



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Gépjárműtechnológia Tanszék



Mechanikai modell definiálása és validálása additívan gyártott Ti6Al4V próbatest maradó feszültségeinek meghatározására

Készítette:
Vrábel Imre, Kovács Péter

Témavezető:
Dr. Bán Krisztián

Budapest, 2023.

Tartalmi kivonat

Az additív gyártás napjaink egyik leggyorsabban terjedő gyártási technológiája, köszönhetően számos előnyének. A tömegcsökkentés, gyors prototípusgyártás, kevesebb szerelés, generatív tervezés és különleges ötvözetek alkalmazhatósága miatt egyre több iparág számára kecsegtetőnek tűnik a technológia. Sok pozitívuma ellenére azonban néhány limitáló tényezővel is rendelkezik. Ezek közé tartozik a maradó feszültség is, amely hatással van az alkatrész mechanikai tulajdonságaira és annak felhasználhatóságára.

A dolgozatban SLM (Selective Laser Melting) technikával gyártott Ti6Al4V próbatestek vizsgálatával foglalkozunk. Ezen technológia során fémpor rétegek egymás fölé terítése, a szemcsék megolvasztása és egymáshoz hegedése történik. A lokalizált hőhatás és gyors hűlés hatására maradó feszültség lesz a leggyártott munkadarabban. Ezen feszültségek következtében már a gyártás során problémák merülhetnek fel, a darabok felszakadhatnak, leválások jönnek létre. Ezen kívül támaszok használata szükséges sok esetben, amelyek eltávolítása további feszültségekkel jár. Ezek a feszültségek megközelíthetők, akár meg is haladhatják a folyáshatárt, aminek következtében a kész test deformálódik, esetleg megreped. Ezért érdemes ezzel a témával foglalkozni, hogy a selejtgyártás mértéke csökkenjen. Ezen kívül a maradó feszültségek a mechanikai tulajdonságokat is kedvezőtlenül befolyásolják, például csökkentik a kifáradási határt. Ezen téma kutatásával új területek nyílhatnak meg az additív gyártás számára.

A dolgozatban egy maradó feszültség vizsgálatára elfogadott próbatestet (cantilever) vizsgálunk, melyet a saját céljainknak megfelelően módosítottunk. Ezen próbatest támaszai részben le lettek vágva a talapzatról, ami következtében a konzol maradó alakváltozást szenvedett. A deformáció mértékéből mechanikai modell és grafikus illesztés segítségével számítjuk a maradó feszültséget. Ezen kívül szimuláció segítségével is meghatározzuk a maradó feszültséget, és összehasonlítjuk a kapott értékeket.

Abstract

The additive manufacturing is one of the fastest-growing manufacturing technologies today, thanks to its numerous advantages. Due to benefits such as weight reduction, rapid prototyping, reduced assembly, generative design, and the applicability of special alloys, the technology appears increasingly promising for various industries. Despite its many positives, however, it comes with some limiting factors. Among these is residual stress, which affects the mechanical properties of components and their usability.

In this thesis, we focus on the examination of Ti6Al4V test specimens manufactured using the Selective Laser Melting (SLM) technique. In this technology, metal powder is layered on top of each other, and the particles are melted and fused together. Due to localized heat and rapid cooling, residual stress is induced in the manufactured part. These stresses can lead to problems during production, such as cracking and delamination of the components. Additionally, the use of supports is often necessary, and their removal introduces further stresses. These stresses can approach or even exceed the yield strength, resulting in deformation or potential cracking of the final product. Therefore, it is worthwhile to investigate this issue to reduce the rate of defects in manufacturing and potentially open up new areas for additive manufacturing.

In the thesis, we examine a modified cantilever test specimen, that is appropriate for residual stress analysis, where the supports have been partially cut from the base, resulting in residual deformation of the cantilever. The residual stress is calculated from the magnitude of deformation using a mechanical model and graphical fitting. Additionally, we determine the residual stress through simulation and compare the obtained values.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	5
2. Irodalomkutatás	7
2.1. Maradó feszültség	7
2.2. Maradó feszültség mérési módszerek	7
2.2.1. Rétegleválasztó módszer (layer removal)	8
2.2.2. Fúrás módszer (hole drilling).....	9
2.2.3. Röntgensugaras diffrakció módszer.....	10
2.2.4. Ultrahangos módszer	11
2.2.5. Cantilever módszer	13
3. Célok meghatározása.....	15
4. Módszertan	16
4.1. A próbatest geometriája	16
4.2. A próbatest gyártása.....	17
4.3. Alkalmazott mechanikai modell	19
4.3.1. Horizontális terhelések.....	20
4.3.2. Vertikális terhelések.....	21
5. Kiértékelés.....	23
5.1. Semleges szál meghatározása	23
5.2. Vertikális terhelésekből adódó feszültségek.....	24
5.2.1. Görbületi sugár meghatározása.....	25
5.2.2. Vertikális terhelésből adódó feszültségek meghatározása.....	25
5.3. Horizontális terhelésből adódó feszültségek.....	26
5.4. Normál feszültség	27
5.5. Összehasonlítás a szimulációs eredményekkel	28
6. Összefoglalás	30
7. Irodalomjegyzék.....	31
8. Ábrajegyzék.....	34
9. Táblázatok jegyzéke	35
10. Rövidítések és szimbólumok jegyzéke	36

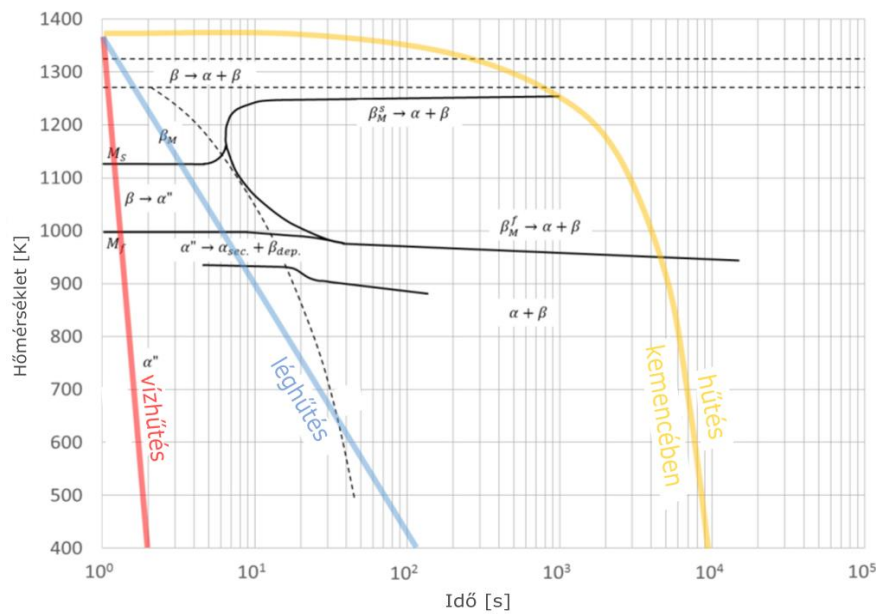
1. BEVEZETÉS

Napjaink egyik feltörekvő és gyorsan növekvő technológiája az additív gyártás (AM). Segítségével lehetőségünk adódik bonyolult geometriák pontos gyártására, mint a belső hűtőcsatornák vagy belső rácsos szerkezetek kialakítása, amelyeket nehéz lenne létrehozni hagyományos gyártási technikákkal [1-5]. A technológia segítségével 3D-s testeket tudunk legyártani, amelyek rétegről rétegre épülnek fel a számítógéppel-segített-tervezés (CAD) adatai alapján [3]. Az AM sokféle anyag felhasználásával működhet, mint a fémek, polimerek, kerámiák és kompozitok [2], ami a technológia sokszínű felhasználásának ad lehetőséget.

Az AM technológiái közül az egyik legelterjedtebb a laser powder bed fusion (LPBF), magyarul lézeres porágyas technológia, ezen belül is a selective laser melting (SLM), azaz szelektív lézeres olvasztás. Gyakori használatának egyik oka, hogy sokféle fémmel használható, mint az Al-, Fe-, Ti-, Co-, Cu- és Ni-ötvözetek [2,3]. Az additív technológiák közül az egyik leggyorsabb hűlési sebességgel rendelkezik, amely előnyeinek ellenére a maradó feszültség szempontjából kedvezőtlen. Emellett az SLM technológiával gyártott daraboknál általában jobb mechanikai, tribológiai és korróziós tulajdonságok mutatkoznak az öntött darabokhoz képest [3]. Pozitív tulajdonságai miatt a repülő-, gépjármű-, orvosi és más iparokban egyre jobban terjed a felhasználása [2-4].

A Ti6Al4V egy titán ötvözet, 6 tömeg% alumíniummal és 4 tömeg% vanádiummal. Kitűnő mechanikai tulajdonságai, nagy szilárdsága, korrózióállósága és biokompatibilitása miatt széles körben elterjedt a repülőipar, vegyipar, orvosi ipar és nagy teljesítményű gépjármű alkatrészek gyártása körében [1,6,7].

A titán két fázissal rendelkezik, magasabb hőmérsékleten térközepes köbös β -fázisú a szerkezete, míg alacsonyabb hőmérsékleten hexagonális α -fázisú. Az ötvözetben az Al α -stabilizálóként viselkedik, ami az átalakulás hőmérsékletét megemeli, míg a V β -stabilizáló, tehát csökkenti ezt a hőmérsékletet. Gyors hűlésnél a $\beta \rightarrow \alpha$ átalakulás nem megy végbe tökéletesen, martenzitesedés következik be. Ez jellemző az SLM gyártott alkatrészekre, mivel ennél a technológiánál magas a hűlési sebesség [6], ami $\sim 10^4$ és $\sim 10^6$ Ks⁻¹ között változik [3]. Az 1. ábrán látszódik, hogy ennél a hőmérsékletnél teljesen martenzites átalakulás megy végbe. Ezzel a technológiával gyártott testek gyakran rendelkeznek pórusokkal és repedésekkel. A gyártás során a kis energiabeviteli térfogathoz képest fajlagosan nagy hőelvonó felület tartozik, ennek következtében kimagasló lesz a hőmérséklet gradiens a testen belül, ami hőhatás okozta maradó feszültséggel jár [6,7].



1. ábra: A Ti6Al4V folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramja [10].

A maradó feszültségek külső terhelés hiányában meglévő, anyagon belüli feszültségmezők. Bármilyen hőtani folyamat során kialakulhatnak deformációk, heterogén képlékeny alakváltozások, szilárd fázisú, elsőrendű fázisátalakulások, amik maradó feszültséghez vezetnek [6,8].

Az SLM technológia során a testen belül nagy hőmérséklet eloszlás alakul ki, ami eltérő rugalmas alakváltozással jár és nagy belső feszültségekhez vezet a fémszerkezetben. A gyártás során létrejövő martenzites mikroszerkezet, amely kisebb rugalmassággal rendelkezik az $\alpha + \beta$ szerkezettel szemben, hajlamosabb ezen feszültségek kialakulására. A maradó feszültségek következtében változnak az alkatrész tulajdonságai, ami a komponens teljesítményének és élettartamának csökkenéséhez vezethet. A feszültség pozitív értékei húzó-, míg negatív értékei nyomófeszültségre engednek következtetni [6,9]. A húzófeszültségek a felszín közelében fáradáshoz vezetnek a ciklikus terhelések következtében. Ezzel szemben a nyomófeszültségek a felszín közelében javítják a fáradási tulajdonságot és ellenállóvá teszik a munkadarabot a feszültség okozta repedések kialakulásával szemben, így ez akár jótékony hatású is lehet. A sörétszórás (shot-peening) pont ezt használja ki, amely során a felületet apró golyókkal szórják nagy erővel, így kompresszív feszültségek jönnek létre az anyag felületének közelében [6,8].

Jelentős kutatások folynak a maradó feszültség meghatározásával kapcsolatban, hogy optimalizálni lehessen a tervezést, az additív gyártás paramétereinek beállításait és a gyártás utáni megmunkálásokat [5].

2. IRODALOMKUTATÁS

2.1. MARADÓ FESZÜLTSG

A maradó feszültség, mint már a bevezetőben ismertettük, olyan feszültségek, amelyek az anyagban vagy testben maradnak a gyártás végeztével, külső terhelések és hőeloszlás hiányában [6,11].

Megkülönböztetünk mikro és makro feszültségeket, melyek jelen lehetnek az anyagban akár egyszerre is. A makro maradó feszültségek (I. típus) a szemcseméretnél nagyobb léptékű tartományban változnak. Bármely változás az I. típusú feszültségek egyensúlyában a makroszkópikus dimenzióban okoz változást. Minden eljárás vagy folyamat, amely a feszültségek inhomogén eloszlásával jár, makro maradó feszültséget eredményez [6,11,12].

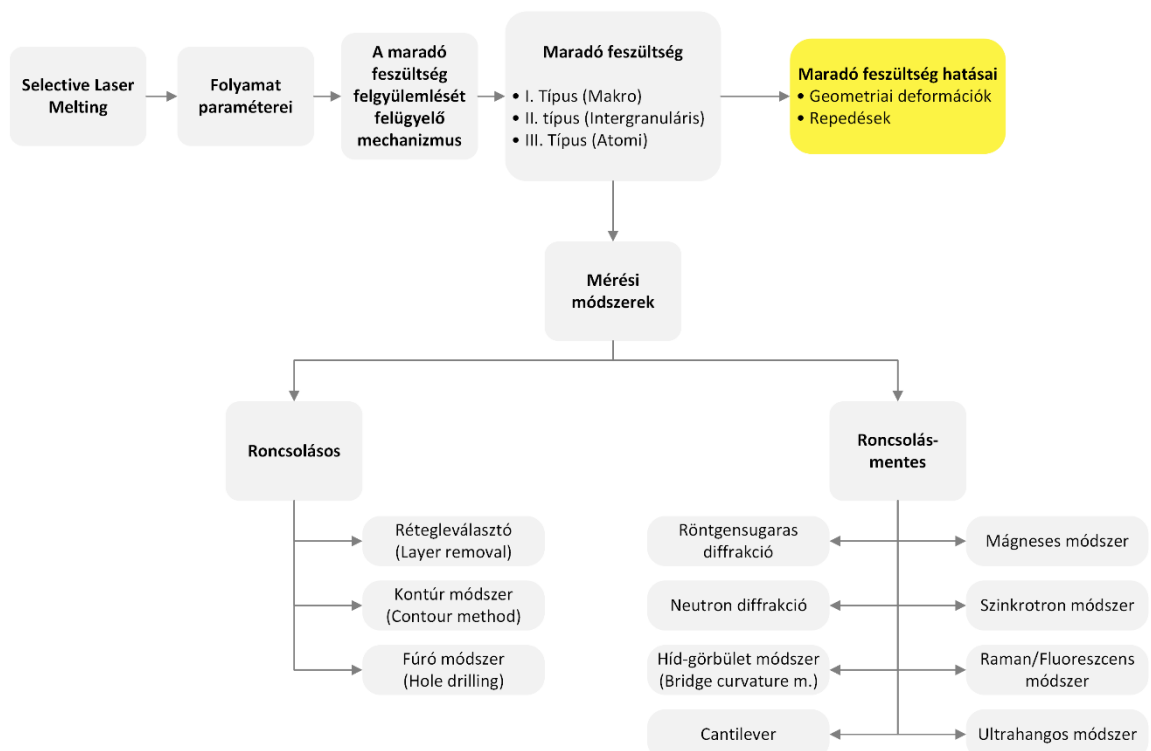
A mikro maradó feszültségek az anyag mikroszerkezetének változásából erednek, egy szemcsén belül. Ide tartoznak a II. és III. típusú feszültségek. A II. típusú maradó feszültségek a szemcseméret szintjén működnek. Főleg a martenzites átalakulások eredményezik ezeket a feszültségeket. A III. típusú maradó feszültségek a szemcseméretnél kisebb, atomi szinten alakulnak ki. Ezek a kristályrács hibáiból erednek, mint a diszlokációk vagy vakanciák [6,11,12].

A maradó feszültségek a gyártási folyamatok során végbemenő nem egységes képlékeny alakváltozás következtében jönnek létre. Kialakulásuk lehet természetes és mesterséges. Előbbi általában a különböző forgácsolási technikák, hegesztés vagy rúdhúzás következtében kialakuló húzófeszültség, míg utóbbi pl. a sörétszórás okozta nyomófeszültség. A makroszkópikus termikus eredetű maradó feszültségek a hevítési és hűtési műveletek következtében alakulnak ki, amely során széleskörű hőeloszlás alakul ki az alkatrész belsejében. Ezzel szemben a mikroszkópikus termikus maradó feszültségek oka a különböző fázisok vagy komponensek eltérő hőtágulási együtthatója [6,11], illetve az elsőrendű, szilárdfázisú fázisátalakulások okozta fajtérfogatváltozás.

2.2. MARADÓ FESZÜLTSG MÉRÉSI MÓDSZEREK

A maradó feszültség mérésének módszereivel nem a feszültség értékét mérjük közvetlenül, hanem az alakváltozást, anyag- és geometriai tulajdonságokat [6,11]. Megkülönböztetünk mechanikai roncsolásos és fizikai roncsolásmentes mérési módszereket. A roncsolásos eljárások az anyag változtatásával, anyagleválasztással vagy -szétválasztással járnak, amely során a maradó feszültség felszabadul és a deformációk

mérhetőek lesznek [11,13]. Ide tartoznak olyan technikák is, amelyek felületi előkészítést, tisztítást igényelnek. Ezekre példa a rétegleválasztó módszer (layer removal) vagy a kontúr módszer (contour method). A fúró módszert (hole drilling) félig-roncsolásos technikának tekintik, mivel csak egy kis furatot fúrnak az alkatrészbe, ami nagyobb struktúráknál könnyen javítható [11]. A roncsolásmentes eljárások során anyagleválasztás nélkül történik a mérés. Ezekre példa a röntgensugaras diffrakció, neutron diffrakció, az ultrahangos módszer vagy az általunk is használt cantilever. A maradó feszültségmérés módszereinek csoportosítása a 2. ábrán látható.



2. ábra: A maradó feszültség mérési módszereinek csoportosítása ([6]-os forrás alapján).

2.2.1. RÉTEGLEVÁLASZTÓ MÓDSZER (LAYER REMOVAL)

A rétegleválasztó módszer roncsolásos technológia, nagy mennyiségű anyagleválasztással jár, amely következtében a II. és III. típusú feszültségek nullára átlagolódnak ki, így ezzel a módszerrel csak a makroszkopikus maradó feszültségek mérhetőek. Egyszerű technológia, sokféle anyag maradó feszültségének mérésére alkalmas és többféle módszerrel kombinálható, azonban roncsolásos mivolta miatt nem mindig használható [11].

A módszer lényege, hogy folyamatos rétegeltávolítás mellett görbületet mérnek. Először a lemez egyik feléről leválasztanak egy réteget. Mivel a maradó feszültségek

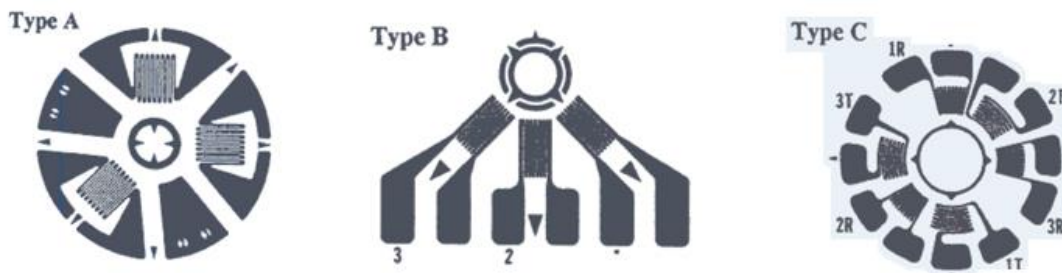
mindig egyensúlyi állapotban vannak a testen belül, ezért a réteg eltávolításával a kiegyensúlyozás céljából újraparendeződnek a feszültségek. Ennek következtében a lemez deformálódik, meghajlik. A görbület a kiindulási lemez maradék feszültségeitől és az anyagtulajdonságoktól függ. A görbület mérését követően újabb rétegeket választanak le, és rendre megméri a görbületeket, amíg a test végére nem érnek. Ezek segítségével megállapítható az eredeti lemez feszültségeloszlása. A görbület mérése optikai mikroszkóppal, lézeres szkenneléssel, nyúlásmérő bélyeggel vagy profilometriával történhet [11,14].

A rétegleválasztó módszer egyik hátránya, hogy a felületi és felületközeli feszültségek nem állapíthatók meg vele, ezért röntgensugaras diffrakcióval kombinálva szokták használni [14,15]. Röntgensugaras diffrakcióval csak a felületen és a felület alatt néhány μm -es mélységben tudnak mérni, ezért a két módszer kombinálása előnyösnek bizonyul. Ezen összekapcsolt technológia során is folyamatos rétegeltávolítás szükséges. Minden leválasztást követően röntgensugaras diffrakcióval megállapítják a felületi maradék feszültséget. A réteg eltávolításához szükséges megmunkálás újabb maradék feszültséggel jár, amit a felület maratásával el kell távolítani. Természetesen még mindig jelen van a rétegleválasztást követő feszültség-átrendeződés, így a röntgensugaras diffrakció eredményeit korrigálni kell [14].

2.2.2. FÚRÁS MÓDSZER (HOLE DRILLING)

A félig-roncsolásos maradék feszültség meghatározására szolgáló módszer, a fúrás módszer, gyors és egyszerű használata révén széles körben elterjedt. Más technikákkal szemben olcsó, létezik laboratóriumi, de szállítható eszköze is, így közvetlenül a felhasználás helyén mérhetőek az alkatrészek [1,11].

A módszer egy kis furat fúrásával kezdődik. A lokálisan feszültségmentesített felületek deformációját általában nyúlásmérő bélyegek segítségével mérik, de használhatóak teljes látómezős optikai technikák is. A nyúlásmérő bélyegeknek különböző rozetta elrendezései léteznek (3.ábra). A mérési eredményeket kísérletekből eredő számításokkal és formulákkal és véges elemes módszer segítségével értékelik ki [6,11]. Az inkrementális fúrás lehetőséget biztosít a feszültségeloszlás felvételére.



3. ábra: Tipikus maradó feszültség mérésnél használt nyúlásmérő bélyeg rozetta elrendezések [11].

A technológia nem elég érzékeny a deformációkra, pontatlan eredmények következhetnek a furat méreteiből, a felületi érdességből és a darab előkészítéséből adódóan. A fúró átmérőjénél nagyobb mélységben nem érdemes mérni, mivel nem észlelhető változás a mérésben. A deformációk csak a felszínen kerülnek mérésre. A Saint Venant elv értelmében a felületi deformáció egyre érzéketlenebb a maradó feszültségek relaxációjára a furatmélység növekedésével, az eltérések a mért deformációban folyamatosan csökkennek, a nyúlásmérő bélyeg mérési hibái egyre relevánsabbak lesznek. További hibalehetőséget jelent, hogy a mérési pontatlanságok a számolásnál nagy eltérésekhez vezethetnek. Ezért fontos a megfelelő furatátmérő és nyúlásmérő bélyegek választása. A kisebb méretű bélyegek jobban lokalizált mérést biztosítanak, de nehezebben kezelhetőek és kevésbé mélyen lehet velük mérni a kisebb furatátmérő miatt, továbbá megnövekedik a rossz beállításból és a felületi szabálytalanságokból fakadó hibalehetőség [11,16].

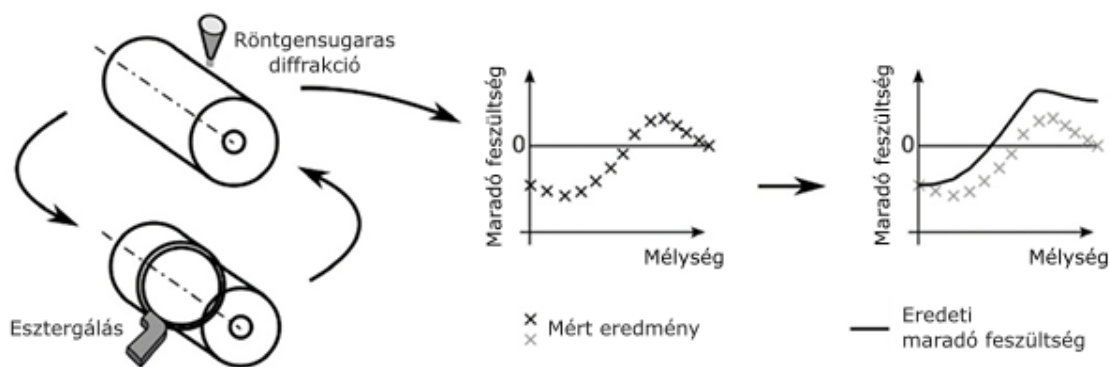
2.2.3. RÖNTGENSUGARAS DIFFRAKCIÓ MÓDSZER

A röntgensugaras diffrakció módszer segítségével roncsolásmentesen tudunk maradó feszültséget mérni. A polikristályos anyag rugalmas deformációja szolgál alapjául. A deformációk hatására változások mennek végbe a kristálysíkok egymáshoz viszonyított helyzetében, elcsúsznak, elmozdulnak egymáshoz képest. Ez az elmozdulás ugyanolyan lesz minden hasonló rendezettségű síkban, a síkok közti távolság jellemzően összefügg a maradó feszültségek nagyságával és irányával, így ezek ismeretében meghatározhatók ezek a feszültségértékek [11,16].

A módszer alapja, hogy röntgensugarakkal sugározzuk a mintadarabot, amelyek áthatolnak a felületen. A sugarak egy része a kristálysíkokra érkezve szétszóródik. A mintadarab körül érzékelők mozognak, amelyek detektálni tudják ezeket a diffraktált

sugarakat, és mérik a szórési szöget. A szórési szög elemzésével meghatározható az átlagos rácstávolság a síkok között. Az érzékelők a diffraktált sugarak intenzitását mérik. A szórési csúcsokhoz tartozó beesési szögből számítható a Bragg-egyenlet alapján a rácssíkok közti távolság [11,17].

Az egyik legelterjedtebb roncsolásmentes vizsgálati módszer, azonban több hátráltató tényezővel rendelkezik. A próbatestnek be kell férnie a diffraktométerbe, ezért limitált a mérete. Olyan geometriával kell rendelkeznie, hogy a röntgensugár hozzáférjen a mérendő területhez és akadálymentesen diffraktálódni tudjon az érzékelőbe. Továbbá, figyelembe kell venni a felület állapotát, a nagy felületi érdesség hátráltatja a megfelelő mérést [1,11]. Érzékeny a mikroszerkezeti tényezőkre, nagy szemcsemérettel rendelkező anyagoknál nehezen használható [5]. A mérés sebessége a vizsgált anyag minőségétől, a röntgensugár forrásától és az elvárt pontosságtól függ.



4. ábra: A röntgensugaras diffrakció és a rétegleválasztó módszer kombinálása [14]

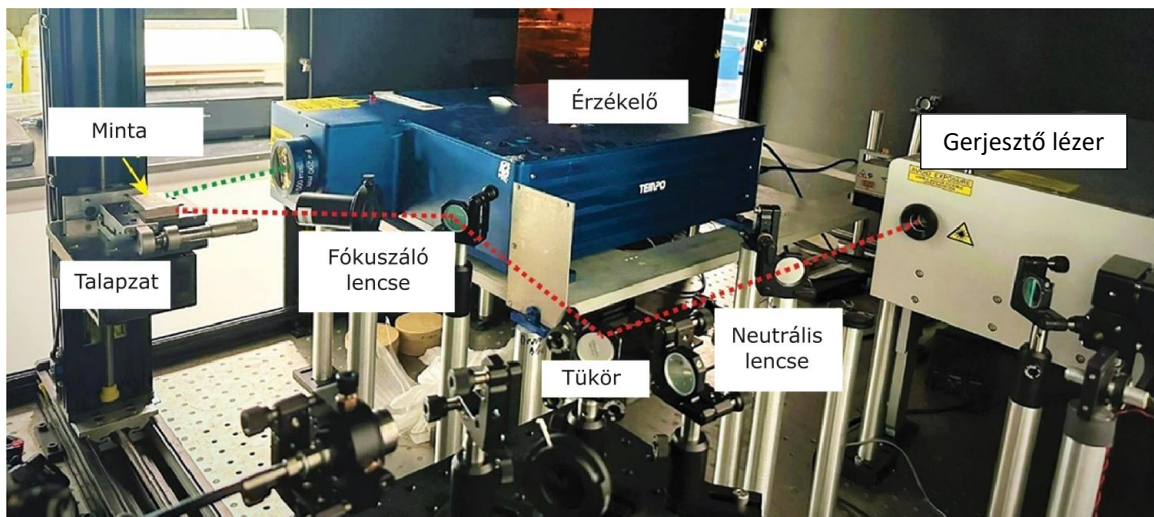
A röntgensugaras diffrakció módszer legfőbb hátráltató tényezője, hogy csak a felületi és felületközeli maradó feszültségek határozhatók meg vele [1,11,14-16]. Ezért gyakran kombinálják más módszerekkel, mint a rétegleválasztó módszer [14,15], ahogy azt már korábban említettük. A 4. ábrán látható egy lehetséges megoldás, ahol az is fel van tüntetve, hogy a kapott értékek korrekciója szükséges az eredeti feszültségek meghatározásához. Egy másik megoldás, hogy nagy energiájú szinkrotron röntgensugarakat használunk, amely segítségével mélyebben is tudunk mérni, továbbá ez a módszer lehetővé teszi az additívan gyártott testek pontos mérését [1,17].

2.2.4. ULTRAHANGOS MÓDSZER

Egy újabb roncsolásmentes technika az ultrahangos módszer, amely az anyagon belül terjedő ultrahang hullámok sebességének a feszültség szintekre való érzékenységét használják ki. Ezen sebességeket közvetlenül befolyásolja a jelenlévő feszültségek iránya

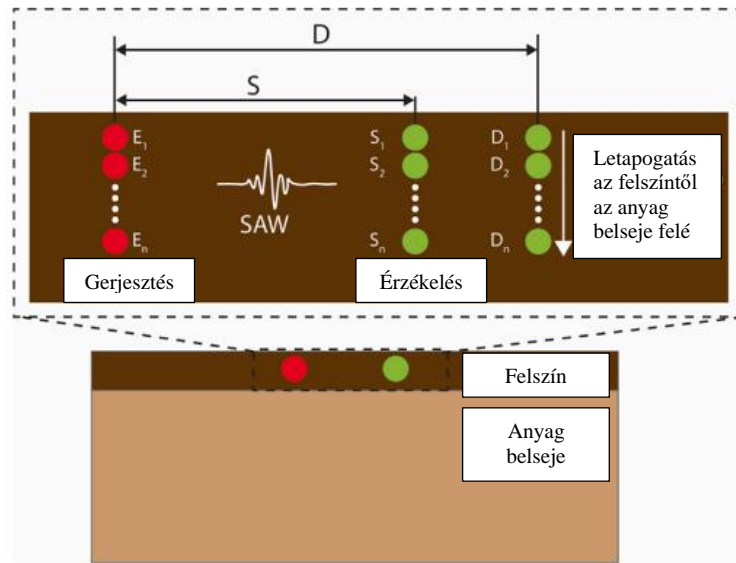
és nagysága. A sebességek nagyon érzékenyek a szemcseszerkezetre és az ultrahang úthossza pontatlan, ezért nem a sebesség értékeit, hanem a haladási időt mérik. Mivel a sebességek változása az egész úthosszon megoszló feszültségmezőktől függ, így csak az átlagos maradó feszültséget tudjuk meghatározni. Az elemzés akusztóelasztikus együttható segítségével történik [11,15]. Gyors és költséghatékony módszer, könnyen szállítható a mérőeszköz, így sok helyen felhasználható, jól alkalmazható rutinellenőrzéseknél [1,11,15].

Lézeres ultrahang módszerrel elérhető az érintésmentes vizsgálat. Felvehető vele az anyagon belüli feszültségeloszlás is, ha több szinten mérjük meg a mintadarabot. Erre egy példa a [15]-ös forrás, ahol lézeres ultrahang módszerrel vizsgálják a mintákat, és a felszíntől lefelé haladva 30 μm -es közökkel folyamatos méréseket végeznek (5.ábra).



5. ábra: Maradó feszültség gradiens felvétele lézeres ultrahang módszerrel [15]

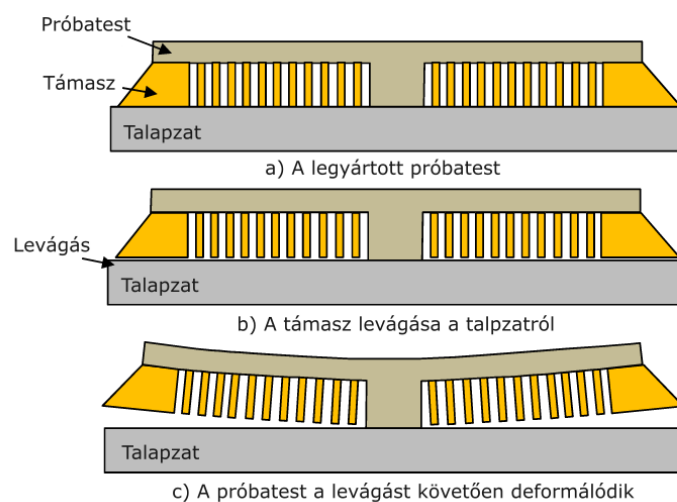
A pulzáló lézer akusztikus hullámokat indukál a minta felszínén (surface acoustic wave -SAW). Ezek a hullámok a mintadarab mikroszerkezetétől függenek. A lézer fókuszáló lencsével egy kb. 10 μm -es pontban van fókuszálva (az 5. ábrán a piros sugár). Ez az átmérő határozza meg az akusztikus hullám sáv szélességét. A keletkezett hullámokat egy lézeres interferométerrel érzékelik (az 5. ábrán a zöld sugár). Egy lineárisan mozgó talapzat segítségével mozgatták a mintadarabot, hogy le tudják tapogatni a mintát a vastagság irányában. A maradó feszültség profil felírásához 30 μm -es közökkel mozgatták el a gerjesztő, illetve érzékelő lézereket a keresztmetszet mentén. A 6. ábrán látszik, hogy minden gerjesztési pontban (E_i) keletkező akusztikus hullámot két ponton érzékelték (S_i és D_i). Így mérhető a két pont közötti sebességkülönbség, és felállítható a maradó feszültség profilja [15].



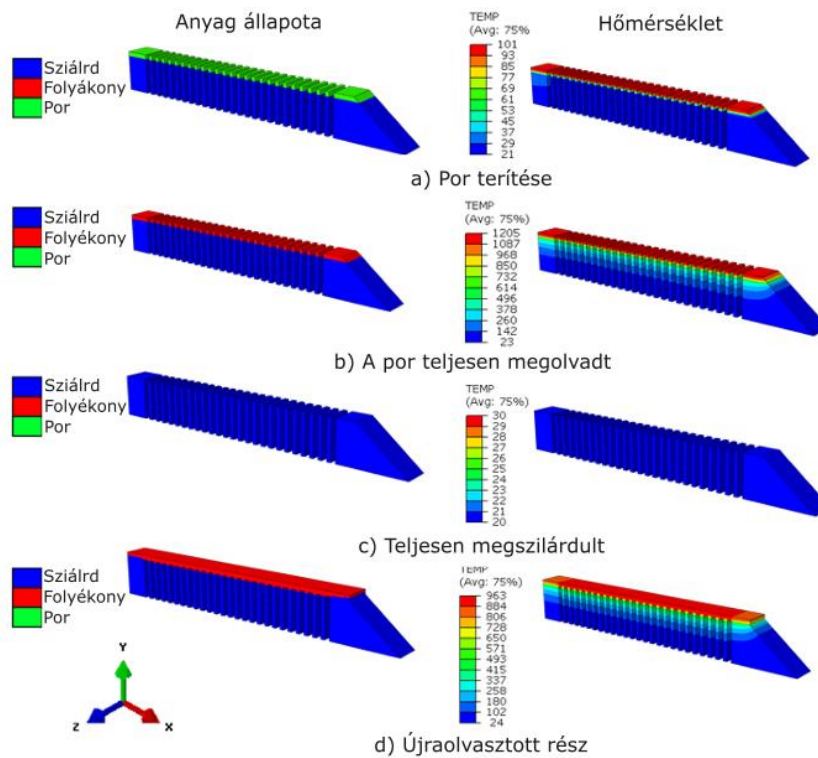
6. ábra: A lézeres ultrahangos vizsgálat pozícionálása [15].

2.2.5. CANTILEVER MÓDSZER

A cantilever egy próbatest, amely segítségével meghatározható az additív gyártás során kialakuló maradó feszültség. A próbatest könnyen deformálódna az SLM folyamat során, ezért szükségünk van egy támaszra, hogy gyártás közben ne szenvedjen alakváltozást. Egy lehetséges kialakítása a 7. ábrán látható [18]. Lehetséges az ábrához hasonló dupla, kétoldali kialakítása vagy egyedülálló kialakítása is. A próbatest méreteire nem vonatkozik szabvány, kísérleti, tapasztalati úton kerülnek legyártásra.



7. ábra: A cantilever egy lehetséges kialakítása a) gyártás után, b) levágáskor, c) levágást követően [18].



8. ábra: Az anyagállapot és hőmérsékletváltozás additív gyártás során [18].

A maradó feszültség oka a próbatestben a gyártás folyamán gyorsan váltakozó felmelegedési és lehülési állapotok. Az SLM gyártás közben néhány ms alatt melegítjük fel, ill. olvasztjuk meg a fémport, és néhány másodperc alatt hűl vissza. A 8. ábrán látszódik, hogy a por terítése során egy új réteg kerül a test tetejére (zöld), ekkor $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül van a legnagyobb hőmérséklet. Ezt követően az olvadáspont fölé hevítjük, a megolvadt állapotot jelzi a piros szín, ekkor $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül van a legnagyobb hőmérséklet. Végül a hűlés következik, amely végeztével az összes megolvadt por megszilárdul (kék). Ekkor a folyamat befejeztével a legnagyobb hőmérséklet $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül van. Az ábra alján látszódik, hogy az előző réteg egy része mindig újraolvad az új réteg hevítése során [18]. Ez okozza a maradó feszültséget a mintadarabban.

A deformáció akkor következik be, amikor a támaszt levágjuk a talpazatról. A levágás előtt nagy húzófeszültség figyelhető meg a próbatest felső rétegeiben. A hevítési folyamat során a körülvevő anyag korlátozza a felső rétegek tágulását, és nyomófeszültség keletkezik, míg a hűlés során az összehúzódás van korlátozva, így húzófeszültségek jönnek létre [18].

3. CÉLOK MEGHATÁROZÁSA

A dolgozat célja, a maradó belső feszültségek meghatározására Ti6Al4V anyagból gyártott próbatestek esetén egy felállított mechanikai modell módosítása, és validálása mérésekkel egy korábbi diplomamunka [1] alapján. A diplomamunkában szereplő mechanikai modell szerint a maradó feszültségek a horizontális és vertikális terhelésekből származó feszültségek összege. A terhelések a megfelelő irányú deformációk mérésével határozhatók meg. A diplomamunkában nem történt meg a horizontális terhelésekből származó feszültségérték meghatározása, a szimulációk alapján egy közelítő mennyiséget használva végezte el a kiértékelést. Célunk a deformációk mérésére megfelelő módszer kidolgozása, amely pontosabb eredményekkel tud szolgálni és a későbbiekben felhasználható egyéb kutatások során.

A maradó belső feszültségek vizsgálatára a “cantilever” elvű eljárást választottuk, erre minden szükséges eszköz a rendelkezésünkre állt, ezért ez volt a legkézenfekvőbb számunkra.

A maradó belső feszültségek vizsgálata a jelenlegi legnagyobb kihívás az additív gyártás terén, mivel ismereteink alapján ez a legjelentősebb hátulütője ennek a technológia csoportnak. A lokális felhevülés, majd hűlés, miközben a közvetlen környezetben az alkatrész többi része ezen hőmérsékleti görbének mindig egy másik pontján tart, rendkívül magas maradó feszültségeket okoz a testben, melyek a mechanikai tulajdonságokat jelentősen rontják. Ez a technológia természetes velejárója, mivel a mi esetünkben használt lézernyaláb átmérője egy bizonyos méret felett már képtelen lenne ellátni a feladatát, ezáltal a gyártást ellehetetlenítené azzal, hogy az alapanyag port nem lenne képes megolvasztani.

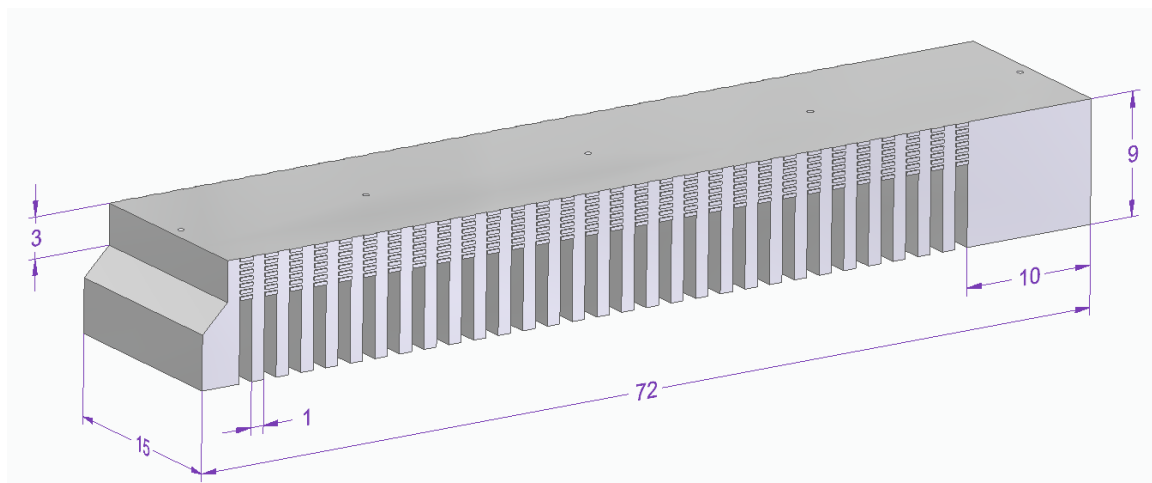
A gyártás utáni hőkezelések képesek a maradó belső feszültségek csökkentésére, de ez extra gyártási időt és költségeket igényel, illetve bonyolítja az eljárást és hátrányba helyezi az additív gyártási technológiákat a hagyományos gyártási módszerekkel szemben. Ebből fakad ezen dolgozat relevanciája, hiszen amennyiben sikeresen történik meg a mechanikai modell felállítása, abban az esetben ezeknek a maradó belső feszültségeknek a számítása lehetővé válik az eljárás során, azaz számolni lehet vele, hogy mennyivel rontja le az adott gyártott test mechanikai tulajdonságait. Ezáltal meghatározható lenne, hogy adott követelményeknek való megfelelés érdekében alkalmazható-e ez a technológia, illetve amennyiben igen, milyen utómunkálásokkal kell számolni.

A maradó feszültségek meghatározására kidolgozott megfelelő módszer segítségével további kutatásokat lehet végezni, mint a különböző paraméterekkel gyártott próbatestek vagy a különböző módon utómunkált minták összehasonlítása. Így a gyártási idők és a technológiai költségek akár csökkenthetők, adott feladatra jobb kihasználtsági szint érhető el. Ez a jelenlegi iparban kulcsfontosságú, amikor a gépi kihasználás növelése, a termelékenység fokozása, a költségek minimalizálása és a selejtgyártás csökkentése, akár teljes mértékű eltűnése a legfontosabb irány.

4. MÓDSZERTAN

4.1. A PRÓBATEST GEOMETRIÁJA

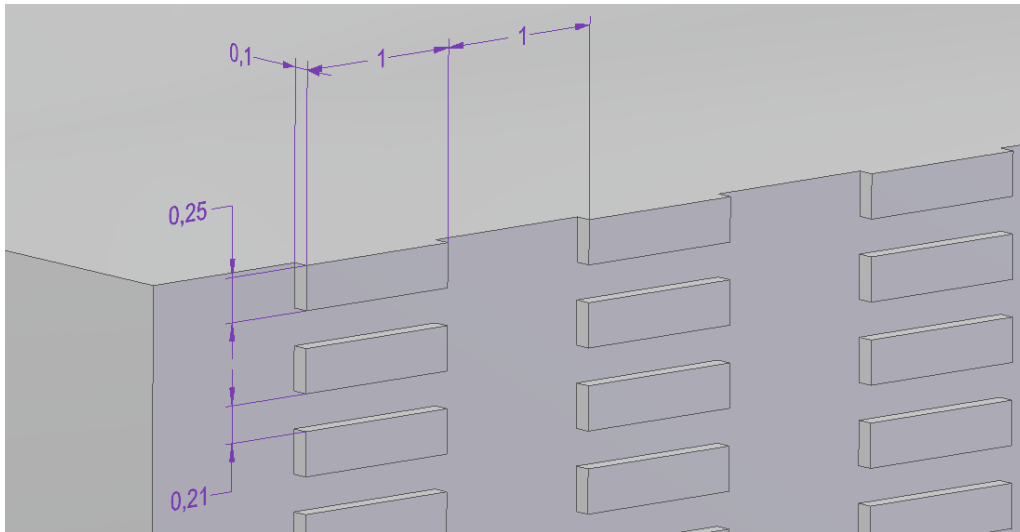
A próbatestek Solid Edge 2021-es CAD szoftverrel lettek megtervezve az [1]-es forrásban szereplő geometriai méretekkel. A “cantilever” egy egyik végén befogott hasáb szerű alkatrész, melynek másik vége szabadon kinyúlik. A konzol végéig összesen 30 láb került kialakításra 1 mm távolságban egymástól. Ezen kívül még a mechanikai modell alkalmazása miatt a konzol oldalán, azokon a részeken, ahol nincsen láb, kis kiszögellések lettek kialakítva javaslatunkra, mely a későbbiekben a semleges szál meghatározásában játszik szerepet. A konzol kialakítását a 9. ábra szemlélteti.



9. ábra: A cantilever fő, befoglaló méretei

A 10. ábrán látszik a 3 mm magas gerenda részen, a konzololdalon kialakított 7 darab 0,25 mm magas, 0,1 mm vastag és 1 mm széles kiszögellés, közöttük 0,21 mm réssel függőlegesen és 1 mm-es távolsággal vízszintesen. Ezek a kiszögellések várakozásaink szerint nem befolyásolják a mérési eredményeinket kis méretükből kifolyólag. Ezen kívül a próbatest tetején további 5 apró furat (referenciapont) kapott még helyet, amelyek a

távolságok meghatározására szolgálhatnak még értékes információkkal a lábak felvágása előtt és után is.



10. ábra: A kiszögellések méretei.

4.2. A PRÓBATEST GYÁRTÁSA

A próbatesteket egy EOS M 100-as SLM additív gyártó berendezéssel készítettük el, melyet az 11. ábra mutat.



11. ábra: A gyártáshoz használt EOS M 100 SLM technológiájú berendezés.

A próbatest a gépből való kikerülés után semmilyen utókezelésen nem esett át, ezzel fenntartva annak gyári maradó belső feszültségi szintjét, nem csökkentve mesterségesen

azt. A konzol lemérésre került egy Keyence VR-5000 típusú optikai mikroszkóppal (12.ábra) a lábak felvágása előtt és után.



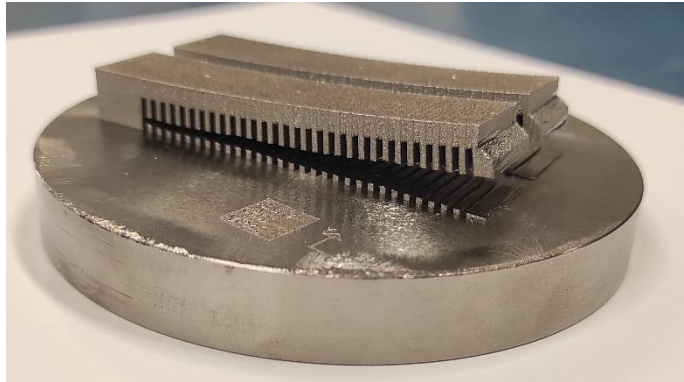
12. ábra: A próbatest beméréséhez használt Keyence optikai mikroszkóp

Ahhoz, hogy a próbatestre a mechanikai modellünk alkalmazható legyen és a maradó belső feszültségek számolhatóak legyenek, a konzol bemérésére szükségünk van a lábak felvágása előtt is, hiszen ehhez az eredeti helyzetéhez lehet majd viszonyítani a maradó alakváltozásokat a lábak elvágása után. A vágást kézi fűrészsel végeztük el, a folyamat során az építési platform, amelyre a próbatestek gyártva lettek, befogásra került egy satuba (13. ábra), hogy a vágás pontosan, a konzol sérülése nélkül elvégezhető legyen.



13. ábra: A próbatest felvágás közben.

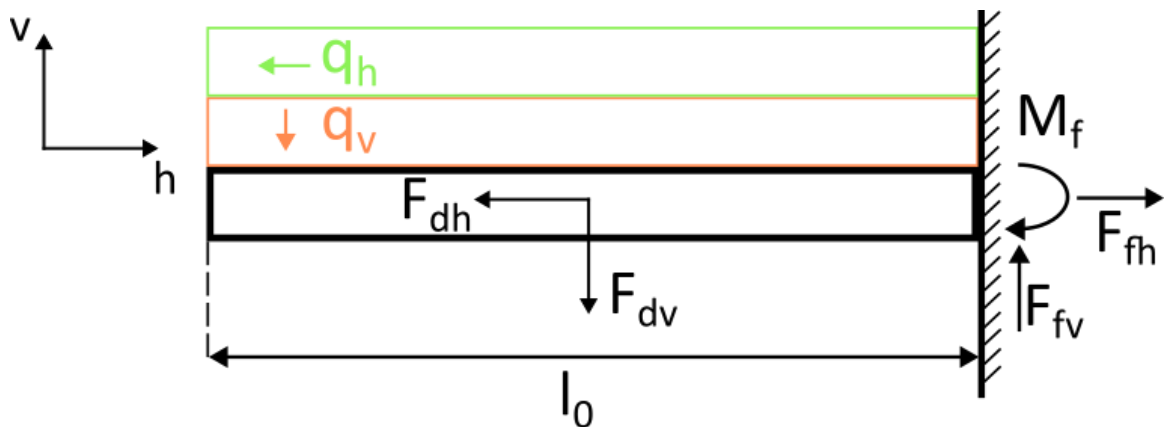
A lábak átvágása után ismét a Keyence mikroszkóp alá került a konzol, melyen a gyártás utáni szkennelések ismét el lettek végezve, ezáltal az eredmények összehasonlíthatóak és kiértékelhetővé váltak.



14. ábra: A próbatest a felvágás után.

4.3. ALKALMAZOTT MECHANIKAI MODELL

Az általunk használt mechanikai modell az [1]-es forrás alapján épül fel. A maradó feszültségek horizontális és vertikális terhelésekből származó feszültségek összege. Számításainkban mi a befogási keresztmetszetre merőleges feszültségeloszlás számításával foglalkozunk. A két komponenst külön-külön határozzuk meg a megfelelő alakváltozások mérésével, majd ezeket összegezzük. Tiszta hajlítás esetén csak vertikális terhelésekkel számolunk. Ekkor a semleges szál a keresztmetszet súlyponti tengelyébe esik, azonban ha ehhez hozzáadódik a tiszta húzás, akkor a semleges szál eltolódik.



15. ábra: A megoszló terhelések a próbatesten.

v: vertikális irány

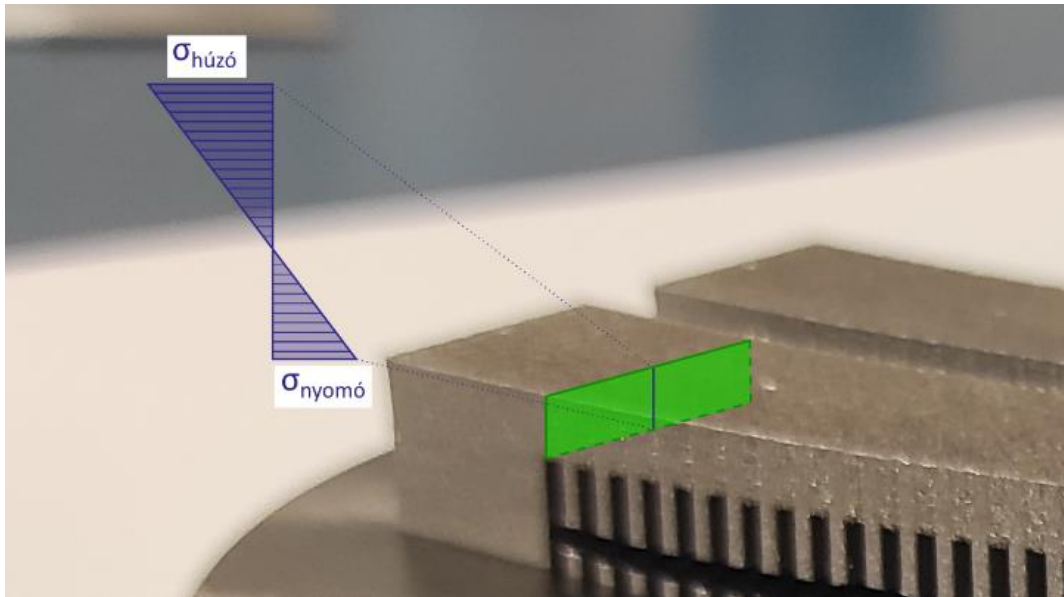
h: horizontális irány

q_v : vertikális megoszló terhelés

q_h : horizontális megoszló terhelés

A mechanikai modellünk két alapvető feltevésre épít. Egyik, hogy a semleges szálban felvágás előtt és után is a húzó és nyomó feszültségek értéke pontosan nulla. Másik, hogy

amennyiben a felvágás utáni állapotban a számolt nyomatékot és húzást megoszló terhelésként a konzolra alkalmaznánk, az visszatérne eredeti, felvágás előtti helyzetébe.



16. ábra: A befogási keresztmetszet feszültségeloszlása.

4.3.1. HORIZONTÁLIS TERHELÉSEK

A horizontális terhelések tiszta húzás során jelennek meg. Mivel tiszta hajlítás során a semleges szál a keresztmetszet súlyponti tengelyébe esik, ezen a tengelyen az ebből származó feszültségek értéke nulla, azaz csak a tiszta húzásból származó feszültségek okoznak alakváltozást. A deformáció segítségével a következő képlet alapján tudjuk meghatározni a megoszló horizontális terhelést [1]:

$$q_h = \frac{\Delta l_i * S * E}{l_0 * l_i - \frac{1}{2} * l_i^2}, \quad (1)$$

ahol:

q_h – horizontális megoszló terhelés

Δl_i – a hosszirányú alakváltozás mértéke, a felvágás előtt és felvágás után mért távolságok különbsége l_i távolságban a befogástól

S – a befogási keresztmetszet

E – Ti6Al4V rugalmassági modulusza

l_0 – a felvágás után mért hossz

l_i – távolság a befogástól a felvágás után

A horizontális megoszló terhelésből elemi erőt kell képeznünk, majd ebből számoljuk a horizontális terhelésből származó feszültséget:

$$F_h = q_h * l_0 \quad (2)$$

$$\sigma_h = \frac{F_h}{S} \quad (3)$$

4.3.2. VERTIKÁLIS TERHELÉSEK

Tiszta hajlítás során a semleges szál görbületi sugarára felírhatjuk a következő képletet:

$$\frac{1}{R(l_i)} = \frac{M(l_i)}{I * E}, \quad (4)$$

ahol:

$R(l_i)$ – a semleges szál görbületi sugara l_i távolságban a befogástól,

$M(l_i)$ – a hajlítónyomaték l_i távolságban a befogástól,

I – a keresztmetszet inerciája

E – Ti6Al4V rugalmassági modulusza

Ezt a képletet a nyomatékra rendezve kiadódik, hogy adott deformáció esetén, l_i távolságban a befogástól, mekkora hajlítónyomaték lép fel a konzolban. Ehhez viszont szükségünk van a keresztmetszet inerciájára, illetve az anyag rugalmassági moduluszára. Az általunk használt ötvözet rugalmassági modulusza 110 GPa, azaz 110.000 MPa-nak vehető fel. Az inercia számítására a következő képletet használtuk fel:

$$I = \frac{a^3 * b}{12}, \quad (5)$$

ahol:

a – a keresztmetszet magassága

b – a keresztmetszet szélessége

A keresztmetszet magasságának itt a konzol legkisebb keresztmetszetét néztük, ahol nincsenek támasztólábak és kiszögellések sem. Így “a” értéke 3 mm. A keresztmetszet szélességének értékét szintén a legszűkebb részére vettük fel az anyagnak, így “b” értéke 15 mm. Ezen értékek alapján az inercia meghatározható, mely értéke $I = 33,75 \text{ mm}^4$. Az “R” semleges szál sugarát pedig a Keyence VR-5000 géppel mért adatok alapján határozzuk majd meg.

Itt azzal a közelítéssel élünk, hogy a felvágott konzol egy körívre illeszkedik. Mivel görbét csak a konzol felülről szkennelt képén tudunk illeszteni annak a tetejére, ahol a semleges szál nem található, ezért a konzol tetejére illesztett görbe átmérőjét a keresztmetszet súlyponti tengelyében található semleges szál felülettől mért távolságának hozzáadásával korrigáltuk. Így minden adott már a befogás keresztmetszetében ébredő hajlító nyomaték kiszámolásához.

A vertikális terhelésekből származó feszültségeket a befogási keresztmetszetben számolt hajlítónyomaték segítségével határozzuk meg:

$$\sigma_v = \frac{M * y}{I}, \quad (6)$$

ahol:

σ_v – a vertikális terhelésekből származó feszültség

M – a hajlítónyomaték a befogási keresztmetszetben

y – távolság a súlyponti tengelytől

I – a keresztmetszet inerciája

A vertikális terhelésekből származó feszültség megoszlik a magasság mentén és a súlyponti tengelyben zérus lesz, amely tiszta hajlítás esetén azonos a semleges szállal. Ezért a feszültségeloszlás a súlyponti tengelyre szimmetrikus lesz. A horizontális terhelésekből származó feszültségek értéke azonos a keresztmetszeten belül, ezért az összegzett feszültségek eloszlása eltolódik, aszimmetrikus lesz, a semleges szál a súlyponti tengelytől távolabb lesz (16. ábra). A kiszámolt feszültségértékek összeadásával kiadódik a maradék belső feszültsége a munkadarabnak, mely összehasonlítható szimulációkkal vagy mérésekkel a továbbiakban.

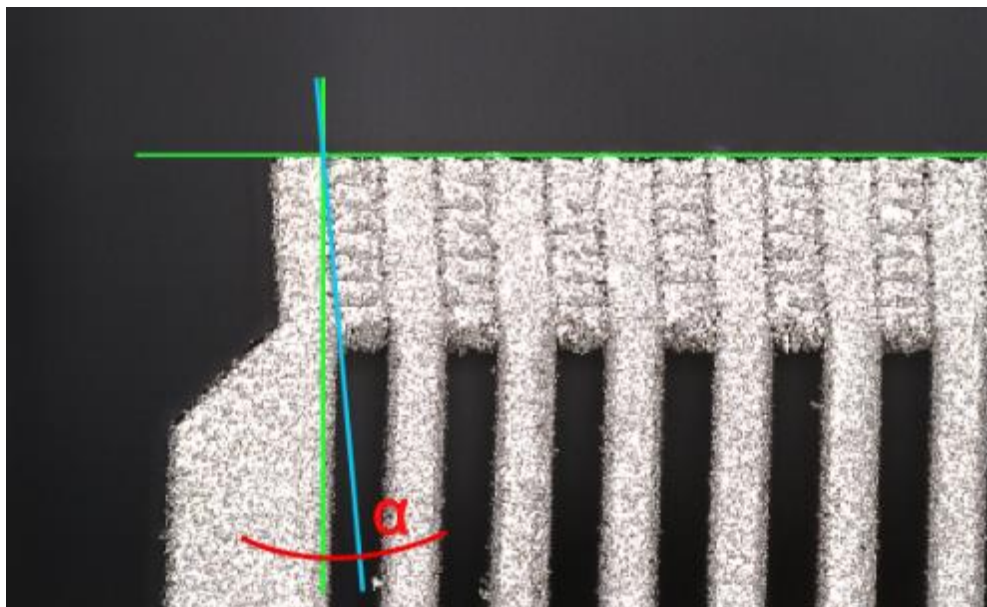
A konzol szkennelésre került oldalára és tetejére állítva egyaránt. Oldalára állítva a kiszögellésekre felülről tudunk ránézni. Ezt megtettük vágás előtt és vágás után is. A Keyence VR-5000 elemző szoftverének megfelelő parancsait és lehetőségeit használva méréseket végeztünk a konzol tetejétől az aljáig több pontban is a konzol teljes hosszán. Ezen mérések célja az volt, hogy megállapítsunk hosszanti irányú távolságokat vágás előtt és után is. Mivel a semleges szálban a feszültségek értéke pontosan nulla, így nem nyúlik, illetve nem is zsugorodik az. Ezen hossz távolságokat összehasonlítva a konzol két állapota esetén tudtuk közelíteni a semleges szálát, mely a konzol alsó harmadában lett lokalizálva.

5. KIÉRTÉKELÉS

5.1. SEMLEGES SZÁL MEGHATÁROZÁSA

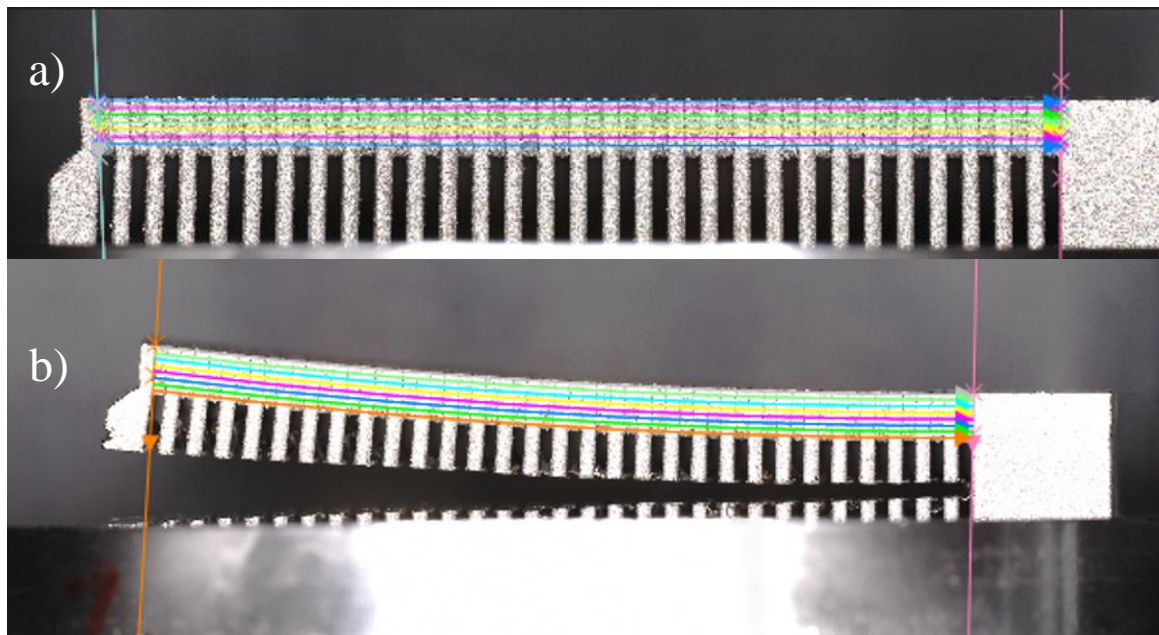
A semleges szál a test egész hosszán azon magasságban helyezkedik el, ahol a feszültségekből származó deformációk mértéke nulla. Helyzetét a Keyence VR-5000 optikai mérőeszköz segítségével határoztuk meg.

Először levágás előtt végeztünk méréseket. Felülről lefelé haladva egyeneseket illesztettünk a próbatest oldalára a két legszélső kiszögellés közé (18. ábra). Elméletileg a két pont távolsága az egész magasságon megegyezik, azonban a gyártás közben keletkező feszültségek következtében a levágás előtt is minimális mértékben deformálódott a próbatest vége a magasság mentén (17. ábra).



17. ábra: A próbatest oldalnézete levágás előtt.

Levágás után felülről lefelé haladva ugyanazon magasságokban illesztettünk görbét a felhajlott próbatestre (18. ábra). Az illesztett görbe kiterített hossza és a levágás előtti pontok távolságának különbsége megadja az adott magasságban a maradó feszültségből adódó nyúlás mértékét. Ez az érték azonban csak közelítő, mivel a hajlítás görbületi sugara a próbatest hossza mentén változik. Emellett a technológiai adottságok miatt nem tudunk a kiszögelléseken ugyanott felvenni pontokat mindkét ábrán, ami további hibát visz a mérésbe.



18. ábra: Egyenesek és görbék illesztése a levágás előtt (a) és levágás után (b) mért próbatestre.

A mérési eredményeket az 1. táblázat tartalmazza. Semleges szálnak a próbatest magassága mentén azt a vonalat tekintjük, amely hosszirányban nem deformálódik, azaz nem ébrednek benne feszültségek. A mért adatok alapján ez ott található, ahol a felvágás előtti és utáni távolságok különbsége nulla. A táblázat alapján a semleges szál kb. 2,7 mm mélyen található a próbatest felszínétől mérve.

1. táblázat: Különböző magasságokban mért távolságok felvágás előtt és után.

i	levágás előtt (mm)	levágás után (mm)	Δl (mm)	mélység (mm)
1	58,863	58,633	0,23	0
2	58,862	58,639	0,223	0,392
3	58,846	58,674	0,172	0,831
4	58,815	58,674	0,141	1,341
5	58,794	58,696	0,098	1,795
6	58,770	58,719	0,051	2,242
7	58,754	58,731	0,023	2,695
8	58,746	58,741	0,005	2,734
9	58,711	58,779	-0,068	2,997

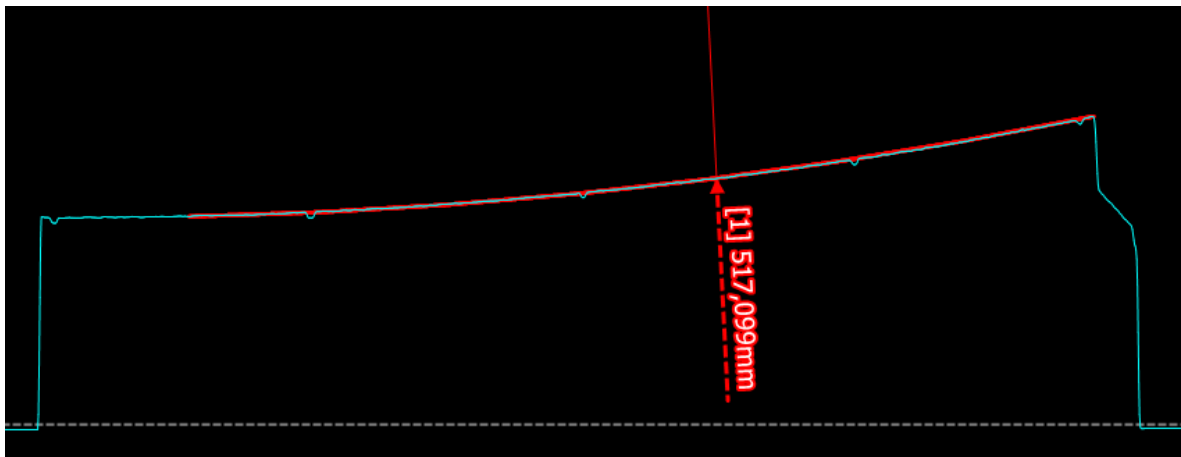
5.2. VERTIKÁLIS TERHELÉSEKBŐL ADÓDÓ FESZÜLTSEGEK

A maradó feszültségek az additívan gyártott SLM „cantilever” próbatestekben a modell alapján két komponensből tevődnek össze a hossz mentén: vertikális és horizontális

terhelésből adódó feszültségek. A vertikális terhelésekből származó feszültségek meghatározása az (5) és (6) egyenlet segítségével történt.

5.2.1. GÖRBÜLETI SUGÁR MEGHATÁROZÁSA

A hajlító nyomaték meghatározásához első lépésben szükségünk van a görbületi sugárra. A görbületi sugár a próbatest hossza mentén változik, így körívre történt görbeillesztéssel csak közelítő értéket kapunk. Mivel a mérőeszköz segítségével csak a próbatest felszínére tudunk mérhető görbületi sugarat illeszteni, ezért ezt az értéket korrigálni kellett. A mért görbületi sugár értéke 517,099 mm, ahogy az az 19. ábrán látható. A tisztán hajlított konzol semleges szála pontosan középen, esetünkben 1,5 mm mélyen helyezkedne el. Mivel a transzverzális feszültségek csak a hajlító nyomatékból származnak, ezért ezzel az értékkel korrigáljuk az illesztett sugarat, így a semleges szál görbületi sugara tiszta hajlítás esetén 518,599 mm lesz.



19. ábra: A próbatest felszínére illesztett görbületi sugár.

5.2.2. VERTIKÁLIS TERHELÉSBŐL ADÓDÓ FESZÜLTSEGEK MEGHATÁROZÁSA

A hajlító nyomatékot az (5) egyenlet segítségével kaptuk meg a befogási keresztmetszetre vonatkozóan. Ugyanúgy, mint a görbületi sugár, a hajlító nyomaték is a próbatest hossza mentén változik, ezért a kapott eredmény a befogási keresztmetszetre érvényes közelítő érték.

$$M(l_0) = \frac{I * E}{R(l_0)} = \frac{33,75 \text{ mm}^4 * 110000 \text{ MPa}}{518,599 \text{ mm}} = 7,1587 \text{ Nm}$$

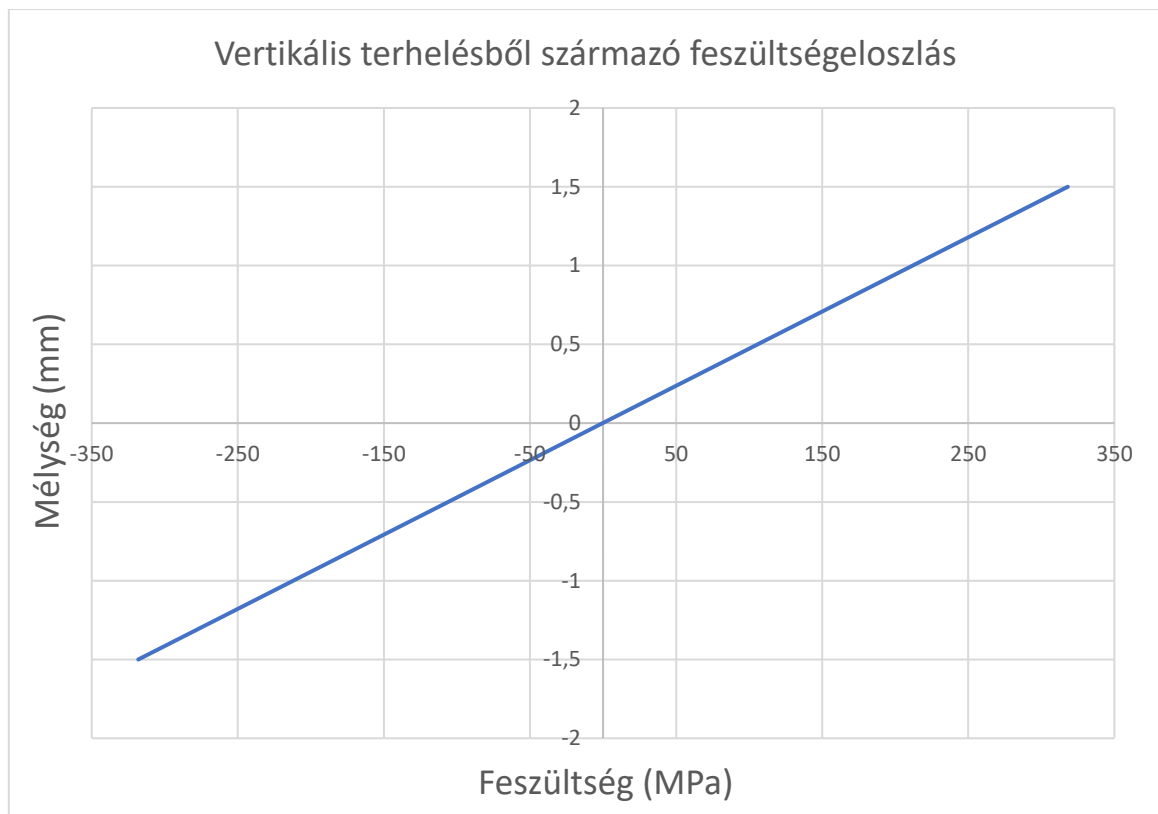
A vertikális terhelésből eredő, befogási keresztmetszetben kialakuló feszültségeloszlást a hajlító nyomaték segítségével a (6) egyenlet alapján határoztuk meg. A feszültségek

eloszlását a magasság mentén rendre 0,5 mm-es osztásokban számoltuk ki. Az eredményeket a 2. táblázat tartalmazza.

2. táblázat: A vertikális terhelésből eredő feszültségek.

i	Vertikális terhelésből eredő feszültség(MPa)
1	318,164902
2	212,1099347
3	106,0549673
4	0
5	-106,0549673
6	-212,1099347
7	-318,164902

A 20. ábra a vertikális terhelésből eredő, befogási keresztmetszetben kialakuló feszültségeket mutatja a próbatest magasságának függvényében. A befogott keresztmetszet súlyponti tengelyénél található a vertikális megoszló terhelésből adódó hajlítás semleges szálja.



20. ábra: Vertikális terhelésből származó feszültségeloszlás.

5.3. HORIZONTÁLIS TERHELÉSBŐL ADÓDÓ FESZÜLTSEGEK

A befogás keresztmetszetére merőleges feszültségeloszlás meghatározásához a vertikális terhelésből adódó feszültségen kívül szükségünk van a konzol hosszirányú

terhelésből adódó feszültségre is. A vertikális terhelésből adódó feszültségek értéke tiszta hajlítás során a próbatest magasságának közepén (a keresztmetszet súlyponti, vízszintes tengelye), a semleges szálon nulla. Ebből adódóan az itt mért deformációk csak a horizontális terhelésből adódó feszültségekből származnak. Ezen feszültség meghatározása érdekében 1,5 mm mélyen megmértük a nyúlást.

Ezen mélységben a levágás előtti hossz 58,772 mm volt, míg levágás után 58,7 mm. Az (1) egyenlet segítségével meghatározott tiszta húzó feszültség értéke 269,52 MPa lett, ami az egész befogási keresztmetszeten belül azonos.

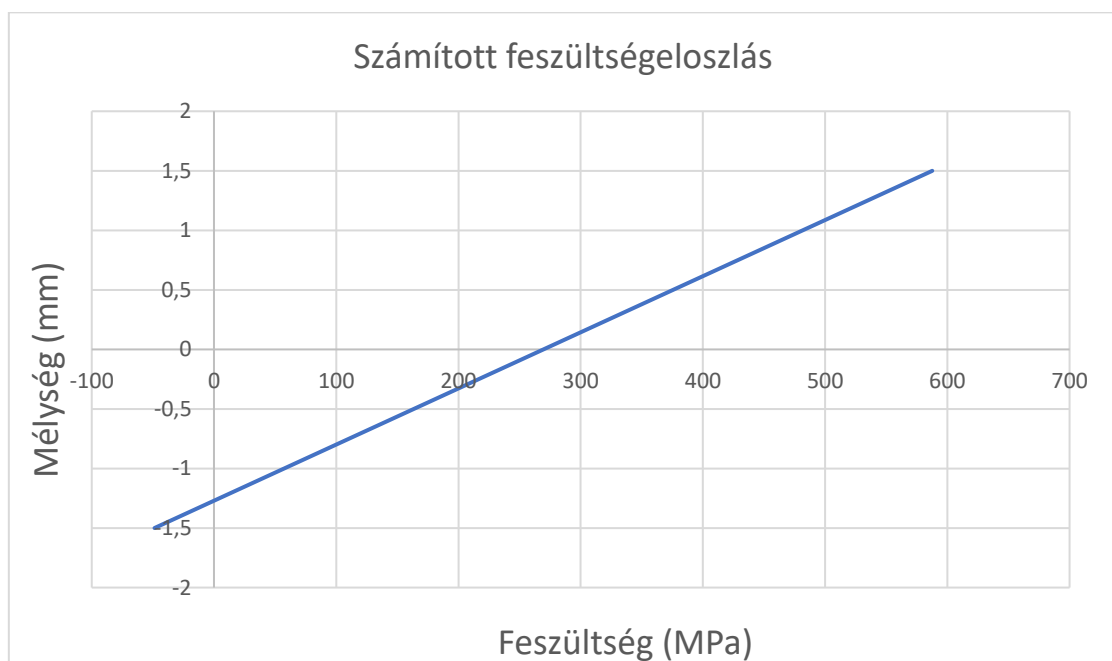
5.4. NORMÁL FESZÜLTÉG

Az összegzett feszültségek értékeit a 3. táblázat tartalmazza.

3. táblázat: Az összegzett feszültségértékek.

i	Összfeszültség (MPa)	Mélység (mm)
1	587,6814026	0,0
2	481,6264352	0,5
3	375,5714679	1,0
4	269,5165006	1,5
5	163,4615333	2,0
6	57,40656594	2,5
7	-48,64840138	3,0

Látszódik, hogy az értékek 2,5 és 3 mm között érik el a nulla értéket. Korábbiakban meghatároztuk, hogy a semleges szál 2,7 mm mélység körül található, ez párhuzamban van a számításaink eredményeivel.



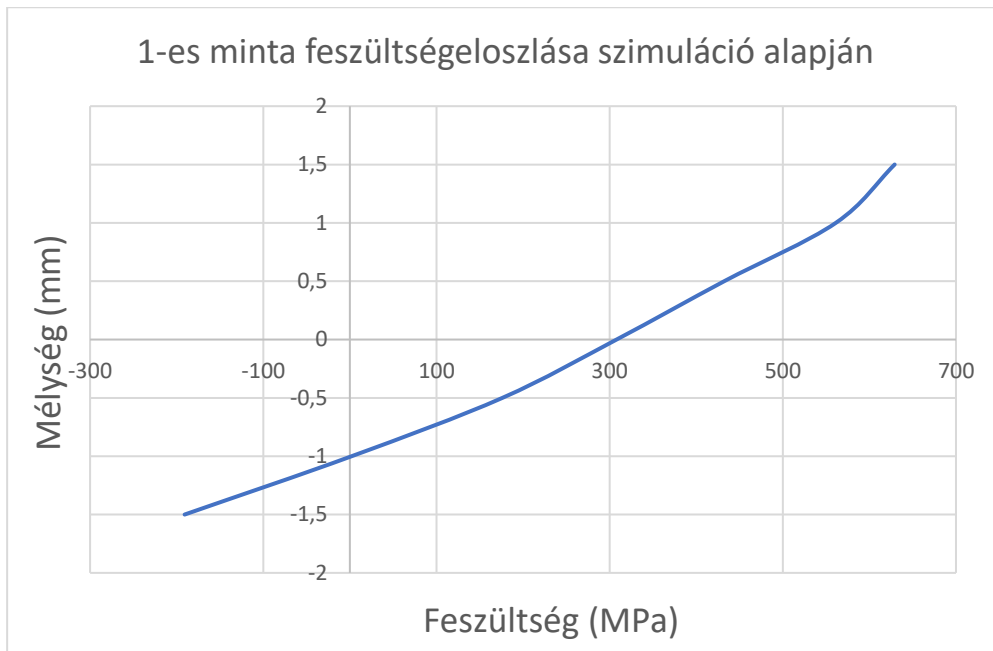
21. ábra: A számított feszültségeloszlás diagramja.

5.5. ÖSSZEHASONLÍTÁS A SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEKKEL

Az [1]-es forrás szimulációs eredményei a következők:

4. táblázat: Az 1-es minta befogási keresztmetszetének maradó feszültségeloszlása szimuláció alapján.

1-es minta		
1	629,1786	MPa
2	561,2527	MPa
3	432,3128	MPa
4	308,0022	MPa
5	176,1481	MPa
6	2,055223	MPa
7	-190,851	MPa

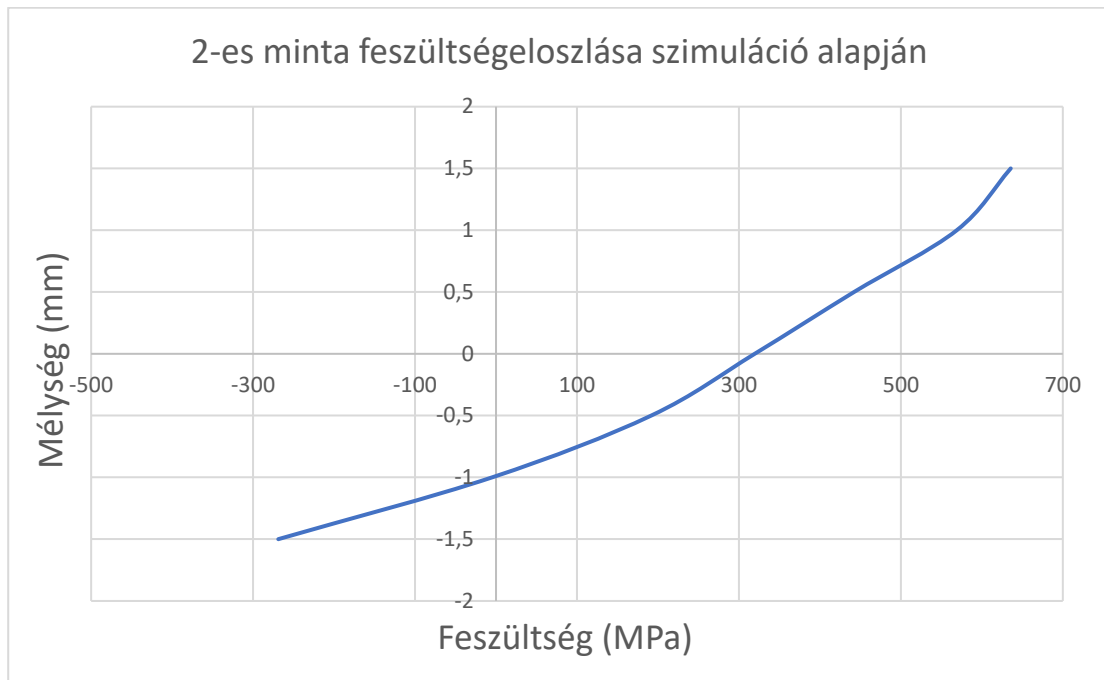


22. ábra: Az 1-es minta szimulációs feszültségeloszlás diagramja.

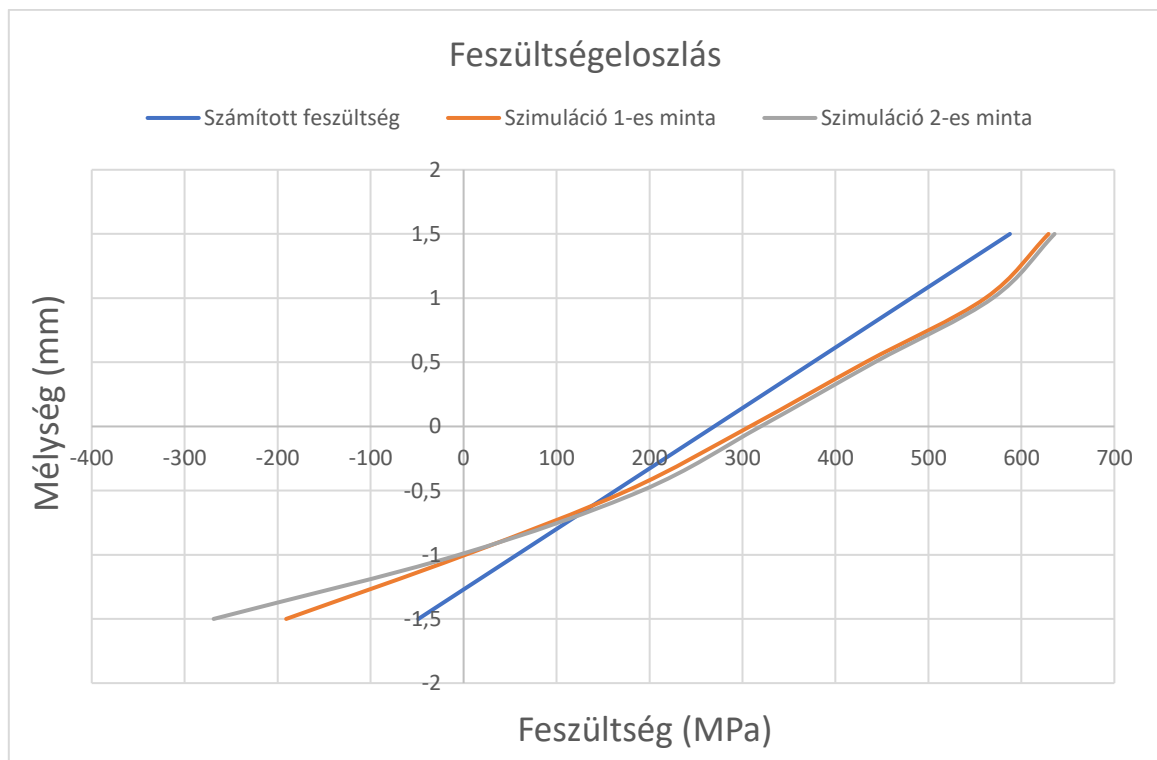
A 2-es minta befogási keresztmetszetének maradó feszültségeloszlása:

5. táblázat: A 2-es minta befogási keresztmetszetének maradó feszültségeloszlása szimuláció alapján.

2-es minta		
1	635,6733	MPa
2	569,0664	MPa
3	442,1655	MPa
4	319,4766	MPa
5	191,6709	MPa
6	-4,90045	MPa
7	-268,876	MPa



23. ábra: A 2-es minta szimulációs feszültségeloszlás diagramja.



24. ábra: Összehasonlító feszültségeloszlás diagram.

Látható, hogy a szimulációs eredmények 310 MPa körül metszik az x tengelyt, míg a számított értékek 270 MPa körül. A szimulációs értékeknél nagyobb nyomófeszültségek jelennek meg, -190 MPa, illetve -268 MPa, mint a számított értékeknél, ami -48 MPa.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozatban Ti6Al4V anyagú SLM additívan gyártott cantilever próbatest maradó feszültségének vizsgálatát végeztük egy korábbi diplomamunka [1] alapján, annak továbbgondolásával, általunk javasolt módosításokkal. A próbatest a korábbi diplomamunka [1] általunk módosított geometriája szerint készült. Deformáció mérésével meghatároztuk a horizontális és vertikális feszültségkomponensek értékét, és ezek összegzésével felállítottuk a befogási keresztmetszet feszültségeloszlását.

A számított eredményeinket összehasonlítottuk a korábbi diplomamunka [1] szimulációs eredményeivel. A kapott értékeink jobban megközelítik a szimulációs eredményeket, mint a diplomamunka számított értékei. Azonban nem jelenthetjük ki teljes biztonsággal, hogy a szimulációs értékek teljesen a valóságot tükrözik.

Az általunk számított horizontális terhelésekből származó feszültség értéke a szimulációs értékekhez képest kb. 40 MPa-lal lett kevesebb, a maximális húzófeszültség is kb. 40 MPa-lal lett kevesebb, azonban a szimulációs értékek átlagához képest az általunk számított nyomófeszültségek 180 MPa-lal alacsonyabbak. Ezek alapján kijelenthetjük, hogy mindenképp érdemes további méréseket végezni, hogy a számított értékek szórásának meghatározásával jobban tudjuk közelíteni a valóságot.

Az általunk számított vertikális terhelésekből származó feszültségértékek a vártnál alacsonyabbak. Mivel a görbületi sugár, amit a hajlítónyomaték meghatározására használunk, a próbatest hossza mentén változik, ezért az általunk az egész hosszra illesztett görbe csak közelítő érték. Érdemes lehet vizsgálni, hogy a gyártási pontatlanság miatt kellő magabiztonsággal lehet-e illeszteni a közelítő görbét, vagy érdemesebb más módszert alkalmaznunk a hajlító nyomaték meghatározására.

Összességében ez a kutatás betekintést nyújt az additívan gyártott Ti6Al4V ötvözetek maradó feszültségének egy lehetséges meghatározásába. A módszer számszerűsített feszültségadatokat ad, ami lehetőséget ad további kutatásokban az eredmények egyszerű összehasonlítására.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Taha Emin Özçelik, Experimental Residual Stress Mapping of Additive Manufactured Ti6Al4V alloys, Diplomamunka, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 2023
- [2] Prashanth, K.G. Selective Laser Melting: Materials and Applications. J. Manuf. Mater. Process. 2020, 4, 13. <https://doi.org/10.3390/jmmp4010013>
- [3] Prashanth, K.G.; Kolla, S.; Eckert, J. Additive manufacturing processes: Selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—Selection guidelines. Materials 2017, 10, 672. <https://doi.org/10.3390/ma10060672>
- [4] S. Xu, J. Liu, Y. Ma, Residual stress constrained self-support topology optimization for metal additive manufacturing, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 389, 2022, 114380, ISSN 0045-7825, <https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114380>
- [5] R. Zhang, X. Li, X. Hou, J. Mo, J. A. de Oliveira, F. Wang, Y. Zhang, J. Li, S. Paddea, H. Dong, S. Zhang, Residual stress mapping in additively manufactured steel mould parts using asymmetric and multiple cuts contour method, Journal of Manufacturing Processes, Volume 102, 2023, Pages 1000-1009, ISSN 1526-6125, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.019>
- [6] Haider Ali, Evolution of Residual Stress in Ti6Al4V components fabricated using Selective Laser Melting, PhD tézis, The University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom, 2017
- [7] Miao, X.; Wu, M.; Han, J.; Li, H.; Ye, X. Effect of Laser Rescanning on the Characteristics and Residual Stress of Selective Laser Melted Titanium Ti6Al4V Alloy. Materials 2020, 13, 3940. <https://doi.org/10.3390/ma13183940>
- [8] Weili Cheng, Iain Finnie, 'Introduction to Residual Stresses', Residual Stress Measurement and the Slitting Method, Springer New York, NY 10013, USA, 2006, 1-8, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-39030-7>
- [9] Haider Ali, Hassan Ghadbeigi, Kamran Mumtaz, Effect of scanning strategies on residual stress and mechanical properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V, Materials Science and Engineering: A, Volume 712, 2018, Pages 175-187, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.103>
- [10] Haize Galarraga, Robert J. Warren, Diana A. Lados, Ryan R. Dehoff, Michael M. Kirka, Peeyush Nandwana, Effects of heat treatments on microstructure and properties of

Ti-6Al-4V ELI alloy fabricated by electron beam melting (EBM), Materials Science and Engineering: A, Volume 685, 2017, Pages 417-428, ISSN 0921-5093, <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.019>

[11] F. A. Kandil, J. D. Lord, A. T. Fry, and P. V Grant, A Review of Residual Stress Measurement Methods-A Guide to Technique Selection, NPL Materials Centre, Teddington, Middlesex, UK, 2001, 45

[12] Murat Deveci, Types of Residual Stresses, Stresstech Bulletin 13, https://www.stresstech.com/wp-content/uploads/2020/08/Bulletin_13_Types_of_Residual_Stresses.pdf (Weblap elérve ekkor: 2023.10.19.)

[13] Nian-Pu Xue, Qiong Wu, Yu Zhang, Bian-Hong Li, Yi-Du Zhang, Shuai Yang, Yu Zhu, Jian Guo, Han-Jun Gao, Review on research progress and comparison of different residual stress strengthening methods for titanium alloys, Engineering Failure Analysis, Volume 144, 2023, 106937, ISSN 1350-6307, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106937>

[14] Pavol Dlhý, Jan Poduška, Pavel Pokorný, Michal Jambor, Luboš Náhlík, Pavel Hutař, Residual stress determination by the layer removal and X-ray diffraction measurement – correction method, MethodsX, Volume 9, 2022, 101768, ISSN 2215-0161, <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101768>

[15] Santhakumar Sampath, Zheng Zhang, Zi Wen Tham, Yi Fan Chen, Debbie Hwee Leng Seng, Thulsiram Gantala, Lei Zhang, Non-contact measurements of residual stress distribution and grain size in titanium alloys with laser ultrasonic system, International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 108809, ISSN 0020-7403, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108809>

[16] Claudia Barile, Simone Carone, Caterina Casavola, Giovanni Pappalettera, Implementation of Gaussian Process Regression to strain data in residual stress measurements by hole drilling, Measurement, Volume 211, 2023, 112590, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112590>

[17] Max D.A. Valentine, Vimal Dhokia, Joseph Flynn, Sophie A.M. McNair, Alexander J.G. Lunt, Characterisation of residual stresses and oxides in titanium, nickel, and aluminium alloy additive manufacturing powders via synchrotron X-ray diffraction, Materials Today Communications, Volume 35, 2023, 105900, ISSN 2352-4928, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105900>

- [18] C. Li, J.F. Liu, X.Y. Fang, Y.B. Guo, Efficient predictive model of part distortion and residual stress in selective laser melting, Additive Manufacturing, Volume 17, 2017, Pages 157-168, ISSN 2214-8604, <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.08.014>

8. ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A Ti6Al4V folyamatos hűtésre érvényes átalakulási diagramja [10].	7
2. ábra: A maradó feszültség mérési módszereinek csoportosítása ([6]-os forrás alapján).	9
3. ábra: Tipikus maradó feszültség mérésnél használt nyúlásmérő bélyeg rozetta elrendezések [11].	11
4. ábra: A röntgensugaras diffrakció és a rétegleválasztó módszer kombinálása [14].	12
5. ábra: Maradó feszültség gradiens felvétele lézeres ultrahang módszerrel [15].	13
6. ábra: A lézeres ultrahangos vizsgálat pozícionálása [15].	14
7. ábra: A cantilever egy lehetséges kialakítása a) gyártás után, b) levágáskor, c) levágást követően [18].	14
8. ábra: Az anyagállapot és hőmérsékletváltozás additív gyártás során [18].	15
9. ábra: A cantilever fő, befoglaló méretei.	17
10. ábra: A kiszögellések méretei.	18
11. ábra: A gyártáshoz használt EOS M 100 SLM technológiájú berendezés.	18
12. ábra: A próbatest beméréséhez használt Keyence optikai mikroszkóp.	19
13. ábra: A próbatest felvágás közben.	19
14. ábra: A próbatest a felvágás után.	20
15. ábra: A megoszló terhelések a próbatesten.	20
16. ábra: A befogási keresztmetszet feszültségeloszlása.	21
17. ábra: A próbatest oldalnézete levágás előtt.	24
18. ábra: Egyenesek és görbék illesztése a levágás előtt (a) és levágás után (b) mért próbatestre.	25
19. ábra: A próbatest felszínére illesztett görbületi sugár.	26
20. ábra: Vertikális terhelésből származó feszültségeloszlás.	27
21. ábra: A számított feszültségeloszlás diagramja.	28
22. ábra: Az 1-es minta szimulációs feszültségeloszlás diagramja.	29
23. ábra: A 2-es minta szimulációs feszültségeloszlás diagramja.	30
24. ábra: Összehasonlító feszültségeloszlás diagram.	30

9. TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat: Különböző magasságokban mért távolságok felvágás előtt és után.	25
2. táblázat: A vertikális terhelésből eredő feszültségek.....	27
3. táblázat: Az összegzett feszültségértékek.....	28
4. táblázat: Az 1-es minta befogási keresztmetszetének maradó feszültségeloszlása szimuláció alapján.	29
5. táblázat: A 2-es minta befogási keresztmetszetének maradó feszültségeloszlása szimuláció alapján.	29

10. RÖVIDÍTÉSEK ÉS SZIMBÓLUMOK JEGYZÉKE

R	mm	semleges szál görbületi sugara
M	Nm	hajlító nyomaték
I	mm ⁴	keresztmetszeti inercia
E	N/mm ²	rugalmassági/Young modulusz
a	mm	keresztmetszet magassága
b	mm	keresztmetszet szélessége
Δl	mm	hossz változás
SLM		Selective Laser Melting
AM		Additive Manufacturing
CAD		Computer-Aided Design
LPBF		Laser Powder Bed Fusion
μm		mikrométer
ms		mikrosecundum
°C		Celsius fok
K		Kelvin
mm		milliméter
Nm		Newton-méter
N		Newton
GPa		Giga-Pascal
MPa		Mega-Pascal
s		secundum
F_h	N	horizontális elemi erő
σ_h	MPa	horizontális feszültség komponens
σ_v	MPa	vertikális feszültség komponens