LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

LOVEN VAIKUTUS VÄSYMISKESTÄVYYTEEN AINETTA LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUKSELLA VALMISTETUILLE KAPPALEILLE

EFFECT OF NOTCH IN FATIGUE LIFE FOR PARTS PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING

Lappeenrannassa 7.5.2021

Juuso Mäkilä
Tarkastaja DI Kalle Lipiäinen
Ohjaaja DI Kalle Lipiäinen

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Juuso Mäkilä

Loven vaikutus väsymiskestävyyteen ainetta lisäävällä valmistuksella valmistetuille kappaleille

Kandidaatintyö

2021

28 sivua, 13 kuvaa, 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastaja: DI Kalle Lipiäinen

Ohjaaja: DI Kalle Lipiäinen

Hakusanat: ainetta lisäävä valmistus, väsyminen, lovivaikutus

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin loven vaikutusta ainetta lisäävällä valmistuksella valmistettujen kappaleiden väsymiskestävyyteen. Työssä on tehty laaja kirjallisuuskatsaus aiheesta ja tuotu esille erilaisia mallinnustapoja kyseiselle ilmiölle. Lisäksi työssä on profilometrillä otettu kuva koesauvan pinnasta ja verrattu tämän pinnanlaatudataa kirjallisuudesta löytyneisiin tutkimuksiin. Väsymystestejä työhön ei ole tehty.

Kirjallisuuskatsauksessa tärkeäksi tekijäksi väsymiskestävyyden suhteen ilmeni kappaleen pinnanlaatu. Pinnanlaadun ollessa huono havaittiin selvä heikkeneminen kappaleen väsymiskestävyydessä. Profilometrillä saatua pinnanlaatudataa verrattiin aikaisempiin tutkimuksiin ja havaittiin koesauvan pinnanlaadun olevan parempi. Väsymiskestävyyttä hypoteettisesti oletettiin paremmaksi koesauvalle perustuen havaintoihin kirjallisuuskatsauksesta, kun väsymystestidataa koesauvalle ei ollut.

ABSTRACT

LUT-university
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Juuso Mäkilä

Effect of notch in fatigue life for parts produced by additive manufacturing

Bachelor's thesis

2021

28 pages, 13 figures, 1 table and 2 appendices

Examiner: DI Kalle Lipiäinen

Supervisor: DI Kalle Lipiäinen

Keywords: additive manufacturing, fatigue, notch effect

The effect of notch in fatigue life for parts produced by additive manufacturing was inspected in this bachelor's thesis. A large literature review was made and different ways to depict this phenomenon were brought up. A picture was taken of the surface of a test rod by a profilometer and the surface roughness data of the test rod was compared to other test data found from the literature. Fatigue tests for this thesis hasn't been made.

From the literature review surface roughness was found to be an important factor when considering the fatigue life of additively manufactured parts. A bad surface roughness correlated to a short fatigue life. The surface roughness data obtained by the profilometer was compared to other test data from the literature and was found to be better. The fatigue life was hypothetically assumed to be better for the test rod based on the findings from the literature review since there was no fatigue data for the test rod.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO

1 JOHDANTO 6

2 TEORIA JA TAUSTA 7

3 AIEMPIEN TUTKIMUSTEN TARKASTELUA 10

4 KOKEELLISUUS 21

5 JOHTOPÄÄTÖKSET 24

LÄHDELUETTELO 25

LIITTEET

LIITE I: Koesauvan pinnanlaatudata

LIITE II: Pinnanlaatusuureet Excel-datasta

SYMBOLILUETTELO

K_t	Jännityskeskittymäkerroin
$\bar{K}_t$	Tehollinen elastinen jännityskeskittymäkerroin
$\bar{K}_f$	Tehollinen väsyttävä jännityskeskittymäkerroin
N_f	Kuormittavien kertojen määrä
R	Jännityssuhde
R_a	Profiloidun viivan aritmeettinen keskikorkeus [µm]
R_t	Profiloidun viivan maksimi huippu-laakso korkeus [µm]
R_{z10}	Profiloidun viivan 10-pisteen korkeus karheus [µm]
t	Loven leveys, syvyys [mm]
y_{max}	Profiilin korkein huippu [µm]
y_{min}	Profiilin syvin laakso [µm]
σ_{max}	Maksimijännitys, maksimilovijännitys [MPa]
σ_{min}	Minimijännitys [MPa]
σ_n	Nimellinen jännitys [MPa]
$\bar{\rho}_{10}$	10-pisteen laakson säde [µm]
ρ	Loven säde [mm]
ρ_j	Syvimmän laakson säde [µm]
χ	Jännitysgradientti

1. JOHDANTO

Metallikappaleiden väsyminen rajoittaa niiden käyttöikää huomattavasti. Väsyminen onkin erittäin tärkeä mitoittava elementti kappaleita suunniteltaessa. Ainetta lisäävän valmistuksen, englanniksi additive manufacturing (AM), lisääntyessä ja kehittyessä entistä enemmän on tärkeää suunnata tutkimusta kohti AM -teknologian avulla valmistettujen kappaleiden ominaisuuksiin. Erityisesti kappaleiden väsymistä on tärkeää tutkia, sillä suurin osa valmistetuista osista menee käyttötarkoitukseen, jossa ne altistuvat väsyttävälle kuormitukselle.

AM -kappaleiden väsymiskestävyyteen vaikuttaa erilaiset tekijät, kuten ydintymisen ennustaminen, pinnanlaatu ja alkuvirheet, väsyttävän kuormituksen vaihtelu sekä lukuisten prosessiparametrien vaikutus lopputulokseen (Molaei, Fatemi 2018, s. 7). Tässä tutkielmassa keskitytään erityisesti loven vaikutuksiin AM -kappaleiden väsymiskestävyydessä. Edellä mainittu toimii tämän tutkimuksen tutkimusongelmana. Tutkimusongelmasta on johdettu päätutkimuskysymys, miten ja miksi lovi vaikuttaa ainetta lisäävällä valmistuksella valmistetun kappaleen väsymiskestävyyteen. Tämän avulla on tarkoitus saada vastauksia tutkimusongelmaan ja löytää mahdollisia parannuksia nykyisiin analyyseihin.

Ainetta lisäävän valmistuksen avulla on mahdollista valmistaa monimutkaisia kappaleita suoraan yhdellä prosessilla, mitä ei tavanoimaisilla materiaalia poistavilla menetelmillä pystyttäisi tuottamaan. AM -prosessi lujittaa raaka-aine materiaalin, kuten jauheen, nauhan tai levyn, ensin sulattamalla sen ja tämän jälkeen jähmettyen kiinteäksi kappaleeksi (DebRoy, Wei et al. 2018, s. 115).

2. TEORIA JA TAUSTA

Ennen kuin aloitetaan tutkimaan tarkemmin loven vaikutusta, on tärkeää ymmärtää, miten väsymisilmiö käyttäytyy, ja miten sitä mallinnetaan. Bathias ja Pineau (2010, s. 6) määrittelevät kirjassaan väsymisen toistuvan kuorman aiheuttamiin muutoksiin materiaalissa, jotka voivat johtaa murtumiseen. Tärkeitä käsitteitä liittyen väsyttävään kuormaan ovat maksimijännitys σ_{max} ja minimijännitys σ_{min}. Minimi- ja maksimijännityksen suhde on *R*, jota kutsutaan jännityssuhteeksi. Tämä esiintyy varsin usein tutkimuksissa, joissa tarkastellaan väsyttävän kuorman vaikutuksia. Jännityssuhde kertoo, minkälaiselle toistuvalle kuormitukselle kappale altistuu, esimerkiksi R = -1 tarkoittaa, että kappaleeseen vaikuttaa vakioamplitudinen kuorma, joka on vedolla ja puristuksella yhtä kaukana nollasta.

Väsymisilmiötä on vaikea havaita, sillä se harvoin aiheuttaa globaalia plastisoitumista kappaleeseen, vaan on sen sijaan hyvin paikallista. Plastisoituminen aiheutuu alueille, joissa kappaleessa on valmiiksi lovi tai siihen on ydintynyt mikrosärö. Kappaleiden väsymisikää kuvaa teoriassa vain kuormitusten määrä eikä niiden tiheys. Tällöin väsymisiän määrittää kuormitusten määrä murtumiseen, jota peilataan S-N -käyrässä jännitysamplitudiin. S-N -käyrä tai Wöhler -käyrä kuvaa vaikuttavan jännitysamplitudin sekä kuormitusten määrien yhteyttä graafisesti. Kuvaajassa molemmat akselit ovat logaritmisesti sovitettuja, jolloin siitä saadaan suora. (Bathias, Pineau 2010, s. 8.)

Puhuttaessa lovien vaikutuksista on tärkeää ymmärtää jännityskeskittymiä ja, miten niitä voidaan mallintaa. Tärkeää on myös ymmärtää ero loven ja särön välillä. Lovi muistuttaa puoliympyrää materiaalin pinnassa ja sille voidaan määrittää säde ja leveys. Säröt puolestaan ovat hyvin teräviä ja syviä koloja, joilla säde on nolla. (Murakami 2019, s. 17.) Kirjassaan Murakami (2019, s. 15) esittää ns.”ekvivalentin ellipsin käsite”, jonka avulla määritellään jännityskeskittymäkerroin K_t.

$$K_t = 1 + 2\sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (1)$$

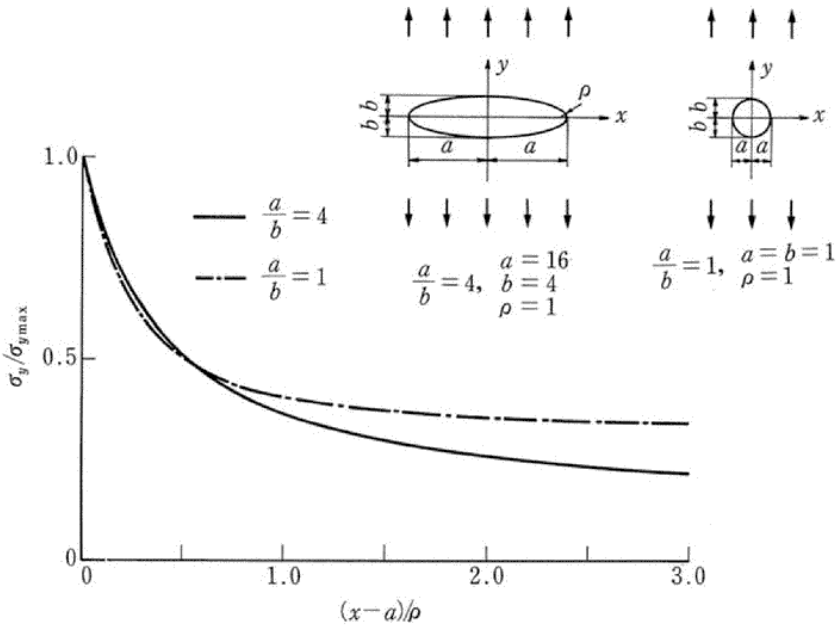
Yhtälössä 1 t on loven leveys ja ρ on loven säde.

On tutkittu, että melkein kaikki väsymisestä aiheutuneet murtumat ovat saaneet alkunsa alueelta, jossa on geometrinen virhe, kuten lovi. Lovien kohdalla vaikuttaa jännityskeskittymä, jonka vaikutusta väsymiskestävyyteen kutsutaan lovivaikutukseksi. (Murakami 2019, s. 29.) Siebel ja Stieler kehittivät mallin, jossa hyödynnetään jännitysgradienttia loven juuressa kuvaamaan loven vaikutusta. Tämä malli perustuu siihen, että oletetusti ainoastaan jännityksen jakautuminen erittäin lähellä lovea vaikuttaa väsymiskestävyyteen, jolloin jännityksen voidaan ajatella jakautuvan suorana. Tätä mallia käyttäen Siebel ja Stieler esittivät idean gradientista χ, joka saadaan normalisoimalla jännitysjakauma loven maksimijännityksellä.

$$\chi = \left|\frac{d\sigma^*}{dx}\right|_{x=0} \tag{2}$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_y}{\sigma_{ymax}} \tag{3}$$

Yhtälössä 3 σ_y on kappaleeseen vaikuttava nimellinen jännitys ja σ_{ymax} on maksimilovijännitys. Yhtälössä 2 χ on gradientti ja x on tarkasteltavan kohdan paikka jännitysjakaumassa. (Murakami 2019, s. 29.)



Kuva 1. Yllä esitetty jännityksen jakautumista elliptisen muotoiselle lovelle aksiaalisessa kuormassa (Murakami 2019, s. 30).

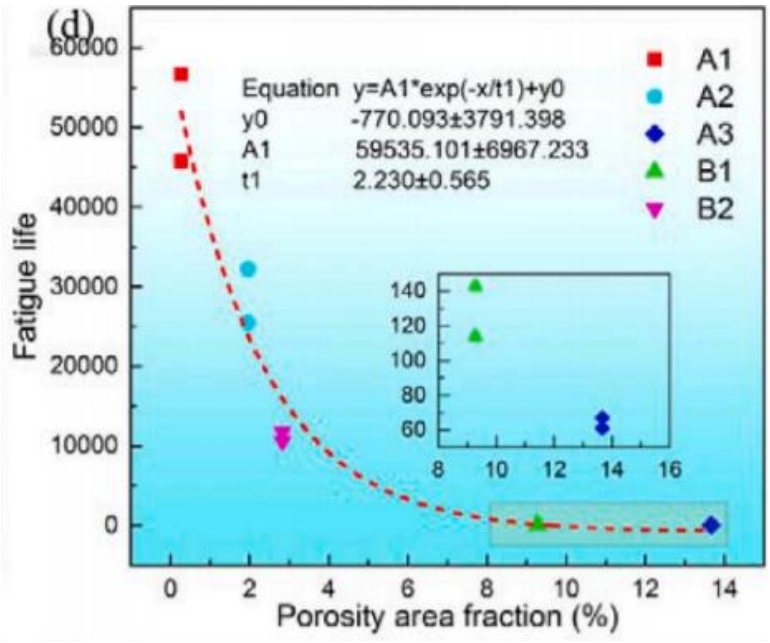
Lovivaikutuksen piirteet voidaan kiteyttää seuraavasti, mitä pienempi loven säde eli mitä terävämpi lovi, sitä suurempi jännitysgradientti, jolloin sallittu elastinen maksimilovijännitys on suuri. Jos loven säde on suuri, vaikutus on käänteinen. Huomioitavaa on kuitenkin, että suuri sallittu elastinen maksimilovijännitys ei tarkoita, että kappaleeseen tuotava sallittu nimellinen jännitys saa olla suuri. Tämä johtuu siitä, että jännityskeskittymäkerroin K_t on loven säteen ρ sekä syvyyden t funktio. Huomaa, että tässä kontekstissa t on loven syvyys eikä aiemmin mainitussa elliptisessä mallissa oleva leveys. Maksimilovijännitys voidaan ilmaista seuraavasti. (Murakami 2019, s. 31.)

$$\sigma_{\max} = K_{\mathrm{t}}\sigma_{\mathrm{n}} \tag{4}$$

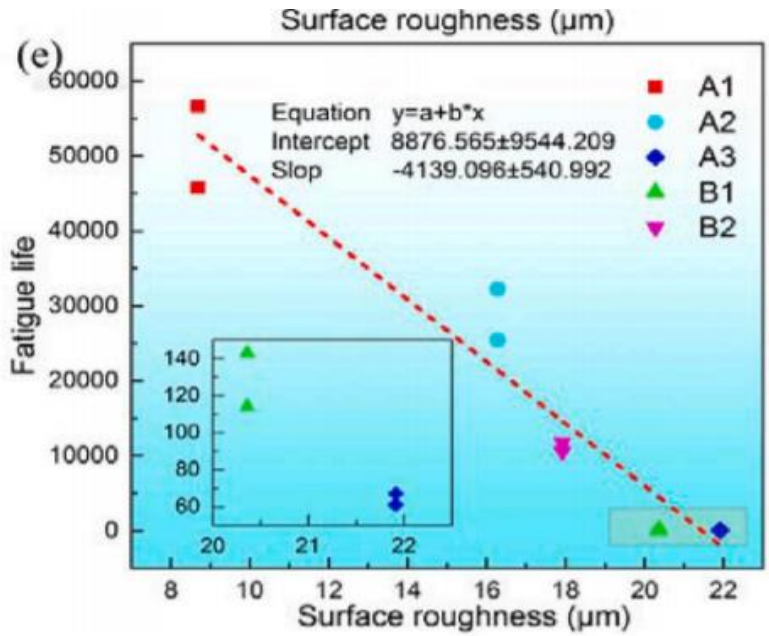
Yhtälössä 4 $\sigma_{\max}$ on maksimilovijännitys, K_{t} on jännityskeskittymäkerroin ja σ_{n} on nimellinen jännitys (Murakami 2019, s. 31).

3. AIEMPIEN TUTKIMUSTEN TARKASTELUA

Artikkelissaan Zhang, Li et al. tutkivat AM-teknologian avulla valmistetun 304L austeniittisen ruostumattoman teräksen väsymisominaisuuksia. He tutkivat prosessiparametrien vaikutusta materiaalin väsymiskestävyyteen. Pinnankarheutta, huokoisuutta ja jäännösjännityksiä tarkasteltiin ja miten ne vaikuttivat materiaalin väsymiskestävyyteen. Tutkimuksessa havaittiin, että pinnankarheus ja huokoisuus vaikuttavat suoraan materiaalin väsymiskestävyyteen negatiivisesti näiden kahden tekijän kasvaessa. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty koekappaleiden pinnan huokoisuuden sekä pinnankarheuden välinen yhteys väsymiskestävyyteen. (Zhang, Li et al. 2021, s. 12.)



Kuva 2. Kappaleen pinnan huokoisuuden vaikutus väsymiskestävyyteen (Zhang, Li et al. 2021, s. 8).



Kuva 3. Kappaleen pinnankarheuden vaikutus väsymiskestävyyteen (Zhang, Li et al. 2021, s. 8).

Väsymistestitulosten perusteella voidaan havaita koekappaleiden väsymiskestävyyden laskevan merkittävästi pinnankarheuden ollessa 20 µm sekä vastaavasti huokoisuuden ollessa noin 7 %. Kun näiden kahden pinnanlaatusuureiden arvot kasvavat suuremmiksi, väsymissärön ydintyminen nopeutuu ja näin vaikuttaa kappaleen väsymiskestävyyteen. (Zhang, Li et al. 2021, s. 9.)

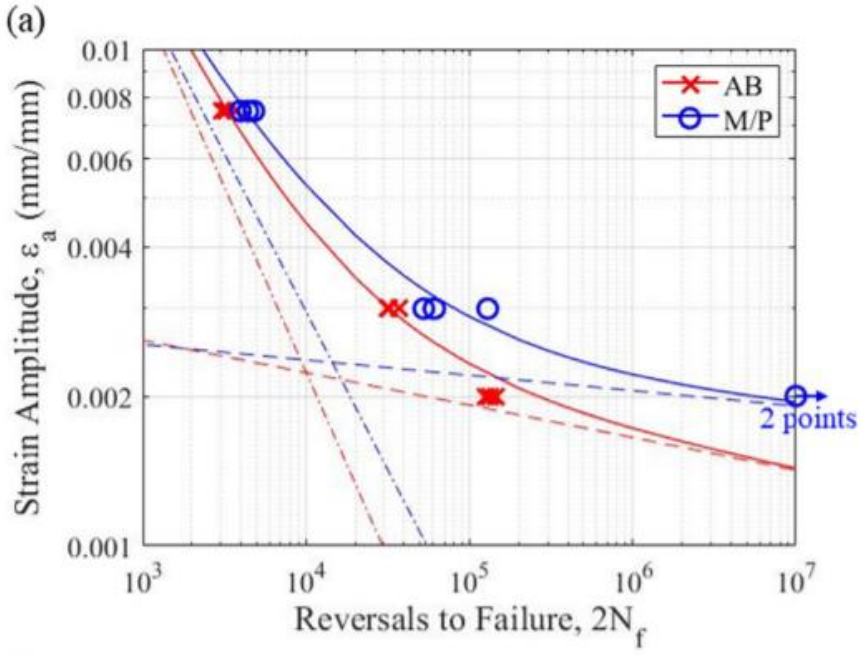
Zhang, Li et al. huomasivat myös, että jäännösjännityksien merkitys on erittäin vähäinen verrattuna pinnankarheuden sekä huokoisuuden vaikutuksiin. Väsymissärön ydintymisen kannalta pinnankarheus on dominoiva tekijä, kun puhutaan säröistä, jotka ovat saaneet alkunsa kappaleen pinnasta. Suuri huokoisuus puolestaan aiheuttaa sisäisten väsymissäröjen ydintymistä johtuen pisteistä, joissa huokoisuus on aiheuttanut puutteellisen yhteensulamisen. Huokoisuuden muodostumista on helpompi rajoittaa prosessiparametreja muuttamalla kuin pinnankarheuden kasvamista. Koska aiemmasta kirjallisuudesta ei ole löytynyt ratkaisua tälle ongelmalle, Zhang, Li et al. ehdottivat ns. ”kriittistä arvoa”, joka 304L austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle olisi pinnankarheudeltaan noin 20 µm. Tämä arvo määritettiin koetulosten perusteella olevan validi. (Zhang, Li et al. 2021, s. 12)

AM -teknologian avulla valmistetun 304L ruostumattoman teräksen väsymiskestävyyttä tutkittiin myös Lee, Pegues et al. toimesta. He tutkimuksessaan vertasivat pinnankarheuden vaikutusta väsymiskestävyyteen jälkikäsittelemättömille sekä jälkikäsitellyille koekappaleille, joiden väsymiskokeissa käytettiin jännityssuhteena R = -1. Koekappaleille tehtiin sekä venymäohjautunut väsymiskoe, että voimaohjautunut väsymiskoe. Havaittiin, että pinnankarheuden vaikutus oli huomattava molemmissa olosuhteissa, mutta erityisesti voimaohjautuneessa väsymiskokeessa pinnankarheuden vaikutus oli vielä herkempää. Venymäohjautuvasta väsymiskokeesta piirrettiin venymäkäyrät käyttäen mallina seuraavaa yhtälöä, jossa plastinen ja elastinen venymäamplitudi yhdistettiin.

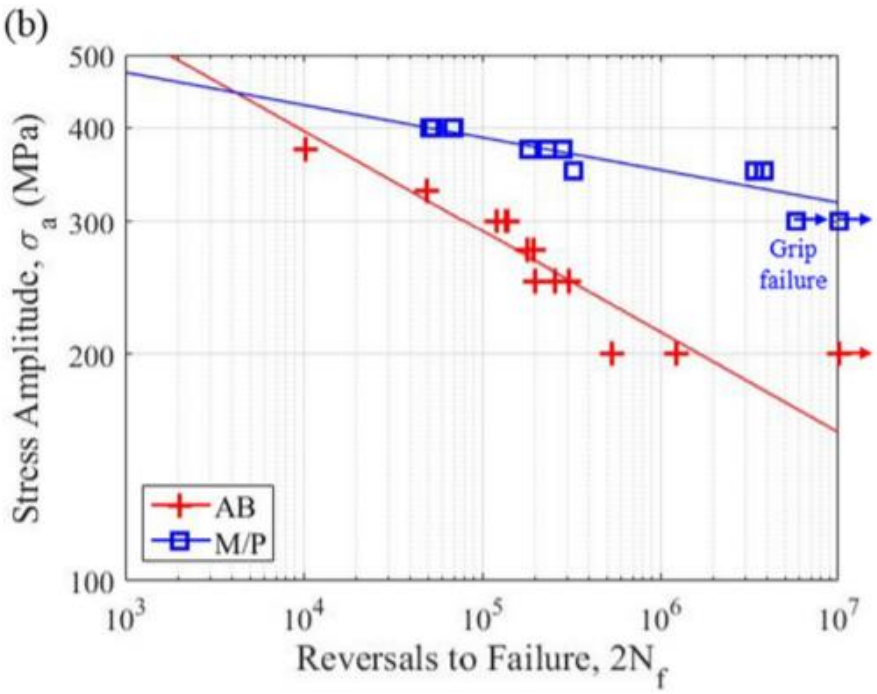
$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \varepsilon_{\mathrm{a}} = \frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{e}}}{2} + \frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{p}}}{2} = \frac{\sigma_{\mathrm{f}}'}{E}(2N_{\mathrm{f}})^{b} + \varepsilon_{f}'(2N_{\mathrm{f}})^{c} \qquad (5)$$

Yhtälössä 5 $\frac{\Delta\varepsilon}{2}$ ja ε_{a} ovat jännitysamplitudi, $\frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{e}}}{2}$ on elastinen jännitysamplitudi, $\frac{\Delta\varepsilon_{\mathrm{p}}}{2}$ on plastinen jännitysamplitudi, σ_{f}' on väsymiskestävyys kerroin, E on kimmokerroin, $2N_{\mathrm{f}}$ on kuormituskertojen määrä murtumiseen, b on väsymiskestävyyseksponentti, $\varepsilon_{\mathrm{f}}'$ on materiaalin väsymissitkeyskerroin ja c on materiaalin väsymissitkeyseksponentti (Lee, Pegues et al. 2020, s. 2).

Kuvassa 4 on testituloksista saatu venymäkäyrä ja kuvassa 5 jännityskäyrä. Käyristä voidaan huomata, että kuormituskertojen $2N_{\mathrm{f}}$ kasvaessa pinnankarheuden vaikutus on paljon merkittävämpi, erityisesti jännityskäyrässä. Tämä selittyy loven ydintymisellä, johon vaikuttaa materiaalin pinnankarheus, toisin kuin loven kasvaminen, johon puolestaan vaikuttaa materiaalin mikrorakenne. Kuormituskertoja ollessa huomattavan paljon kappaleen väsymiskestävyyttä rajoittaa eniten loven ydintyminen ja näin pinnankarheus. (Lee, Pegues et al. 2020, s. 7.)



Kuva 4. Testituloksiin sovitettu venymäkäyrä, jossa punainen käyrä kuvaa jälkikäsittelemättömiä koekappaleita ja sininen jälkikäsiteltyjä koekappaleita (Lee, Pegues et al. 2020, s. 8.).



Kuva 5. Testituloksiin sovitettu jännityskäyrä, jossa punainen kuvaa jälkikäsittelemättömiä koekappaleita ja sininen jälkikäsiteltyjä koekappaleita (Lee, Pegues et al. 2020, s. 8.).

Kappaleen pinnan voidaan ajatella koostuvan huipuista sekä laaksoista. Näistä laaksot vaikuttavat väsymiskestävyyteen, sillä ne voidaan kuvitella mikro-loviksi, jotka voivat edes auttaa varsinaisen loven ydintymistä (Lee, Pegues et al. 2020, s. 10). Artikkelissaan Lee & Pegues et al. käyttivät jälkikäsittelemättömän kappaleen väsymiskestävyyden ennustamiseen pinnanlaatusuureita R_a profiloidun viivan aritmeettinen keskikorkeus, R_t profiloidun viivan maksimi huippu-laakso korkeus, R_{zISO} profiloidun viivan 10-pisteen korkeus karheus sekä $\bar{\rho}_{10}$ 10-pisteen laakson säde. Alla on esitetty yhtälöt näille suureille ja taulukossa yksi on laskettu eri valmistussuunnille pinnanlaatusuureiden keskiarvot. (Lee, Pegues et al. 2020, s. 2).

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|\mathrm{d}x \tag{6}$$

$$R_t = |y_{max} - y_{min}| \tag{7}$$

$$R_{zISO} = \frac{1}{5}\left[\sum_{i=1}^{5} y_{i-max} + \sum_{j=1}^{5} y_{j-min}\right] \tag{8}$$

$$\bar{\rho}_{10} = \frac{1}{5}\left[\sum_{j=1}^{5} \rho_{j-min}\right] \tag{9}$$

Yhtälössä 6 l on mitattavan viivan pituus ja Z(x) on korkeus mitattavan viivan kohdassa x (Lee, Pegues et al. 2020, s. 3). Yhtälössä 7 ja 8 y_{max} on profiilin korkein huippu ja y_{min} on profiilin syvin laakso (Lee, Pegues et al. 2020, s. 3). Yhtälössä 8 ρ_j on syvimmän laakson säde (Lee, Pegues et al. 2020, s. 11).

Taulukko 1. Määritettyjen pinnanlaatusuureiden keskiarvot ja suluissa keskihajonta riippuen niiden valmistussuunnasta mikrometreissä (Lee, Pegues et al. 2020, s. 4).

Facing directions	R_a	R_z	R_{zISO}
North	13 (2)	80 (14)	65 (11)
East	13 (2)	81 (13)	66 (10)
South	12 (1)	75 (7)	60 (4)
West	12 (3)	80 (15)	62 (12)

Näitä pinnanlaatusuureita hyödyntäen voidaan määrittää materiaalin loviherkkyyskerroin *q*, tehollinen elastinen jännityskeskittymäkerroin $\overline{K}_{\mathrm{t}}$ ja tehollinen väsyttävä jännityskeskittymäkerroin $\overline{K}_{\mathrm{f}}$. Alla on esitetty näille suureille yhtälöt.

$$q = \frac{1}{1+\frac{\gamma}{\bar{\rho}_{10}}} \tag{10}$$

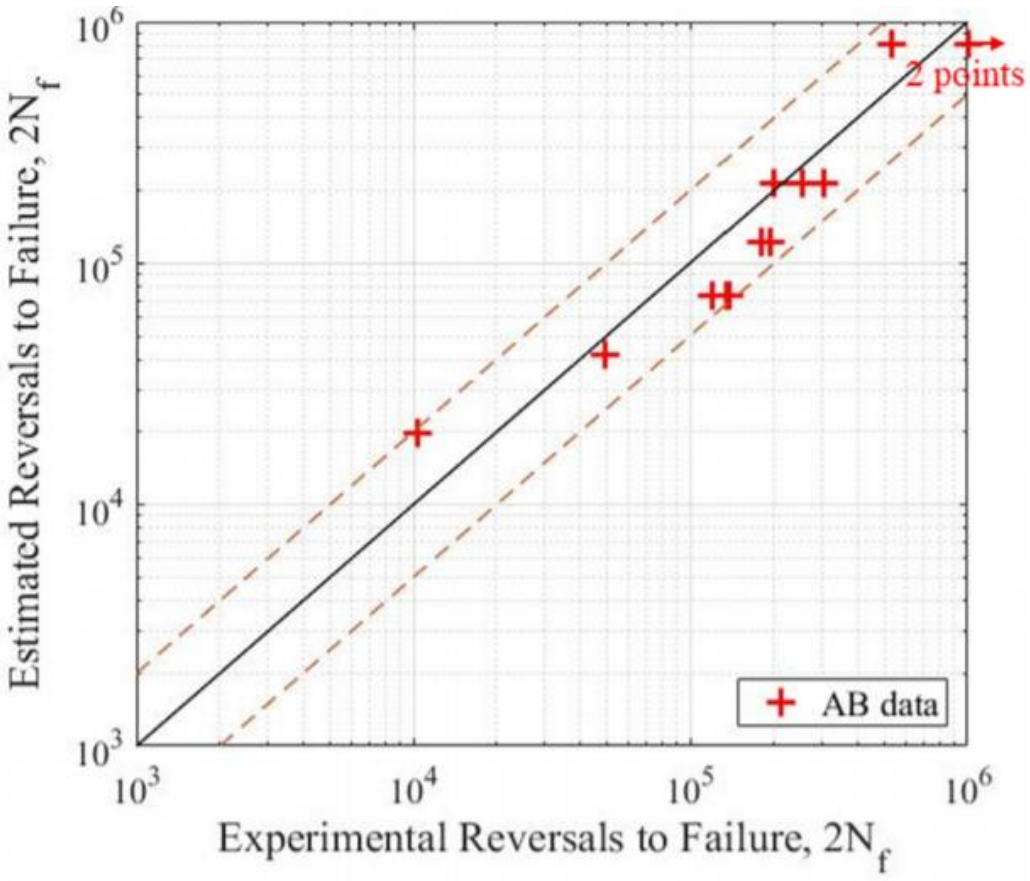
$$\overline{K}_{\mathrm{t}} = 1 + n\left(\frac{R_{\mathrm{a}}}{\bar{\rho}_{10}}\right)\left(\frac{R_{\mathrm{t}}}{R_{\mathrm{zISO}}}\right) \tag{11}$$

$$\overline{K}_{\mathrm{f}} = 1 + q(\overline{K}_{\mathrm{t}} - 1) \tag{12}$$

Yhtälössä 10 γon materiaalin ominaispituus, joka 304L ruostumattomalle teräkselle on määritetty olevan 13 µm perustuen sen kiteiden keskikokoon. Yhtälössä 11 *n* on jännitystila, jonka arvioidaan olevan 2 vetojännitykselle. (Lee, Pegues et al. 2020, s. 11.)

Jälkikäsittelemättömille koekappaleille väsymiskestävyyden ennustamiseen hyödynnettiin materiaalin murtolujuutta ja kokeellisesti määritettyä väsymisrajaa, joka 10^7 kuormituskerralla oli 300 MPa. Jälkikäsitellyille koekappaleille arvioitiin 2000 kuormituskerrassa väsymiskestävyydeksi 553 MPa ja näiden tietojen avulla muodostettiin jälkikäsitellyille koekappaleille jännityskäyrä. Jälkikäsittelemättömille koekappaleille väsymiskestävyys ennustettiin jakamalla jälkikäsiteltyjen koekappaleiden väsymisraja tehollisella väsyttävällä jännityskeskittymäkertoimella $\overline{K}_{\mathrm{f}}$, joka pinnanlaatudatan avulla määritettiin olevan 2,30. Näin jälkikäsittelemättömille koekappaleille väsymisrajaksi saatiin 130 MPa ja muodostettua jännityskäyrä, missä 2000 kuormituskerrassa arvioitiin väsymiskestävyyden olevan 553 MPa. Käytännössä prosessissa hyödynnetään jo jälkikäsiteltyjen koekappaleiden väsymistestidataa ja jälkikäsittelemättömien koekappaleiden pinnanlaatudataa, jotta voidaan ennustaa jälkikäsittelemättömän kappaleen väsymiskestävyyttä ilman, että on tarvetta tehdä omat väsymistestit niille. (Lee, Pegues et al. 2020, s. 11.)

Kuvassa 6 on esitetty jälkikäsittelemättömille koekappaleille tehtyjen testien tulokset voimaohjautuvasta väsymistestistä. Samassa kuvassa on 2 hajontanauhaa merkattuna mustilla katkoviivoilla, jotka määritettiin edellä mainitulla prosessilla. Kuvasta voidaan huomata, että kaikki datapisteet pysyvät hajontanauhojen sisällä eli voidaan todeta Lee, Pegues et al. kehittämän metodin olevan tehokas tapa ennustaa väsymiskestävyyttä jälkikäsittelemättömille kappaleille, jos jälkikäsitellyille kappaleille on jo tehty väsymistestit.



Kuva 6. Punaiset datapisteet kuvaavat jälkikäsittelemättömien koekappaleiden väsymistestituloksia ja katkoviivalla merkityt suorat kuvaavat hajontanauhoja (Lee, Pegues et al. 2020, s. 12).

Solberg et al. tutkivat artikkelissaan valmistussuunnan vaikutusta 18Ni300-teräskappaleen pinnanlaatuun. Kappaleille tehtiin myös väsymistestit, jotta niiden väsymisominaisuuksia olisi mahdollista tarkastella. Koekappaleet valmistettiin eri kulmissa verrattuna valmistusalustaan. Kulmat olivat 0°-135° väliltä 15° hypyillä ja jokaisella kulmalla tehtiin kolme koekappaletta. Lisäksi koekappaleiden kaikki muut sivut kävivät läpi jälkikäsittelyn, jotta väsymistestien vaikutus saatiin ohjattua halutulle tarkastelualueelle. Väsymystesteissä käytettiin jännityssuhdetta R=0. (Solberg et al. 2021, s. 4.)

Koekappaleiden valmistuksen jälkeen niiden pinnanlaatua tarkasteltiin elektronimikroskoopilla, englanniksi Scanning Electron Microscope eli (SEM). SEMillä saaduista kuvista voitiin erottaa kolme toisistaan eroavaa pinnanlaatutilaa. Kulman ollessa 0° tai sen lähettyvillä oli havaittavissa porras-efektiä ja kulman kasvaessa sulamattomien jauhepartikkelien määrä kasvoi pinnassa. 45° ja 90° välillä pinnankarheus kasvoi ja jauhepartikkelien määrä kasvoi huomattavasti. Tästä eteenpäin kulman kasvaessa pinnankarheus sekä jauhepartikkelien määrä lisääntyi entisestään. (Solberg et al. 2021, s. 6.) Kuvassa 7 on esitetty SEMillä saadut kuvat koekappaleiden pinnoista.

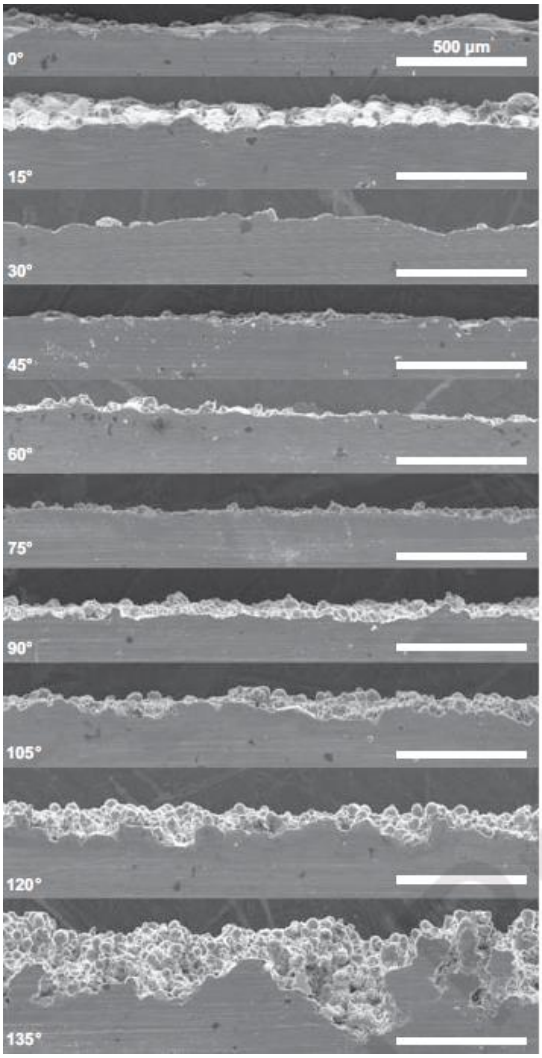
Solberg et al. käyttivät analyysissään pinnanlaatusuureita R_a aritmeettinen keskipoikkeama ja R_z profiilin maksimi korkeus. Alla on esitetty suureiden yhtälöt.

$$R_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i| \tag{13}$$

$$R_z = |\max y_i| - |\min y_i| \tag{14}$$

Yhtälössä 13 n on tasapitkien välien määrä profiilin viivalla ja y_i on etäisyys keskiviivasta pisteen i kohdalla (Solberg et al. 2021, s. 5).

R_a ja R_z kasvoivat radikaalisti, kun valmistussuunta kasvoi 90° aina 135° asti. Lisäksi pinnanlaatusuureiden huomataan laskevan valmistussuunnan mennessä lähemmäksi 90°. Tämä voidaan selittää edellä mainitulla porras-efektillä. (Solberg et al. 2021, s. 6.)



Kuva 7. Eri kulmissa valmistettujen koekappaleidein poikkileikkauskuva pinnasta (Solberg et al. 2021, s. 7.).

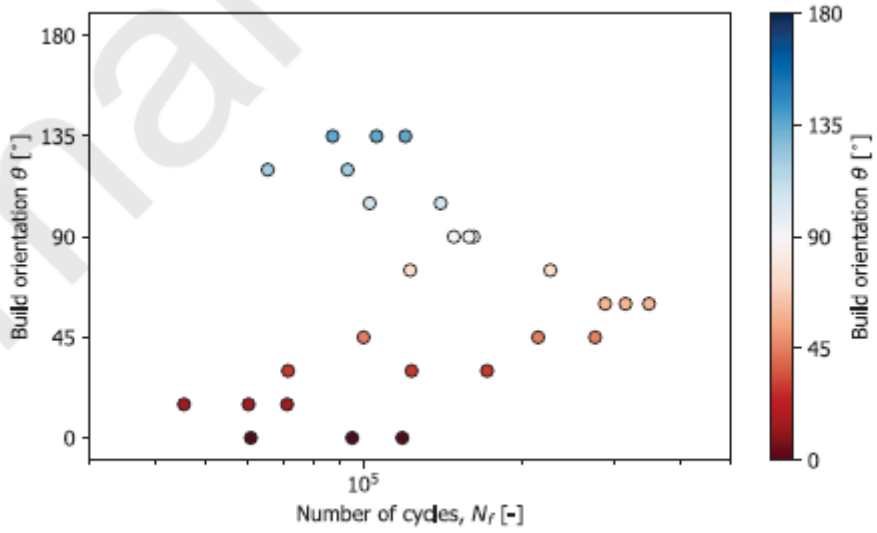
Koekappaleiden väsymisdata on esitetty kuvassa 8. Kuvasta nähdään, että parhaan tuloksen väsymistestistä saivat koekappaleet, jotka valmistettiin 60° kulmassa, ja että huonoimman tuloksen saivat koekappaleet, jotka valmistettiin 120° kulmassa. Selvästi väsymiskestävyys paranee, kun lähestytään vertikaalia valmistussuuntaa ja heikkenee, kun jatketaan siitä suurempiin kulmiin. (Solberg et el. 2021, s. 6.)

Solberg et al. on verrannut väsymisdataansa muihin aiempien tutkimusten, joiden tekijöitä ovat Damon et al. sekä Meneghetti et al., tuottamiin väsymisdatoihin kuvassa 7. Muiden tutkimusten väsymistestit tehtiin jännityssuhteella $R = -1$, joten niihin sovellettiin Smith-Watson-Topper, lyhyesti (SWT), keskijännitystä. (Solberg et al. 2021, s. 10.) Alla on esitetty keskijännityksen yhtälö.

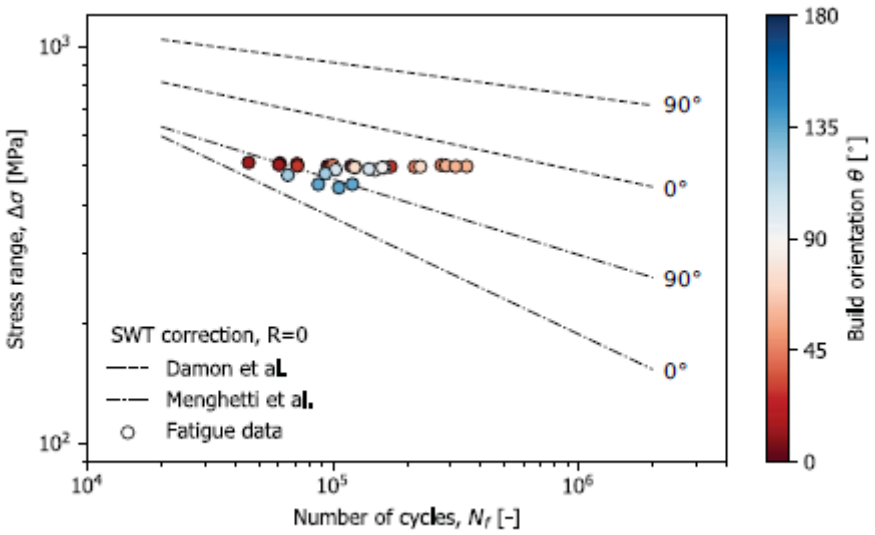
$$\sigma_{\mathrm{ar}} = \sigma_{\mathrm{max}} \sqrt{\frac{1-R}{2}} \tag{15}$$

Yhtälössä 15 σ_{ar} on SWT-keskijännitys, σ_{max} on maksimijännitys annetun jännityssuhteen R kohdalla (Solberg et al. 2021, s. 10).

Kuvasta 9. nähdään Solberg et al. sekä kirjallisuuden tekemien tutkimusten välillä samanlaisuuksia väsymisdatan suhteen. Kuitenkin nimellisen jännityksen suhteen on huomattavaa vaihtelua tutkimusten välillä. Tämä voidaan selittää koekappaleiden dimensioiden vaihtelulla. (Solberg et al. 2021, s. 10.)



Kuva 8. X-akselilla on kuormittavien kertojen määrä N_{f} ja y-akselilla on valmistussuunta θ (Solberg et al. 2021, s.9).

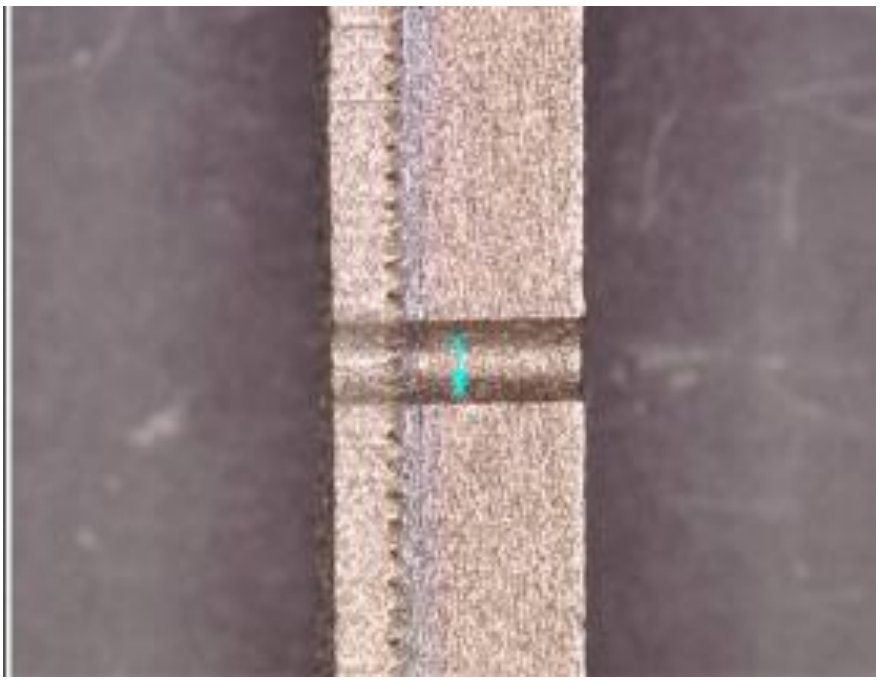


Kuva 9. X-akselilla on kuormittavien kertojen määrä N_f ja y-akselilla vasemmalla puolella jännitysväli $\Delta\sigma$ sekä oikealla puolella valmistussuunta θ (Solberg et al. 2021, s. 12).

Tutkimuksestaan Solberg et al. tekivät johtopäätöksiä liittyen valmistussuunnan vaikutuksiin. Valmistussuunnan kasvaessa kohti 90° koekappaleiden pinnassa esiintyi porras-efektiä. Valmistussuunnan kasvaessa yli 90° koekappaleiden pinnanlaatu huononi huomattavasti pinnankarheuden kasvaessa. Pinnanlaadun vaikutus on nähtävissä väsymisdatassa sekä kuvista, jotka pohjautuvat dataan. Koekappaleet, joiden pinnanlaatu oli parempi, kestivät enemmän kuormituskertoja kuin koekappaleet, joiden pinnanlaatu oli huono. (Solberg et al. 2021, s.14.)

4. KOKEELLISUUS

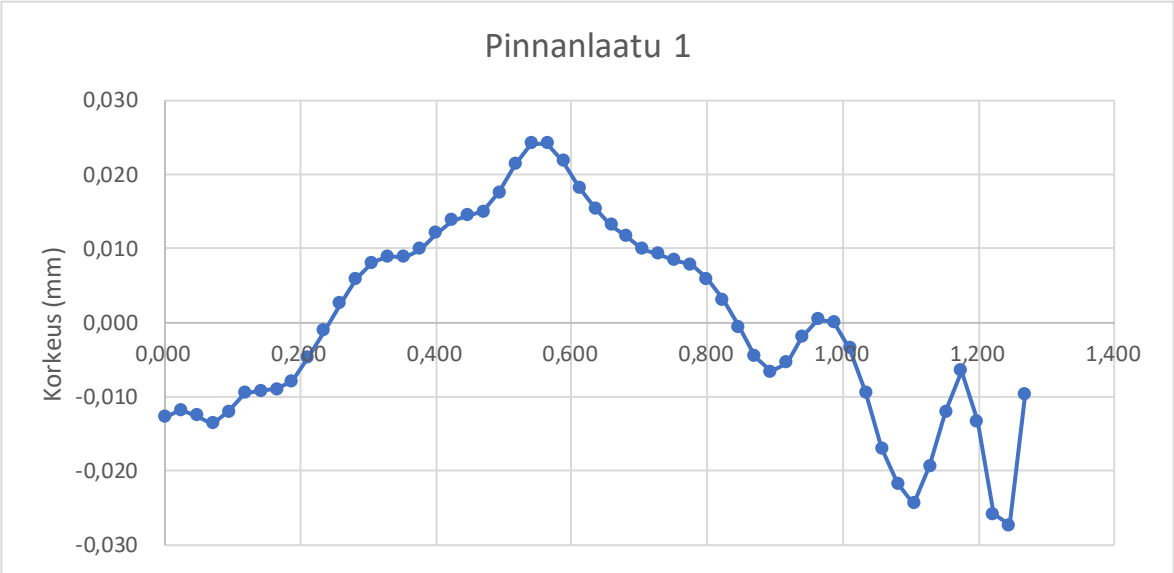
Tässä osiossa esitellään itse tehtyjä pinnanlaatumittauksia ja vertaillaan niitä kirjallisuudesta löytyneisiin havaintoihin. Kuvassa 10 on esitetty Lappeenrannan teknillisen yliopiston profilometrin avulla otettu kuva tarkasteltavasta koesauvasta ja siihen merkitty viiva, jolta pinnanlaatusuureet määritetään. Koesauva on valmistettu ainetta lisäävällä valmistusmenetelmällä.



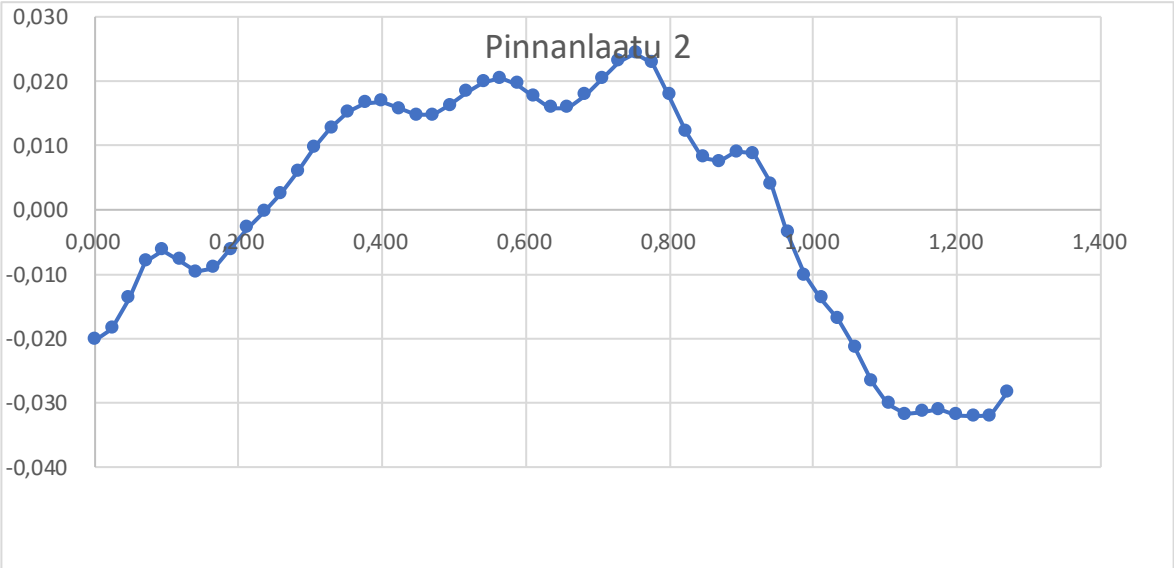
Kuva 10. Koesauva ja viiva, jolta pinnanlaatusuureet määritetään.

Kuvissa11, 12 ja 13 on puolestaan muodostettu Excelissä esitettyä dataa hyödyntäen viivat kuvaamaan profiilin pinnankarheutta 3 osaan. Kuvasta 13 voidaan huomata hyvin terävä lovi verrattuna kuviin 11 ja 12. Tämä lovi voisi olla mahdollinen väsymissärön alku. Liitteessä I on koesauvan pinnanlaatudataa. Liitteestä II löytyy pinnanlaatusuureet R_a profiloidun viivan aritmeettinen keskikorkeus, R_z profiloidun viivan maksimi huippu-laakso korkeus, R_{zJIs} profiloidun viivan 10-pisteen korkeus karheus. Kun verrataan näitä pinnanlaatusuureita Lee, Pegues et al. tutkimuksessa esiintyneisiin pinnanlaatusuureisiin, joita on taulukoitu taulukossa 1, voidaan huomata, että R_a on pienempi koesauvalla kuin taulukossa 1 esitetyillä arvoilla. Lisäksi R_z sekä R_{z10} ovat pienempiä kuin taulukossa 1 vastaavat arvot. Kirjallisuuden perusteella pinnanlaadulla on suuri merkitys kappaleen väsymiskestävyyteen.

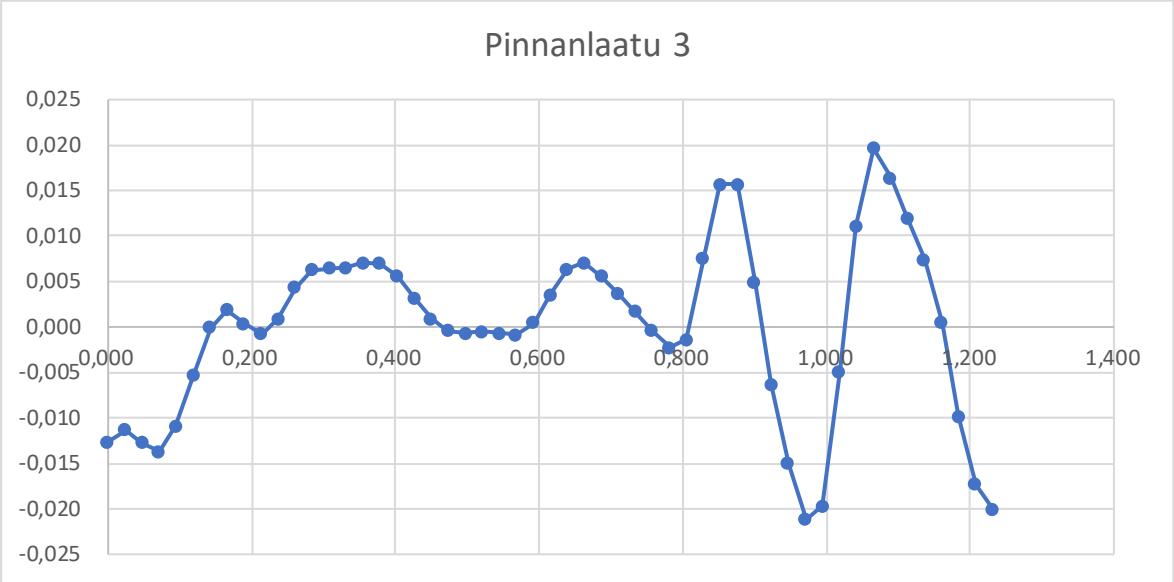
Tämän perusteella voisi esittää hypoteesin siitä, että tutkittu koesauva saavuttaisi paremmat väsymystestitulokset verrattuna Lee, Pegues et al. tutkimiin koekappaleisiin pinnanlaadun perusteella. Kuitenkin on tärkeää huomioida, että koesauvasta on mitattu pinnanlaatusuureita vain yhden viivan kohdalla, kun taas Lee, Pegues et al. mittasivat viideltä vierekkäiseltä viivalta per koekappale pinnanlaatusuureita.



Kuva 11. Koesauvan profiilin pinnankarheutta kuvaava viiva osa 1.



Kuva 12. Koesauvan profiilin pinnankarheutta kuvaava viiva osa 2



Kuva 13. Koesauvan profiilin pinnankarheutta kuvaava viiva osa 3.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä kandidaatintyössä tarkasteltiin lyhyesti tutkimuksia liittyen ainetta lisäävällä valmistuksella valmistettujen kappaleiden väsymiskestävyyteen. Tutkimuksissa tarkoituksena oli esittää malleja AM-kappaleiden väsymiskestävyyden ennustamiseksi sekä tuoda esille kriittisiä tekijöitä, jotka dramaattisesti huonontavat kappaleiden väsymisominaisuuksia. Tarkastelluissa tutkimuksissa pinnanlaatu nousi yhdeksi tärkeäksi tekijäksi väsymisominaisuuksien suhteen. Kuten artikkelissaan Lee, Pegues et al. 2020 huomasivat ne koekappaleet, joilla oli huono pinnanlaatu eivät kestäneet väsymiskuormitusta pitkään verrattuna koekappaleisiin, joilla oli parempi pinnanlaatu. Lisäksi oman koesauvan pinnanlaatusuureita verrattiin Lee, Pegues et al. saamiin pinnanlaatusuureisiin ja tämän perusteella esitettiin hypoteesi, että koesauva saavuttaisi paremman väsymistestituloksen, pohjautuen kirjallisuudessa esitettyihin havaintoihin.

Pinnanlaadun vaikutuksia tutkittiin myös Solberg et al. 2021 puolesta, mutta he tarkastelivat tätä valmistussuunnan vaikutusten kautta. Heidän tuloksensa johtivat samoihin johtopäätöksiin pinnanlaadun suhteen. AM-kappaleiden kannalta tulevaisuudessa on tärkeää jatkaa tutkimusta pinnanlaatuun vaikuttavien tekijöiden osalta, jotta voidaan optimoida paras mahdollinen väsymiskestävyys ainetta lisäävällä valmistuksella valmistetuille kappaleille. Tämän aiheen tärkeys painottuu lisää, kun AM-kappaleiden kompleksien geometrioiden johdosta ei voida käyttää jälkikäsittelymenetelmiä. Tällöin ratkaisevia tekijöitä ovat AM-prosessiparametrit ja kappaleeseen muodostunut pinnanlaatu.

LÄHDELUETTELO

BATHIAS, C. and PINEAU, A., 2010. *Fatigue of materials and structures*. London: ISTE, pp. 1-521.

DEBROY, T., WEI, H.L., ZUBACK, J.S., MUKHERJEE, T., ELMER, J.W., MILEWSKI, J.O., BEESE, A.M., WILSON-HEID, A., DE, A. and ZHANG, W., 2018. Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. *Progress in Materials Science,* **92**, pp. 112-224.

LEE, S., PEGUES, J.W. and SHAMSAEI, N., 2020. Fatigue behavior and modeling for additive manufactured 304L stainless steel: The effect of surface roughness. *International Journal of Fatigue,* **141**, pp. 105856.

MOLAEI, R. and FATEMI, A., 2018. Fatigue Design with Additive Manufactured Metals: Issues to Consider and Perspective for Future Research. *Procedia Engineering*, **213**, pp. 5-16.

MURAKAMI, Y., 2019. *Metal Fatigue.* San Diego: Elsevier Science & Technology, pp. 1-734.

SOLBERG, K., HOVIG, E.W., SØRBY, K., BERTO, F., Directional fatigue behaviour of maraging steel grade 300 produced by laser powder bed fusion, *International Journal of Fatigue* (2021)

ZHANG, H., LI, C., XU, M., DAI, W., KUMAR, P., LIU, Z., LI, Z. and ZHANG, Y., 2021. The fatigue performance evaluation of additively manufactured 304L austenitic stainless steels. *Materials Science and Engineering: A,* **802**, pp. 140640.

LIITTEET

Koesauvan pinnanlaatudata

X(mm)	Z(mm)
0,000	-0,013
0,024	-0,011
0,047	-0,013
0,071	-0,014
0,095	-0,011
0,118	-0,005
0,142	0,000
0,166	0,002
0,189	0,000
0,213	-0,001
0,237	0,001
0,260	0,004
0,284	0,006
0,308	0,006
0,332	0,007
0,355	0,007
0,379	0,007
0,403	0,006
0,426	0,003
0,450	0,001
0,474	0,000
0,497	-0,001

X(mm)	Z(mm)
0,000	-0,020
0,023	-0,019
0,047	-0,014
0,070	-0,008
0,094	-0,006
0,117	-0,008
0,141	-0,010
0,164	-0,009
0,188	-0,006
0,211	-0,003
0,235	0,000
0,258	0,003
0,282	0,006
0,305	0,010
0,329	0,013
0,352	0,015
0,376	0,017
0,399	0,017
0,423	0,016
0,446	0,015
0,470	0,015
0,493	0,016

X(mm)	Z(mm)
0,000	-0,013
0,023	-0,012
0,047	-0,013
0,070	-0,014
0,094	-0,012
0,117	-0,010
0,141	-0,009
0,164	-0,009
0,188	-0,008
0,211	-0,005
0,235	-0,001
0,258	0,003
0,282	0,006
0,305	0,008
0,329	0,009
0,352	0,009
0,376	0,010
0,399	0,012
0,423	0,014
0,446	0,014
0,470	0,015
0,493	0,018

0,521	-0,001
0,545	-0,001
0,568	-0,001
0,592	0,000
0,616	0,003
0,639	0,006
0,663	0,007
0,687	0,006
0,710	0,004
0,734	0,002
0,758	0,000
0,781	-0,002
0,805	-0,001
0,829	0,008
0,853	0,016
0,876	0,016
0,900	0,005
0,924	-0,006
0,947	-0,015
0,971	-0,021
0,995	-0,020
1,018	-0,005
1,042	0,011
1,066	0,020
1,089	0,016
1,113	0,012
1,137	0,007
1,160	0,000
1,184	-0,010
1,208	-0,017
1,231	-0,020

0,517	0,018
0,540	0,020
0,564	0,020
0,587	0,020
0,611	0,018
0,634	0,016
0,658	0,016
0,681	0,018
0,705	0,020
0,728	0,023
0,752	0,024
0,775	0,023
0,799	0,018
0,822	0,012
0,846	0,008
0,869	0,007
0,893	0,009
0,916	0,009
0,940	0,004
0,963	-0,004
0,987	-0,010
1,010	-0,014
1,034	-0,017
1,057	-0,021
1,081	-0,027
1,104	-0,030
1,128	-0,032
1,151	-0,031
1,175	-0,031
1,198	-0,032
1,222	-0,032
1,245	-0,032
1,269	-0,028

0,517	0,021
0,540	0,024
0,564	0,024
0,587	0,022
0,611	0,018
0,634	0,015
0,658	0,013
0,681	0,012
0,705	0,010
0,728	0,009
0,752	0,008
0,775	0,008
0,799	0,006
0,822	0,003
0,846	-0,001
0,869	-0,005
0,893	-0,007
0,916	-0,005
0,940	-0,002
0,963	0,000
0,987	0,000
1,010	-0,003
1,034	-0,009
1,057	-0,017
1,081	-0,022
1,104	-0,024
1,128	-0,019
1,151	-0,012
1,175	-0,006
1,198	-0,013
1,222	-0,026
1,245	-0,027
1,269	-0,010

Liite II

Pinnanlaatusuureet Excel-datasta

No.	Measurement name	Measured value	Unit
1	Ra	6	µm
2	Rz	41	µm
3	Rz10	14	µm