



■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# AINETTA LISÄÄVÄLLÄ VAL- MISTUKSELLA TUOTETTUJEN METALLISTEN KAPPALEIDEN VÄSYMINEN

DEADMAN (DESIGN FOR ADDITIVE MANUFACTURING)

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä(t) Matti Kesonen			
Työn nimi AINETTA LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUKSELLA TUOTETTujen METALLISTEN KAPPALEIDEN VÄSYMENEN			
Päiväys	8.1.2015	Sivumäärä/Liitteet	55
Ohjaaja(t) Päätoiminen tuntiopettaja Tatu Westerholm ja yliopettaja Esa Hietikko			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia-ammattikorkeakoulu			
Tiivistelmä			
<p>Opinnäytetyö suoritettiin osana Savonia-ammattikorkeakoulun järjestämää DeAdMan-hanketta, jossa tutkittiin ainetta lisäävän valmistuksen suunnitteluun liittyviä periaatteita ja menetelmiä. Opinnäytetyössä tarkasteltiin ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallisten testikappaleiden väsymistä. Lisäksi vertailtiin perinteisen sekä ainetta lisäävän valmistuksen vaikutusta materiaalin väsymisessä. Työn tavoitteena oli tuottaa ainetta lisäävällä valmistuksella metalliset testikappaleet joille toteutetaan standardin mukaiset väsytestit. Tavoitteena oli myös tutkia ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden pinnankarheuden vaikutusta materiaalin väsymiseen.</p> <p>Työn kokeelliset mittaukset toteutettiin aksiaalisella veto-puristusväsytesteillä, jotka perustuivat SFS-ISO 1099 standardiin. Työn teoreettisena osana arvioitiin 316L materiaalin väsymisikä, jota vertailtiin testeissä saatuihin tuloksiin. Testikappaleiden valmistuksessa käytettiin sekä perinteistä ainetta poistavaa että ainetta lisäävää valmistusmenetelmää. Ainetta poistavassa menetelmässä sovellettiin koneistus-valmistusprosessia; ainetta lisäävässä menetelmässä käytettiin DMLS ja 3DP-valmistusprosesseja. DMLS- testikappaleet valmistettiin 316L materiaalista, ja 3DP-testikappaleet 420ss+pronssista. Vertailukappaleet valmistettiin 316L vastaavasta materiaalista. Testaukset suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun HIT-Savonia tiloissa olevalla Walter +Bai AG mallia LFV 500- HH veto- ja väsymistestauslaitteistolla.</p> <p>Tuloksista havaittiin, että vertailukappaleen teoreettinen väsymisikä oli 24 % suurempi kuin sen testissä havaittu väsymisikä. 3DP-testikappaleiden testituloksista havaittiin, että niiden väsymisikä oli vähintään 68 % pitempi kuin koneistetulla vertailukappaleella. DMLS- testikappaleiden väsymisikä oli 72 % pidempi kuin vertailukappaleella. Lisäksi DMLS- kappaleiden väsymisikä oli 12 % pidempi kuin 3DP-tekniikalla valmistetuilla kappaleilla. Koneistettujen DMLS- testikappaleitten väsymisikien keskiarvo oli 428 % pidempi kuin käsittelemättömillä DMLS- kappaleilla. DMLS- testikappaleissa väsymisikien hajonta kasvoi, kun kappaleiden pinnankarheus pieneni kehittyneimmissä valmistusprosesseissa. Tämä tarkoittaa sitä, että pinnankarheuden pienentyessä kappaleiden väsymisiät olivat enemmän riippuvaisia niiden sisäisestä rakenteesta. Tutkimuksissa selvisi, että perinteiset teoreettiset väsymisiän määrittäminen menetelmät eivät sovellu 3DP-valmistusprosessilla tuotetuille kappaleilla. DMLS- testikappaleiden väsymisiät noudattivat osittain perinteisen teoreettisen väsymisiän määrittämenetelmän antamia tuloksia.</p>			
Avainsanat Ainetta lisäävä valmistus, metallien väsyminen, väsymistestaus, Standardi SFS-ISO 1099,420ss+pronssi, 316L			
Julkinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Matti Kesonen			
Title of Thesis Fatigue Testing of Parts Produced by Metal Additive Manufacturing			
Date	January 8, 2015	Pages/Appendices	55
Supervisor(s) Mr Tatu Westerholm, Lecturer and Mr Esa Hietikko, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences			
<p>Abstract</p> <p>This final project was part of the DeAdMan-project in which Savonia University of Applied Sciences investigated possible design principles and methods of additive manufacturing. An objective of this final project was to investigate the fatigue testing of parts produced by metal additive manufacturing, compatibility of fatigue testing standards to metal additive manufacturing. Another aim was to compare the fatigue effect on material of traditional manufacturing to additive manufacturing and investigate the effect of surface roughness on the fatigue strength of parts produced by metal additive manufacturing.</p> <p>Fatigue testing was carried out by the axial force-controlled method based on SFS ISO 1099. In this final project fatigue life was theoretically estimated and compared to practical testing results for the material 316L. The test pieces were produced by traditional subtracting manufacturing and additive manufacturing. The traditional subtracting manufacturing was accomplished by machining whereas the additive manufacturing was accomplished by DMLS and 3DP processes. The material in reference test parts was similar to 316L. DMLS test parts were made of 316L and 3DP test parts were made of 420ss+bronze. The tests were performed with Walter +Bai AG model LFW 500- HH at HIT Savonia.</p> <p>The test results showed that the theoretical determined fatigue life was 24% higher than the actual tested fatigue life. The fatigue life of 3DP-specimen was 68% longer than the machined reference parts. The fatigue life of DMLS-specimen was 72% longer than the machined reference parts and 12% longer than that of the 3DP-specimen. The machined DMLS specimen had an average value of fatigue life of 428% more than the untreated DMLS specimen. The DMLS test results showed that when the importance of surface structures decreased the variation of test results increased and the importance of the internal structure grew. The investigations revealed that the determination methods of traditional theoretical fatigue life are not suitable for 3DP produced parts. The test results of DMLS specimen partly follow the estimation of traditional theoretical fatigue life.</p>			
Keywords Additive manufacturing, metal fatigue, fatigue testing, SFS ISO 1099, 420ss+bronze,316L			
Public			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	6
2	AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS .....	6
2.1	3D Printing (3DP).....	9
2.2	Selective Laser Sintering (SLS).....	10
2.3	Direct Metal Laser Sintering (DMLS) .....	10
3	METALLIN VÄSYMINEN .....	12
3.1	Väsymislaskenta .....	13
3.2	Väsytykokeet.....	14
3.3	Tekijät jotka vaikuttavat väsymisikään.....	16
3.4	WÖHLER - käyrä .....	17
3.5	Lovivaikutus väsymisessä .....	23
4	MURTUMISMENETELMÄT .....	26
4.1	Haurasmurtuma.....	26
4.2	Sitkeä murtuma .....	27
4.3	Väsymismurtuma .....	28
4.4	Ydintymät ja etenemisvaihe.....	29
5	MATERIAALIN OMINAISUUDET .....	30
5.1	Ruostumattomat teräkset .....	30
5.1.1	X2CrNiMo 17–12-2 (316L, DIN 1.4404) .....	31
6	VÄSYMISTESTAUS.....	32
6.1	Aikaisemmat tutkimukset aiheesta .....	32
6.2	Standardi aksiaaliseen väsytykokeeseen.....	34
6.3	Koekappaleet.....	36
6.4	Alkuarvot.....	37
6.5	Testaus .....	41
6.6	Testitulokset.....	47
7	YHTEENVETO.....	48
	LIITE 1: VETO-PURISTUSKOESAUVAN VALMISTUSPIIRUSTUKSET .....	52
	LIITE 2: MATERIAALIN EOS STAINLESS STEEL 316L TEKNISET OMINAISUUDET .....	53
	LIITE 3: I. MATERIALISE 420 SS+PRONSSI MATERIAALIN TEKNISET OMINAISUUDET .....	54
	LIITE 4: Lfv 500- HH VETO- JA VÄSYMISTESTAUSLAITTEISTON TEKNISET TIEDOT .....	55

## Määritteet

AM	Additive manufacturing
RP	Rapid Prototyping
RM	Rapid Manufacturing
SLA	Stereolithography
3DP	3D Printing
SLS	Selective Laser Sintering
LOM	Laminated Object Manufacturing
FDM	Fused Deposition Modelling
LENS	Fused metal deposition
Overhang	Roikkuvia muotoja
HCF	High Cycle Fatigue
LCF	Low Cycle Fatigue
$R_a$	Pinnan epätasaisuuksien aritmeettinen keskiarvo, yksikkö $\mu\text{m}$

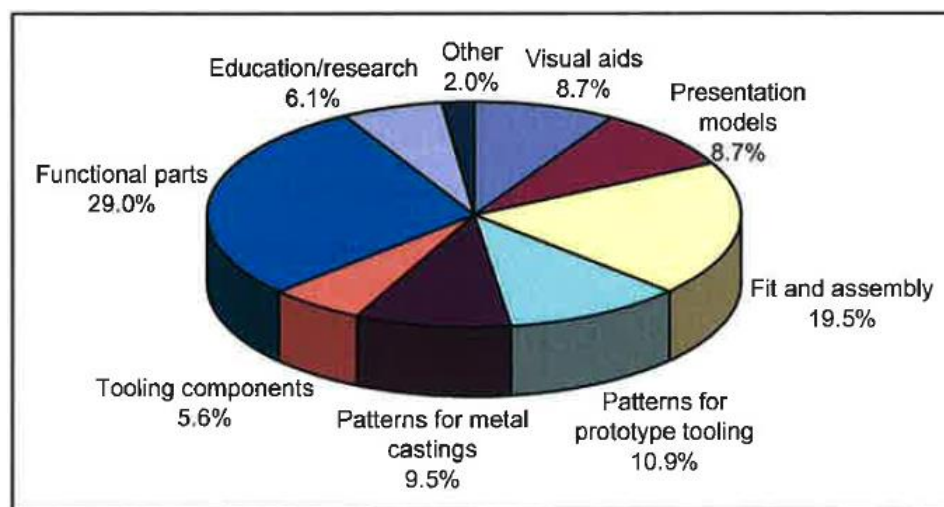
## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin osana Savonia-ammattikorkeakoulussa järjestettyä DeAdMan hanketta, jossa tutkittiin ainetta lisäävän valmistuksen teknologialla tuotettujen komponenttien suunnittelussa käytettäviä periaatteita, menetelmiä ja työkaluja. Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden väsymistä. Tutkimuksia ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden valmistusprosessin vaikutuksesta rakenteen väsymiseen on vähäistä. Opinnäytetyössä verrattiin ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen testauskappaleiden väsymiskestävyyttä teoreettisten laskujen antamiin tuloksiin sekä vertailukappaleiden väsymisikään, jotka valmistettiin ainetta poistavalla menetelmällä. Tavoitteina oli työssä toteuttaa väsytykokeet ainetta lisäävällä valmistuksella toteutetuille kappaleille ja sitä kautta selvittämään pystytäänkö ainetta lisäävää valmistusta käyttämään rakenteissa, johon kohdistuu väsyttävää kuormitusta.

## 2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

Ainetta lisäävä valmistus (AM) jota myös kutsutaan 3D-tulostukseksi, RP ja RM:ksi. Periaatteena ainetta lisäävällä valmistuksella on se, että siinä lisätään materiaalia kerroskerrokselta. CAD-malli muutetaan STL-muotoon jonka jälkeen malli siirretään valmistuskoneelle, jossa malli leikataan poikkipintageometrioiksi, jonka perusteella rakenne valmistetaan.

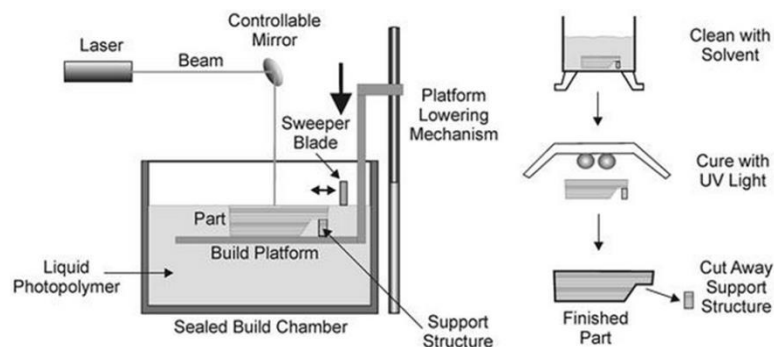
Ainetta lisäävä valmistus tuo tuotteen suunnittelulle enemmän vapauksia, koska siinä on vähemmän rajoitteita kuin esimerkiksi ainetta poistavissa valmistusmenetelmissä. Rakenne pystytään suunnittelemaan ajattelemalla sen toimintafunktioita eikä niinkään sen valmistettavuutta. Valmistukseen on jo kehitelty monia erilaisia valmistusmenetelmiä, joita ovat esimerkiksi SLA, 3DP, SLS, LOM, FDM ja LENS. Valmistusprosessit voidaan jakaa karkeasti materiaalin pursotus-, jauhepeti-, nestepeti- ja -suihkutusmenetelmiin. (Wohler associates 2014,28.)



KUVA 1. Ainetta lisäävän valmistuksen käyttö eri sovellusaloilla (Wohler associates 2014,20.)

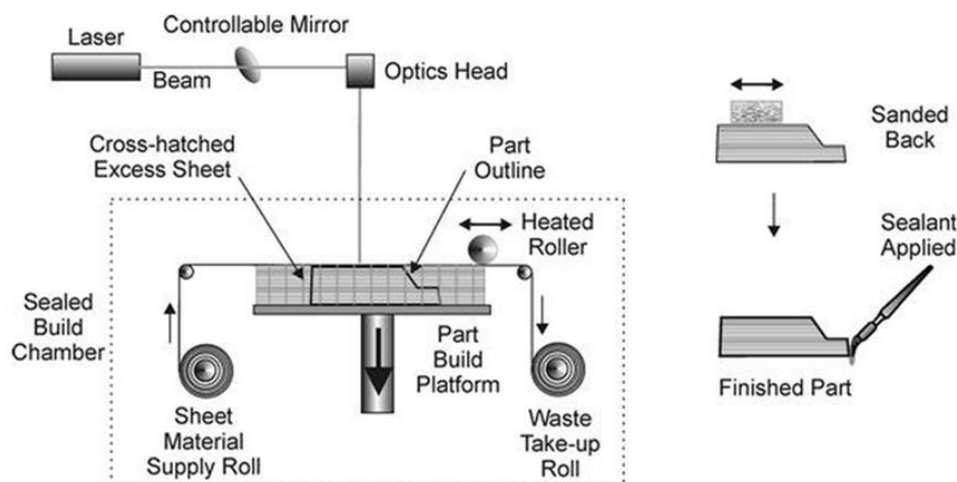
Kuvassa 1 näkyy,kuinka ainetta lisäävää valmistusta käytetään eri sovellusaloilla. Ainetta lisäävää valmistusta käytetään eniten toiminnallisissa osissa.

SLA-valmistusprosessissa (KUVA 2) pienitehoinen lasersäde on osoitettu peilin kautta jäljittämään 2D-poikkileikkauksukuvaa hyytelömäiseen fotopolymeeri hartsiin, joka on pystysuuntaisesti liikkuvan tason päällä. Ennen toimenpiteen toistettua pyyhkiä pyyhkäisee uuden kerroksen hyytelömäistä fotopolymeerihartsia edellisen kerroksen päälle. Edellä mainittu toimenpide suoritetaan rakennuskammiossa. Semmoisenaan kappale pitää huonosti muotonsa, joten se pitää kovettaa jälkikäsitteilynä UV-valossa. Viimeisenä kappaleesta tulee poistaa tukimateriaalit, jotka esimerkiksi tukevat negatiivisia olakkeita. (Swift, Booker 2013.)



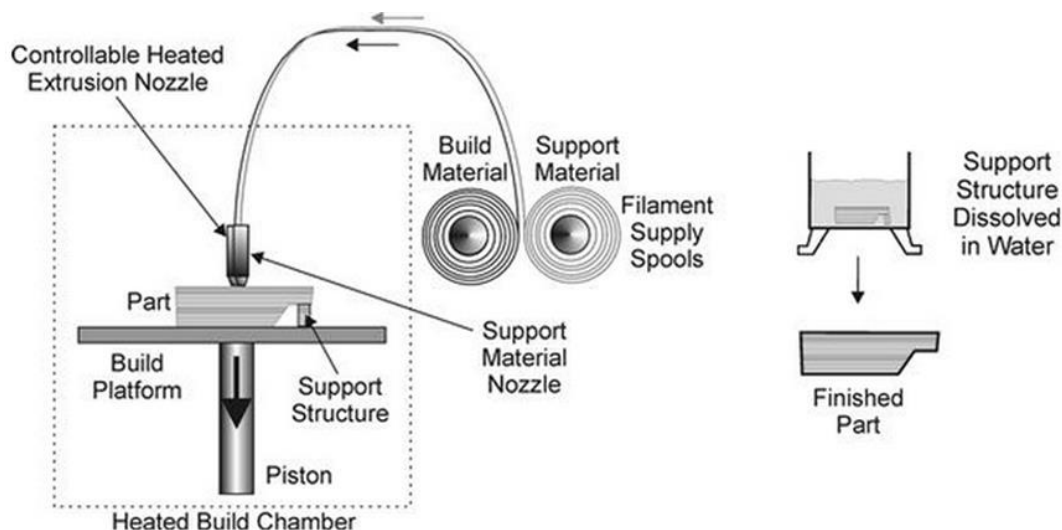
KUVA 2. SLA- valmistusprosessi (Swift, Booker 2013.)

LOM-valmistusprosessissa (KUVA 3) arkkimateriaali, joka on päällystetty sidosaineella liikutetaan rakennusalustalle käyttäen syöttörullaa, jonka jälkeen kuumennettu painerulla sitoo arkin aikaisempaan kerrokseen. Arkista leikataan kaksiulotteinen profiili CO<sub>2</sub>-lasersäteellä peillä ohjaten. Työtaso laskeutuu aina joka leikkauksen jälkeen saman verran, jotta samanlaatuinen kerrospaksuus säilyisi kaikissa kerroksissa. Edellä mainittu toimenpide toistetaan niin useasti, että saadaan rakennettua haluttu kolmiulotteinen rakenne. Poltettu hukka-arkki kelataan hukkakelalle, josta se on helppo poistaa. Rakenteen viimeistelyssä yleensä hiotaan pinta esimerkiksi hiekkapaperilla parantaen pinnanlaatua. Materiaalina voidaan käyttää paperia, joitakin kestopuoveja, metallifoliota ja keraameja. (Swift, Booker 2013.)



KUVA 3. LOM-valmistusprosessi (Swift, Booker 2013.)

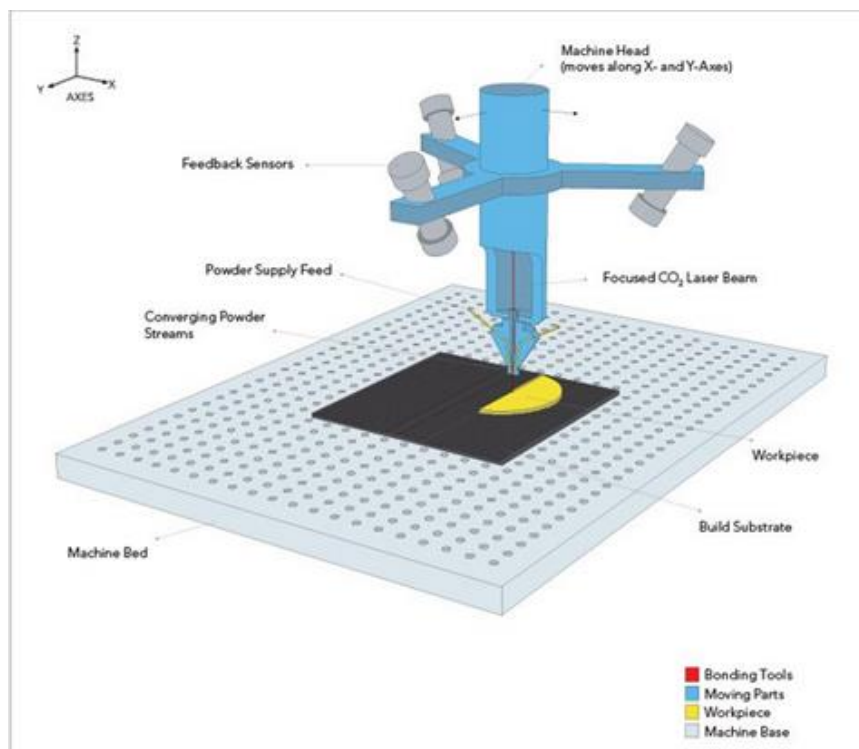
FDM-valmistusprosessissa (KUVA 4) käytetään lisäainelankaa, jota syötetään kuumennettuun suuttimeen, josta se tulee sulana rakennusaineena. Työalustassa ylläpidetään kuumuutta juuri rakennusaineen sulamislämpötilan alapuolella. Säädettyä suutinta liikutetaan horisontaalisesti työtasolla, jossa suutin luo kaksiulotteisesta poikkileikkauksesta ohuen kerroksen työalustalle. Sularakennusaine jäähtyy ja kovettuu edellisen kerroksen päälle luoden uuden kerroksen rakenteeseen. Työalusta laskeutuu tasaisesti kovettuneen kerroksen verran, minkä jälkeen prosessi alkaa alusta ja jatkuu niin kauan kuin 3D-rakenne on valmis. FDM:ssä voidaan käyttää pursottimia, joissa on useampi suutin kerrallaan. Yleisimmät materiaalit ovat PLA ja ABS. (Swift, Booker 2013.)



KUVA 4. FDM-valmistusprosessi (Swift, Booker 2013.)

LENS-valmistusprosessin on kehittänyt Sandia National laboratoriot Yhdysvalloissa ja kaupallisti Optomec. LENS-tekniikkaa käytetään yleensä täysmetallisiin prototyypeihin esimerkiksi lentoteollisuuteen, puolustustarviketeollisuuteen ja terveydenhuoltosektorille sekä pienten työkalujen ja työkalujen istukoihin ruiskutusvaluissa. LENS-prosessissa (Kuva 5) käytetään metallipulveria, joka syötetään suuttimesta lasersäteen polulle, joka sulattaa metallipulverin ja samalla laser sulattaa osakerroksen. Valmistusprosessissa laser sulattaa myös aikaisemman kerroksen josta seuraa vahva sidos syötettyjen kerroksien välillä. LENS-prosessissa voidaan käyttää materiaaleina ruostumattomia terässeoksia, alumiinia, titaania, maraging-terästä, nikkeli-kromia, kobolttia ja kuparia. Rajamitat ovat 305x305x305 mm. Pienin seinämänpaksuus voi olla 1,5 mm. (Bryden 2014.)

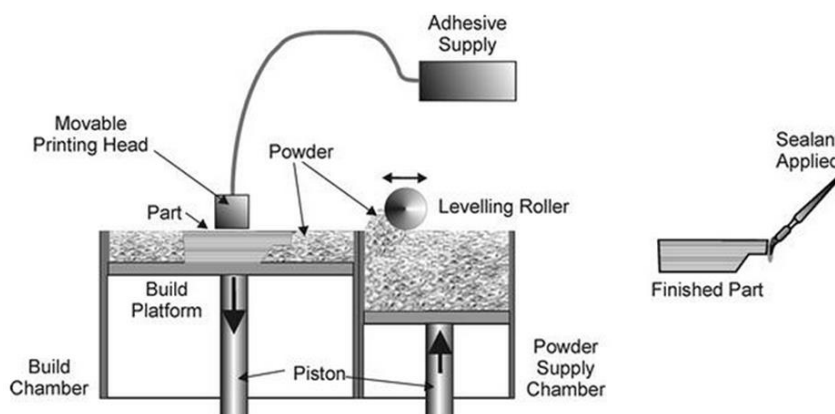




KUVA 5. LENS- valmistusprosessi (Bryden 2014.)

## 2.1 3D Printing (3DP)

3DP-valmistusprosessissa (KUVA 6) tulostuspää syöttää nestemäistä sidosainetta (liima) pulveriin rakennuskammiossa. Pulverihiukkaset liimautuvat toisiinsa ja tulostusalusta liikkuu tietyn verran alaspäin, jonka jälkeen on luotu tasapaksu kerros rakennetta. Seuraavaksi tela levittää uuden kerroksen edellisen päälle, jonka jälkeen suoritetaan edellä mainittu toimenpide uudelleen. Prosessista saadaan kolmiulotteinen kappale, mikä puhdistetaan ylimääräisestä pulverista ja sidosaineesta. Yleensä valmistuksen jälkeen kappale on hauraassa tilassa, minkä vuoksi suoritetaan infuusio, jossa imeytetään lisämateriaali tukevoittamaan rakennetta. Metallirakenteille infuusio toteutetaan alipaineuunissa noin 1100 °C lämpötilassa, jossa voidaan imeyttää infiltraation avulla esimerkiksi pronssia. (Swift, Booker 2013.)

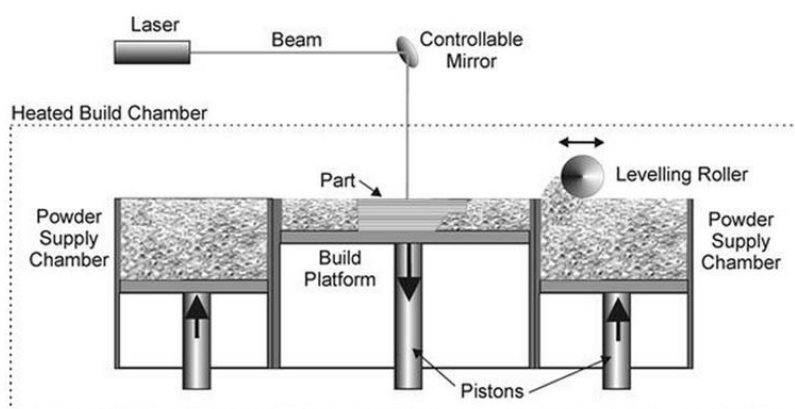


KUVA 6. 3DP-valmistusprosessi (Swift, Booker 2013.)

## 2.2 Selective Laser Sintering (SLS)

SLS-valmistusprosessissa korkeatehoinen lasersäde ohjataan peiliä käyttäen tekemään kaksiulotteinen poikkileikkaus valmistettavasta rakenteesta sintrauspulveriin. Pulverin hapettuminen ehkäistään siten, että se on tiivistetyssä typpi-atmosfääri kammiossa. Pulveri esikuumennetaan kuumentuskammiossa (KUVA 7) juuri sulamislämpötilan alapuolelle. Työalusta laskeutuu aina sintrauksen jälkeen kerroskerrokselta saavuttaen samanlaiset kerrospaksuudet kaikille kerroksille.

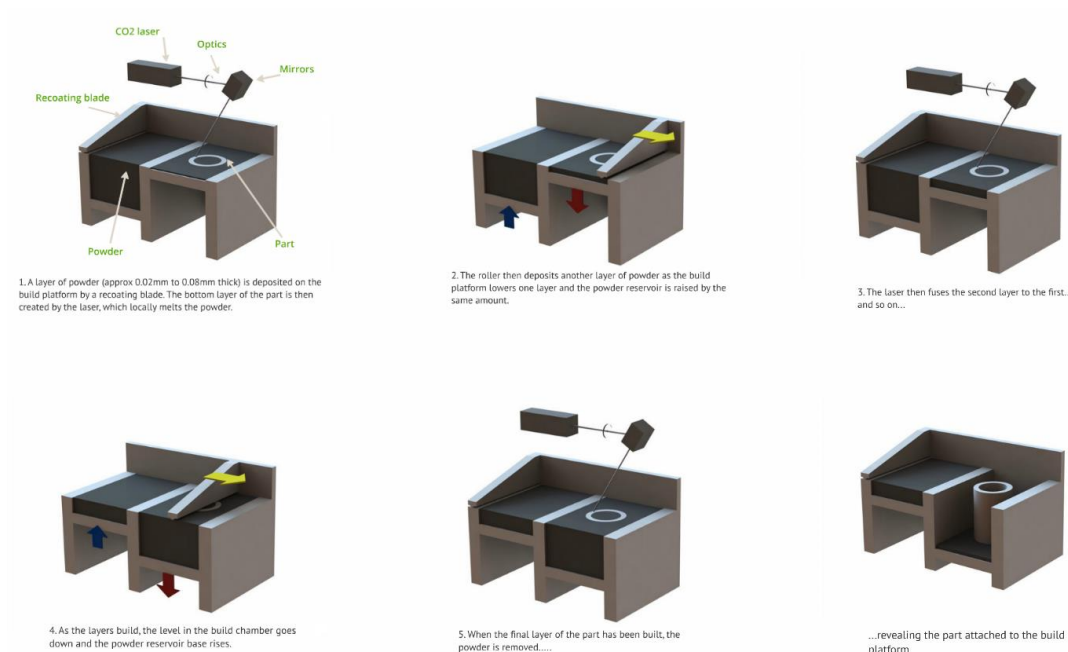
Pulverin levitysrulla pyyhkäisee uuden kerroksen pulveria, johon seuraava kaksiulotteinen poikkileikkauskuva sintrataan. Toimenpidettä jatketaan niin pitkään kuin kolmiulotteinen malli on valmis. Rakenteen valmistuttua poistetaan ylimääräinen pulveri harjaamalla ja imuroimalla. (Swift, Booker 2013.)



KUVA 7. SLS- valmistusprosessi (Swift, Booker 2013.)

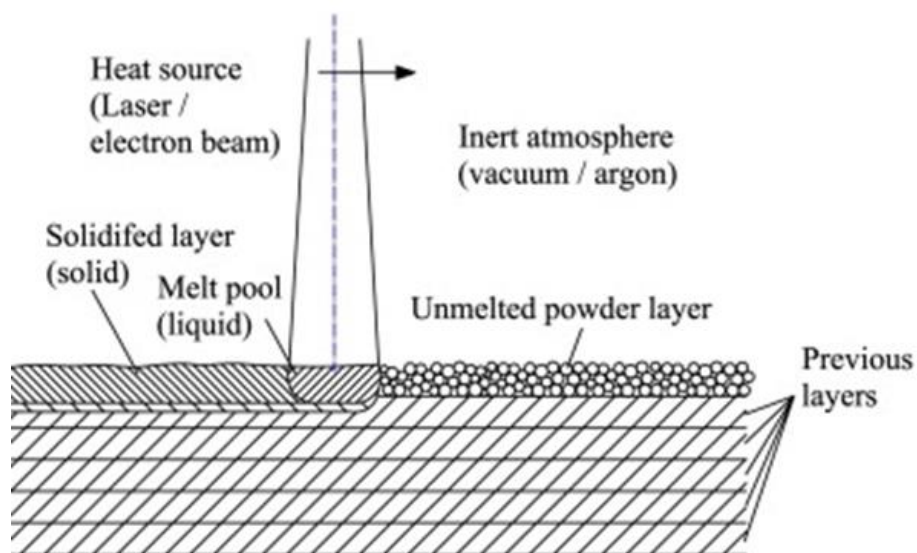
## 2.3 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

DMLS-valmistusprosessi (KUVA 8) on variaatio SLS-tekniikasta jota käytetään metallien ja keramiikkakomposiittiosien valmistukseen. DMLS-variaation on kehittänyt EOS e-Manufacturing Solutions. DMLS-prosessissa käytetään erittäin hienorakeista pulveria (Kuva 9) ja siinä ei käytetä mitään sidonta aineita. 2D-poikkileikkaus kuvanto sintrataan suoraan inertissä atmosfäärissä esimerkiksi argonissa. DMLS voidaan saavuttaa 99–100% tiiveys kappaleissa, mutta tukirakenteita tarvitaan negatiivisten ulokkeiden, jotka ylittävät 45 astetta eli niin sanottujen "overhanging" tukemiseen. (Swift, Booker 2013.) Suunnittelussa tulee myös huomioida lämmönjohdettavuus valmistusvaiheessa (Leino 2014).



KUVA 8. DMLS- valmistusprosessi (Ayre 2014.)

Valmistetut kappaleet joudutaan vielä jälkikäsittelmään niin, että poistetaan tukirakenteet. Väsymiskestävyyden parantamiseen käytetään jälkikäsittelyssä kuulapuhallusta ja kiilloitusta. DMLS-käytettäviä lasertyyppisiä ovat Yb-kuitu tai CO<sub>2</sub>, tehoiltaan 100 W:sta jopa 200W. Kerroksien paksuus valmistuksessa on noin 0,02 mm. Mittatoleranssit ovat  $\pm 0,05$  ja  $\pm 0,25$  mm välillä. (Swift, Booker 2013.)



KUVA 9. Kuvaus ainetta lisäävästä valmistuksesta (Brandt 2011.)

### 3 METALLIN VÄSYMINEEN

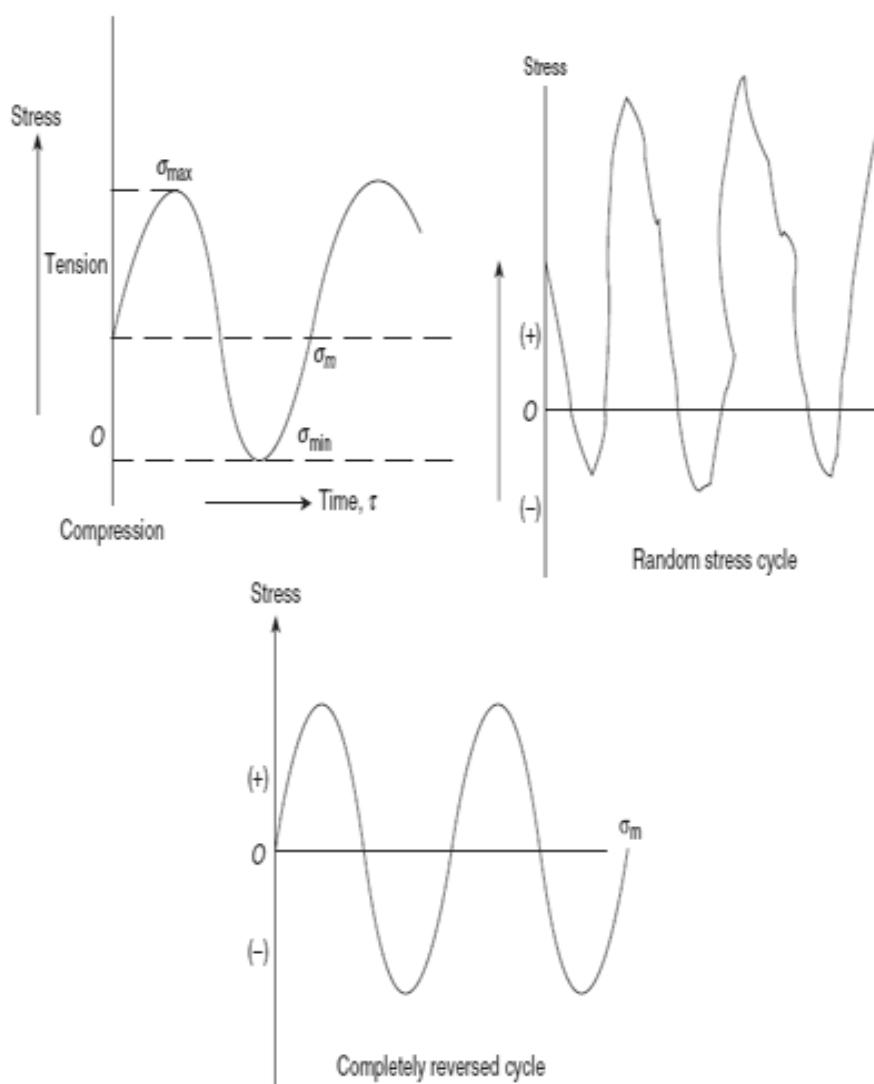
Kuormitusvaihtelujen aiheuttamaa vaurioiden yhdistymisprosessia kutsutaan materiaalin väsymiseksi. Väsymistä säätelevät monet materiaaliopin lainalaisuudet kuten kimmo- ja plastisuusteoriat. Valmistustavalla ja pinnanlaadulla on suuri vaikutus väsymisen muodostumiselle ja etenemiselle.

Materiaalin murtuminen tapahtuu, kun rakenneosaa tai koneenosaa kuormitetaan staattisesti niin, että vertailujännitys rasiitetuimmassa pisteessä ylittää materiaalin murtorajan  $R_m$ . Dynaamisessa eli vaihtuvassa kuormituksessa murtumisprosessi on paljon monimutkaisempi kuin staattisessa. Dynaamisessa kuormituksessa kuormitusvaihtelut aiheuttavat materiaaliin mikroskooppisia vaurioita, jotka yhdistyvät aikaisempien kuormitusvaihtelujen aiheuttamien vaurioiden kanssa. (Salmi 2010, 353.)

Väsymisteoria eroaa monessa suhteessa perinteisen lujuusopin ilmiöistä, koska niissä voidaan johtaa laskukaavat analyyttiseen tapaan, kuten palkintaivutus- ja pisteenjännitystilanteoriassa. Vuosina 1953–1954 sattui kolme Comet -suihkumatkustajakoneen tapaturmaa, jossa oli syynä runkomateriaalin väsyminen. Materiaalin väsymisen aiheuttamien tapaturmien johdosta väsymisen laskenta- ja koemenetelmät ovat kehittyneet paljon. 1970-luvulla on kehitetty tärkeimmät työkalut tämän päivän väsymisenlaskentaan, joita sovelletaan insinööritieteiden aloilla. Väsymismitoitukseen on laadittu standardi (EN 1993-1-9), jossa on määräyksiä väsymismitoitukselle. (Salmi 2010, 353.)

Väsymismurtuma tapahtuu kolmessa vaiheessa, jossa ensimmäisessä vaiheessa ytimessä tapahtuu hienohalkeama atomitasolla, toisessa vaiheessa halkeama leviää ja kasvaa kuormitus syklien jatkues- sa ja kolmannessa vaiheessa tapahtuu äkillinen murtuma yleensä kohtisuorassa suunnassa jännityk- sen kanssa. (U.C. Jindal 2012.)

Kappaleeseen kohdistettu jännitys voi olla aksiaalista eli puristusta tai venymistä, taivutusta eli vaih- tokuormitusta sekä myös vääntöä tai näitten yhdistelmiä. Pääsääntöisesti on vain olemassa kolme erilaista jännitys vastaan syklien lukumäärä tapausta. Alla olevassa kuvassa 10 näkyvät eri kuormi- tustyypin aiheuttamat jännitysvaihtelut. (U.C. Jindal 2012.)



KUVA 10. Eri kuormitustyyppien aiheuttamat jännitysvaihtelut (U.C. Jindal 2012.)

### 3.1 Väsymislaskenta

Päätarkoituksen väsymisen laskennassa on määrittää elinikä kappaleelle, jota kuormitetaan vaihtelevalla kuormituksella. Väsymislaskentapohja perustuu runsaitten testien aineistoihin sekä tuloksiin, joista on voitu johtaa materiaalien erilaisia käyttämisapoja.

Väsymisvaurion alku perustuu mikroskooppisten materiaalin säröihin, jotka kuormitusten jatkuessa kumuloituvat isoimmaksi makroskooppisiksi alkusäröiksi. Särön kasvua voidaan ennustaa murtumismekaniikassa tilastollisesti ja Parisin kaavaa käyttäen. Palmgren-Miner säännöstä johdetulla kaavalla voidaan määrittää väsymisikä rautametalille. (Ikonen 1986,202.)

Toistuvasta kuormituksesta johtuvat plastiset muodonmuutokset aiheuttavat materiaalin väsymisen. Perinteisessä väsymisen laskennassa, jota kutsutaan jännitysmenetelmäksi (HCF), jännitysmenetelmässä kappaleen plastinen muodonmuutos on pientä, koska kappaleen elinikä voi olla kymmenestä-tuhannesta syklistä sataanmiljoonaan sykliin.

Pienen plastisenmuodonmuutoksen takia sitä ei huomioida laskennassa, perinteisessä väsymisen laskennassa otetaan huomioon vain koetulokset ja niistä arvioitu kappaleen kokonaiselinikä. (Salmi 2010, 355.)

Kuormituksen kasvaessa kappaleen elinikä vähentyy ja plastinenmuodonmuutos kasvaa isommalle alueelle, jonka seurauksen väsymisvaurio etenee nopeammin. Myötäväsymislaskenta (LCF), jota voidaan myös kutsua suuremman plastisenmuodonmuutoksen takia venymämenetelmäksi. Elinikä-alue venymämenetelmällä on muutamasta syklistä kymmeneentuhanteen sykliin. Venymämenetelmää käytetään yleisimmin silloin, kun tiedetään rakenteessa olevan geometrisiä epä-jatkuvuus kohtia.

Erottaakseen milloin kannattaa käyttää perinteistä väsymislaskentaa ja milloin myötäväsymislaskentaa on pääperiaate, että jos kuormituksen aiheuttaman jännitys kriittisessä pisteessä on jatkuvasti korkeampi kuin kappaleen materiaalin myötöraja, niin silloin on tarkoituksenmukaista käyttää myötäväsymislaskentaa. (Salmi 2010, 355.)

## 3.2

### Väsytykokeet

Päätestausmenetelmät väsymiselle ovat veto-puristuskokeet, taivutuskokeet ja vääntökokeet. Kuvassa 8 näkyvät erilaiset kuormitustapaukset, jossa esim. veto-puristuskuormituksessa tuleva jännitysvaihtelu muodostaa sinikäyrän muotoista funktiota.

Compression eli veto-puristus kuormitus, jossa keskijännitys  $\sigma_m > 0$ . Joka saadaan kaavalla

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (1)$$

Jossa  $\sigma_{\max}$  on maksimijännitys ja  $\sigma_{\min}$  on minimijännitys. Jännitteen ollessa koko ajan negatiivinen on kyseessä puristustykytyksestä ja jos jännitteen ollessa koko ajan positiivinen on kyseessä vetotykytystä. Jännitysamplitudi  $\sigma_a$ , joka kertoo jännitysheilahduksen keskijännityksestä  $\sigma_m$  yhden syklin aikana. Jännitysamplitudi saadaan kaavalla (2)

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2)$$

Jännitysvaihtelu  $\Delta\sigma$ , joka kertoo kokonaisjännitysvaihtelun yhden syklin aikana.  $\Delta\sigma$  saa kaavalla

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (3)$$

Jännityssuhde  $R_s$  on maksimijännitys  $\sigma_{\max}$  ja minimijännityksen  $\sigma_{\min}$  suhde, joka saadaan kaavalla

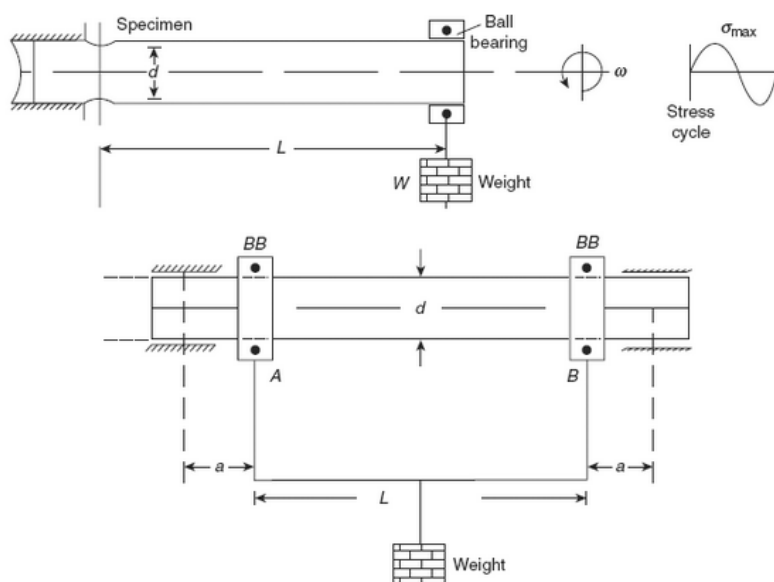
$$R_s = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (4)$$

Jännityssyklien lukumäärää merkitään kirjaimella  $n$  ja kestonlukua merkitään  $N$ , joka kuvaa toisin sanoen väsymisikää tietyllä jännitystasolla. Kestolukua  $N$  mitataan käyrästössä 10 logaritmisessa koordinaatistossa. Merkintä  $\sigma_N$  ilmoittaa kestorajan jännityksen tietyn kestonluvun  $N$  hetkellä. (Salmi 2010, 356–357; U.C. Jindal 2012.)

Completely reversed cycle eli vaihtokuormitus, jossa  $\sigma_m = 0$  ja jossa jännitys vaihtelee  $-\sigma$  ja  $+\sigma$  välillä (Kuva 8). Vaihtelukuormituksessa kestoraja  $\sigma_N$  yhtä suuri kuin jännitysamplitudi, koska syklien lukumäärä  $n$  on sama kuin kestonluku  $N$  keskijännityksellä  $\sigma_m$ . (U.C. Jindal 2012.)

Kahteen viimeisimpään tapaukseen eli veto-puristuskuormitus ja vaihtokuormitukseen pystytään laskemaan rakenteen elinikä vakioamplitudisen kuormituksen perusteella. Kolmannessa eli random stress cycle, joka tarkoittaa epäsäännöllistä kuormitusta, jossa kuormituksen amplitudi vaihtelee ajanfunktiona. Tähän tulee soveltaa jännitys- ja venymämenetelmiä. Vaihtokuormituksen laskennassa kuormitusspektri eli kuormitushistoria määritetään joukoiksi vakioamplitudisia kuormitussyklejä johon yleensä käytetään kahta menetelmää, jotka ovat Rainflow - menetelmä ja vesisäiliömenetelmä. (Salmi 2010, 356–357.) (U.C. Jindal 2012.)

Vaihtokuormituksella kuormitetussa kappaleissa murtuminen tapahtuu kaikkein tehokkaimmin ja sen takia tutkimuksissa yleisin standardin mukainen testaus toteutetaan niin, että kappaleet altistetaan väännölle ja taivutukselle kuva 11 (a) ja (b).



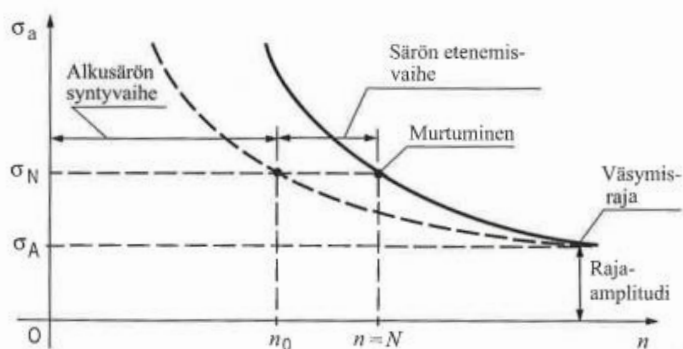
KUVA 11. (a) Ulokkeellinen taivutus ja vääntö ja (b) puhdas taivutus testimalli (U.C. Jindal 2012.)

Kuvassa 11 (a) on testattava kappale, joka on kuormitettu ulokkeellisesti taivuttamalla laakerikuormituksella, joka aiheuttaa taivutusmomentin  $WL$  kappaleen lovettuun eli kriittisempään kohtaan. Jos  $d$  on kappaleen halkaisija, silloin maksimitaivutusjännitys  $\sigma_{\max}$  saadaan kaavalla (5)

$$\sigma_{\max} = \frac{32WL}{\pi * d^3} \quad (5)$$

Kuvassa 11 (a) näkyy myös jännitysvaihtelu kyseisen jännityspisteen kohdalla. Kuva 11 (b), jota kutsutaan MOORE:n standarditestiksi. Tässä testissä laakerikuormitus kohdistuu kappaleeseen symmetrisesti ja kappaleeseen kohdistuva taivutusmomentti on jatkuva kohtien A ja B välillä. Symmetrisen kuormituksen takia kohdassa A ja B on yhteneväinen taivutusmomentti  $Wa$ . Pinnassa oleva taivutusjännitys  $\sigma_{\max}$  saadaan kaavalla (U.C. Jindal 2012.)

$$\sigma_{\max} = \frac{32Wa}{\pi * d^3} \quad (6)$$



KUVA 12. Jännitys-elinikä-käyrä (Salmi 2010,357.)

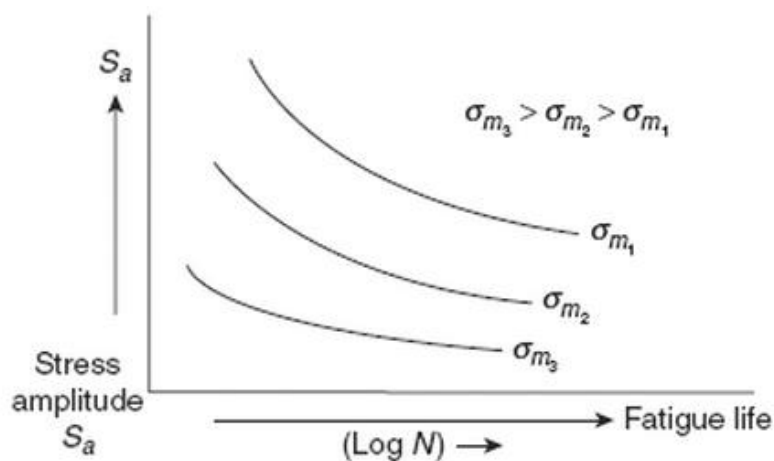
Kuvassa 12 näkyy, kuinka jännitysamplitudin kasvaessa kuormitussyklien lukumäärä pienenee ja miten särönkasvu lisääntyy. Särön kasvusta kerrotaan kappaleessa ydintyminen ja särön eteneminen enemmän.

Raja-amplitudi  $\sigma_A$ , kuvaa jännitysamplitudia kun keistoluku  $N$  eli väsymisikä on ääretön ja  $\sigma_N$ , kuvaa keistolukua  $N$  vastaavaa jännitysamplitudia. (Salmi 2010, 357.)

### 3.3 Tekijät, jotka vaikuttavat väsymisikään

Väsymisikään vaikuttavia tekijöitä ovat mm. keskijännitys  $\sigma_M$ , pinnankarheus, kappaleen suunnittelu ja ympäristön kemiallinen koostumus.





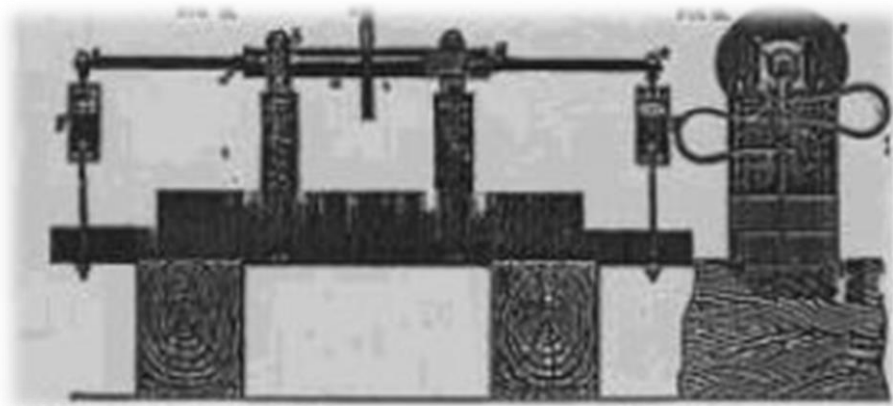
KUVA 13. Jännitys-elinikä-käyrä (U.C. Jindal 2012.)

Kuva 13 esittää, kuinka rakenteen keskijännityksen kasvu vähentää väsymisikää. Monissa yleisissä kuormitustapauksissa, maksimijännitys rakenteessa kohdistuu sen pinnalle, joten pinnanlaadulla ja pintakäsittelyllä on suuri merkitys väsymisiän parantamiseen. (U.C. Jindal 2012.)

Rakenteen suunnittelun yksityiskohtaisilla ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus väsymiseen. Kaikki lovet, kuten kiilaurat tai geometriset epäjatkuvuuskohdat kuten, akselinuritus tai rihlaukset lisäävät rakenteessa olevia jännityksiä. (U.C. Jindal 2012; Tähtinen 2009, 16.) Ympäristön vaikutus ja sen kemiallisella koostumuksella on todella merkittävä vaikutus materiaalin käyttäytymiseen esimerkiksi korroosioväsymisessä, jossa korroosion ja jännityksen vaihtelut rakenteissa nopeuttavat vaurioitten syntymistä. Korroosioväsyminen ilmenee yleisimmin sellaisissa paikoissa, joissa rakenne tai materiaali on tekemisissä muiden paikallisten korroosioiden muodoille. On havaittu että kloridipitoinen ympäristö altistaa hyvin helposti austeniittisen teräksen korroosioväsymiselle. (Korroosionesto: Esiintymismuodot.)

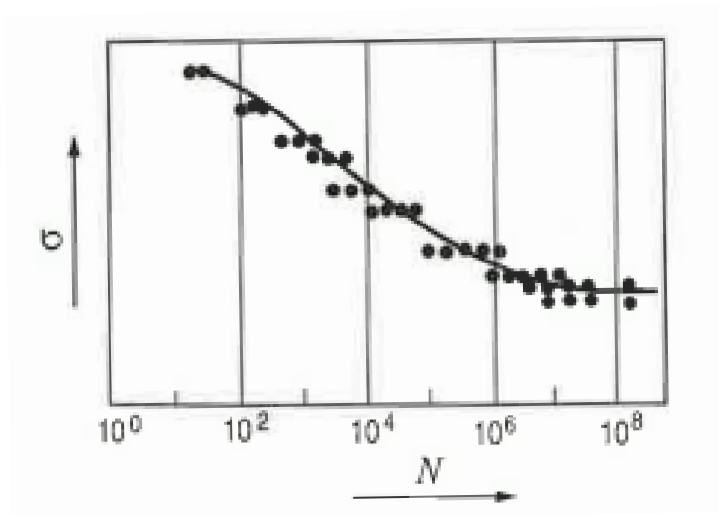
### 3.4 WÖHLER - käyrä

August Wöhler alkoi tutkia junavaunujen ja veturien akseleitten murtumisen syitä vuonna 1850. Wöhler suoritti kokeita, joissa akseleita kuormitettiin dynaamisesti erilaisilla kuormituksilla (KUVA 14). Kokeista ilmeni kaksi merkittävää löytöä, joista ensimmäinen oli että rautamateriaalit kestävät teoriassa äärettömän kauan, jos vain jännitysamplitudi pysyy alle materiaalin väsymisrajan.



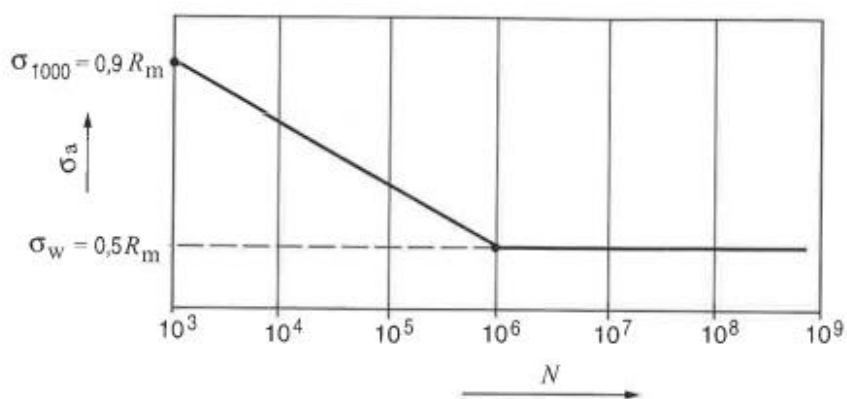
KUVA 14. WÖHLERIN testausmenetelmä (ATZ Online.)

Seuraavissa kokeissa ilmeni, että jännitysvaihtelun  $\Delta\sigma$  merkitys on suurempi väsymisen kannalta kuin maksimijännityksen. (Salmi 2010,354.)



KUVA 15. Standarditestin WÖHLER- käyrä (Salmi 2010,354.)

Väsymisentestauksesta saadut tulokset voidaan kuvata jännitys-elinikä-käyrällä, jota myös kutsutaan WÖHLER-käyräksi (KUVA 15). WÖHLER-käyrän yksinkertaistettu versio (KUVA 16) on rautametalleille log-log-asteikolla, jossa on selvä taite  $10^6$  kuormitusyökkien kohdalla, jonka jälkeen loppuosa on suora. WÖHLER-käyrä ilmaistaan yleensä keskijännityksen  $\sigma_m$  ollessa nolla. (Salmi 2010,359;Ikonen 1986,193.)



KUVA 16. Yksinkertaistettu WÖHLER- käyrä (Salmi 2010,354.)

WÖHLER- käyrän määrittäminen alkaa 1000 kuormitusyökin kohdalta, jos 1000 sykliä vastaavaa aikalujuutta materiaalille ei ole annettu, niin sen arvio voidaan laskea kaavalla (7)

$$\sigma_{1000} = 0,9 * R_m \quad (7)$$

Jossa  $R_m$  on materiaalin murtolujuus. Seuraavaksi tulee määrittää vaihtolujuus  $\sigma_w$ , teräksillä vaihtolujuus vaihtelee yleensä  $0,35 * R_m \dots 0,60 * R_m$  mutta, jos materiaalille ei ole annettu vaihtolujuutta voidaan arvioida kaavalla (8)

$$\sigma_w = \begin{cases} 0,50 * R_m & , R_m \leq 1400 \text{ MPa} \\ 700 \text{ MPa} & , R_m > 1400 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

Kuvaaja on suora välillä  $10^3 \dots 10^6$  log-log- asteikolla, jossa logaritmisen asteikon kantaluku on 10. Kohdassa  $10^6$  alkaa vaakasuora osuus, jossa kuvassa 8 näkyvä materiaalin vaihtolujuus  $\sigma_w$  sijaitsee. Tärkein yksittäinen parametri väsymyksen mitoituksessa on vaihtolujuus, koska jos kuormituksesta aiheutuva jännitysamplitudi  $\sigma_a$  on pienempi kuin vaihtolujuus  $\sigma_w$  teoriassa rakenne kestää äärettömän määrän kuormitusyöklejä. (Salmi 2010,361.)

Seuraavaksi määritetään yhtälö  $10^3 \leq N \leq 10^6$  väliselle suoralle kaavalla:

$$\log(\sigma_a) - \log(0,9 * R_m) = \frac{\log(0,5 * R_m) - \log(0,9 * R_m)}{\log 10^6 - \log 10^3} * (\log(N) - \log(10^3)) \quad (9)$$

Kun yhtälöä sievennetään päästään yhtälöön:

$$N = \left( \frac{\sigma_a}{1,6218 * R_m} \right)^{-11,75} \quad (10)$$

Yhtälö voidaan myös kirjoittaa muodossa:

$$\sigma_a = 10^\alpha * N^b \quad (11)$$

Seuraavaksi saadaan lausekkeet parametrille  $\alpha$  ja  $b$  ehdoilla  $\sigma_a = \sigma_{1000}$ ,  $N = 10^3$  ja  $\sigma_w = \sigma_a$ ,  $N = 10^6$

$$\alpha = \log\left(\frac{\sigma_{1000}^2}{\sigma_w}\right) \quad , \quad b = -\frac{1}{3} * \log\left(\frac{\sigma_{1000}}{\sigma_w}\right) \quad (12)$$

Mistä saadaan yhtälö

$$N = 10^{\frac{-\alpha}{b}} * \sigma_a^{\frac{1}{b}} \quad (13)$$

Kaavasta (13) pystytään laskemaan ennustettu kestoikä rakenteelle. Harvoin rakenteen testausympäristö vastaa todellista rakenteen toimintaympäristöä, joten väsymisen mitoituksen otetaan mukaan kertoimia, jotka kuvaavat muun muassa kappaleen kokoa, kuormitustyyppiä, pinnanlaatua, pintakäsittely ja ympäristötekijöitä. Yleensä väsymiskestävyyteen vaikuttavat tekijät otetaan huomioon vain vaihtolujuudessa. Oletetaan etteivät ulkoiset tekijät tule vaikuttamaan 1000 syklin eli  $\sigma_{1000}$  kestorajaan vähäisen kuormituskertojen takia. (Salmi 2010,361–367.)

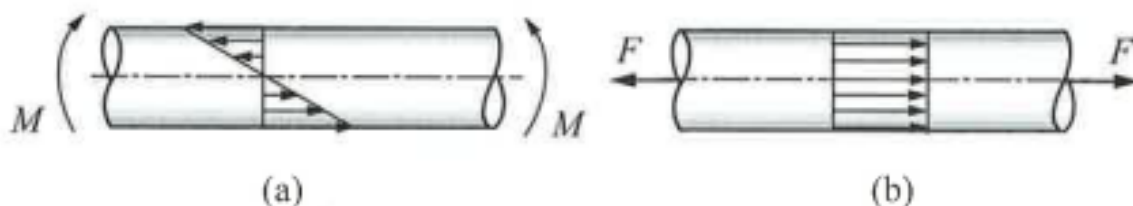
Redusoitu vaihtolujuus lasketaan kaavalla:

$$\sigma_w^{\text{red}} = (c_1 c_2 c_3 \dots) \sigma_w \quad (14)$$

Jossa  $c_1$  on kappaleen mittakerroin kerroin, joka otetaan huomioon taivutus- ja vääntökuormitetuissa kappaleissa testeihin tukeutuvilla kaavalla (Salmi 2010,367)

$$c_1 = \begin{cases} 1 & d < 8\text{mm} \\ 1,189 * d^{-0,097} & d > 8\text{mm} \end{cases} \quad (15)$$

Kaavaa voidaan perustella niin, että kun kuormitetaan taivutuksella tai väännöllä pientä tai suurta kappaletta, on silloin kappaleissa olevat reunajännitykset yhtä suuret, mutta isommassa kappaleessa on suurempi materiaalitilavuus. Ja sen vuoksi tulee suurempi määrä mikroskooppisia materiaalivikoja, jotka kuormittuvat korkeille jännityksille, jolloin on todennäköisempää, että suurempaan kappaleeseen syntyy alkusärö nopeammin kuin pienempään. Aksiaalisessa kuormituksessa eli veto- ja puristuskuormituksessa on  $c_1=1$ , koska kappaleeseen syntyy poikkileikkaukseen likimain tasainen jännityskenttä (KUVA 17), jonka seurauksena kappaleen koolla ei ole niin suurta merkitystä.



KUVA 17. Jännityskentät vedossa ja taivutuksessa (Salmi 2010,361-368.)

Kaavassa (14) oleva  $c_2$  on kuormitustyyppi kerroin. Väsymiskestävyyden kannalta on kuormitustyyppillä merkitystä. Puhtaalla taivutuksella kuormiteltaessa poikkileikkauksen jännityskenttä on lineaarisesti muuttava (KUVA 17). Aksiaalisessa kuormituksessa jännityskenttä jakautuu likimain tasaisesti poikkileikkaukseen. Testien mukaan arvioitu kuormitustyyppin kerroin  $c_2$  aksiaalisessa kuormituksessa on (Salmi 2010,361–368.)

$$c_2 = 0,7 \quad (16)$$

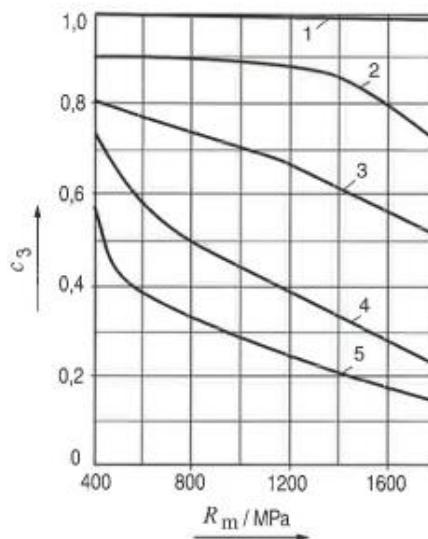
Väännössä sitkeä terämateriaali tottelee melko hyvin von MISESi:n murtumishypoteesia ja sen takia taivutuksen vertailujännitystä apuna käyttäen saadaan väännössä

$$\frac{\sigma_{\text{vääntö}}}{\text{VVEH}} = \sqrt{3} \tau_{xy} \quad , \quad \frac{\sigma_{\text{taivutus}}}{\text{VVEH}} = \sigma_x \quad (17)$$

$$\rightarrow \tau_w = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577 * \sigma_w \quad (18)$$

reduointiparametriksi  $c_2=0,577$ . (Salmi 2010,361–368.)

Pinnanlaadulla on suuri merkitys kappaleen väsymiskestävyyteen, kappaleessa niitä voi olla geometriset epätasaisuudet tai pinnan veto-jännösjännitykset. Kaksi edellä mainittua helpottavat alkusäröjen syntymistä, mikä näin ollen vähentää väsymiskestävyyttä. Pinnanlaadun kerroin  $c_3$  pystyy määrittämään käyrästöstä (KUVA 18). (Salmi 2010,361–369.)



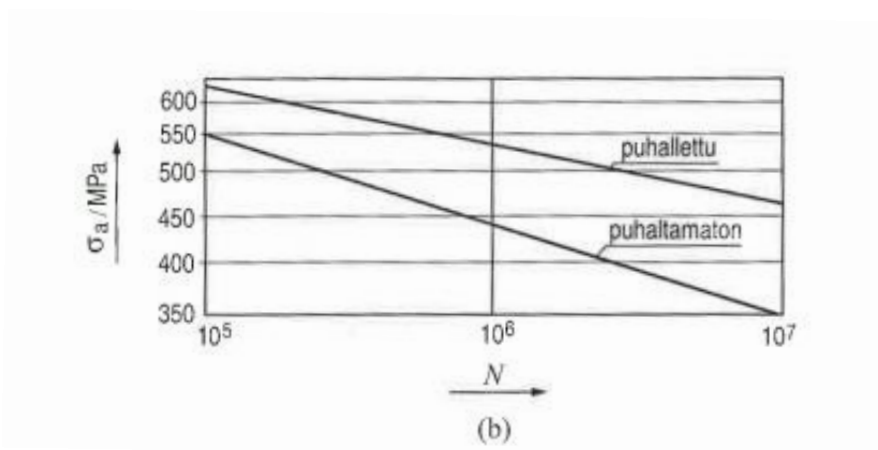
KUVA 18. Pinnanlaatu käyrästö (Salmi 2010,369.)

Kuva 18 esittää kuinka pinnanlaadun merkitys kasvaa murtolujuuden  $R_m$  kasvaessa. Kuvassa 18 käyrät 1-5 ovat

1. Kiillotettu
2. Hiottu
3. Koneistettu tai kylmävedetty
4. Kuumavalssattu
5. Taottu.

Pintakäsittelyssä on merkittävintä se, että minkälaisen jännityskentän se tekee rakenteen pintaan, oli pintakäsittely pinnoitusta, lämpökäsittelyä tai mekaanista. Olennaista väsymiskestävyyttä parannaessa pintakäsittelyssä on, että pinnoitettavan kappaleen pintaan jää puristava jäännösjännitys, jos taas jäännösjännitys on vetojännitystä niin silloin se heikentää väsymiskestävyyttä. Sen takia  $c_4$  parametri voi olla ykköstä suurempi tai pienempi luku. (Salmi 2010,361–370.)

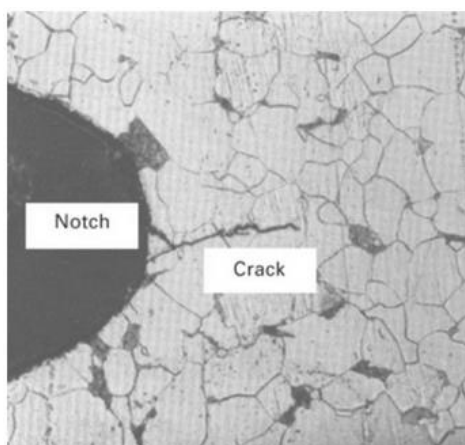
Kuulapuhalluksessa saadaan esimerkiksi 1mm syvä puristusjännitysvyöhyke, joka parantaa rakenteen väsymiskestävyyttä huomattavasti (KUVA 19).



KUVA 19. Hiekkapuhalluksen vaikutus väsymiskestävyyteen (Salmi 2010,370.)

### 3.5 Lovivaikutus väsymisessä

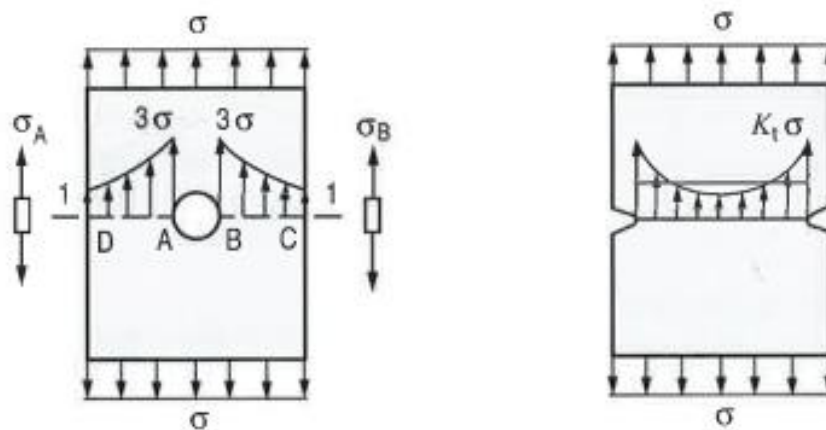
Geometristen epäjatkuvuuskohtien kuten lovet (KUVA 20), olakkeet ja reiät aiheuttavat jännityskeskittymiä kappaleessa, joka taas heikentää sen väsymiskestävyyttä.



KUVA 20. Lovesta alkanut särö (Mouritz 2012.)

Maksimijännityksen  $\sigma_{\max}$  tarkoitetaan paikallista jännityshuippua ja nimellisjännityksellä  $\sigma_{\text{nim}}$  tarkoitetaan nimellisjännitystä, joka on kaukana kappaleen epäjatkuvuuskohdasta. Maksimijännityksen ja nimellisjännityksen suhdetta kutsutaan lovenmuotoluvuksi  $K_t$ .

$$K_t = \sigma_{\max} / \sigma_{\text{nim}} \quad (19)$$



KUVA 21. Jännityshuiput reiällisessä ja lovetussa levyssä (Salmi 2010,374.)

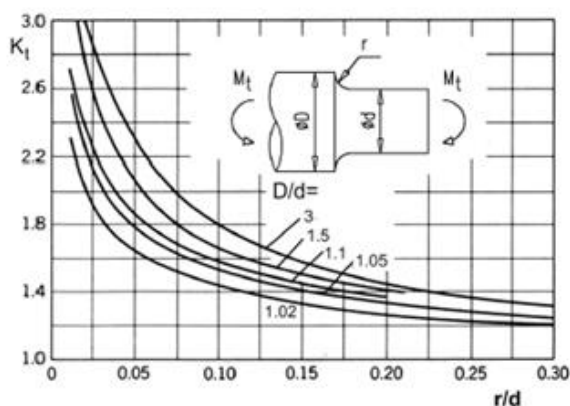
Kuva 21 kertoo, kuinka jännitykset jakautuvat reiällisessä levyssä. Reiällisessä levyssä syntyy jännityshuippu noudattaen lineaarista kimmoteoriaa ympyrämuotoisen reiän reunaan

$$\sigma_{\max} = 3 * \sigma \quad (20)$$

Lovetussa levyssä tulee lovenpohjaan jännityshuippu, jonka pystyy laskemaan kaavalla

$$\sigma_{\max} = K_t * \sigma \quad (21)$$

Kimmo-teorian antamien tulosten perusteella on laadittu tapauskohtaisia käyrästöjä lovenmuotolukujen määrittämiseen (KUVA 22).



KUVA 22. Olakkeellisen akselin lovenmuotolukuja taivutuksessa (Salmi 2010,436.)

Lovivaikutus otettaessa huomioon väsymisessä tulee myös ottaa huomioon se, että jännityskeskittymän vaikutus ei ole yhtä suuri kuin lovenmuotoluku. Jännityskeskittymään vaikuttaa materiaalin lujuus ja loven koko, sen takia onkin käytettävä jännityskeskittymän lovenvaikutuslukua. Jännityskeskittymän lovenvaikutusluvun saadaan kaavasta



$$K_f = \sigma_w^{\text{Sileä}} / \sigma_w^{\text{lovellinen}} \quad (22)$$

Yleisimmin kuitenkin käytetään laskuissa loviherkkyyyslukua  $q$ , joka saadaan kaavasta

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1} \rightarrow K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (23)$$

PETERSONI:n kaava on yksi monista loviherkkyydelle koetuloksiin perustuvista kaavoista

$$q = \frac{1}{1 + a/r} \quad (24)$$

Jossa  $a$  on materiaaliparametri, joka on riippuvainen materiaalin murtolujuudesta (Taulukko 1) ja  $r$  on loven pohjan säde.

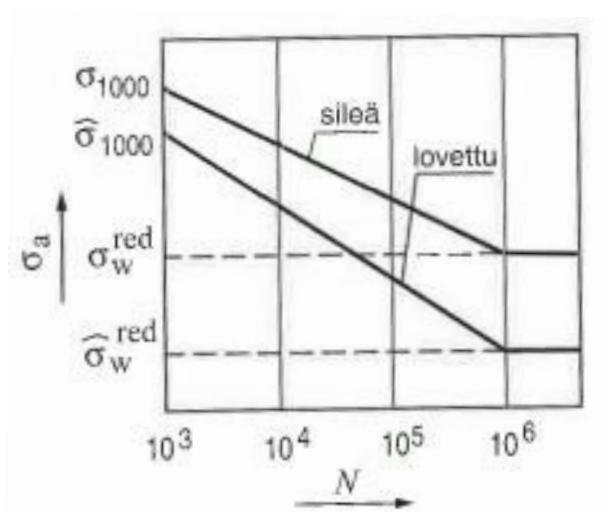
TAULUKKO 1. Materiaaliparametri  $a$  (Salmi 2010,376.)

$R_m$ /MPa	$a$ /mm
400	0,33
600	0,20
800	0,14
1000	0,10
1200	0,06
1400	0,05
1600	0,04

WÖHLER-käyrässä jännityskeskittymät huomioidaan siten, että miljoonan syklin kohdalla vaihtolujuus jaetaan lovivaikutusluvulla  $K_f$ , sama muutos tehdään tuhannen syklin kohdalla lovenvaikutusluvulla  $K_{f1000}$ . Lovenvaikutusluku  $K_f$ , joko alentaa lujuuden tai nostaa nimellisjännityksen arvoja. Muutokset saadaan kaavoilla

$$\widehat{\sigma}_w^{\text{red}} = \sigma_w^{\text{red}} / K_f \quad \widehat{\sigma}_{1000} = \sigma_{1000} / K_{f1000} \quad (25)$$

Kuva 23 esittää, eron väsymiskestävyyteen, kun otetaan huomioon lovenvaikutus WÖHLER- käyrässä.



KUVA 23. Lovivaikutus WÖHLER-käyrässä (Salmi 2010,377.)

#### 4 MURTUMISEN MENETELMÄT

Murtumismenetelmät voidaan karkeasti jakaa hauras- ja sitkeä murtumaan. Näistä kahdesta on haurasmurtuma vaarallisempi, koska se etenee todella suurella nopeudella koko rakenteen läpi ja on erittäin epästabiili. Haurasmurtumassa halkeama laajenee mielellään, sinne missä mikrorakenne on kaikista heikoin. Hauraita materiaaleja ovat mm. lasi, jää ja valumetallit. Sitkeässä murtumassa särön alkamisen jälkeen särön täytyy tehdä enemmän työtä laajentuakseen, mikä tekee sitkeästä murtumasta stabiilin. Hauraan ja sitkeän murtuman erottaminen puhtaasti jommaksikummaksi on epätodennäköistä, mutta sitkeän murtumisen erottaa selvemmin, koska siihen sisältyy sitkeä muodonmuutoskomponentti. (Ikonen 1986, 45.)

##### 4.1 Haurasmurtuma

Haurasmurtumassa murtumiseen tarvittava energiamäärä on pieni. Käyttömateriaalit voivat murtua ulkoisen jännityksen vaikutuksesta hauraasti, koska joissakin käyttömateriaaleissa voi olla raerakenne niin monimutkainen, että niistä puuttuvat plastisenmuodon muutoksen edellyttämät tiivispaketti kidetasot. Hauraus voi myös metallissa johtua siitä, että sen rakenne sisältää paljon hauraita rakeita tai ne ovat jakautuneet rakenteeseen epätehokkaalla tavalla. (Ikonen 1986, 47)

Sitkeät materiaalitkin voivat joskus käyttäytyä hauraasti, silloin murtuma leviää pitkin raerajoja tai sitten rakeiden läpi, jota voidaan myös kutsua lohkomurtumiseksi. Lohkomurtuma on yleisin haurasmurtuman alalaji, jossa rakeen liukutasolle tuleva jännitys ylittää kriittisen arvon  $\tau_k$ , joka saadaan kaavasta (Ikonen 1986, 47.)

$$\tau_k = G\sqrt{b/l} \quad (29)$$

Jossa  $b$  on atomien välinen etäisyys ja  $l$  on liukutasen pituus. Lohkomurtumaa ei pääse syntymään, jos mikrosäröjen kasvamisen estää plastinen muodonmuutos tai jos vetojännitys on liian pieni, jolloin särö ei pääse laajenemaan. Haurasmurtuman pinta on yleensä kirkas, valoa heijastava sekä tasomainen ja yleensä murtumispinnassa näkyy jokimainen kuvio (KUVA 24), joka leviää edetessään. Murtumisen alkusärön paikan voi päätellä siitä, mistä jokimainen kuviointi on alkanut. Lohkomurtuma voi levitä jopa äänennopeudella, mistä sen vaarallisuus johtuukin. Lohkomurtumaan altistaa ferriittisissä teräksissä kuormituksen kasvu sekä lämpötilan lasku. (Ikonen 1986, 48)



KUVA 24. Haurasmurtuma, jossa on merkittynä alkusärön paikka, josta on alkanut särön kasvu (Failure Analysis of Mechanical Components.)

#### 4.2 Sitkeä murtuma

Sitkeässä murtumassa sitoutuu huomattavasti enemmän energiaa kuin haurasmurtumassa, koska särönkärjessä tapahtuu plastisoitumista. Materiaalin rakenne sitkeässä murtumassa on sellainen, että murtumussärö ei pääse helposti etenemään siinä. Kuvassa 25 näkyy, kuinka sitkeässä murtumassa on tapahtunut kuroutumista.

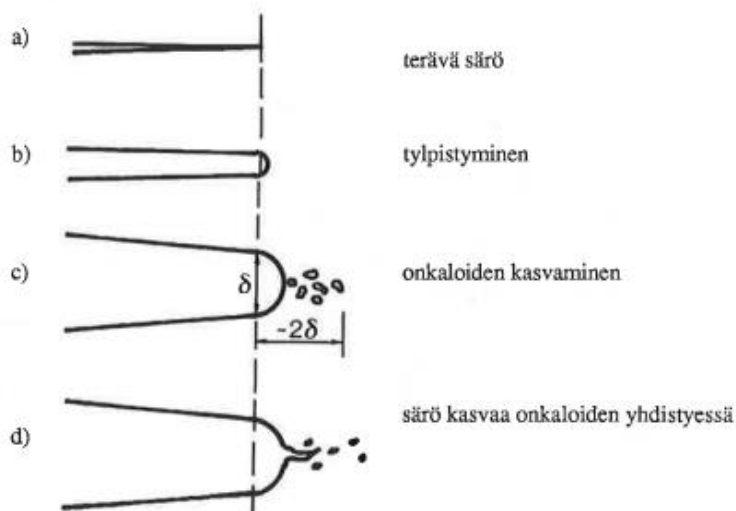


KUVA 25. Sitkeä murtuma (Engineering materials.)

Kuvassa 26 kerrotaan, kuinka aluksi tulee terävä särö, jonka jälkeen särön päässä alkaa plastisoitumista ja se alkaa tylpistyä, joka hidastaa särön kasvua.

Seuraavaksi tylpistyneen särön eteen alkaa kasvaa onkaloita, jonka jälkeen särön kasvu alkaa uudestaan. Jännitystilän kolmiulotteellisuus vaikuttaa todella paljon onkaloitten syntymiseen.

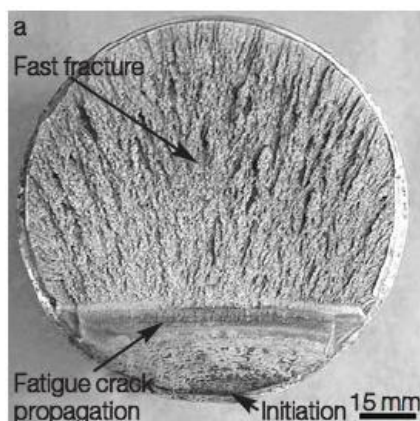
Kapeissa rakenteissa onkaloitten syntyminen hankaloituu tilan puutteen takia ja sen takia särön kasvukin hidastuu, näin ollen materiaali muuttuu sitkeäksi. (Ikonen 1986, 49.)



KUVA 26. Särön kasvu sitkeässä murtumassa (Ikonen 1986, 49.)

### 4.3 Väsymismurtuma

Rakenteen väsymisen vaiheet voidaan jaotella kolmeen osaan, jotka ovat särön ydintyminen, särön eteneminen ja murtuminen, jossa murtuminen tapahtuu sitkeästi tai hauraasti. Väsymismurtuman murtuma pinnassa on kaksi aluetta, väsymisestä johtuva sileä osuus, joka on hioutunut väsyessä ja sitten karkeampi jäännösmurtumavyöhyke (KUVA 27). Hauraan ja sitkeän materiaalin käyttäytyminen väsymismurtumassa on samankaltaista, koska särön päähän ei tule plastista muodonmuutosta. Ainutta plastisoitumista tapahtuu vain muutamassa mikroskooppisessa liukunauhassa, joista väsymismurtuma lähtee liikkeelle.

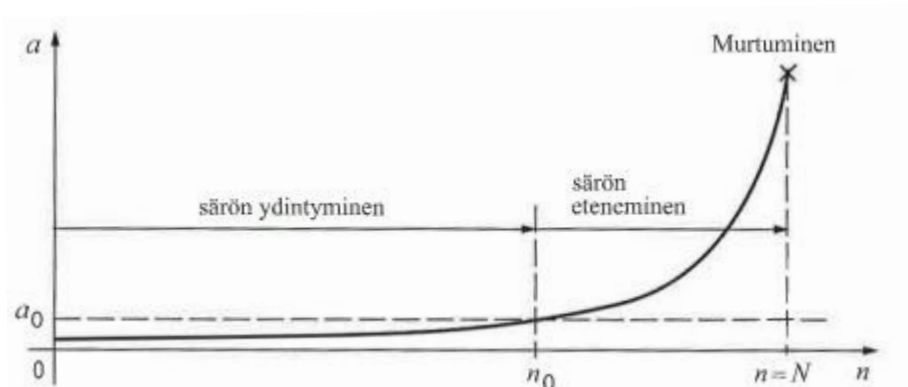


KUVA 27. Väsymismurtuma

(Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM): Part Two.)

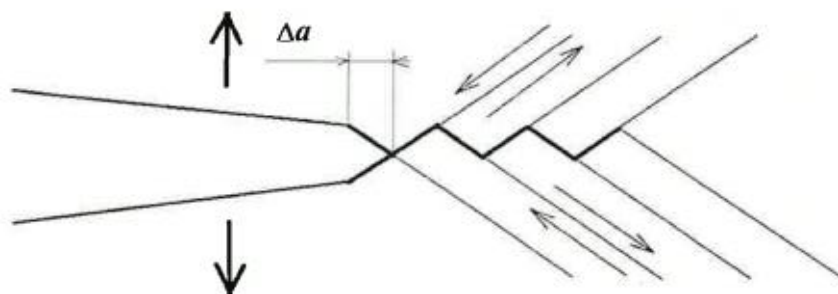
## 4.4 Ydintymät ja etenemisvaihe

Särön ydintymisvaihe kattaa kaiken särön kasvusta mikroskooppisesta makroskooppiseksi (alkusäröksi) ja riippuen ympäristöstä siihen kuuluu 10- 90 % koko rakenteen kestoiästä. Alkusärön jo olemassa kappaleessa, ydintymistä ei enää tapahdu. (Ikonen 1991,191.)



KUVA 28. Särö kasvu kuormitus syklien määrän  $n$  funktiona  $a_0 \approx 0,1\text{mm}$  (Salmi 2010, 357.)

Kuvassa 28 näkyy, kuinka särön ydintyminen, särön eteneminen ja murtuminen jakautuvat kuormitus-syklien määrän funktiona. Särön ydintymiseen menee suurin osa kuormitus-sykleistä ja kohdassa, missä särön eteneminen alkaa, särö on noin 0,1 mm pitkä. Kun alkusärö on kasvanut yli kriittisen mitan, kasvumekanismi muuttuu stabiiliksi särönkasvuksi, jossa mikrorakenteella on enää vähäinen merkitys. Kuvassa 29 näkyy, kuinka särö aukeaa vetojännityksen vaikutuksesta aiheuttaen plastisen muodonmuutosalueen särön kärjessä. Särön kärkeen alkaa muodostua leikkausnauhoja, minkä jälkeen särön pinnassa alkaa tapahtua leikkausnauhojen pitkin  $\Delta a$  suuruista liukumaa. (Makkonen 2011,10.) (Salmi 2010,355–357.)



KUVA 29. Stabiilin särön kasvun mekanismi (Makkonen 2011,10.)

Särön kasvaessa sen piteneminen kiihtyy eksponentiaalisesti (KUVA 28) ja lopulta se rakenteen poikkileikkauksen ehjäosa ei jaksakaan enää kantatella sitä ja tapahtuu murtuminen. Yleisimmin murtumat ovat haurasmurtumia. (Makkonen 2011,11.)

## 5 MATERIAALIN OMINAISUUDET

Väsymisessä materiaalin ominaisuudet ovat todella tärkeitä. Väsyminen on riippuvainen materiaalis- sa olevasta mikrorakenteesta. Materiaaleissa kannattaa välttää väsymisen kannalta kaksifaasista ra- kennetta, jossa toinen on kovempi kuin toinen. Homogeeninen rakenne, jossa pieniraekoko ja hieno- jakoiset erkaumat vaikeuttavat dislokaatioiden liukumista, joka parantaa väsymisen kestävyttä. (Materiaalin rakenteen vaikutus väsymiseen.)

Teräkset luokitellaan eurooppalaisen standardin (EN 10088-1) mukaan, mikrorakenteen perusteella seuraavasti:

- ferriittiset teräkset
- martensiittiset teräkset
- erkautuskarkenevat teräkset
- austeniittiset teräkset
- austeniittis-ferriittiset teräkset.

( SFS 2005, 10.)

### 5.1 Ruostumattomat teräkset

Ruostumaton teräs sopii moniin käyttökohteisiin ja se löydettiin 1900-luvun alussa, kun kromia lisät- tiin teräkseen ja huomattiin sen tuovan hyvän korroosionkestävyyden. Ruostumattomassa teräkses- sä on oltava vähintään 11 % kromia (Cr) suojautuakseen korroosiolta, mutta siihen on sekoitettu esimerkiksi kuparia (Cu), nikkeliä (Ni) ja molybdeenia (Mo) riippuen käyttökohteesta. On olemassa kolmea erilaista tyyppiä ruostumattomia teräksiä, jotka näkyvät kuvassa 30 (U.C. Jindal 2012, Strength of materials, 22.)

Composition (%)			
Ferritic stainless steel	C 0.08–0.2 Cr 12–27 Mn 1–1.5, Si 1.0	Ferritic structure, high corrosion and oxidation resistance	Used in furnaces, storage for acids and cutlery
Austenitic stainless steel	C < 0.2 Cr 16–24 Ni 8–22	Austenite is stabilized by nickel	Used in chemical plants, roller and ball races
Martensitic stainless steel	C 1–1.2 Cr 12–18 Mn 1–2 Si 0.5–1.0 Ni 1–2	Hard martensitic structure	Turbine blades, tools, springs and knife edges

KUVA 30. Ruostumattomien teräksien tyypit ja käyttökohteita (U.C. Jindal 2012, Strength of material, 22.)

Kuva 30 esittää erilaisten ruostumattomien teräksien kemiallisen koostumuksen, ominaisuuksia ja käyttökohteita, esimerkiksi austeniittisen ruostumattoman teräksen käyttökohteita ovat kemikaali tehtaat. Ruostumattoman teräksen työstettävyyteen vaikuttaa erityispiirteet, jotka tekevät siitä haastavamman koneistaa. Muutamia näistä ovat

- työstökarkeneminen
- alhainen lämmönjohtavuus
- suuri sitkeys
- huono lastunkatkeamisominaisuus. (OUTOKUMPU.)

#### 5.1.1 X2CrNiMo 17–12-2 (316L, DIN 1.4404)

316L on ruostumaton ja haponkestävä teräs. 316L on austeniittinen kiderakenne eli pintakeskinen kuutiorakenne (pkk). Taulukossa 2 on 316L kemiallinen koostumus, joka on saatu sulatusanalyysistä. (SFS 2005,27.)

TAULUKKO 2. 316L kemiallinen koostumus (SFS 2005,27.)

316L DIN 1.4404	Paino-%
C	≤ 0,030
Si	≤ 1,00
Mn	≤ 2,00
P <sub>max</sub>	0,045
S	≤ 0,030 <sup>b</sup>
N	≤ 0,11
Cr	≤ 16,5...18,5
Cu	-
Mo	2,00...2,50
Nb	-
Ni	10,0...13,0 <sup>c</sup>
Muut	-

Taulukossa 2 oleva yläindeksi <sup>b</sup> tarkoittaa sitä, että rikkipitoisuus voi parantaa työstettävyysominaisuuksia. Lastuavaan työstöön meneville tuotteille suositellaan 0,015...0,030 % rikkipitoisuutta, hitsattaville tuotteille suositellaan noin 0,008...0,030 % rikkipitoisuutta ja kiillotetuille enintään 0,015 %. Nikkelipitoisuutta voidaan joissain erityistapauksissa suurentaa, esimerkiksi jos halutaan mahdollisimman pieni deltaferriittipitoisuus varmistaakseen putkien kuumamuokattavuus ja pienempi permeabiliteetti. (SFS 2005,29.)

Taulukko 11 Liuotushehkutettujen<sup>a</sup> austeniittisten ruostumattomien terästen mekaaniset ominaisuudet ja raerajakorroosionkestävyys huoneenlämpötilassa (ks. taulukko A.4) käsittelytiloissa 1C, 1E, 1D, 1X, 1G ja 2D  
 Table 11 Mechanical properties at room temperature of solution annealed<sup>a</sup> (see Table A.4) austenitic steels and resistance to intergranular corrosion in conditions 1C, 1E, 1D, 1X, 1G and 2D

Teräksen nimike Steel designation		Paksuus <i>t</i> tai halkaisija <sup>b</sup> <i>d</i> Thickness <i>t</i> or diameter <sup>b</sup> <i>d</i>	Kovuus <sup>c,d</sup> Hardness <sup>c,d</sup>	0,2 %-raja 0,2 %-proof strength	1 %-raja 1 %-proof strength	Murtolujuus <sup>d,e</sup> Tensile strength <sup>d,e</sup>	Murtovenymä <sup>d,e</sup> Elongation after fracture <sup>d,e</sup>		Iskuenergia (ISO-V) Impact energy (ISO-V)		Raerajakorroosion- kestävyys <sup>f</sup> Resistance to intergranular corrosion <sup>f</sup>	
Nimike Name	Numero- tunnus Number	mm	HB  max.	$R_{p0,2}^g$ MPa <sup>h</sup> min.	$R_{p1,0}^{c,g}$ MPa <sup>h</sup> min.	$R_m$ MPa <sup>h</sup>	A % min. (pitk.) (long.)	(poik.) (tr.)	KV J min. (pitk.) (long.)	(poik.) (tr.)	toimitus- tilassa in the delivery condition	herkistet- tynä <sup>g</sup> in the sensitized condition <sup>g</sup>
Standarditeräokset Standard grades												
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	≤ 160 160 < <i>t</i> ≤ 250	215	200	235	500...700	40 -	- 30	100 -	- 60	kyllä yes	kyllä yes

KUVA 31. X2CrNiMo 17–12-2 (DIN 1.4404) 316L Mekaaniset ominaisuudet (SFS 2005,43.)

Kuvassa 31 oleva b yläindeksointi tarkoittaa kuusiotangossa avainväliä, yläindeksointi c tarkoittaa opastavaa arvoa ja e yläindeksi tarkoittaa, että valssilangoilla on vain voimassa murtolujuusvaatimukset. Yläindeksi d tarkoittaa, että HB- kovuus voi olla 100 yksikköä suurempi tai murtolujuus voi olla 200 MPa suurempi mitä ilmoitettu. Enintään 25 mm paksuilla profiileilla ja tangoilla, jotka on kylmämuokattu ja kuumamuokatuilla enintään 8 mm paksuilla profiileilla ja tangoilla on murtovenymä 20 % pienempi. (SFS 2005,43.)

## 6 VÄSYMISTESTAUS

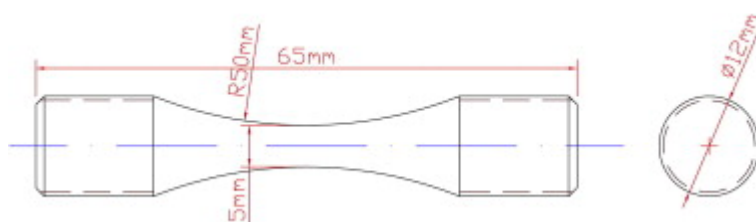
Tutkimuksessa tutkittiin ja testattiin ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallisten kappaleiden väsymisominaisuuksia. Testausmenetelmäksi tässä tutkimuksessa valittiin aksiaalinen veto-puristusväsytykskoe. Aksiaalisessa väsymiskokeessa kuormitetaan kappaletta veto-puristuskuormituksella. Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettuja koekappaleita tilattiin 12 kpl, joista 6 testattiin suoraan ilman mitään jatkotoimenpiteitä ja 6 kappaleista koneistettiin pinta  $R_a$  0,8  $\mu$ m tarkkuuteen. Väsymiseen liittyvillä laskutoimituksilla arvioitiin DMLS-tekniikalla tuotettujen testikappaleiden väsymisikä, mutta kaavat eivät suoraan päde ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen kappaleiden väsymiseen. Laskettaessa väsymisikää Palmgren-Miner säännöstä johdetulla väsymisiän kaavalla (13), tulee ottaa huomioon, että kaava on vain tarkoitettu rautametalille. 3DP-tekniikalla tuotettuihin kappaleisiin ei laskettu arvioitua väsymisikää, koska materiaalina oli komposiittimateriaali. Tutkimuksessa verrattiin 3DP-tekniikalla tuotettujen kappaleiden väsymistä DLMS-tekniikalla tuotettujen kappaleiden väsymiseen ja DMLS- tekniikalla valmistettujen kappaleiden pinnankarheuden vaikutusta väsymiseen.

### 6.1 Aikaisemmat tutkimukset aiheesta

Tutkimuksessa Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior, on tutkittu SLM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden tulostussuunnan ja eri tulostusalusta lämpötilojen sekä lämpökäsittelyn vaikutusta väsymiseen. Materiaalina on tutkimuksessa käytetty Alumiini AlSi10Mg. Tutkimuksessa valittiin tulostussuunnaksi 0°, 45°, 90° ja tulostusalustan vertailu lämpötilat olivat 30°C ja 300°C.

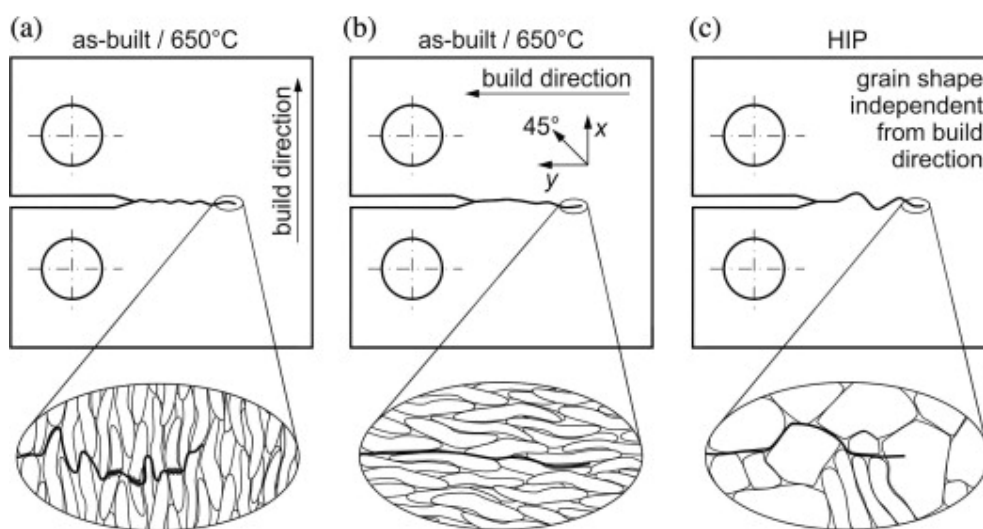


Lämpökäsittelynä kappaleet korkeakarkaistiin ja vertailukappaleet jätettiin valmistuksessa saatuun tilaan. Tutkimuksessa huomattiin, että tulostussuunnalla oli vähäinen vaikutus rakenteen väsymiseen, kun taas jälkilämpökäsittelyllä oli suuri vaikutus väsymiskestävyyteen. Tutkimuksessa huomattiin myös se, että alkusärö alkaa aina joko rakenteen pinnasta tai huokoisista, mutta ei sulaneista kohdista. Johtopäätöksenä tutkimuksesta vedettiin, että 300°C tulostusalustan lämpötilalla ja korkeakarkaistuksen yhdistelmällä saadaan kasvatettua väsymiskestoa ja pystytään poistamaan tulostussuuntien 0°, 45° ja 90° aiheuttamat erot väsymiskestävyydessä. Tutkimuksessa huomioitavaa oli myös SLA-tekniikalla valmistettujen kappaleiden väsymisen tarkastelun lisäksi se, että koekappaleiden geometria on hyvin samankaltainen (KUVA 32) kuin SFS-ISO 1099 on määritelty. (Brandi 2011,159–169.)



KUVA 32. Tutkimuksessa Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior käytetty koekappalegeometria (Brandi 2011, 159–169.)

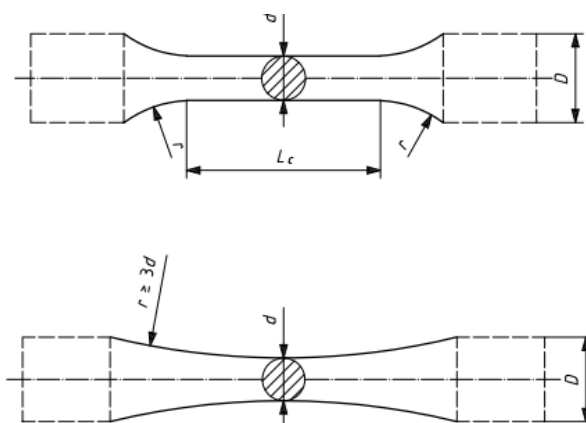
Toisessa tutkimuksessa aiheena oli SLM-tekniikalla valmistettujen kappaleiden väsymisessä särönkasvun käyttäytyminen 316L ruostumattomalla teräksellä. Johtopäätöksenä tutkimuksessa havaittiin, että tulostussuunnalla oli vaikutusta väsymisaikaan. Kerrosten myötäisesti liikkuva särö kuvassa 33, (a) on hitaampaa kuin vastakkaisesti liikkuva särö (b). Tutkimuksen todettiin, että 316 L materiaalia SLM-valmistuksella voidaan käyttää sovellutuksissa ilman jälkikäsittelyä. (Riemer 2014,15–25.)



KUVA 33. Särön liikkuminen tulostussuunnasta riippuen (Riemer 2014,15–25.)

## 6.2 Standardi aksiaaliseen väsytykokeeseen

Standardi SFS-ISO 1099 esittää ohjeet väsytykokeiden suorittamiselle aksiaalisella väsytykokeella. Tässä kappaleessa kerrotaan, kuinka suoritetaan standardin SFS-ISO 1099 mukainen aksiaalinen väsytystestaus poikkileikkaukseltaan pyöreälle kappaleelle, tutkimukseen soveltuvilla mitoitusohjeilla. Testattavan kappaleen muoto tulee olla poikkileikkaukseltaan pyöreä tai suorakulmio. Testauksen periaate on, että testauskappale kiinnitetään aksiaalisesti kuormitettavaan testauslaitteistoon, jossa voidaan määrittää halutun tyyppinen jännitysjakso ja jännityksen suuruus, jolla kappaletta kuormitetaan. Koetta jatketaan niin pitkään, että testauskappale hajoaa tai saavutetaan ennalta laskettu väsymiskestoikä. (SFS 2006,5.)



KUVA 34. Standardin SFS-ISO 1099 mukaiset geometriat, joissa poikkileikkaus on pyöreä.  
(SFS 2006,14.)

Kuva 34 esittää geometriat poikkileikkaukseltaan pyöreälle kappaleelle. Alemmassa mallissa testauskappaleessa on kaareva keskiviiva, jonka kaaren säde  $r$  on  $3 \cdot d$ .

TAULUKKO 3. geometriset mittaehdot kappaleelle (SFS 2006,6.)

Parameter	Dimension
Diameter of cylindrical gauge length	$d \geq 3 \text{ mm}$
Transition radius (from parallel section to grip end)	$r \geq 2d$
External diameter (grip end)	$D \geq 2d$
Length of reduced section	$L_C \leq 8d$

Taulukossa 3 kerrotaan mittaehdot kappaleelle, joka on yli 5 mm paksu. Merkinällä  $d$  tarkoitetaan testikappaleen ohuinta halkaisijaa, tunnuksella  $r$  tarkoitetaan sädettä olakkeen kohdalla ja  $D$  tarkoitetaan testikappaleen päissä olevan kiinnityspinnan halkaisijaa.  $L_C$  tarkoittaa ohuimman halkaisijan  $d$  pituutta. Testauskappaleen tärkeimmät geometriset toleranssit esittää kuva 35.

Parallelism	//	$\leq 0,005d$
Concentricity		$\leq 0,005d$
Perpendicularity	⊥	$\leq 0,005d$

KUVA 35. Testauskappaleen geometriset toleranssit (SFS 2006,6.)

Tutkimuksessa tutkitaan DMLS- ja 3DP-tekniikalla tuotettujen kappaleiden väsymistä, joten kappaleen koneistukseen liittyvät ohjeistukset standardin SFS-ISO 1099 mukaan huomioitiin vain osittain. Tutkimuksessa huomioitiin pinnankarheus ennustetussa väsymiskestössä.

DMLS- ja 3DP- tekniikalla tuotetuissa kappaleissa on pinnanlaatu  $R_a$  7-15 ja noin 60  $\mu\text{m}$  (Swift, Booker 2013.). Koneistetuissa kappaleissa, jotka on tuotettu DMLS-tekniikalla, päädyttiin pinnankarheuteen  $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$ .

Testikappaleet tulee merkitä niin selkeästi, että on selvää työstön ja testauksen aikana, mikä kappale on kyseessä. Merkkkaus ei saa vaikuttaa testauksen laatuun. Standardin mukaisessa testauksessa, tulisi määrittää keskimääräinen pinnankarheus alle 0,2  $\mu\text{m}$ . Viimeistelyssä suositellaan käyttämään mekaanista kiillotusta, jolla poistetaan koneistuksessa tulleet naarmut. (SFS 2006,8.)

Testauslaitteisto tulee olla jännitys-puristuskone, joka on suunniteltu pehmeään aloitukseen ilman takaiskua ohittaessaan nollapisteen. Koneen tulee olla jäykkä sivusuunnassa ja koko kuormitus-koneiston sisältäen voimamittarin, tarraimet ja koekappaleen, tulee olla sivuttaissuunnassa jäykkiä. Koneessa tulee pystyä ohjelmoimaan ja mittaamaan voimia saadakseen suositeltu siniaaltoisykli. Tuleva voiman tarkkuus ohjelmoinnista tai manuaalisesta lähteestä tulee olla kohdistettuna kappaleeseen paremmin kuin 1 % tarkkuudella. Tarraimen tulee siirtää kuormituskykliä voimat testauskappaleeseen ilman takaiskua. Tarrainten väli, korkeus suunnassa tulee olla mahdollisimman pieni välttääkseen lommahdusta testikappaleessa. (SFS 2006,9.)

Testauslaitteiston ohjauksen ja mittaussysteemin tarkistus tulee tehdä säännöllisesti. Voiman lähde tulee kalibroida ISO 7500-1 standardin mukaan. Koekappaleen asennuksessa testauslaitteistoon tulee varmistaa, että testauskappale on kiinnitetty tarraimiin aksiaalisesti. Testikappaleen kuormitusnopeus voi vaihdella testin luonteen mukaisesti ja testikappaleen jäykkyyden mukaan.

Nopeuden määrittämisessä tulee ottaa huomioon, mikä nopeus on testauslaitteistolle ja testauskappaleelle sopivin. Yleisimmin käytetty taajuus väsymistestauksessa on 5...300 Hz. Testeissä käytettävä voima tulee olla sama kaikissa testikappaleissa. Keskivoima ja voima-alue tulisi olla  $\pm 1$  % voima-alueesta määritetyn staattisen virheen standardin ISO 7500-1 mukaan. Lämpötilan minimiarvo ja maksimiarvo tulee mitata päivittäin testien aikana. (SFS 2006,11.)

Testausraportissa tulee olla

- viittaus kansainväliseen standardiin
- materiaali jota, testaan ja sen metallurginen rakenne, mekaaniset ominaisuudet ja lämpökäsittely
- testattavan kohdan sijainti

- testikappaleen muoto ja nimellimitat
- testikappaleen pinnanlaatu.

Jokaisen testikappaleen testiraporttiin sisältyvät asiat:

1. Lämpöleikkausmitat
  2. Maksimi ja minimi kohdistettu voima
  3. Käytettyjen jännitysten arvot
  4. Taajuus ja väsymisikä
  5. Kuvaus testauskoneesta: tyyppi, sarjanumero, kuormitusosuus ja sarjanumero, aiheutetut kuormitustilat
  6. Lämpötila kappaleelle jos testikappaleen kuumennus ylittää 35°C
  7. Maksimilämpötila ja minimilämpötila sekä suhteellinen kosteus
  8. Kriteerit testin loppumiselle esimerkiksi aika, testikappaleen hajoaminen tai joku muu kriteeri
  9. Muita huomioita testiolosuhteita.
- (SFS 2006,12.)

### 6.3 Koekappaleet

Koekappaleet mitoitettiin Standardin SFS-ISO 1099 mukaan, jossa määritettiin kappaleen muoto ja koko. Koekappaleen poikkileikkaus on pyöreä, joten kappaleen kapeamman kohdan halkaisijaksi määritettiin taulukon 3 mukaan 8 mm. Taulukon 3 mukaan koekappaleen säde  $r$  (KUVA 34) määritettiin 16,5 mm. Koekappaleen tartuntapään halkaisija  $D$  on taulukon 3 mukaan 16,5 mm ja tartunta päätten pituus on 45 mm. Koekappaleen kapeamman osan pituus  $L_c$  (KUVA 34) on 25 mm, taulukon 3 mukaan. Koneistusta varten 6 kappaleeseen mitoitettiin työstövarat. Koekappaleista tehtiin Solid-Works 3D-mallinnus ohjelmalla virtuaalinen 3D-malli (KUVA 36) ja valmistuspiirustukset. Valmistuspiirustukset kappaleesta on liitteenä (LIITE 1).



KUVA 36. 3D-malli veto-puristuskoesauvasta

Valmistuserään myös suunniteltiin vetokoesauva, josta saatiin kyseistä valmistuserästä mitattua tarkasti materiaalin murtoraja.

#### 6.4 Alkuarvot

Alkuarvoilla tarkoitetaan niitä arvoja, jotka pystytään määrittämään materiaalin mekaanisista ominaisuuksista ja testauskappaleen geometrisistä piirteistä. Tutkimuksessa valittiin materiaaliksi DMLS-tekniikassa X2CrNiMo 17–12-2 (DIN 1.4404) EOS 316L (LIITE 2), joka on yleinen ruostumaton haponkestävä teräs. 3DP-tekniikalla tuotettujen kappaleiden materiaaliksi valittiin 420 SS+pronssi, materiaalin tekniset tiedot löytyvät liitteenä (LIITE 3). Materiaalin valinnassa otettiin huomioon se, että millä materiaaleilla pystytään DMLS-tekniikalla valmistamaan suunnitellut testikappaleet ja onko materiaali muuten yleisessä käytössä. DMLS-tekniikalla tuotetut testikappaleet valmistettiin EOSINT M-sarjasta tehdyllä development versiolla (KUVA 37), joka tarkoittaa yksinkertaistettua versiota ja soveltuu paremmin tutkimuskäyttöön. 3DP-tekniikalla tuotetut kappaleet valmisti i.materialise ja valmistajan valinnassa huomioitiin materiaali kustannukset sekä toimitusaika.



KUVA 37. EOSINT M-series development version (Matilainen 2012, 30.)

Koesauvat DMLS-tekniikalla valmistetaan pystyyn eli suuntaan Z. Seuraavaksi laskettiin arvioitu väsymisikä geometrian ja 316L materiaalin mekaanisten ominaisuuksien avulla. Väsymisiän määrittäminen aloitettiin laskemalla vaihtolujuus  $\sigma_w$  testikappaleen materiaalille kaavalla (8). Koska materiaalin murtolujuus  $R_m$  on liitteen 2 mukaan suunnassa (Z) 540 MPa saimme vaihtolujuudeksi:

$$\sigma_w = 540 \text{ MPa} * 0,5 = 270 \text{ MPa} \quad (8)$$

Tämän jälkeen määritettiin jännitys 1000 syklin kohdalla kaavalla (7)

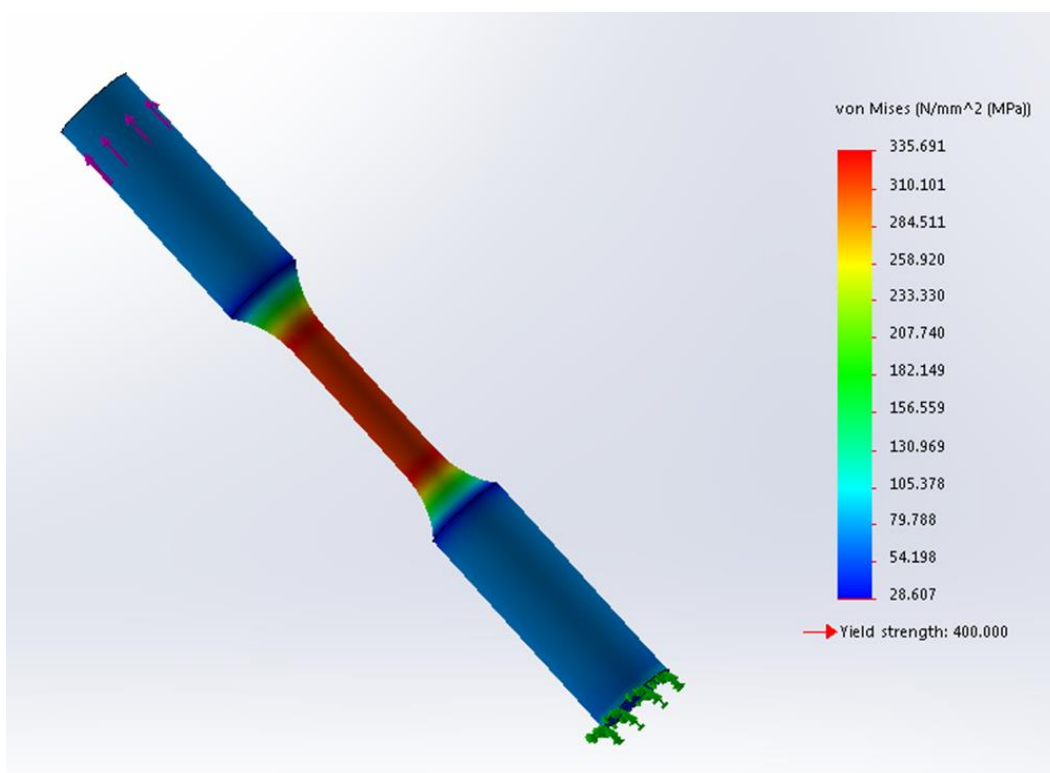
$$\sigma_{1000} = 0,9 * 540 \text{ MPa} = 486 \text{ MPa} \quad (7)$$

Tämän jälkeen määritettiin voima  $F$ , jolla saatiin tarvittava jännitys  $\sigma$  testauskappaleiden kuormitukseen. Jännitys määritettiin kappaleen kapeampaan kohtaan, jossa säde  $r$  oli 4mm. Seuraavaksi laskettiin poikkipinta alaksi  $50,265 \text{ mm}^2$ . Kuormitus  $F$  aiheuttaman jännityksen  $\sigma$  arvo pinta-alalla  $A$  tuli

ylittää vaihtolujuuden  $\sigma_w$  arvon. Voiman arvoksi arvioitiin 16000 N, josta laskettiin pinta-alalle A kohdistuva jännitys kaavalla (30).

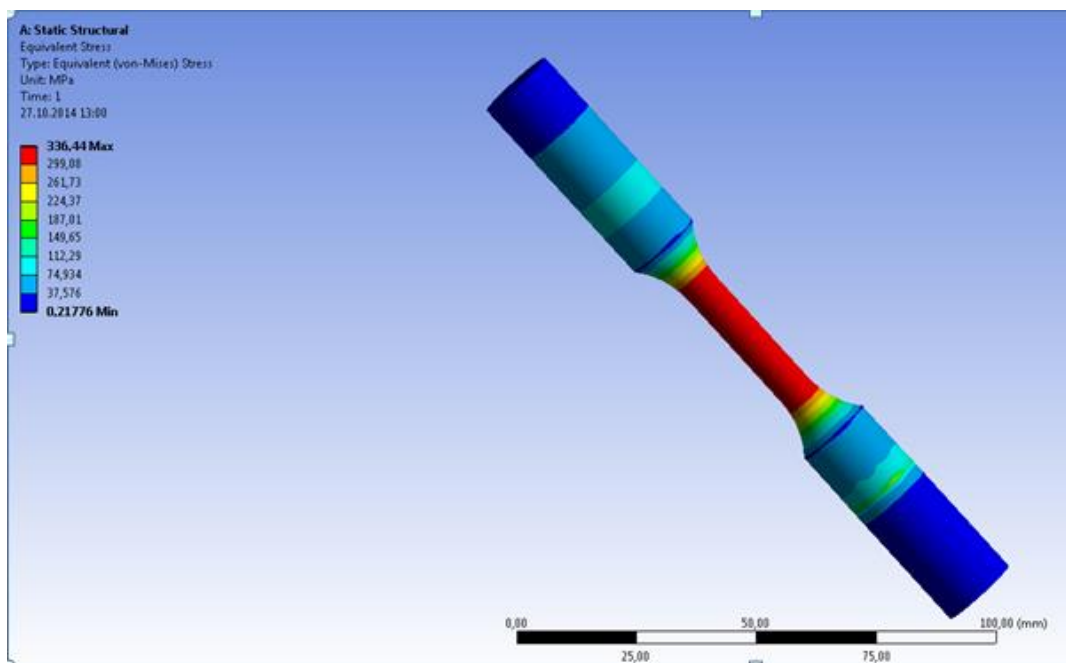
$$\sigma = \frac{16000 \text{ N}}{50,265 \text{ mm}^2} = 318,3 \text{ MPa} \quad (30)$$

Jännityksen tarkistamiseen käytettiin FEM-simulointia. FEM-simulointi tehtiin staattisella kuormituksella, josta pystyttiin varmistamaan testikappaleen geometriaan kohdistuvat jännitykset. FEM-simulointi toteutettiin SolidWorks FEM-simulaation ja Ansys Workbench FEM-simulaation avulla. Kappaleen yksinkertaisen geometrian takia, SolidWorks simuloinnissa voima asetettiin aksiaalisesti vetämään kappaleen päästä ja kiinnitettiin kappaleen vastakkaisesta päästä. SolidWorks ohjelmalla simuloinnista saatiin tulokseksi (KUVA 38) 335,7 MPa.



KUVA 38. SolidWorks 3D-mallinnus ohjelmalla tehty staattinen simulointi

Ansys Workbench simuloinnissa tulokseksi saatiin 336,4 MPa (KUVA 39). Tulokset vastasivat hyvin toisiinsa laskuteorioissa ja simuloinneissa.



KUVA 39. Ansys Workbench simulointi staattisella kuormituksella

Kuormitusvoima väsymisen testaukseen päätettiin 16000 N, josta kohdistuu kappaleen poikkileikkauksen pinta-alalle jännitys 318,3 MPa. Väsymiskestojän määrittämisessä laskettiin parametreille  $\alpha$  ja  $b$  arvot kaavoilla (12)

$$\alpha = \log\left(\frac{486 \text{ MPa}^2}{270 \text{ MPa}}\right) = 2,9419 \quad (12)$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log\left(\frac{486 \text{ MPa}}{270 \text{ MPa}}\right) = -0,0851$$

Väsymiskestojän määrittämisessä käytettiin kaavaa (13). Jännitysamplitudi  $\sigma_a$  on sama kuin jännitys  $\sigma$ , koska keskijännitys  $\sigma_m$  vaihtokuormituksessa on 0.

$$N = 10^{\frac{-2,9419}{-0,0851} * 318,3 \text{ MPa}^{\frac{1}{-0,0851}}} = 144505 \quad (13)$$

Nopeudeksi testaukseen linjattiin 10 Hz standardin SFS-ISO 1099 mukaan, jossa määritellään testi nopeudeksi noin 5...300 Hz. Nopeus linjattiin myös sen takia 10 Hz, koska testikappaleiden kuormitussykylien määrässä haluttiin päästä jännitysmenetelmä (HCF high cycle) alueelle, jolla tarkoitetaan sitä, että kuormitussykylien määrä tulee ylittää  $10^4$ . Testauksen kesto aika  $T$  arvioitiin kaavalla

$$T = N/f \quad (32)$$

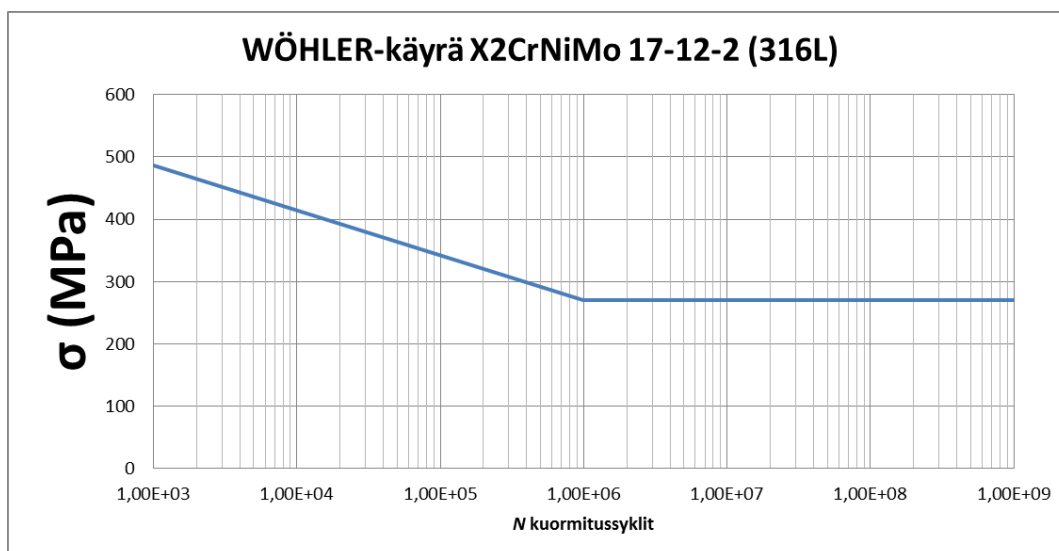
$$T = 144504,627/10 = 14450,5 \text{ s} \quad (32)$$

Testausaika haluttiin minuutin tarkkuudella.

$$T_{\min} = 7760 \text{ s} \quad (33)$$

$$T_{\min} = 14450,46 \text{ s} / 60 \text{ s} = 241 \text{ min}$$

Testikappaleelle saatiin kuormituksenalaiseksi teoreettiseksi väsymisiäksi 144506 kuormitusyhtiä. Vaihtolujuuden  $\sigma_w$  ja jännityksen 1000 kuormitusyhtiin  $\sigma_{1000}$  avulla, määritettiin WÖHLER-käyrä (KUVA 40) materiaalille 316L.



KUVA 40. WÖHLER- käyrä materiaalille 316L

Seuraavaksi redusointiin vaihtolujuus kaavalla (14) realistisemmaksi testaukseen. Redusoinnissa käytettiin kappaleen koon, kuormitustyyppin ja pinnanlaadun kerrointa. Kappaleen koko kerroin  $c_1$  aksiaalissa kuormituksessa on 1, kuormitustyyppin  $c_2$  kerroin on 0,7 ja pinnanlaatu kerroin  $c_3$  on kuvan 9 mukaan 0,785.

$$\sigma_w^{\text{red}} = (1 * 0,7 * 0,785) * 270 \text{ MPa} = 148,4 \text{ MPa} \quad (14)$$

Lovivaikutusta ei otettu laskuihin mukaan testikappaleen geometrinen piirteiden takia. Väsymisen kestoiän määrittämisessä laskettiin parametreille  $a$  ja  $b$  arvot kaavoilla (12)

$$\alpha = \log\left(\frac{486 \text{ MPa}^2}{148,4 \text{ MPa}}\right) = 3,2019 \quad (12)$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log\left(\frac{486 \text{ MPa}}{148,4 \text{ MPa}}\right) = -0,1718$$

Väsymiskestoiän määrittämisessä käytettiin kaavaa (13). Jännitysamplitudi  $\sigma_a$  on sama kuin jännitys  $\sigma$ , koska keskijännitys  $\sigma_m$  vaihtokuormituksessa on 0

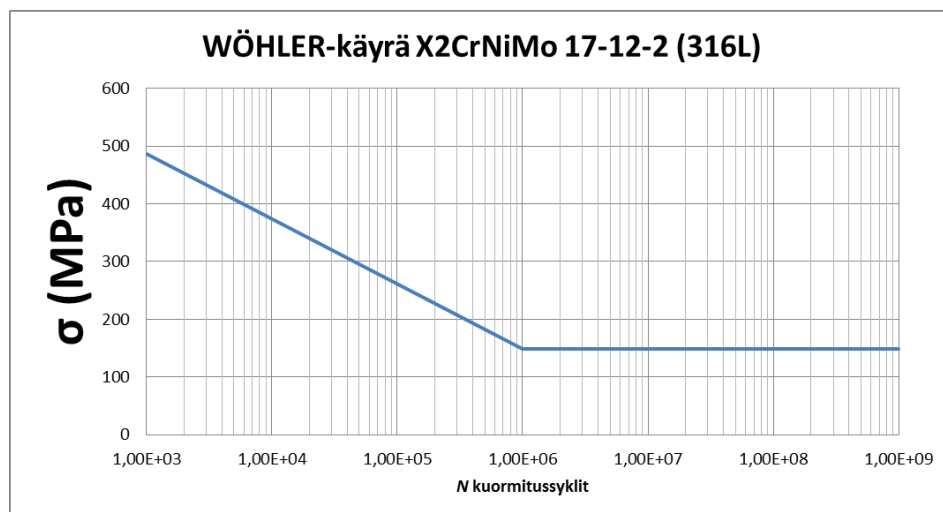


$$N = 10^{\frac{-3,2019}{-0,1718} * 318,31 \text{ MPa}^{\frac{1}{-0,1718}}} \quad (13)$$

$$= 11748$$

Seuraavaksi arvioitiin testausaika redusoidulla vaihtolujuudelle käyttäen kaavoja (31) ja (32) 20 minuuttia.

Tämän jälkeen määritettiin WÖHLER-käyrä materiaalille 316L (KUVA 41). WÖHLER-käyrän määrittämisessä käytettiin redusoitua vaihtolujuutta  $\sigma_w^{\text{red}}$  ja jännitystä 1000 syklin kohdalla eli  $\sigma_{1000}$ .



KUVA 41. Materiaalin 316L redusoitu WÖHLER- käyrä

## 6.5 Testaus

Testaukset suoritettiin valmistajan Walter +Bai AG mallia LFV 500- HH veto- ja väsymistestauslaitteistolla (KUVA 42). Laitteen teknilliset tiedot löytyvät liitteenä (LIITE 4). Väsymisiän testauksessa ensimmäisenä suoritettiin koekappaleitten kiinnitystestaus, koska testauslaitteiston kiinnitysvoimasta ei ollut varmaa tietoa, kiinnitysvoimaa säädeltiin laitteessa 0-100 % välillä. Kiinnitystestauksessa saatiin testauksen kautta määritettyä 18 % kiinnitysvoima materiaalille 316 L.



KUVA 42. Walter +Bai AG mallia LFV 500- HH veto- ja väsymistestauslaitteisto (Walter + Bai AG 2014)

Ensimmäiset väsymistestaukset suoritettiin kahdelle kylmävedetyistä tangosta koneistetuille 316L vastaavaa materiaalia oleville veto-puristuskoesauvoille (KUVA 43). Teoreettisen väsymisiän määrittämisen tarkentamiseksi suoritettiin 316L vastaavalle materiaalille vetokokeet, jossa tarkennettiin materiaalin murtolujuus. Vetokokeista saimme murtolujuudeksi 609,1 MPa, josta saimme uudelleen lasketuksi väsymisiäksi 23681 kuormitus sykliä.



KUVA 43. 316L vastaavaa materiaalia olevat veto-puristuskoesauvat (Matti Kesonen.)

Testaukset suoritettiin lähtöarvoilla 16 kN voima-amplitudi, 10 Hz nopeudella ja keskijännitys 0. Koneistettujen veto-puristuskoesauvojen testauksessa oli tarkoitus testata teoreettisten laskujen paikkaansa pitävyyttä. Vertailukappaleiden tulokset näkyvät taulukossa 4.

TAULUKKO 4. Kylmävedetty 316L vastaava materiaali

	Testi 1	Testi 2
F (N)	16000	16000
$\sigma$ (Mpa)	318,3	318,3
N	17900	16000
f (Hz)	10	10
Ra ( $\mu\text{m}$ )	0,8	0,8
D (mm)	16,5	16,5
d (mm)	8	8



KUVA 44. 420ss+pronssi vetokoesauva koneistetulla pinnalla (Matti Kesonen.)

3DP-valmistetuille veto-puristuskoesauvoille ei määritetty arvioitua väsymisenkestoikää, koska materiaalina oli komposiittimateriaali. 3DP-tekniikalla valmistetuille testikappaleille kuitenkin haluttiin määrittää todellinen murtolujuus vetokokeella (KUVA 44). Vetokokeissa lähdettiin mittaamaan materiaalin murtovenymää ja murtolujuutta. Murtolujuudeksi saimme ensimmäisessä 3DP-vetosauvalla 581 MPa ja murtovenymäksi 0 %, toisessa vetokokeessa saatiin 554 MPa ja murtovenymäksi 0 %. Vetokokeissa huomattiin, että 3DP-tekniikalla valmistetut materiaali 420ss+pronssi olevat vetokoesauvat käyttäytyvän hyvin hauraasti ja murtumatyyppi vetokokeissa oli selkeästi haurasmurtuma. Molemmissa 420ss+pronssi vetokoesauvoissa murtuminen tapahtui ainepaksuuden muutoskohdasta.

3DP-tekniikalla valmistettuja veto-puristuskoesauvoja tilattiin kiillotuksella 3 kappaletta (KUVA 45). Testikappaleen kiinnitysvoimaa jouduttiin nostamaan 40 % muokkauslujittumisen takia. Ensimmäisessä väsytestauksessa pidettiin sama voima amplitudi 16 kN, joka oli 316L vastaavan materiaalin väsymistestauksessa. Ensimmäisessä testauksessa kuormitustaajuutta muutettiin taulukon 5 mukaan.



KUVA 45. 3DP-tekniikalla tuotetut veto-puristuskoesauvat (Matti Kesonen.)

TAULUKKO 5. Ensimmäinen 16 kN väsytestaus 3DP-väsytestauskappaleella

Taajuus (Hz)	Kuormitusyöklit
10	44508
50	998
25	10146
15	1040

Testissä haluttiin testata taajuuden muutoksen vaikutusta väsymiseen hauraalla materiaalilla. 3DP-testikappaleiden tulokset näkyvät taulukossa 6.

TAULUKKO 6. 3DP-valmistusprosessi 420ss +pronssi

	Testi 1	Testi 2	Testi 3
F (N)	16000	17000	17000
$\sigma$ (Mpa)	318,3	338,2	338,2
N	56692	62700	91500
f (Hz)	10,50,25,15	10	10
Ra ( $\mu\text{m}$ )	~60	~60	~60
D (mm)	16,5	16,5	16,5
d (mm)	8	8	8

Testauksissa huomattiin taajuudella olevan merkitystä väsymisikään. Testauksessa huomattiin, että kaikki 3DP-tekniikalla tuotetut veto-puristuskoesauvat murtuivat ainepaksuuden muutoskohdasta (KUVA 46).



KUVA 46. Murtuminen ainepaksuuden muutoskohdasta (Matti Kesonen.)

DMLS- tekniikalla tuotettuja veto-puristuskoesauvoja oli yhteensä 12 kappaletta ja 1 vetokoesauva, joista kuudessa veto-puristuskoesauvassa ja yhdessä vetokoesauvassa oli suunnittelussa jätetty ko-  
neistusvarat (KUVA 47).



KUVA 47. Koneistusvaralla olevat veto-puristuskoesauvat ja vetokoesauva (Matti Kesonen.)

Koneistusvaralla olevat DMLS-tekniikalla tuotetut veto-puristuskoesauvat koneistettiin pinnankarheuteen  $R_a$  0,8  $\mu\text{m}$ . DMLS-tekniikalla tuotetuista veto-puristussauvoista 6 kappaletta valmistettiin suoraan oikeisiin mittoihin ja olivat jälkikäsittelemättömiä (KUVA 48). Tarkoituksena oli verrata pinnan karheuden vaikutusta DMLS-tekniikalla tuotetuissa veto-puristuskoesauvoissa. DMLS-tekniikalla pystyttiin kappaleet valmistamaan pinnankarheuteen  $R_a$  7-15  $\mu\text{m}$ .



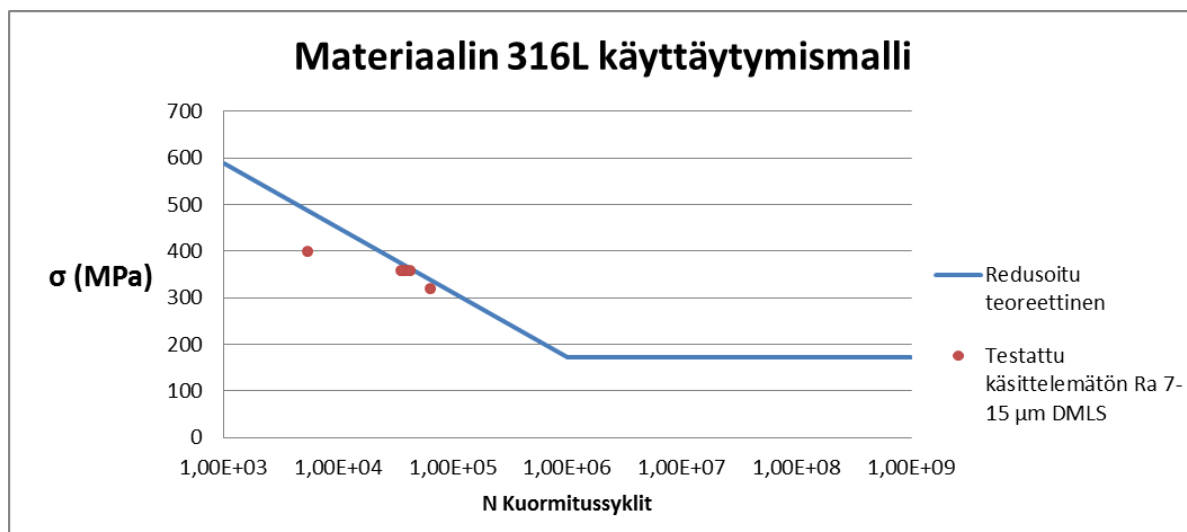
KUVA 48. DMLS- tekniikalla käsittelemättömät veto-puristuskoesauvat (Matti Kesonen.)

DMLS-tekniikalla valmistetulle vetokoesauvalle suoritetussa vetokokeessa saatiin murtolujuudeksi  $R_m$  654,1 MPa ja murtovenymäksi 32,5 %. DMLS-testikappaleilla käytetyt parametrit ja väsymisiät näkyvät taulukossa 7.

TAULUKKO 7. DMLS-veto-puristukoe parametrit ja tulokset

	$F$ (N)	$\sigma$ (MPa)	$N$	$f$ (Hz)
DMLS testi 1		16000	318,3	64817
Koneistettu testi 1		16000	318,3	422709
DMLS testi 2		20000	397,9	5389
Koneistettu testi 2		20000	397,9	23216
DMLS testi 3		18000	358,1	39128
Koneistettu testi 3		18000	358,1	107000
DMLS testi 4		18000	358,1	37020
Koneistettu testi 4		18000	358,1	177440
DMLS testi 5		18000	358,1	42930
Koneistettu testi 5		18000	358,1	332947
DMLS testi 6		18000	358,1	35320
Koneistettu testi 6		18000	358,1	198340

Testaukset suoritettiin kolmella eri voima-amplitudilla, joista määritettiin kuvaajat materiaalin käyttäytymismallista väsyttävässä kuormituksessa.

KUVA 49. Materiaalin EOS 316L käyttäytymismalli pinnankarheudella Ra 7-15  $\mu\text{m}$ 

Kuvassa 49 esitetään, kuinka testauksessa saadut tulokset poikkeavat teoreettisesti määritetystä materiaalin EOS 316L WÖHLER-käyrästä. Teoreettisissa määrittämissä käytettiin DMLS-tekniikalla tuotetun vetokoesauvan vetokokeista saatua murtolujuutta  $R_m$  joka oli 654,1 MPa.

DMLS-testikappaleista, jotka koneistettiin pinnankarheuteen Ra 0,8  $\mu\text{m}$  määritettiin myös kuvaaja materiaalin käyttäytymismallista väsyttävässä kuormituksessa (KUVA 50).





kuin vertailukappaleella materiaalia 316L vastaavalla. DMLS- tekniikalla tuotetuilla veto-puristuskoesauvoilla oli testien mukaan vähintään 12 % pitempi väsymisikä kuin 3DP-tekniikalla tuotetuilla veto-puristuskoesauvoilla.

Testaustuloksista pystyttiin päättelemään alustavasti, että DMLS- tekniikalla tuotetuissa koekappaleissa ei ollut hajonta niin suuri kuin 3DP-tekniikalla tuotetuissa. Veto-puristuskokeissa DMLS- testikappaleissa murtuminen alkoi aina materiaalin paksuuden muutoskohdasta. Kuvat 49 ja 50 esittävät, kuinka teoreettinen väsymisikä laskettuna testatusta murtorajasta  $R_m$ , eroaa käytännön aksiaalisesta veto-puristuskoe tuloksista. Vertailussa pinnankarheuden vaikutusta DMLS- testikappaleiden väsymisikään, koneistetun pintakarheudella Ra 0,8  $\mu\text{m}$  kesti prosenttialisella keskiarvolla 428 % enemmän mitä käsittelemätön DMLS-tekniikalla tuotetut kappaleet. Käsittelemättömistä DMLS-veto-puristuskoesauvojen väsymisiän tuloksista laskettiin keskiarvoksi 38600 kuormitusyksiä ja koneistetun DMLS- veto- puristuskoesauvojen keskiarvoksi 203932 kuormitusyksiä. Keskiarvoista laskettiin suurin poikkeama käsittelemättömistä ja koneistetuista DMLS- testikappaleista. Käsittelemättömien DMLS-testikappaleiden suurin poikkeama keskiarvosta oli 11 % ja koneistettujen DMLS-testikappaleiden oli 91 %.

## 7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä oli tarkoitus tutkia DMLS- ja 3DP-valmistustekniikoilla tuotettujen kappaleiden väsymisominaisuuksia ja saada alustava arvio, voidaanko DMLS- ja 3DP-tekniikoilla valmistettuja osia käyttää väsyttävässä kuormituksessa teollisuudessa. Olettamuksena oli, että ainetta lisäävällä valmistuksella tuotetut kappaleet eivät kestä niin hyvin väsyttävää kuormitusta kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. Testaustulokset kuitenkin osoittivat, että ainetta lisäävällä valmistuksella tuotetut testikappaleet kestivät paremmin väsyttävää kuormitusta kuin perinteisellä valmistusmenetelmällä tuotetut.

Perinteiset teoreettiset väsymisiän määrittäminen menetelmät eivät sovellu 3DP-valmistusprosessilla tuotettuihin rakenteisiin. DMLS-testikappaleiden väsymisiät noudattivat osittain perinteisen teoreettisen väsymisiän määrittäminen menetelmän antamia tuloksia. 3DP-tekniikalla tuotetut testikappaleet osoittivat testitulosten hajonnalla sen, että 3DP-valmistusprosessi ei ole tasalaatuinen rakenteissa, joita kuormitetaan väsyttävällä kuormituksella. Syyksi hajonnalle 3DP-valmistusprosessissa arvioitiin infuusiossa tapahtuvaa imeytysmateriaalin imeytysprosessin kontrolloimattomuutta ja lämpötilaa, joita infuusiossa joudutaan käyttämään. Yleensä väsyttävään kuormitukseen pyritään välttämään semmoisia materiaaleja, joissa on kaksifaasirakenne. Infuusioprosessissa tapahtuva infuusio ja siihen tarvittava lämpötila vaikuttavat materiaalinominaisuuksiin huomattavasti.

DMLS-tekniikalla tuotetuissa testikappaleissa pinnankarheudella oli huomattava merkitys tulosten hajonnassa sekä väsymisiässä. DMLS-testikappaleissa hajonta kasvoi, kun pinnankarheuden merkittävyys pieneni ja sisäisen rakenteen merkitys kasvoi. Väsytyksiässä oli kuitenkin suuri kasvu DMLS-testikappaleissa, joissa oli koneistettu pinta. DMLS-tekniikalla tuotettujen testikappaleiden testaukset paljastivat sen, että DMLS-valmistusprosessi on tasalaatuisempi kuin 3DP-valmistusprosessi raken-



teissa, joihin kohdistuu väsyttävää kuormitusta. DMLS- ja 3DP valmistettujen testikappaleiden tulokset väsyttävässä kuormituksessa olivat yllättävät. Väsymiskestävyyttä pystytään 3DP- ja DMLS- tekniikalla valmistetuissa rakenteissa parantamaan mm. pintakäsittelyllä ja lämpökäsittelyllä. Perinteiseen kylmävedetystä aihioista valmistettuun testikappaleisiin verrattuna 3DP- ja DMLS- valmistusprosessin tuomat materiaalinominaisuudet parantavat väsymiskestävyyttä. 3DP- ja DMLS- tekniikalla tuotetut rakenteet soveltuvat osittain teolliseen käyttöön, jossa kuitenkin DMLS-tekniikka soveltuu laajemmin sen tasalaatuisuutensa takia.

## LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- ATZ Online,History of fatigue. [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-14] Saatavissa:  
<http://www.atzonline.com/index.php;do=show/site=a4e/sid=GWV/alloc=38/id=61/special=Special+Simulation>
- AYRE Mike, 2014. DMLS design guide V4 - A basic guide to designing parts for the Direct Metal Laser Sintering '3D print' process. [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-11-14]. Saatavissa:  
<https://prezi.com/q55mkdhc7dwo/dmls-design-guide-v4/>
- BRANDI, E.2011 Materials & Design. [verkkoaineisto] Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior.Elsevier.[Viitattu 2014-10-31] Saatavissa:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0261306911005590>
- BRYDEN.Douglas B.2014. CAD and Rapid Prototyping for Product Design. Laurence King.Edinburgh (e-kirja)
- MATERIAALIN RAKENTEEN VAIKUTUS VÄSYMISEEN. Aalto yliopisto. Elektroniikan laitos. [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-14] Saatavissa: [https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-113.2110/luennot/S-113\\_2110\\_lh5.2110\\_luento\\_5-mekaaniset\\_ii.pdf](https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/s-113.2110/luennot/S-113_2110_lh5.2110_luento_5-mekaaniset_ii.pdf)
- IKONEN, Kari I.1991. Murtumismekaniikka. Helsinki. Otatieto Oy
- JINDAL, U.C. 2012. Experimental Stress Analysis . Pearson India.Intia (e-kirja)
- JINDAL, U.C. 2012. Strength of Materials. Pearson India.Intia (e-kirja)
- LEINO, R. 2014. Metallitekniikka.Talentum 23
- MAKKONEN,Matti M.2011.Väsymislajuuden mitoitusmenetelmät. Vaasan ammattikorkeakoulu
- MATILAINEN, Ville M.2012. Benchmarking of laser additive manufacturing process. Lappeenranta University of Technology.LUT Metal Technology.[verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-14] Saatavissa:  
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/84863/BSc%20Thesis%20Matilainen%20fv.pdf?sequence=1>
- METALLIC MATERIALS – FATIGUE TESTING – AXIAL FORCE-CONTROLLED METHOD. Suomen standardiliitto SFS-ISO 1099. 2006.
- MOURITZ, A.2012. Introduction to Aerospace Materials. Woodhead Publishing:Australia (e-kirja)

NEVILLE SACHS.2014. [verkkoaineisto] Failure Analysis of Mechanical Components [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-12-11] Saatavissa: <http://www.maintenanceworld.com/failure-analysis-of-mechanical-components/>

KORROOSIONESTO: ESIINTYMISMUODOT. Opetushallitus [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-14] Saatavissa: [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f2\\_korroosionesto\\_esiintymismuodot.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html)

OUTOKUMPU, About stainless steel [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-17] Saatavissa: <http://www.outokumpu.com/en/stainless-steel/about-stainless/how-stainless-steel-plate-is-made/Pages/default.aspx>

RIEMER,A,2014, Engineering Fracture Mechanics. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting.Elsevier, Lontoo.[verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-31] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013794414000757>

RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET. OSA 3: YLEISEEN KÄYTTÖÖN TARKOITETUT KORROOSIONKESTÄVÄT TANGOT, VALSSILANGAT, LANGAT, PROFIIILIT, KIRKKAAT TUOTTEET JA PUOLIVALMISTEET. TEKNISET TOIMITUSEHDOT. Suomen standardiliitto SFS – EN 1088-3. 2005.

SALMI, Tapio S. 2010. Lujuusoppi. Tampere. Pressus Oy

SWIFT, K.G.BOOKER, J.D. 2013 Manufacturing Process Selection Handbook. Elsevier.Lontoo (e-kirja)

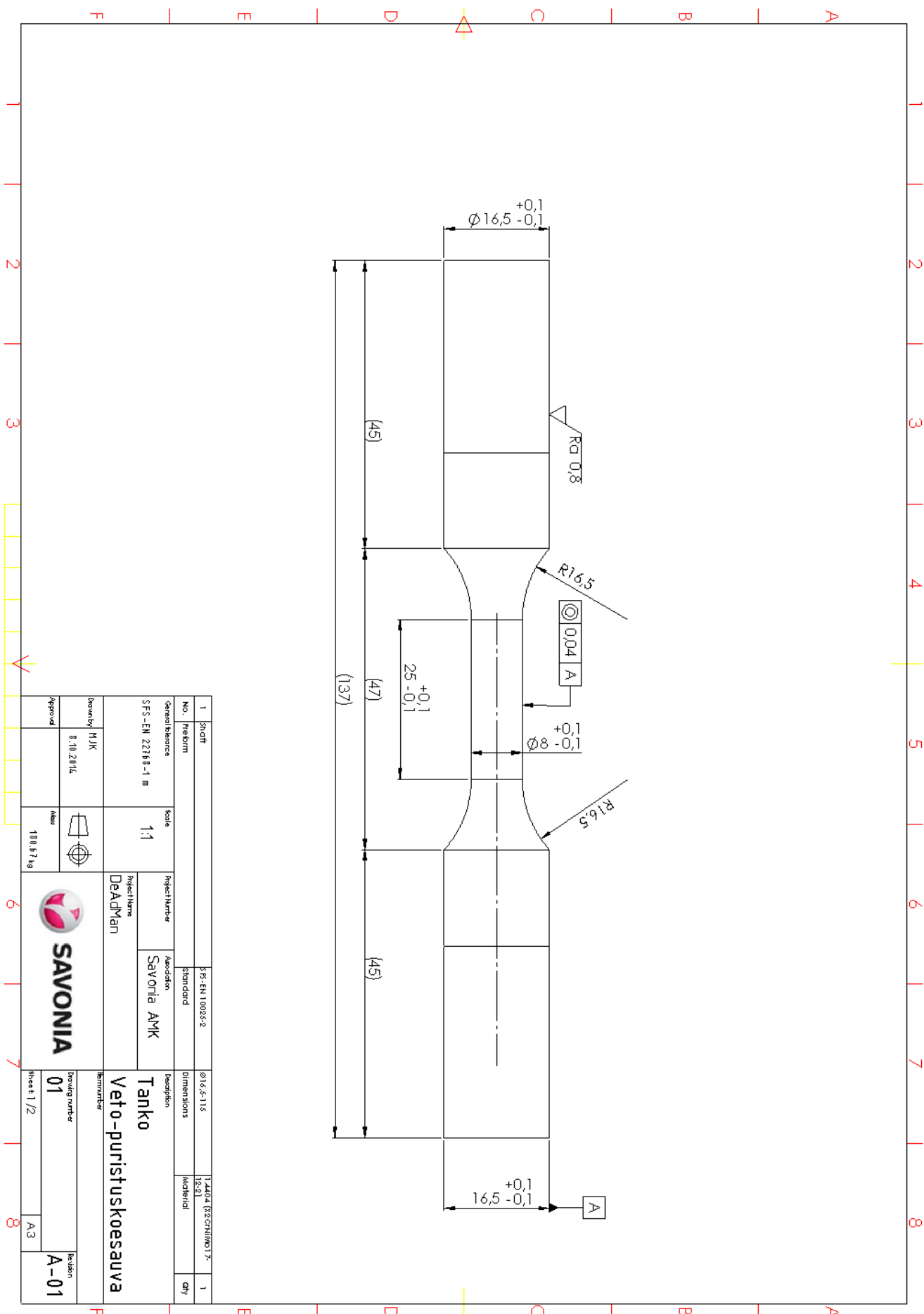
TOTAL MATERIAL.2010. [verkkoaineisto] Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM): Part Two [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-12-11] Saatavissa: <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=299>

TÄHTINEN, Susanna T.2009. PINNANLAADUN MÄÄRITYSTEKNIIKAT JA MITTAUSLAITTEET VIIMEISTELYSORVAUKSEN YHTEYDESSÄ. LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLI-OPISTO. Konetekniikan koulutusohjelma. . [verkkoaineisto] [Viitattu 2014-10-31] Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/44131/nbnfi-fe200903191244.pdf?..>

WALTER + BAI AG, 2014. INSTRUCTION MANUAL ORIGINAL SERVOHYDRAULIC FATIGUE TESTING MACHINE TYPE LFV 500-HH

WOHLER ASSOCIATES, 2014. Wohlers Report 2014. Wohler Associates Inc, USA [Viitattu 2014-12-11]

## LIITE 1: VETO-PURISTUSKOESAUVAN VALMISTUSPIIRUSTUKSET



## LIITE 2: MATERIAALIN EOS STAINLESS STEEL 316L TEKNISET OMINAISUUDET



## Material data sheet

### Mechanical properties of parts (at room temperature)

As built	
Ultimate tensile strength [5]	
- in horizontal direction (XY)	640 ± 50 MPa
- in vertical direction (Z)	540 ± 55 MPa
Yield strength, Rp0.2% [5]	
- in horizontal direction (XY)	530 ± 60 MPa
- in vertical direction (Z)	470 ± 90 MPa
Young's modulus [5]	
- in horizontal direction (XY)	typ. 185 GPa
- in vertical direction (Z)	typ. 180 GPa
Elongation at break [5]	
- in horizontal direction (XY)	40 ± 15 %
- in vertical direction (Z)	50 ± 20 %
Hardness [6]	typ. 85 HRB

[5] Machining and testing of the test bars according to ISO 6892 / ASTM E8M, proportional test pieces, diameter of the neck area 5 mm (0.2 inch), gauge length 4D = 20.0mm (0.79 inch), stress rate 10MPa/s, strain speed in plastic region 0.375 1/min.

[6] Rockwell hardness (HRB) measurement according to EN ISO 6508-1 on polished surface.

## LIITE 3: I. MATERIALISE 420 SS+PRONSSI MATERIAALIN TEKNISET OMINAISUUDET

<b>Alloy Family</b>	420 SS+Bronze
<b>UTS</b>	99 KSI (682 MPa)
<b>Yield</b>	66 KSI (455 MPa)
<b>Modulus</b>	21.4 MPa (147 GPa)
<b>Elongation</b>	2.30%
<b>Hardness</b>	20-25 HRc
<b>Color</b>	Old Silver, Medieval Pewter or Wheat Penny

## LIITE 4: LFV 500- HH VETO- JA VÄSYMISTESTAUSLAITTEISTON TEKNISET TIEDOT

**A3 Technical data****Performance attribute****LFV 500-HH**

Force max.	: 500 kN dynamic
Testing height between Grips	: 80 - 2050 mm
Load measuring	: Load Cell Type 1248EAW 500 kN
Measuring accuracy from 2.500 to 500.000 kN tension/compression	: Grade 0.5, ISO 7500-1 T2
Piston stroke	: 400 mm

**PAC-134**

Working pressure Pression	: 315 bar
Pump delivery P1	: 134 l/min
Tank capacity	: approx. 500 litres
Oil viscosity	: 46 cSt at 40 degree C (Hydraulic oil DIN 51524 T2, DIN 51519; ISO VG 46)
Soundlevel	: 70 dB(A)

**Dimensions and Weights****LFV 500-HH**

Dimensions W x D x H	: 2000 x 1925 x 5080 mm
Weight (with grips)	: approx. 10000 kg

**PAC-134**

Dimensions W x D x H	: 800 x 2143 x 1950 mm
Weight	: approx. 1580 kg

**Supplying, Interface, Connections****LFV 500-HH**

Power supply	: 3 x 400V+N+PE
Current	: 150 Amp.
Electrical pre- fuse	: 200 Amp.