaszelemeket minden esetben el kell távolítani, a felületet kezelni kell, valamint ahhoz, hogy a gyártott alkatrész elérje a megfelelő mechanikai paramétereket, hőkezelés szükséges. Egy megfelelően elkészített 3D-nyomtatott acél próbatest hőkezelve akár meg is haladhatja a hagyományosan elkészített darabok mechanikai tulajdonságait. Itt azonban további figyelmet kell fordítani a rétegtépcsés irányára, valamint arra, milyen irányból szenved el a legnagyobb terhelést a beépítésre szánt alkatrészünk. Ez kifejezetten fontos vizsgálati lépés, mivel különböző irányok különböző maradó feszültségi értékekkel rendelkeznek, melyek közvetlen összefüggésben vannak a beépíthetőségi tulajdonságokkal is.

IRODALOM

- [1] Frazier W. E. (2014): Metal additive manufacturing: A review. *J. Mater. Eng. Perform.*, 23, 1917–1928. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-0958-z>
- [2] Li C., Liu Z. Y., Fang X. Y., Guo Y. B. (2018): Residual stress in metal additive manufacturing. In: 4th CIRP Conference on Surface Integrity. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.05.039>
- [3] Li C., Liu J. F., Fang X. Y., Guo Y. B. (2017): Effi-

cient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting. *Additive Manufacturing*, 17, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.014>

- [4] Nagy E.: Maradó feszültség meghatározása. Miskolci Egyetem, Műszaki Anyagtudományi Kar, Gyakorlati útmutató.
- [5] Withers P. J. (2007): Residual stress and its role in the future. *Rep. Prog. Phys.*, 70, 2211. DOI: 10.1088/0034-4885/70/12/R04
- [6] Jiang J., Xu X., Stringer J. (2018): Support structures for additive manufacturing: A review. *J. Manuf. Mater. Process.*, 2, 64. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- [7] Chahal V., Taylor R. M. (2020): A review of geometric sensitivities in laser metal 3D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 15, 227–241. <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1709255>
- [8] Gusarov A. V., Pavlov M., Smurov I. (2011): Residual stresses at laser surface remelting and additive manufacturing. *Physics Procedia*, 12A, 248–254. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.032>
- [9] Jacob G., Brown C., Donmez A., Watson S., Slotwinski J. (2017): Effects of powder recycling on stainless steel powder and built material properties in metal powder bed fusion processes. <https://doi.org/10.6028/NIST.AMS.100-6>
- [10] Mertinger V.: Röntgendiffrakciós módszerek.
- [11] Prevý P. S. (1986): X-ray diffraction residual stress techniques. *American Society for Metals*, pp. 380–392. <https://www.shotpeener.com/library/pdf/1986155.pdf>