Tampereen yliopisto

Nooa Vuokko

VÄSYMISKESTÄVIEN OSIEN SUUNNITTELU METALLIJAUHEPETITULOSTUKSELLE

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastaja: Hossein Mokhtarian
"Toukokuu 2025"

TIIVISTELMÄ

Nooa Vuokko: Väsymiskestävien osien suunnittelu metallijauhepetitulostukselle
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknisten tieteiden kandidaattiohjelma, Konetekniikka
Toukokuu 2025

Additiiviset valmistusmenetelmät, kuten jauhepetitulostus ovat yleistyneet viime vuosina huomattavasti, tarjoten paljon uusia mahdollisuuksia komponenttien suunnitteluun ja valmistukseen. Verrattuna perinteisemmillä valmistusmenetelmillä valmistettuihin vastineisiin, jauhepetitulosteilla on tyypillisesti huono väsymiskestävyys. Tämä rajoittaa käyttökohteiden määrää, joissa jauhepetitulostettuja osia voidaan hyödyntää.

Tämän kandidaatin työn tavoitteena on koota LPBF-osien väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä sekä käsitellä sitä, miten niitä muuttamalla voidaan optimoida osien väsymiskestävyys. Tutkielma on rajattu suunnitteluvaiheen kannalta merkittäviin tekijöihin. Työ on toteutettu kirjallisuuskatsauksena. Sen yleiset taustatiedot pohjautuvat alan kirjallisuuteen, kuten oppikirjoihin. Tarkempien arvojen ja yksityiskohtien osalta lähteenä on käytetty pääasiassa aiheesta tehtyjä tutkimuksia. Tutkielman väitteitä on pyritty perustelemaan mahdollisimman kattavilla lähteillä, saatavilla olevan tutkimusmateriaalin puitteissa. Tutkielma on jaettu kolmeen osaan: Ensin käsitellään LPBF-osien laatuun ja lujuuteen vaikuttavia tekijöitä, jotka ovat tärkeä pohja väsymiskestävyydelle. Toisena käsitellään suoraan väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä. Viimeisenä on yhteenveto, jossa käydään läpi tutkielman löydökset.

Tutkielmassa huomattiin, että väsymiskestävyyteen vaikuttavat tekijät ovat käytetyn materiaalin ominaisuudet, osan sisäiset jännitykset ja osan pinnanlaatu. Jälkikäsittelyillä huomattiin olevan suuri merkitys sekä materiaalin ominaisuuksiin, että osan pinnankarheuteen, riippuen käytetystä jälkikäsittelymenetelmästä. Paras mekaaninen väsymiskestävyys voidaan saavuttaa valitsemalla materiaaliksi titaani tai Inconel, mutta myös teräksellä päästää hyvään lopputulokseen. Jälkikäsittelymenetelmistä paras tulos saadaan yhdistämällä lämpökäsittely ja osan geometrialle soveltuva pintakäsittelymenetelmä, kuten koneistaminen tai kemiallinen käsittely. Sisäisiin jännityksiin voidaan vaikuttaa lähinnä lisäämällä materiaalin määrää, mutta myös optimoimalla osan rakenteen.

Avainsanat: 3D-printtaus, additiivinen valmistus, laserjauhepetitulostus, topologian optimointi, väsymiskestävyys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Nooa Vuokko: Design of Fatigue-Resistant Parts for laser powder bed printing
Bachelor’s Thesis
Tampere University
Bachelor's Programme in Engineering Sciences, Mechanical Engineering
May 2025

Additive manufacturing techniques, such as powder bed printing, have become much more common in recent years. This offers many new possibilities for designing and manufacturing components. Compared to similar components made with more traditional manufacturing methods, powder bed printed parts typically have worse fatigue lives. This limits the amount of applications where powder bed printed parts can be used.

The objective of this thesis is to summarise factors influencing the fatigue resistance of LPBF parts and how these can be used to optimise the fatigue life of these parts. The thesis is limited to factors that are relevant to the design phase. The research method of the thesis is a literature review. The general information of the thesis is mainly based on literature in the field, such as textbooks. More specific details and values are primarily sourced from research papers. In the thesis, the claims presented are based on multiple sources when possible. The thesis is divided into three parts: First, it examines the factors affecting the quality and strength of LPBF parts which form an important basis for fatigue resistance. Secondly, it discusses the factors that directly affect fatigue resistance. Lastly, the findings of the thesis are summarised.

The thesis found that the factors affecting fatigue resistance are the mechanical properties of the material used, the internal stresses of the part and the surface quality of the part. Post processing was found to greatly influence both the material properties and the surface quality of the part. The best mechanical fatigue resistance can be achieved with either titanium or Inconel as the material, but steel was a good alternative as well. Amongst post processing treatments, the best results can be achieved by combining a suitable heat treatment with a surface treatment. The chosen surface treatment should be compatible with the geometry of the part. Internal stresses can be mimimised by increasing the amount of useful material, but also by optimizing the structure.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, fatigue strength, laser powder bed printing, topology optimization

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

TEKOÄLYN KÄYTTÖ OPINNÄYTTEESSÄ

Opinnäytteessäni on käytetty tekoälysovelluksia:

☐ Ei
☒ Kyllä

Ilmoitukseni mukaan olen käyttänyt opinnäytteessäni tutkielmaprosessin aikana seuraavia tekoälysovelluksia:

Tekoälysovellusten nimet ja versiot: Scopus AI, ChatGPT-4o mini

Käyttötarkoitus:
Scopus AI-tekoälyä on käytetty etsimään tutkielmaan soveltuvia lähteitä. Sitä ei ole käytetty suoraan lähteenä.
ChatGPT:tä on käytetty tekstin oikolukemiseen.

Osiot, joissa tekoälyä on käytetty: Tutkielman lähdeluettelo, tutkielman käsittelykappaleet.

Olen tietoinen siitä, että olen täysin vastuussa koko opinnäytteeni sisällöstä, mukaan lukien osat, joissa on hyödynnetty tekoälyä, ja hyväksyn vastuun mahdollisista eettisten ohjeiden rikkomuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. YLEISET SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT ASIAT 3
2.1. Valmistusorientaatio 3
2.1.1 Porrasrakenteen vaikutus 3
2.1.2 Materiaalien anisotrooppisuus 4
2.1.3 Tukirakenteet 6
2.2. Täyttörakenteet ja pysyvät tukirakenteet 8
2.3. Topologiaoptimointi suunnittelussa 8
3. OSIEN VÄSYMISKESTÄVYYS 10
3.1. Geometria 10
3.2. Materiaalin valinta 11
3.3. Jälkikäsittely 13
3.3.1 Mekaaniset jälkikäsittelymenetelmät 13
3.3.2 Kuula- ja hiekkapuhallus 14
3.3.3 Kemialliset jälkikäsittelymenetelmät 15
3.3.4 Lämpökäsittely 15
3.3.5 Jälkikäsittelymenetelmän valinta 16
4. YHTEENVETO 18
LÄHTEET 20

LYHENTEET JA MERKINNÄT

HIP	engl. Hot Isostatic Pressing, kuumaisostaattinen puristus
LPBF	engl. Laser Powder Bed Fusion, laser-jauhepetisulatus
LHT	engl. Laser Heat Treatment, laser-lämpökäsittely
PBF	engl. Powder Bed Fusion, jauhepetisulatus
TO	engl. Topology Optimisation, topologiaoptimointi

1. JOHDANTO

Materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät ovat kehittyneet viime vuosina huomattavan nopeasti ja niiden käyttö on yleistynyt merkittävästi. Uudet valmistusteknologiat, kuten 3D-printtaus, tuovat mukanaan uusia ongelmia suunnitteluprosesseissa, jotka vaativat ratkaisua. Osia suunniteltaessa onkin tärkeää ymmärtää, kuinka valitun valmistusmenetelmän ominaisuudet vaikuttavat sekä valmistusprosessiin että lopputulokseen. Yhtä tärkeää on myös valita valmistusmenetelmä suunniteltavalta osalta haluttujen ominaisuuksien mukaan. Näin valmistusmenetelmän hyödyt saadaan maksimoitua ja haitat minimoitua. Jauhepetitulostuksessa (PBF) merkittävin hyöty on suunnittelun lähes rajaton monimutkaisuus (Toyserkani et al. 2021, s. 60).

Jauhepetitulostus (PBF) on 3D-tulostukseen lukeutuva valmistusmenetelmä, jossa metallijauhetta sulatetaan kerroksittain. Jauhe levitetään ohuena kerroksena tulostusalustalle, jonka jälkeen osan poikkileikkausta vastaava osa jauhekerroksesta sulatetaan. Sulatuksessa energianlähteenä voi toimia esimerkiksi lasersäde. Tällöin käytetään termiä LPBF (laser powder bed fusion) (Toyserkani et al. 2021; Dejene & Lemu 2023, s. 2–3). Jauheen levitys sulatuspedille voidaan tehdä kahdella eri päämenetelmällä. Yleisempi näistä on mekaaninen levitys, jossa voidaan käyttää muun muassa rulla-, harja- tai jäykkäteräistä levitintä (Wang et al. 2022, s. 1). Elektrostaattisessa levityksessä jauhe ohjataan jauhesäiliöstä pedille käyttäen kahden elektrodin välistä sähkökenttää (Elton et al. 2023, s. 1–2).

Valmistusmenetelmänä jauhepetisulatuksen tarkkuus on suhteellisen hyvä. Aiemmin mainituista menetelmistä LPBF on tarkempi, ja sillä voidaan saavuttaa melko hyvä pinnanlaatu (Dejene & Lemu 2023, s. 3). Sillä pystytään valmistamaan osia 0,1 mm:n tarkkuudella (Toyserkani et al. 2021, s. 397–399). LPBF-menetelmän tarkkuus riippuu vahvasti prosessiparametreista. Näitä ovat XY-tasolla esimerkiksi energianlähteen koko, muoto ja teho. Z-akselilla tarkkuus riippuu levitettävän jauhekerroksen paksuudesta. Pienentämällä sulatettavan alueen kokoa ja ohentamalla jauhekerrosta voidaan lisätä tarkkuutta. Pienempi sulatusalue tarkoittaa yleensä kuitenkin valmistusajan kasvua.

Tämä tutkielma on toteutettu kirjallisuuskatsauksena ja siinä käsitellään väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä, suunnitteluvaiheen näkökulmasta. Sen avulla pyritään vastaamaan tutkimuskysymykseen: Kuinka LPBF-menetelmällä valmistettujen osien me-

kaanista väsymiskestävyyttä voidaan optimoida. Luku 2 käsittelee osien suunnittelua kyseiselle valmistusmenetelmälle yleisesti, kuitenkin keskittyen osien mekaaniseen suorituskykyyn. Näihin lukeutuvat geometrian piirteiden suunnittelu, sisäiset täyttörakenteet ja topologiaoptimointityökalujen hyödyntäminen. Luvussa 3 käsitellään enemmän väsymiskestävyyteen liittyviä asioita, kuten materiaalivalintoja, jälkikäsittelyä ja geometrian suunnittelua. Luku 4 kokoaa tutkielman käsittelemät aiheet yhteen.

2. YLEISET SUUNNITTELUUN VAIKUTTAVAT ASIAT

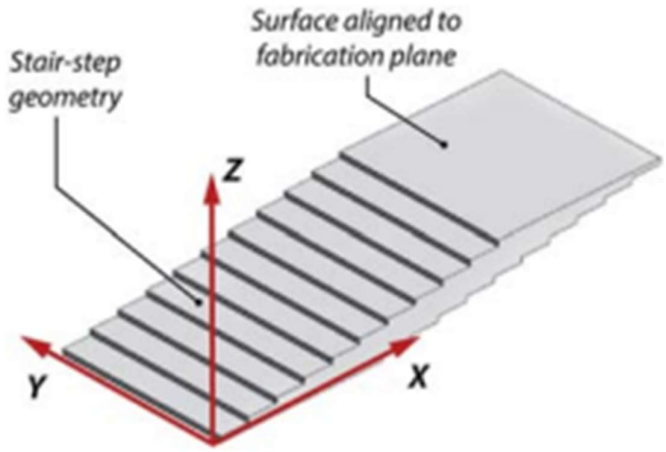
Väsymiskestävyyden kannalta on tärkeää, että osissa ei esiinny virheitä, tai että niitä on mahdollisimman vähän. Myös osan lujuudella on merkittävä vaikutus väsymiskestävyyteen, sillä vahvemmat osat kestävät usein paremmin väsyttäviä rasituksia. Tässä kappaleessa käsitellään yleisesti LPBF-menetelmällä valmistettujen osien laatuun ja lujuuteen vaikuttavia tekijöitä. Tällä luodaan pohja väsymiskestävyyteen vaikuttaville tekijöille.

2.1. Valmistusorientaatio

Valmistusorientaatiolla voi olla merkittävä vaikutus lopputuloksen laatuun LPBF-menetelmillä valmistetuissa osissa. Orientaatioon voivat vaikuttaa osan geometriset vaatimukset, osaan kohdistuvat rasitukset ja tukirakenteiden tarve (Toyserkani et al. 2021, s. 396–399). Myös käytössä olevien materiaalien mekaaniset ominaisuudet ovat riippuvaisia osan valmistusorientaatiosta (Toyserkani et al. 2021, s. 341–342).

2.1.1 Porrasrakenteen vaikutus

PBF-menetelmien kerroksellisuus asettaa geometrian suunnitteluun rajoitteita. Nykyisin käytössä olevilla laitteilla Z-akselin suuntaiset kaarevat muodot diskretisoituvat kerrospaksuuden mukaisesti ja muodostavat porrasmaisen geometrian (Yadroitsev et al. 2021, s. 122). Tämä on havainnollistettu kuvassa 1, jossa tulostusalusta on XY-tason suuntainen. Sama koskee myös pintoja, jotka ovat suoria, mutta kaltevia suhteessa Z-akseliin.



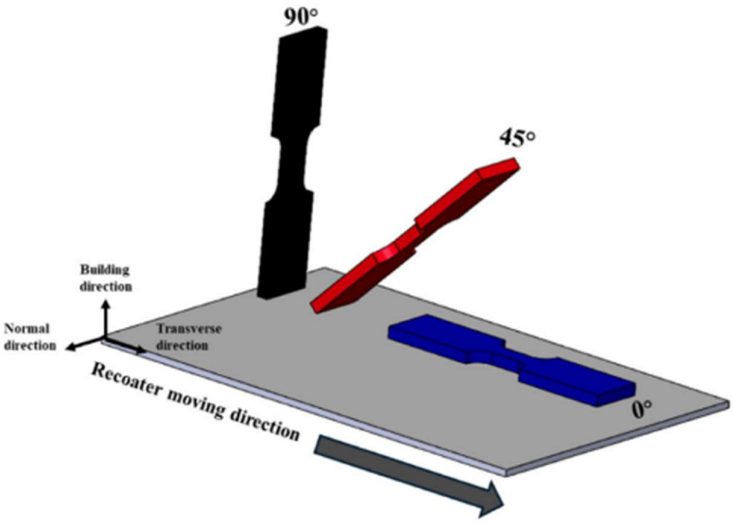
Kuva 1. *Porrasrakenne (Yadroitsev et al. 2021, s. 122)*

Rakenteen porrasmaisuus tulisi ottaa huomioon osaa ja sen orientaatiota suunniteltaessa. Geometriat, jotka vaativat tarkkoja mitta- tai muototoleransseja, tulisi sijoittaa XY-tasoon (Yadroitsev et al. 2021, s. 121–123). Poikkeuksena tähän ovat sellaiset tapaukset, joissa porrasrakenne ei vaikuta geometrian laatuun, kuten suorat seinämät XZ- ja YZ-suunnissa. Toinen poikkeus on tilanteet, joissa kyseinen geometria on tarkoitus työstää toleransseihin jälkikäsittelyvaiheessa.

Tarkkuuden lisääminen Z-akselin suunnassa tasolla onnistuu pienentämällä kerrospaksuutta. Jos kaarevia muotoja halutaan valmistaa z-akselin suuntaisella tasolla, tulisi kuitenkin selvittää, kykenevätkö käytettävissä olevat tulostimet tarpeeksi pieneen kerrospaksuuteen vaadittujen toleranssien saavuttamiseksi. Kyseinen haaste voidaan myös ratkaista sopivalla jälkikäsittelyllä. Tällöin tulee kuitenkin ottaa huomioon se, että osa tulee mitoittaa siten, että siinä on valmistuksen jälkeen tarpeeksi ylimääräistä materiaalia.

2.1.2 Materiaalien anisotrooppisuus

LPBF-menetelmällä valmistettujen osien rakenteet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan anisotrooppisia (Toyserkani et al. 2021, s. 341–342). Anisotrooppinen käyttäytyminen riippuu käytetyn materiaalin lisäksi käytetystä prosessista ja sen parametreista. Seuraavissa löydöksissä viitataan eri materiaalin ominaisuuksiin suhteessa valmistusorientaatioon kuvan 2 mukaisesti. 0°:n osan viitataan olevan vaakatasossa ja 90°:n olevan pystysuunnassa.



Kuva 2. *Valmistusorientaatio (Yousif et al., 2024, s. 1222)*

Ti–6Al–4V-seokselle pystysuunnassa valmistetuilla testikappaleilla murtolujuus oli suurempi kuin vaakasuunnassa valmistetuilla (Wu et al. 2023). Ramachandiran et al. (2023)

puolestaan väittävät, että seokselle Ti-5553 vaakatasossa valmistettujen testikappaleiden murtolujuus on pystysuunnassa valmistettuja suurempi. Shuvhonin et al. (2025) mukaan Ti-6Al-4V-testikappaleiden murto- ja myötölujuus olivat suuremmat vaakatasossa kuin pystysuunnassa. Tässä kuitenkin vertailtiin mikropilareita, joissa kerrosten välinen sidosvahvuus on parempi kuin makromittakaavan osilla.

Yousifin et al. (2024) mukaan 316L-teräksellä korkein murto- ja myötölujuus saavutettiin vaakatasossa valmistetulla testikappaleella. Huonoin lujuus saatiin pystysuorassa valmistetulla osalla, ja 45°:n kulmassa valmistetun testiosan ominaisuudet olivat kahden edeltävän orientaation väliltä. Jinlongin et al. (2023) tutkielman löydökset olivat päinvastaiset 316L-teräkselle, myötö- ja murtolujuuden suhteen, mutta 45°:n orientaatiota ei testattu. M789-teräksellä ei ollut merkittävää eroa orientaatioiden välillä, sillä erot murtolujuudessa olivat noin 3 % (Tian et al. 2020). 316L-teräksellä venymä murtuessa oli suurempi pystysuunnassa (Jinlong et al. 2023; Yousif et al. 2024).

AlSi10Mg-alumiiniseoksella myötö- ja murtolujuus olivat suuremmat pystysuunnassa valmistetulla testikappaleella kuin vaakasuunnassa valmistetulla. 45°:n kulmassa valmistetulla kappaleella molemmat arvot olivat edeltävien orientaatioiden välillä (Lehmhus et al. 2022). Venymä murtumassa oli suurempi vaakatasossa (Lehmhus et al. 2022). Lehmhusin et al. (2022) mukaan erot lujuuksissa voisivat johtua alumiinin jäähtymisen jälkeisestä mikrorakenteesta.

Salemin & Javidradin (2021) mukaan Inconel 625:lle sekä myötölujuus, että murtolujuus saavuttivat suuremmat arvot vaakasuunnassa, kuin pystysuunnassa. Myös Inconel 718:lle murtolujuus vaakasuunnassa valmistetuilla testikappaleille oli suurempi, kuin pystysuunnassa valmistetuille (Alay et al. 2025). Venymä murtuessa oli suurempi pystysuorassa, kuin vaakatasossa, molemmilla seoksilla (Salemi & Javidrad 2021; Alay et al. 2025).

Cu–10Sn-seokselle vaakatasossa valmistetulla testikappaleella murtolujuus ja tasavenymä olivat suuremmat, kuin pystysuorassa valmistetulla (Yang et al. 2024). Kaikkien materiaalien anisotrooppisista ominaisuuksista löytyy yhteenveto Taulukko 1.

Taulukko 1. *LPBF-menetelmällä tulostettujen materiaalien anisotrooppisuus*

Materiaali	**Anisotrooppisuus**	**Vahvin orientaatio**
Teräkset (Tian et al. 2020)	Ei merkittävää eroa	-

Titaani (Ramachandiran et al. 2023; Shuvho et al. 2025)	Kyllä	Vaakasuunta
Alumiiniseokset (Lehmhus et al. 2022)	Kyllä	Pystysuunta
Inconel (Salemi & Javidrad 2021; Alay et al. 2025)	Kyllä	Vaakasuunta
Kupariseokset (Yang et al. 2024)	Kyllä	Vaakasuunta

Yleisenä sääntönä voisi siis pitää, että kun halutaan maksimoida suunniteltavan osan myötö- ja murtolujuus, tulisi osa suunnitella siten, että suurimmat rasitukset kohdistuvat osaan XY-tasolla, suhteessa valmistusorientaatioon. Kun halutaan tasapainottaa murtolujuus tilanteessa, jossa merkittäviä rasituksia kohdistuu kaikkien kolmen akselin suuntaisesti, kannattaa valita 45°:n valmistusorientaatio, jos se on muilta rajoitteilta mahdollista. Poikkeuksena tähän olivat alumiiniseokset, joilla suurin murtolujuus saavutettiin Z-akselin suuntaisessa rasituksessa. Teräksillä yleisen säännön noudattamisesta ei ole tutkimustiedon perusteella haittaa eikä hyötyä.

2.1.3 Tukirakenteet

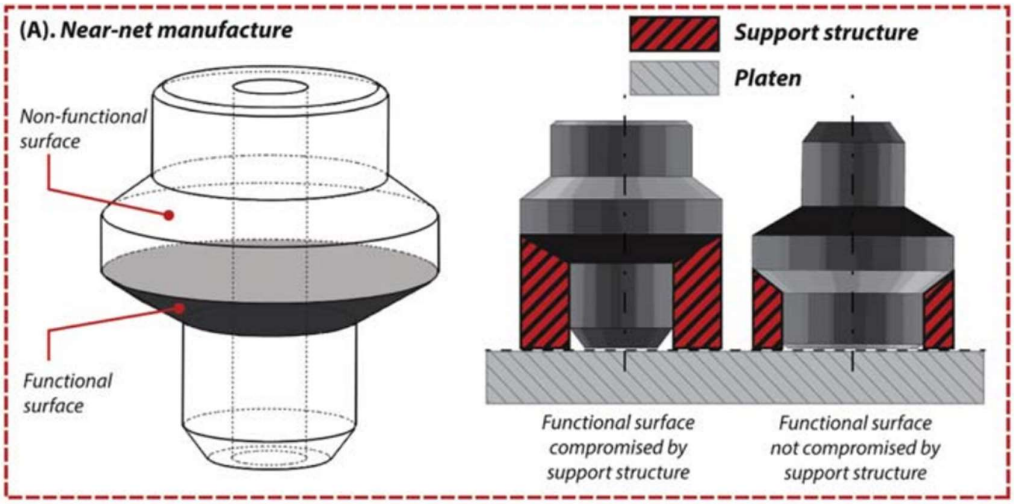
LPBF-menetelmässä tukirakenteiden käyttö on osan geometriasta riippuen monesti välttämätöntä. Niiden käytöllä on useita hyötyjä, mutta myös haittoja. Tämän takia niiden käytön tulisi olla tarkoituksenmukaista. Tukirakenteiden käyttöä tulisi optimoida siten, että niiden hyödyt saadaan maksimoitua ja haitat minimoitua. Tukirakenteiden käyttö lisää valmistukseen käytetyn materiaalin määrää ja näin ollen käytettyä koneaikaa (Toyserkani et al. 2021, s. 436; Yadroitsev et al. 2021, s. 125). Tukirakenteiden käyttö vaatii myös jälkikäsittelyprosessien käyttöä. Tukirakenteiden poiston lisäksi voi tukirakenteiden ja osan välinen pinta vaatia käsittelyä, pinnanlaadun korjaamiseksi (Toyserkani et al. 2021, s. 436).

Tukirakenteiden käytöllä voidaan parantaa lämmönsiirtoa pois tulostuspinnalta, etenkin ohuissa rakenteissa (Yadroitsev et al. 2021, s. 125). Tehostettu lämmönsiirto vähentää jäähtymisen aiheuttamia jäännösjännityksiä (Yadroitsev et al. 2021, s. 125). Lisäksi se voi ehkäistä geometrian vääristymiä, joita nopea jäähtyminen aiheuttaa.

Tukirakenteet myös tukevat tyhjän päällä roikkuvia ulokkeita. Orientaatioissa, joissa tulostettavan osan ja tulostusalustan välinen kontaktipinta on pieni, kuten tulostettaessa osia 45°:n kulmassa, tukirakenteet auttavat ankkuroimaan osan tulostusalustaan.

Suunnitellessa osia tulisi pyrkiä siihen, että tukirakenteita ei tarvitsisi käyttää ilman perusteltua syytä. Tämä voidaan saavuttaa suunnittelemalla osan geometria ja valmistusorientaatio siten, että yli 45°:n päälle kaatuvia rakenteita ei esiinny osassa. Myös ohuita kappaleesta ulkonevia geometrioita tulisi välttää, jos halutaan välttyä tukirakenteiden käytöltä. Osassa tulisi olla tarpeeksi suuri kontaktipinta-ala tulostusalustan kanssa, jotta se ei liiku valmistuksen aikana, ilman erillisiä tukirakenteita.

Kuten aikaisemmin todettiin, Toyserkanin et al. (2021, s. 436) mukaan tukirakenteiden ja osan välinen kontaktipinta on pinnanlaadultaan muuta osaa huonompi. Jos tätä halutaan välttää, tulisi valmistusorientaatio suunnitella siten, että mittatarkat pinnat eivät tarvitse tukirakenteita. Tämä on havainnollistettu kuvan 3 esimerkissä. Tukirakenteiden aiheuttama huonompi pinnanlaatu voidaan korjata käyttämällä sopivaa. Mittatarkoilla pinnoilla tarkoitetaan tässä tapauksessa sellaisia pintoja, joiden toleranssit ovat tarkat tai pinnankarheusvaatimukset korkeat.



Kuva 3. *Tukirakenteet (Yadroitsev et al. 2021, s. 127)*

Jos tukirakenteet halutaan poistaa valmistuksen jälkeen, tulisi osat suunnitella siten, että tukirakenteisiin päästään käsiksi jälkikäsittelyvaiheessa. Toisaalta tukirakenteet voidaan myös suunnitella osaksi lopullista kappaletta. Tällöin tukirakenne vastaa käytännössä sisäistä täyttörakennetta ilman ulkoseinämää. Näiden tyypillinen käyttötarkoitus eroaa kuitenkin huomattavasti irrotettavista tukirakenteista, ja niiden vaatimukset sekä prosessiparametrit eroavat myös merkittävästi.

2.2. Täyttörakenteet ja pysyvät tukirakenteet

Kerroksittainen valmistus mahdollistaa sellaisten rakenteiden valmistamisen, jotka ovat mahdottomia perinteisillä valmistusmenetelmillä. Näihin lukeutuvat erilaiset osan sisäiset täyttörakenteet sekä pysyvät tukirakenteet. Funktionaalisuudeltaan sisäinen täyttörakenne ilman ulkoseinämää ja pysyvät tukirakenteet ovat hyvin samanlaiset. Siksi tässä tutkielmassa niitä käsitellään samana asiana, vaikka ne hieman eroavatkin toisistaan teknisiltä yksityiskohdiltaan.

Täyttörakenteiden käyttö voi parantaa esimerkiksi osan lujuus-painosuhdetta, sekä jäähdytyskykyä (Toyserkani et al. 2021, s. 421–422). Rashidin et al. (2023) mukaan sisäisellä täyttörakenteella valmistetussa testikappaleessa materiaalin käyttö oli 50 %, murtolujuus 61 % ja poikkeama murtopisteessä 85 %, verrattuna umpinaiseen kappaleeseen. Kyseisessä tutkimuksessa testikappaleita rasitettiin taivutuksessa.

Erilaisia täyttörakenteita on olemassa useita. Niiden rakenne perustuu tyypillisesti toistuviin geometrisiin yksiköihin, mutta myös epäsäännöllisiä rakenteita on olemassa (Yadroitsev et al. 2021, s. 425). Toistuvat yksiköt voivat pohjautua palkkirakenteeseen, tai pintarakenteeseen (Yadroitsev et al. 2021, s. 426–427). Myös yksiköiden tiheys on säädeltävissä ja se voi olla joko vakio tai vaihdella gradientin mukaan (Yadroitsev et al. 2021, s. 425–427). Muokkaamalla täyttörakenteiden tiheyttä ja geometriaa, voidaan osan ominaisuuksia säädellä käyttötarpeen mukaan. Erilaisia täyttörakenteita ja niiden välisiä eroja ei kuitenkaan käsitellä tässä tutkielmassa tarkemmin.

Täyttörakenteilla voidaan tutkimustiedon perusteella parantaa osan suorituskykyä suhteessa käytetyn materiaalin määrään. Tukirakenteet voidaan suunnitella siten, että ne absorboivat energiaa halutulla tavalla. Pysyvät tukirakenteet lisäävät kappaleen pintaalaa. Tietyissä käyttökohteissa tämä voi olla haluttu ominaisuus, esimerkiksi lämmönsiirtokyvyn kannalta. Pysyvien tukirakenteiden sisällyttäminen hankaloittaa osan jälkikäsittelyä. Niiden monimutkainen ja tiivis rakenne estää joidenkin jälkikäsittelymenetelmien käytön.

2.3. Topologiaoptimointi suunnittelussa

Topologian optimointi (TO) on menetelmä, jossa osan piirteitä luodaan laskennallisesti. Sitä voidaan käyttää moniin eri käyttötarkoituksiin, mutta yksi yleisimmistä on kappaleen massan minimointi. Lopputuloksena on monesti monimutkaisia rakenteita, joita on hankala valmistaa. TO-algoritmeihin voidaan käyttää valmistusmenetelmäkohtaisia rajoitteita, jotka parantavat valmistettavuutta, mutta samalla ne voivat rajoittaa optimoinnin tehokkuutta (Yadroitsev et al. 2021, s. 138–139).

LPBF-menetelmän kyky valmistaa monimutkaisia rakenteita soveltuu hyvin TO:lla luotujen geometrioiden valmistamiseen. Tästä huolimatta LPBF-valmistusmenetelmän rajoitteet on otettava huomioon suunnittelussa. LPBF-tulostimilla on äärellinen tarkkuus, joka on huomioitava rajoitteiden asettamisessa. Valmiissa osassa ei myöskään saa olla onteloita, joista sulamatonta jauhetta ei voida poistaa. Jos osalle on suunniteltu jälkikäsittelyjä, TO:lla luodun rakenteen tulee olla sellainen, että käsittely on mahdollista. Lisäksi tulisi välttää sellaisten rakenteiden suunnittelua, jotka vaativat tukirakenteita, erityisesti jos osassa on monimutkaisia geometrioita, joista tukirakenteiden poistaminen on hankalaa.

Tutkimuksissa TO:lla on onnistuttu vähentämään osan materiaalin määrää 50–86 % säilyttäen samalla vaadittu mekaaninen suorituskyky (Rashid et al. 2023; Yu et al. 2024). TO:lla voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä osan materiaalin käytössä. Vähentynyt materiaalin käyttö tarkoittaa matalampia materiaalikustannuksia, sillä 3D-printtauksessa valmistusmenetelmissä ei muodostu tukirakenteiden lisäksi hukkamateriaalia. TO:lla voi tämän takia olla myös arvokas työkalu suunnitellessa osia käyttökohteisiin, joissa osien paino on tärkeä kriteeri.

TO:n käytössä rajoitteiden ja rasitustapausten oikeellinen määrittely on myös tärkeää. Vaikka tutkimustuloksissa TO:lla suunniteltujen osien suorituskyky täyttikin vaatimukset, voi niiden kestävyys olla silti huonompi kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetuilla osilla. Tämä voi tapahtua niissä tapauksissa, joissa osaan kohdistuu odottamattomia rasituksia. Tämä voi tapahtua myös silloin, kun TO-algoritmeille asetetuissa parametreissa on virheitä. Tämä on kuitenkin verrattavissa virheisiin perinteisesti valmistettujen osien lujuuslaskennassa. Mahdollinen kestävyyden heikkeneminen TO-osissa johtuu siitä, että optimoinnissa poistetaan materiaalia sellaisilta alueilta, joihin ei oleteta kohdistuvan merkittäviä jännityksiä. Yllättävissä rasitustilanteissa tämä voi kutienkin johtaa osan hajoamiseen, siinä missä optimoimaton, ylimääräistä materiaalia sisältävä osa voisi kestää tilanteen.

3. OSIEN VÄSYMISKESTÄVYYS

LPBF-menetelmällä valmistetuissa osissa tyypillistä on huono väsymiskestävyys. Tämä johtuu pääasiassa pinnankarheudesta, jäännösjännityksistä ja materiaalin rakenteellisista virheistä (Dejene & Lemu 2023, s. 12–14). Jauhepetitulostettujen osien väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa osan geometria, materiaalivalinta, rakenteellisten virheiden määrä ja pinnankarheus. Näistä osan rakenteen virheiden, kuten onkaloiden määrä, riippuu lähinnä prosessiparametreista. Siihen ei siis suunnittelu-vaiheessa voida vaikuttamaa muuten kuin laitevalinnalla.

3.1. Geometria

Yksinkertaistetusti osan väsymiskestävyys riippuu käytetyn materiaalin mekaanisista ominaisuuksista ja siihen kohdistuvan rasituksen suuruudesta (Yadroitsev et al. 2021, s. 444–445). Osan geometrialla siis voidaan vaikuttaa ainoastaan kappaleen rakenteisiin kohdistuviin jännityksiin. Väsymisikää voidaan siis geometrian osalta parantaa 3 eri tavalla. Näitä ovat kuormaa kantavan materiaalin määrän lisääminen, rasitustilanteen muuttaminen edullisemmaksi ja jännityskeskittymien eliminoiminen.

Osan rakenteen jännitystä voidaan vähentää, lisäämällä siihen materiaalia. Tämä voi monesti olla helpoin tapa vaikuttaa väsymisikään geometrian osalta. Materiaalin lisääminen ei kuitenkaan ole aina mahdollista. Tämä voi johtua esimerkiksi painorajoitteista tai tilanpuutteesta.

Osia suunnitellessa tulisi käytetty materiaali kuormittaa mahdollisimman tehokkaasti. Osan kuormitus vedossa tai puristuksessa johtaa monesti parempaan kestävyyteen, kuin kuormitus väännössä tai kierrossa. Materiaalin ominaisuudet voivat kuitenkin vaikuttaa tähän. Jännityskeskittymiä voi muodostua esimerkiksi kappaleen sisäkulmiin, jos niissä käytetty pyöristyssäde ei ole riittävän suuri.

Pyrkiessä vähentämään kappaleen sisäisiä rasituksia, voi TO:n käyttö olla hyödyllistä. Oikein käytettynä, TO:lla voidaan tehokkaasti välttää jännityskeskittymiä osissa. Väsymiskestävyyden kannalta TO:n käytössä tärkeää on rajoitteiden oikea määrittely. Sallitut jännitykset ovat korkean syklimäärän osissa matalammat. Lisäksi materiaalin lisääminen voi olla muutenkin suositeltavaa.

3.2. Materiaalin valinta

Kuten perinteisillä valmistusmenetelmillä valmistetuissa osissa, myös jauhepetitulostetuissa osissa materiaalin valinnalla on merkittävä vaikutus osan väsymiskestävyyteen. Tällä hetkellä jauhepetitulostukselle saatavilla olevien materiaalin määrä on alhaisempi, kuin perinteisemmillä valmistusmenetelmillä. Valitsemalla materiaali, jonka mekaaniset ominaisuudet sopivat korkeasyklisiin rasitustapauksiin, voidaan osan väsymiskestävyyttä parantaa merkittävästi.

Taulukko 2. *Materiaalien väsymisrajoja (taulukko muokattu lähteestä (Fatigue Limit and Material Performance 2025))*

Materiaali	**Väsymisraja (MPa)**	**Huomioita**
Matalahiilinen teräs	140–210	Matala-hiiliset teräkset omaavat kohtuullisen väsymiskestävyyden.
Korkealujuusteräs	280–450	Suurempi murtolujuus yleensä parantaa myös väsymisrajaa.
Titaaniseokset	500–700	Erinomainen väsymiskestävyys, erityisesti korkeissa lämpötiloissa.
Alumiiniseokset	90–250	Kohtuullinen väsymiskestävyys, yleisesti käytössä ilmailuteollisuudessa.
Nikkelipohjaiset seokset (esim. Inconel)	450–650	Erittäin hyvä väsymiskestävyys, erityisesti äärilämpötiloissa.
Magnesiumseokset	90–160	Kohtuullinen väsymiskestävyys, käytetään kevytrakenteisissa komponenteissa.

Taulukko 2 on listattu LPBF-menetelmällä käytössä olevien materiaalien väsymisrajoja. Taulukon arvot ovat kuitenkin yleisiä arvoja kyseisille materiaaleille, eikä niissä ole huomioitu LPBF-menetelmän vaikutusta väsymisrajaan. On myös hyvä ottaa huomioon, että alumiinilla ei ole yksiselitteistä väsymisrajaa, eli jännitysarvoa, jolla materiaali kestäisi

nimellisesti äärettömän määrän syklejä (*Aluminum properties | Ultrasonic Resonators* 2018; Chanyathunyaroj et al. 2020).

Taulukko 3. *Väsymisrajoja LPBF-menetelmällä valmistetuille materiaaleille*

Materiaali	**Väsymisraja (MPa)**	**Pintakäsittely**
Teräs 316L	92.94 (Chepkoech et al. 2024)	Käsittelemätön
Titaani Ti6Al4V	285 (Soyama et al. 2024)	Kuulapuhallus
Titaani Ti6Al4V	217 (Soyama et al. 2024)	Käsittelemätön
Inconel 718	305 (Malej et al. 2024)	Koneistaminen
Alumiini AlSi10Mg	66 (Afroz et al. 2025)	Koneistaminen
Alumiini AlSi10Mg	55 (Afroz et al. 2025)	käsittelemätön

Taulukko 3 on esitetty väsymisrajoja eri materiaaleille LPBF-menetelmällä valmistettuna. Nämä arvot ovat tutkimustietoon pohjautuvia esimerkkiarvoja. Ne voivat siis vaihdella huomattavasti, riippuen prosessiparametreista ja jälkikäsittelystä. Tarkastelluissa tutkimuksissa väsymisrajana on käytetty 10^7 sykliä, jonka jälkeen kokeet lopetettiin (Malej et al. 2024; Afroz et al. 2025). Soyama et al. (2024) käyttivät väsymisrajana myös 10^7 sykliä, mutta tähän päädyttiin laskennallisesti, kokeista kerätyn datan perusteella. Chepkoech et al. (2024) puolestaan käyttivät väsymisrajana 10^6 sykliä. Suurimmassa osassa kokeita käytetty 10^7 sykliä kuvastaa monesti hyvin materiaalin väsymisrajaa. 10^6 puolestaan voi olla liian alhainen syklimäärä väsymisrajan mittaamiseen.

Taulukko 2 ja Taulukko 3 perusteella voidaan tehdä seuraavia johtopäätöksiä. Alumiini soveltuu huonosti väsymiskestävien rakenteiden valmistamiseen. Keveytensä takia, se on kuitenkin monesti paras valinta, kun suunniteltavalla osalla on tiukat vaatimukset massan suhteen.

Titaanilla ja Inconelilla on molemmilla erinomaiset ominaisuudet väsymiskestäviin käyttökohteisiin. Inconel on kuitenkin materiaalina huomattavan kallis, minkä vuoksi sen käyttö ei ole välttämättä perusteltua, ellei sen ominaisuuksia voida hyödyntää täysimääräisesti. Titaani puolestaan on erinomainen valinta, kun suunniteltavalta osalta vaaditaan mahdollisimman hyvää väsymiskestävyyttä. Titaani on myös kohtalaisen kevyt materiaali, joten se sopii painokriittisiin käyttökohteisiin.

Teräksen väsymiskestävyys on kohtalaisen hyvä, jonka lisäksi se on hinnaltaan kohtalaisen edullista. Se siis soveltuu moniin väsymiskestävyyttä vaativiin käyttökohteisiin, silloin kun kalliimman materiaalin käyttö ei ole perusteltua.

3.3. Jälkikäsittely

LPBF-menetelmällä valmistettujen osien väsymiskestävyyttä voidaan parantaa merkittävästi, sopivilla jälkikäsittelymenetelmillä. Jälkikäsittelyllä voidaan vaikuttaa osan pinnanlaatuun, anisotrooppisuuteen, jäännösjännityksiin ja onkaloiden määrään (Yadroitsev et al. 2021, s. 327). Lisäksi osalla jälkikäsittelymenetelmistä voidaan parantaa osan mittatarkkuutta. Tällä ei kuitenkaan ole suoraa vaikutusta osien väsymiskestävyyteen. Käsittelemättömillä LPBF-osilla pinnanlaatu on noin Sa 7,4–15,4 µm (Kaid et al. 2023; Mancisidor et al. 2023).

3.3.1 Mekaaniset jälkikäsittelymenetelmät

Mekaaniset jälkikäsittelymenetelmät perustuvat materiaalin poistamiseen tai muokkaamiseen fysikaalisen työkalun avulla. Näitä ovat muun muassa koneistus, hionta ja kiillotus (Yadroitsev et al. 2021, s. 330–331). Myös pintaa muokkaavat ja korkeanopeuksisiin törmäyksiin perustuvat puhallusmenetelmät voidaan lukea mekaanisiksi käsittelymenetelmiksi. Ne kuitenkin käsitellään omassa luvussaan.

Ti6Al4V-seoksesta valmistettujen kappaleiden pinnankarheus voidaan koneistamalla saada alle Ra 1 µm:n (Mancisidor et al. 2023). 316L-teräkselle on Kaidin et al. (2023) mukaan saavutettu pinnankarheudeksi Sa-arvolta 0,133 µm. AlSi10Mg-seokselle on koneistamalla ja tämän jälkeen hiomalla saavutettu pinnankarheudeksi Sa-arvolta 0,5 µm (Hamidi Nasab et al. 2019). Hamidi Nasabin et al. (2019) mukaan myös väsymisraja kasvoi myös merkittävästi, kun kappale oli käsitelty koneistamalla ja hiomalla.

Pinnan koneistaminen voi kuitenkin jättää osaan haitallisia jäännösjännityksiä (Yadroitsev et al. 2021, s. 337). Myös korkeiden mittatarkkuuksien saavuttaminen monimutkaisilla pinnoilla voi olla haasteellista (Yadroitsev et al. 2021, s. 337). Yleisesti ottaen koneistamalla voidaan kuitenkin saavuttaa hyviä mitta- ja geometriatoleransseja.

Mekaanisilla jälkikäsittelymenetelmillä, kuten koneistamisella ja hiomisella, voidaan saavuttaa erinomaisia pinnankarheuksia LPBF-menetelmällä valmistetuille osille. Niiden on myös huomattu parantavan LPBF-osien väsymiskestävyyttä huomattavasti. Näiden menetelmien käyttö vaatii kuitenkin hyvän pääsyn työstettävälle pinnalle, joka ei geometriasta riippuen ole aina mahdollista. Tämä voi muodostua ongelmaksi etenkin erittäin monimutkaisten osien tapauksessa, kuten TO-osien tapauksessa.

3.3.2 Kuula- ja hiekkapuhallus

LPBF-osien jälkikäsittelyyn voidaan käyttää kuulapuhallusta (eng. shot peening) ja hiekkapuhallusta. Nämä menetelmät perustuvat korkean nopeuden törmäyksiin osan pinnan ja käsittelyyn käytettävän materiaalin välillä.

Kuulapuhallus (eng. shot peening) on jälkikäsittelymenetelmä, jossa käsiteltävää osaa ammutaan tyypillisesti teräksestä tai lasista valmistetuilla kuulilla (Billore & Nayak 2001). Kuulapuhallus perustuu ohuen pintakerroksen muokkauslujittumiseen, joka tämän alueen murtolujuutta ja kovuutta (Billore & Nayak 2001; Herring 2006). Kuulapuhallus soveltuu hyvin monien LPBF-menetelmissä käytettävien materiaalien, kuten terästen ja alumiinien, pintakäsittelyyn (Herring 2006).

Kuulapuhalluksella voidaan parantaa metalliosien väsymiskestävyyttä (Sakamoto et al. 2014; Závodská et al. 2016). 3D-printtatuissa metallisosissa kuulapuhalluksen on havaittu parantavan väsymiskestävyyttä useilla materiaaleilla. Soyaman et al. (2024) mukaan Ti6Al4V-titaanista jauhepetitulostettujen osien väsymiskestävyys parani kuulapuhalluksen johdosta. Kuulapuhallus vaikuttaa myös osien pinnankarheuteen, mutta sillä ei päästä yhtä hyviin pinnankarheuksiin, kuin esimerkiksi hiekkapuhalluksella (Yadroitsev et al. 2021, s. 332–333).

Kuulapuhalluksen vaikutuksesta LPBF-menetelmällä tuotettujen osien väsymiskestävyyteen löytyy näyttöä. Vaikka se ei tuota parhaita pinnankarheuksia, se parantaa väsymiskestävyyttä tehokkaasti muihin jälkikäsittelymenetelmiin verrattuna. Tämä johtuu sen vaikutuksesta pinnan alaiseen kerrokseen, pinnankarheuden lisäksi.

Hiekkapuhalluksella on tutkimuksissa päästy Ti6Al4V-seoksesta valmistetuilla kappaleilla pinnan laatuun, joka on Ra-arvolta 1,94 µm (Mancisidor et al. 2023). AlSi10Mg-seoksesta valmistetuille osille saatu pinnanlaatu puolestaan oli toisessa tutkimuksessa Sa-arvolta 8,3 µm (Hamidi Nasab et al. 2019).

Hiekkapuhalluksella voidaan saavuttaa LPBF-menetelmällä valmistetuille osille kohtalaisen hyvä pinnanlaatu, materiaalista riippuen. Kyseisen menetelmän pitäisi siis parantaa LPBF-osien väsymiskestävyyttä, parantuneen pinnanlaadun seurauksena.

Sekä Kuulapuhallus että hiekkapuhallus vaativat kohtalaisen hyvän pääsyn käsiteltäville pinnoille. Tämä johtuu siitä, että menetelmät vaativat suoran näkölinjan käsiteltävälle pinnalle. Ne ovat kuitenkin jonkin verran anteeksiantavampi, kuin esimerkiksi hionta. Syy tähän on, että puhallusmenetelmissä käytettävät partikkelit ovat kooltaan pienempiä sekä mukautuvampia verrattuna hionnassa käytettäviin työkaluihin.

3.3.3 Kemialliset jälkikäsittelymenetelmät

Kemialliset pintakäsittelymenetelmät perustuvat materiaalin poistamiseen osan pinnalta, kemiallisten reaktioiden avulla. Käsittelyssä osa upotetaan kokonaan kemikaaliin, ja reaktion voimakkuutta säädellään altistuksen keston, lämpötilan ja käytetyn kemikaalin avulla. (Toyserkani et al. 2021, s. 333–335)

Tutkimuksissa kemiallisilla jälkikäsittelymenetelmillä on saavutettu merkittäviä parannuksia kappaleiden väsymiskestävyydessä (Jurg et al. 2022; Maleki et al. 2022). Pinnankarheuksien osalta Ti6Al4V-seoksesta valmistetuille kappaleille saavutettiin pinnankarheudeksi Ra-arvolta 6,4 µm (Jurg et al. 2022). AlSi10Mg-seoksesta valmistetuille osille puolestaan pinnankarheudeksi on saatu Ra-arvolta 3,19 µm (Maleki et al. 2022).

Kemiallisen jälkikäsittelyn etuna on, että sillä päästään käsiksi kaikkiin käsiteltävän osan geometrioihin. Se siis soveltuu hyvin monimutkaistenkin osien käsittelyyn. Kemiallisten pintakäsittelyiden huonona puolena on, että kaikki pinnat käsitellään yhtäaikaisesti. Tämä voi aiheuttaa ongelmia, esimerkiksi erittäin ohuiden geometrioiden käsittelyssä.

3.3.4 Lämpökäsittely

Lämpökäsittely vaikuttaa osien kiderakenteeseen ja vapauttaa jäännösjännityksiä (Yadroitsev et al. 2021, s. 340–341). Jotkin lämpökäsittelyt, kuten HIP (hot isostatic pressure), voivat myös vähentää kappaleen sisältämien onkaloiden määrää (Yadroitsev et al. 2021, s. 342).

Raution et al. (2022) mukaan 316L-teräksen väsymiskestävyys paranee laserlämpökäsittelyn (LHT) johdosta. LHT myös paransi pinnankarheuden Ra-arvoa 8,7 µm:stä 4,86 µm:n. Myös kappaleen murtolujuus parani hieman. Tutkimuksessa käytetyt osat olivat valmistettu LPBF-menetelmällä. (Rautio et al. 2022)

AlSi10Mg-seoksesta valmistetun kampiakselin väsymiskestävyys parani lämpökäsittelyllä huomattavasti. Käsittelyllä saavutettu ero väsymiskestävyydessä oli noin 33 % (António et al. 2024). Fernandesin et al. (2024) mukaan AlSi10Mg-seoksesta valmistettujen osien väsymiskestävyys parani lämpökäsittelyn takia. Osien väsymiskestävyys parani tutkimuksessa 11 %, mutta eron epäiltiin olevan 15 % vielä suuremmilla syklimäärillä (Fernandes et al. 2024). Molemmissa tutkimuksissa lämpökäsittely tehtiin 250 °C:ssa, jolla saatiin poistettua jäännösjännitykset osasta (António et al. 2024; Fernandes et al. 2024).

Mishurovan et al. (2021) mukaan Ti-6Al-4V-seoksesta valmistetuilla osilla lämpökäsittely parantaa väsymiskestävyyttä huomattavasti. Datan perusteella perinteisillä lämpökäsittelyillä väsymisraja parani 66–71 %, verrattuna käsittelemättömään kappaleeseen. HIP-käsittelyllä väsymisikä parani 200 %, mikä vastasi perinteisillä valmistusmenetelmillä

valmistettua kappaletta. HIP-käsittely myös eliminoi onkalot osan rakenteesta lähes kokonaan. Tutkimuksessa käytetyt käsittelylämpötilat vaihtelivat 530 °C ja 900 °C välillä. (Mishurova et al. 2021)

Valitsemalla sopivan lämpökäsittelymenetelmän voidaan siis LPBF-menetelmällä valmistettujen osien väsymiskestävyyttä parantaa merkittävästi. Sekä matalissa että korkeissa lämpötiloissa suoritetut lämpökäsittelyt tuottivat hyviä tuloksia. Parhaat tulokset saavutettiin HIP-käsittelyllä. Tämä vaikuttaisi johtuvan siitä, että kyseinen käsittely vaikuttaa LPBF-menetelmän tuottamiin onkaloihin. Tarkemmat lämpökäsittelyn parametrit riippuvat materiaalista ja halutuista ominaisuuksista.

3.3.5 Jälkikäsittelymenetelmän valinta

Kullakin jälkikäsittelymenetelmällä voidaan vaikuttaa yhteen tai useampaan väsymiskestävyyden osa-alueeseen. Juuri mikään jälkikäsittelymenetelmä ei yksinään kykene parantamaan jokaista väsymiskestävyyteen vaikuttavaa tekijää. Tämän takia parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi tulisi osan jälkikäsittelyssä käyttää useampaa eri jälkikäsittelymenetelmää.

Taulukko 4. *Pintakäsittelymenetelmillä saavutettavia pinnankarheuksia*

Jälkikäsittelymenetelmä	**Saavutettava pinnankarheus**
Käsittelemätön (vertailuarvo)	Sa 7,4–15,4 µm (Kaid et al. 2023; Mancisidor et al. 2023)
Koneistaminen + Hiominen	Sa 0,133 µm (Kaid et al. 2023)
Koneistaminen	Sa < 1 µm (Mancisidor et al. 2023)
Hiekkapuhallus	Ra 1,94 µm (Mancisidor et al. 2023)
Kemiallinen käsittely	Ra 6,4 µm (Jurg et al. 2022)

Lämpökäsittely on läpikäydyistä jälkikäsittelymenetelmistä ainoa, jolla kyetään vaikuttamaan käsiteltävän osan kiderakenteeseen koko sen tilavuuden alueella (Totten 2006, s. 278). Paras pinnankarheus saavutettiin koneistuksella ja hionnalla. Myös hiekkapuhalluksen, sekä kemiallisten käsittelyiden saavutetut pinnankarheudet olivat kohtalaisen hyvät. Kuulapuhalluksen vaikutuksesta väsymiskestävyyteen oli myös hyvää näyttöä. Vaikka se vaikuttaakin pinnankarheuteen, saadaan sen päähyöty vaikutuksesta pinnan alaiseen kerrokseen. Eri pintakäsittelymenetelmillä saavutettavat parhaat pinnankarheuden on koottu Taulukko 4.

Osa käsitellystä tutkimustieto siis viittaisi siihen, että paras tulos saavutetaan yhdistämällä lämpökäsittely sekä koneistaminen ja hiominen. Osa tutkimustiedosta taas viittaa siihen, että paras tulos saavutetaan yhdistämällä lämpökäsittely ja kuulapuhallus. Osan geometriasta riippuen koneistaminen ja hiominen eivät välttämättä ole mahdollisia. Tällöin tulisi lämpökäsittely yhdistää joko hiekkapuhallukseen, kuulapuhallukseen tai kemialliseen käsittelyyn. Kaikkein rajoittavimpien geometrioiden tapauksessa tulisi käyttää kemiallista käsittelyä.

Pintakäsittelymenetelmistä kannattaa valita hiominen ja koneistaminen myös silloin, kun osassa on pintoja, joilla on todella tarkat toleranssit. Toisaalta taas, jos kyseiset pinnat ovat monimutkaisia, voi olla edullista valita pintakäsittelyyn jokin toinen jälkikäsittelymenetelmä. Jälkikäsittelymenetelmän vaikutukset osan geometriaan on myös hyvä ottaa huomioon. Pintakäsittelymenetelmät poistavat tyypillisesti materiaalia osan pinnalta. Osaan on siis syytä suunnitella sopiva määrä työstövaraa, jotta viimeistellyn osan mitat ovat halutut.

4. YHTEENVETO

Tämä tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena. Siinä käsiteltiin LPBF-menetelmällä valmistettujen osien väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä. Tavoitteena oli koota suunnittelun kannalta keskeisiä tekijöitä ja käydä läpi niiden vaikutuksia. Väsymiskestävyyteen vaikuttavien asioiden lisäksi työssä käytiin läpi yleisiä LPBF-menetelmälle suunnitteluun vaikuttavia tekijöitä ja rajoitteita.

Osien valmistusorientaatio olisi hyvä ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. LPBF-menetelmän kerroksellisuus vaikuttaa kykyyn valmistaa tarkkoja geometrisia muotoja XZ- ja YZ-tasolla. Lisäksi tietyt geometriset muodot vaativat tukirakenteiden käyttöä, parhaan lopputuloksen saavuttamiseksi. LPBF-menetelmällä valmistettujen osien mekaaniset ominaisuudet ovat yleisesti ottaen anisotrooppisia. Suurimmalle osalle käsitellyistä materiaaleista vahvin orientaatio on, kun rasitukset ovat XY-tason suuntaisia. Alumiini kuitenkin poikkesi tästä, sillä siitä valmistetut osat olivat vahvimpia Y-akselin suuntaisilla rasituksilla.

LPBF-menetelmällä valmistettujen osien väsymiskestävyyteen voidaan vaikuttaa materiaalivalinnalla sekä parantamalla jännitysjakaumaa ja pinnankarheutta. Yleisesti käytössä olevista materiaaleista titaanilla ja Inconelilla on erinomaiset väsymisominaisuudet, sillä niiden väsymisrajat olivat tutkimustiedon valossa 322 MPa ja 305 MPa. Myös teräs kestää väsymistä hyvin, mutta sen väsymisraja on LPBF-menetelmällä valmistettuna huomattavasti matalampi, noin 93 MPa. Alumiinilla puolestaan ei ole yksiselitteisesti väsymisrajaa, mutta sen väsymisrajaksi on joissakin lähteissä ilmoitettu alle 80 MPa.

Valmiissa osassa materiaalin ominaisuuksia voidaan parantaa sopivalla jälkikäsittelymenetelmällä. Erilaiset lämpökäsittelyt, sekä kuulapuhallus voivat parantaa materiaalin kykyä kestää ulkoisia rasituksia. Kuulapuhallus kuitenkin vaikuttaa vain ohueen kerrokseen pinnan alla, kun taas lämpökäsittelyllä voidaan käsitellä osan koko tilavuus.

Jälkikäsittelyllä voidaan myös vaikuttaa osan pinnanlaatuun. Paras pinnanlaatu saavutetaan koneistamalla ja hiomalla osien pinta. Tämä vaatii kuitenkin hyvän pääsyn käsiteltäville pinnoille, joka ei välttämättä onnistu monimutkaisemmissa rakenteissa. Hiekkapuhalluksella saavutettiin myös hyvä pinnanlaatu, mutta sitä koskevat osittain samat rajoitteet, kuin koneistamista. Kemiallisella jälkikäsittelyllä saavutettiin hieman hiekkapuhallusta huonompi pinnanlaatu. Läpikäydyistä pintakäsittelymenetelmistä kemiallisella

käsittelyllä saavutettiin huonoin, mutta silti kohtalaisen hyvä pinnanlaatu. Kemiallisen käsittelyn etuna on, että sillä päästän käsiksi käytännössä kaikkiin osan pintoihin.

Jännitysjakaumaa voidaan parantaa lähinnä suunnittelemalla ja laskemalla osat huolellisesti, välttäen jännityskeskittymiä. Topologian optimointi voi olla tässä arvokas työkalu, sillä sen avulla voidaan suunnitella tehokkaita osia jännitysjakauman ja materiaalikäytön puolesta.

Tässä kandidaatintyössä esitellystä tutkimustiedosta huomataan, että LPBF-osien väsymiskestävyyteen vaikuttavat tekijät ovat monimutkainen kokonaisuus. Yleisiä hyviä toimintatapoja voidaan luoda, mutta näillä ei välttämättä saavuteta täysin optimaalista tulosta.

LÄHTEET

Afroz, L., Qian, M., Forsmark, J., Li, Y., Easton, M. & Das, R. (2025). Fatigue life of laser powder bed fusion (L-PBF) AlSi10Mg alloy: effects of surface roughness and porosity. *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10(4), pp. 2423–2441. https://doi.org/10.1007/s40964-024-00759-x.

Alay, T.K., Cagirici, M., Yagmur, A. & Gur, C.H. (2025). Determination of the anisotropy in mechanical properties of laser powder bed fusion Inconel 718 by ultrasonic testing. *Nondestructive Testing and Evaluation*, vol. 40(1), pp. 206–224. https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2316255.

Aluminum properties | Ultrasonic Resonators. (2018). Saatavissa (viitattu 7.4.2025): https://www.ultrasonic-resonators.org/materials/aluminum/aluminum_properties.html.

António, M., Fernandes, R., de Jesus, J., Borrego, L., Branco, R., da Costa, J., et al. (2024). Influence of Low-Temperature Stress-Relieving Treatment in the Fatigue Life of Components Produced by Laser Powder Bed Fusion in AlSi10Mg. *Applied Sciences*, vol. 15(1). https://doi.org/doi.org/10.3390/app15010112.

Billore, M. & Nayak, B.R. (2001). Steel shots or glass beads: Making ‘the right chioce’ for automotive parts. International Conference on Shot Peening and Blast Cleaning.

Chanyathunyaroj, K., Phetchcrai, S., Laungsopapun, G. & Rengsomboon, A. (2020). Fatigue characteristics of 6061 aluminum alloy subject to 3.5% NaCl environment. *International Journal of Fatigue*, vol. 133, p. 105420. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.105420.

Chepkoech, M., Omoniyi, P. & Owolabi, G. (2024). Fatigue Response of Additive-Manufactured 316L Stainless Steel. *Metals*, vol. 14(9). Saatavissa (viitattu 7.4.2025): https://www.mdpi.com/2075-4701/14/9/988.

Dejene, N.D. & Lemu, H.G. (2023). Current Status and Challenges of Powder Bed Fusion-Based Metal Additive Manufacturing: Literature Review. *Metals*, vol. 13(2), p. 424. https://doi.org/10.3390/met13020424.

Elton, E.S., Wu, Z., Troksa, M. & Guss, G. (2023). Electrostatic powder spreading for metal powder bed fusion applications. *Additive Manufacturing*, vol. 61, p. 103330. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103330.

Fatigue Limit and Material Performance. (2025). Saatavissa (viitattu 7.4.2025): https://www.samaterials.com/content/fatigue-limit-and-material-performance.html.

Fernandes, R.F., Jesus, J.S., Borrego, L.P., Ferreira, J.A.M. & Costa, J.D. (2024). Notch effect on the fatigue behaviour of AlSi10Mg aluminium alloy obtained by additive manufacturing. *Procedia Structural Integrity*, vol. 54, pp. 300–306. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.01.087.

Hamidi Nasab, M., Giussani, A., Gastaldi, D., Tirelli, V. & Vedani, M. (2019). Effect of Surface and Subsurface Defects on Fatigue Behavior of AlSi10Mg Alloy Processed by Laser Powder Bed Fusion (L-PBF). *Metals*, vol. 9(10), p. 1063. https://doi.org/10.3390/met9101063.

Herring, D.H. (2006). A Tutorial on Shot Blasting and Shot/Laser Peening. *Industrial Heating*, vol. 73(8), p. 20,22. Saatavissa (viitattu 5.4.2025): https://www.proquest.com/docview/217291050/abstract/A2F28BA511714096PQ/1.

Jinlong, L., Zhiping, Z., Zhuqing, W. & Xiong, Y. (2023). The effect of build orientation on tensile properties and corrosion resistance of 316L stainless steel fabricated by laser powder bed fusion. *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 106, pp. 363–369. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.010.

Jurg, M., Medvedev, A.E., Yan, W. & Molotnikov, A. (2022). Surface improvement of laser powder bed fusion processed Ti6Al4V for fatigue applications. *Additive Manufacturing Letters*, vol. 3, p. 100070. https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100070.

Kaid, H., Dabwan, A., Alqahtani, K.N., Abualsauod, E.H., Anwar, S., Al-Samhan, A.M., et al. (2023). Optimization of the Effect of Laser Power Bed Fusion 3D Printing during the Milling Process Using Hybrid Artificial Neural Networks with Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms. *Processes*, vol. 11(10), p. 2892. https://doi.org/10.3390/pr11102892.

Lehmhus, D., Rahn, T., Struss, A., Gromzig, P., Wischeropp, T. & Becker, H. (2022). High-Temperature Mechanical Properties of Stress-Relieved AlSi10Mg Produced via Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Materials*, vol. 15(20), p. 7386. https://doi.org/10.3390/ma15207386.

Malej, S., Larsson, J., Gumpinger, J., Brandão, A., Beevers, E., Ghidini, T., et al. (2024). A Study of Microstructural Tensile and Fatigue Properties Coupled with Digital Image Correlation of Hybrid Manufactured Inconel 718 Parts by Extrusion and Powder Bed Fusion. *Advanced Engineering Materials*, vol. 26(13). https://doi.org/10.1002/adem.202400098.

Maleki, E., Bagherifard, S., Unal, O., Sabouri, F., Bandini, M. & Guagliano, M. (2022). Effects of different mechanical and chemical surface post-treatments on mechanical and surface properties of as-built laser powder bed fusion AlSi10Mg. *Surface and Coatings Technology*, vol. 439, p. 128391. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128391.

Mancisidor, A.M., García-Blanco, M.B., Quintana, I., Arrazola, P.J., Espinosa, E., Cuesta, M., et al. (2023). Effect of Post-Processing Treatment on Fatigue Performance of Ti6Al4V Alloy Manufactured by Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7(4), p. 119. https://doi.org/10.3390/jmmp7040119.

Mishurova, T., Artzt, K., Rehmer, B., Haubrich, J., Ávila, L., Schoenstein, F., et al. (2021). Separation of the impact of residual stress and microstructure on the fatigue performance of LPBF Ti-6Al-4V at elevated temperature. *International Journal of Fatigue*, vol. 148, p. 106239. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106239.

Ramachandiran, N., Asgari, H., Dibia, F., Eybel, R., Keshavarzkermani, A., Gerlich, A., et al. (2023). Anisotropic tensile behavior of laser powder-bed fusion made Ti5553 parts. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 865, p. 144633. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144633.

Rashid, R., Masood, S., Ruan, D., Palanisamy, S., Huang, X. & Rahman Rashid, R.A. (2023). Design Optimization and Finite Element Model Validation of LPBF-Printed Lattice-Structured Beams. *Metals*, vol. 13(2), p. 184. https://doi.org/10.3390/met13020184.

Rautio, T., Hietala, M., Hirvimäki, M., Mäkikangas, J., Kumpula, J. & Järvenpää, A. (2022). Fatigue Life and Surface Quality of Laser Powder Bed Fusion Manufactured 316L Parts by Laser Heat Treatment. pp. 187–191. https://doi.org/10.1109/IC-BIR54589.2022.9786466.

Sakamoto, J., Lee, Y.-S. & Cheong, S.-K. (2014). Effect of shot peening coverage on fatigue limit in round bar of annealed medium carbon steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 28(9), pp. 3555–3560. https://doi.org/10.1007/s12206-014-0816-9.

Salemi, S. & Javidrad, H.R. (2021). Investigation on the Tensile and Compressional Behavior of Inconel 625 Fabricated through Laser Powder Bed Fusion. *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30(5), pp. 3761–3770. https://doi.org/10.1007/s11665-021-05672-w.

Shuvho, M.B.A., Juri, A.Z., Basak, A.K., Kotousov, A. & Yin, L. (2025). Micromechanical characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) made by laser powder bed fusion using an *in-situ* SEM micropillar compression technique. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 161, p. 106794. https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2024.106794.

Soyama, H., Wong, K.L., Eakins, D. & Korsunsky, A.M. (2024). The effects of submerged laser peening, cavitation peening, and shot peening on the improvement of the torsional fatigue strength of powder bed fused Ti6Al4V produced through laser sintering. *International Journal of Fatigue*, vol. 185, p. 108348. https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2024.108348.

Tian, Y., Palad, R. & Aranas, C. (2020). Microstructural evolution and mechanical properties of a newly designed steel fabricated by laser powder bed fusion. *Additive Manufacturing*, vol. 36, p. 101495. https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101495.

Totten, G.E. (2006). *Steel Heat Treatment*. 1st ed. Saatavissa (viitattu 28.4.2025): https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/NOF0849384523/steel-heat-treatment-george-totten.

Toyserkani, E., Sarker, D., Ibhadode, O.O., Liravi, F., Russo, P. & Taherkhani, K. (2021). *Metal additive manufacturing*. Wiley-Blackwell. Saatavissa (viitattu 14.4.2025): https://www.vlebooks.com/Product/Index/2564280?page=0&startBookmarkId=-1.

Wang, L., Zhou, Z., Li, E., Shen, H. & Yu, A. (2022). Powder deposition mechanism during powder spreading with different spreader geometries in powder bed fusion additive manufacturing. *Powder Technology*, vol. 395, pp. 802–810. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.10.017.

Wu, W., He, G., Huang, J., Zhang, A., Liu, X., Ouyang, Z., et al. (2023). Influence of electrochemically charged hydrogen on mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy additively manufactured by laser powder-bed fusion (L-PBF) process. *Materials Science and Engineering: A*, vol. 866, p. 144339. https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144339.

Yadroitsev, I., Yadroitsava, I., Du Plessis, A. & MacDonald, E. (2021). *Knovel - Fundamentals of Laser Powder Bed Fusion of Metals*. Saatavissa (viitattu 15.4.2025): https://app-knovel-com.libproxy.tuni.fi/kn/resources/kpFLPBFM01/toc.

Yang, P., He, D., Guo, X., Lu, S., Chen, S., Shang, F., et al. (2024). Effect of Printing Orientation on the Mechanical Properties of 3D-Printed Cu–10Sn Alloys by Laser Powder Bed Fusion Technology. *Metals*, vol. 14(6). https://doi.org/10.3390/met14060660.

Yousif, M.A.S., Al-Deheish, I.A., Ali, U., Akhtar, S.S. & Al-Athel, K.S. (2024). Mechanical, tribological, and corrosion behavior of laser powder-bed fusion 316L stainless steel parts: Effect of build orientation. *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 33, pp. 1220–1233. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.09.105.

Yu, G., Ling-qin, X., Hua, C. & Lu, P. (2024). Innovative design and process simulation of aviation bracket based on topology optimization and additive manufacturing. *Materials Research Express*, vol. 11(11), p. 116505. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad8ca1.

Závodská, D., Guagliano, M., Bokůvka, O. & Trško, L. (2016). Fatigue Resistance of Low Alloy Steel after Shot Peening. *Materials Today: Proceedings*, vol. 3(4), pp. 1220–1225. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.03.002.