



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

AINETTA LISÄÄVÄLLÄ VALMISTUKSELLA TUOTETTUJEN METALLIKAPPALEIDEN SISÄISTEN KENNO- JA RISTIKKORAKENTEIDEN VAIKUTUS VÄSYMISKESTÄVYYTEEN

Konetekniikan koulutusohjelma

TEKIJÄ:

Mikko Hoffren

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Mikko Hoffren	
Työn nimi Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallikappaleiden sisäisten kenno- ja ristikkorakenteiden vaikutus väsymiskestävyyteen	
Päiväys	1. joulukuuta 2014
Sivumäärä/Liitteet	46/3
Ohjaaja(t) Päätoiminen tuntiopettaja Tatu Westerholm ja yliopettaja Esa Hietikko	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Savonia AMK, DeAdMan-hanke	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämä opinnäytetyö oli osa Savonia-ammattikorkeakoulun DeAdMan-hanketta, jonka tavoite oli kartoittaa ainetta lisäävän valmistuksen tuomia mahdollisuuksia ja suunnitteluperiaatteita yhteistyöryityksille. Opinnäytetyön tarkoitus oli tutustua ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallisten osien särönkasvuun, sisäisiin rakenteisiin ja niiden ominaisuuksiin sekä selvittää voiko särönkasvua pysäyttää käyttämällä sisäisiä rakenteita.</p> <p>Aiheeseen liittyvään teoriaan tutustuttiin kirjallisuustutkimuksen kautta, jota seurasi koekappaleiden suunnittelu SolidWorks-ohjelmalla ja FEM-analyysi Ansys-ohjelmalla. FEM-analyysillä varmennetut koekappaleet oli määrä valmistaa ainetta lisäävällä valmistuksella 3DP- ja DMLS-tekniikoilla EOS 316L ja 420SS/pronssista. Valmistuksessa tapahtuneiden viivästysten takia vain 420SS/pronssi-koekappale saatiin testattua. Koekappaleelle suoritettiin dynaaminen väsytykoe Walter + Bai AG LFV 500-HH –kuormituskeuhällä, joka keskeytettiin särön etenemisen tutkimista varten. Särön etenemistä pyrittiin tutkimaan MicroCT-laitteella otetuilla röntgenkuvilla. MicroCT-laitte paljastui kuitenkin kuvauksiin sopimattomaksi ja sen sijaan säröjen tutkimiseen käytettiin tunkeumanestetarkastusta ja stereomikroskooppia.</p> <p>Tutkimuksessa havaittiin, että FEM-analyysi kohdistaa voiman totuuden mukaisesti koekappaleen uraan. Väsyttävän kuormituksen arvioitu voima oli kuitenkin sopimaton 3DP-koekappaleelle ja testissä kappaleeseen muodostui uran läheisyyteen vain yksi näkyvä makrosärö ja kahdeksan mikrosäröä. 420SS/pronssin väsymiskestävyys osoitautui arvioitua paremmaksi vaikkakin epätasaiseksi. Tekniikalla tuotettujen sisäisten rakenteiden väsymiskestävyyden arvioidaan olevan ulkoisia rakenteita heikompi huonomman pinnanlaadun takia. Sisäisten rakenteiden arvioidaan olevan soveltuvampia DMLS-tekniikalla tuotettuihin kappaleisiin, sillä tekniikan tuottama pinnanlaatu on huomattavasti parempi.</p>	
Avainsanat DMLS, 3DP, kennorakenne, ristikkorakenne, metallien 3D-tulostus, ainetta lisäävä valmistus, särönkasvu	
Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Mikko Hoffren			
Title of Thesis Fatigue Durability of Honeycomb and Grid Structures Produced with Metal Additive Manufacturing			
Date	1 December 2014	Pages/Appendices	46/3
Supervisor(s) Mr Tatu Westerholm, Lecturer and Mr Esa Hietikko, Principal Lecturer			
Client Organisation /Partners Savonia University of Applied Sciences, DeAdMan-project			
<p>Abstract</p> <p>This thesis was a part of the DeAdMan-project in which Savonia University of Applied Sciences surveyed possible applications and design guidelines for additive manufacturing for local companies. The objective of this thesis was to study the fracture mechanics of parts produced with metal additive manufacturing, study lattice structures and find out whether it is possible to stop fracture growth using a lattice structure.</p> <p>First the theoretical background was studied and then 3D models of the specimen were made using SolidWorks. The 3D models were verified and analyzed using Ansys. The verified 3D models were to be manufactured using 3DP and DMLS additive manufacturing techniques from EOS 316L and 420SS/bronze. Due to delays in manufacturing only a single 420SS/bronze sample was tested. The sample was dynamically fatigue tested using Walter + Bai AG LFV 500-HH fatigue testing machine. The fatigue test was interrupted to study fracture growth using X-ray pictures taken with MicroCT X-ray apparatus but it was quickly found out that X-rays were unable to penetrate the shell of the sample. As an auxiliary method a penetrant inspection was performed followed by surface inspection with a stereomicroscope.</p> <p>The tests showed that the theoretical position of maximal stress was in the same place as the actual position of maximal stress. However, the testing load was not correct for the 3DP sample as only one macro fracture and eight micro fractures were formed during fatigue testing. The fatigue strength of 420SS/bronze was proved to be good but it varied a lot. Lattice structures manufactured with 3DP had poor surface quality and as such they are estimated to have lower fatigue strength than surface features. It is estimated that lattice structures manufactured using DMLS are more fatigue resistant as the surface quality produced by the technique is better.</p>			
Keywords DMLS, honeycomb, grid structures, metal 3D-printing, additive manufacturing, fracture growth, lattice structures			
public			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS	7
2.1	DMLS.....	8
2.2	SLS.....	8
2.3	3DP	9
2.4	EBM.....	10
2.5	LENS	10
2.6	Tukirakenteet	11
2.7	Huomiointi suunnittelussa	13
2.8	Materiaalin kierrätys ja kappaleen jälkikäsittely	15
3	MURTUMISMEKANIikka.....	16
3.1	Murtumisen vaiheet	16
3.2	Väsyminen	17
3.3	Särönkasvun ja kappaleen kestoiän arviointi.....	18
3.4	Särönkasvu metallien ainetta lisäävässä valmistuksessa	19
3.5	Suunnitteluperiaatteet väsymisen estämiseksi.....	21
4	KENNO- JA RISTIKORAKENTEET	23
4.1	Ristikot	23
4.2	Kennot.....	25
5	KENNO- JA RISTIKORAKENTEIDEN VÄSYMINEN	27
5.1	Koekappaleiden ja kokeiden suunnittelu.....	27
5.2	Kokeiden suorittaminen.....	34
5.3	Lopputulokset ja virhearvioinnit	43
6	YHTEENVETO.....	44
6.1	Tutkimustulokset ja päätelmät	44
	LÄHTEET	45
	LIITE 1: EOS M-SERIES AINETTALISÄÄVÄ VALMISTUSLAITE	47
	LIITE 2: EOS 316L MATERIAALIOMINAISUUDET	48
	LIITE 3: 420SS / PRONSSI MATERIAALIOMINAISUUDET.....	49

KÄSITTEET

σ_w	Vaihtolujuus
σ_w^{red}	Redusoitu vaihtolujuus
σ_a	Jännitysamplitudi
σ_{1000}	Jännitys tuhannen kuormitusyökin väsymisiällä
R_m	Murtolujuus
N	Kuormitusyökin lukumäärä
ΔK	Jännitysintensiiteettikertoimen vaihtelu
a	Särönleveys
C_1	Redusointiparametri kappaleen koolle
C_2	Redusointiparametri kappaleen kuormitustyyppille
C_3	Redusointiparametri kappaleen pinnan laadulle
F	Taajuus
T	Aika
STL	Pintageometria tiedostotyyppi, jota käytetään ainetta lisäävässä valmistuksessa.
FEM	Finite Element Method eli Rajallisten elementtien menetelmä laskee numeerisesti arvioita kappaleen jännityksistä ja siirtymistä.
Schoenin gyroidi	Alan Schoenin löytämä geometrinen muoto, jossa ei ole yhtään suoraa pintaa tai viivaa.
Schwartzin timantti	Yksi Hermann Schwarzin kehittämistä minimaalisen pinnan geometrioista.
Solidi	CAD-ohjelmalla tehty kiinteä kappale.

1 JOHDANTO

Ainetta lisäävä valmistus eli 3D-tulostus on mullistamassa tuotantoa maailmanlaajuisesti. Tekniikka kehittyi huimaa vauhtia yhä useampien yritysten kehittäessä ainetta lisääviä valmistusmenetelmiä tarkemmiksi ja tehokkaammiksi. Samalla kehitetään täysin uusia tekniikoita tietämyksen lisääntymisenä.

Ainetta lisäävä valmistus on vähitellen rantautumassa myös Suomen teollisuuteen ja sen käyttöä harkitaan useassa yrityksessä. AM-tekniikoilla valmistettujen materiaalien ominaisuuksia on tutkittu toistaiseksi vähän erityisesti niiden väsymislujuuden osalta.

Yksi ainetta lisäävän valmistuksen tuomista mahdollisuuksista on kappaleiden sisäisten rakenteiden luominen. Kappaleen sisäiset rakenteet mahdollistavat kappaleen painon ja kestävyuden optimoinnin. Vähemmän tunnettu mahdollinen sovelluskohde on sisäisten varmuusristikkojen luominen kappaleisiin.

Tämä opinnäytetyö on osa Savonia ammattikorkeakoulun DeAdMan-hanketta jonka tavoitteena oli tutkia ainetta lisäävän valmistuksen tuomia mahdollisuuksia yhteistyöyrityksille, sekä sen suunnitteluperiaatteita. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kappaleen sisäisiä varmuusristikkoja, sekä kennorakenteita ja sitä kuinka ne käyttäytyvät väsyttävän kuorman alaisena. Työ suoritettiin kirjallisuustutkimuksena, jota seurasi koekappaleiden empiirinen testaus teoriasta opittujen tietojen pohjalta. Lopputuloksissa pohdittiin erityisesti olemassa olevan teorian yhteensopivuutta metallien ainetta lisäävään valmistukseen.

2 AINETTA LISÄÄVÄ VALMISTUS

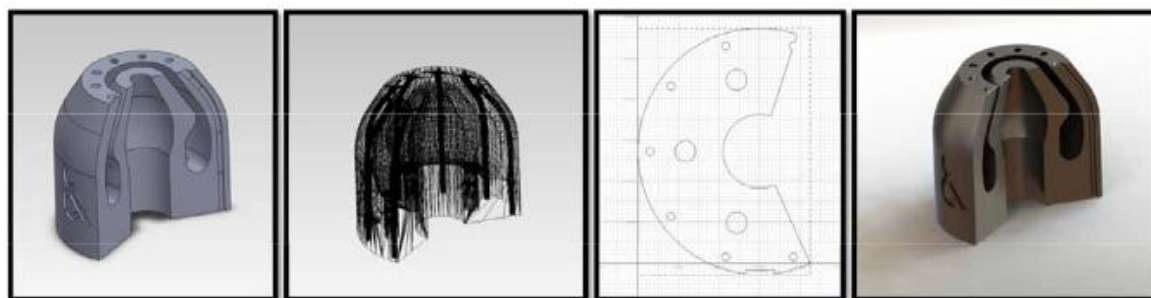
Additive Manufacturing (lyhyesti AM) eli ainetta lisäävä valmistus on valmistusmenetelmä, jossa ainetta lisätään sen poistamisen tai muovaamisen sijaan. Menetelmästä käytetään myös nimiä 3d-tulostus, rapid prototyping eli pikaprototyypointi, sekä rapid manufacturing eli pikavalmistus.

Menetelmässä 3D-malli pilkotaan tasoiksi, jotka valmistetaan kerros kerrokselta. Tämä mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden käytön kappaleen yleisessä muodossa ja sen sisällä. AM-prosessi etenee seuraavalla tavalla. Aluksi luodaan 3D-malli, jonka jälkeen 3D-malli muunnetaan STL-tiedostoksi, joka pilkotaan valitulla viipalointiohjelmistolla. Lopuksi laite valmistaa tuotteen viipaloidun tiedoston pohjalta (kuva 1). (PIILI 2013)

Sisäisten rakenteiden muodostaminen ja monimutkaisten geometrioiden käyttö mahdollistavat painon ja ainevahvuuden optimoinnin. Materiaalia käytetään vain tarvittava määrä säästäten materiaalikustannuksissa. Tähän poikkeuksena ovat kuitenkin tukimateriaalit, joita tarvitaan roikkuvien pintojen tukemiseen. Näitä ovat esimerkiksi vaha, liukenevat muovit ja malliin rakennettavat tuet. AM-tekniikassa ei tarvita aihioita, vaan valmistuksessa käytettävä aine on joko neste, langan tai jauheen muodossa. Tämä kutistaa varsinaista tuotteen valmistusketjua suunnittelupöydältä valmiiksi tuotteeksi. Negatiivisina puolina voidaan pitää menetelmän automaatiotason edellyttämää erityistä osaamista ja jälkikäsittelyn tarvetta ainetta lisäävän valmistuksen jälkeen. (SWIFT ja BOOKER 2013.)

Tyypillisiä käyttökohteita AM-tekniikoille ovat konseptimallit, proteesit, valumuotit ja mallit, prototyypit ja värimallit eri käyttötarkoituksiin (SWIFT ja BOOKER 2013). Ainetta lisäävää valmistusta käytetään myös muiden sovellusten piensarjatuotantoon, sekä yksittäisten osien valmistukseen (BRYDEN 2014).

Tässä opinnäytetyössä rajoitutaan metallien AM-tekniikoihin. Lukuisia muita tekniikoita on saatavilla muoveille, kumille, keraamisille aineille ja monille muille materiaaleille. Uusia tekniikoita, myös kehitetään jatkuvasti lisää.



Kuva 1. Ainetta lisäävän valmistuksen vaiheet (PIILI 2013.)

2.1 DMLS

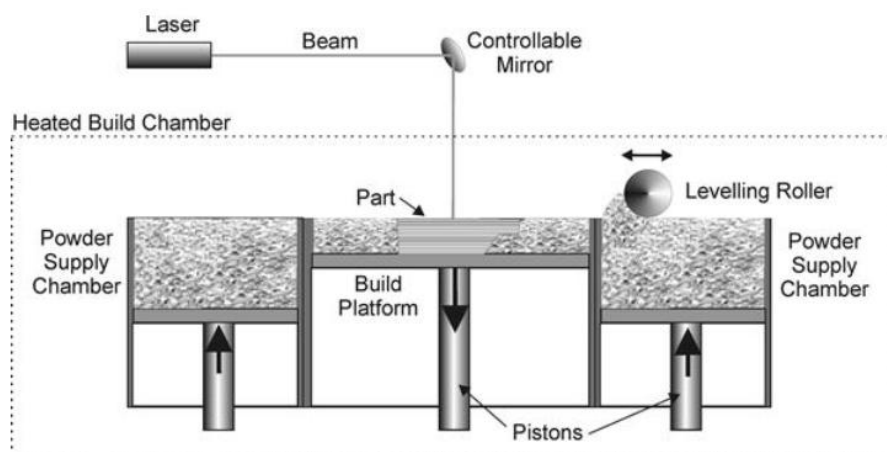
DMLS eli Direct Metal Laser Sintering on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jonka on kehittänyt EOS e-Manufacturing Solutions. DMLS-tekniikka hyödyntää jauhepetiprosessia ja suurteholasera kerrosten luomiseen. Työstökammio täytetään ennen prosessin alkua suojakaasulla, jolla estetään kappaleensisäistä hapettumista ja jauheen syttymistä. Työstökone levittää jauhetta annetun kerrospaksuuden verran työstöalueelle. Tämän jälkeen kappaleen muoto kyseisessä kerroksessa sulatetaan jauheesta kohdistetun laserin avulla. Työstöaluetta lasketaan kerrosvahvuuden verran ja prosessi alkaa alusta. Tämä jatkuu kunnes kappale on valmis (kuva 2). Kappaleen valmistuttua, ylimääräinen jauhe poistetaan ja valmis osa leikataan alustasta irti. (PIILI 2013.)

DMLS-tekniikalla saavutetaan $\pm 0,05$ - $\pm 0,25$ mm toleranssialue. Pinnankarheus DMLS-tekniikalla valmistetulla kappaleella on tyypillisesti välillä 7 - 10 μm Ra. DMLS-tekniikalla on päästy jopa $>0,02$ mm kerrosvahvuuksiin. (SWIFT ja BOOKER 2013.)

2.2 SLS

Kiinteää ainetta tuottavasta DMLS-tekniikasta poiketen SLS-tekniikassa (Selected Laser Sintering) jauhe sintrataan huokoiseksi kappaleeksi, johon imeytetään muuta metallia kestävyuden lisäämiseksi. Suurin eroavaisuus DMLS-tekniikan prosessiin on kohdistetun laserin teho (kuva 2). SLS-tekniikassa käytetyn laserin teho on alle puolet DMLS-tekniikassa käytetyn laserin tehosta. Varsinaisen AM-prosessin jälkeen kappale on niin sanotussa "vihreässä tilassa", jossa se hajoaa helposti. Vihreässä tilassa oleva kappale siirretään uuniin, jossa siihen imeytetään metallia infiltraatioprosessissa. Yleisin käytössä oleva imeytysmetalli on pronssi. Infiltraatioprosessin jälkeen kappaleet kestävät rasitusta huomattavasti enemmän kuin vihreässä tilassa. (SWIFT ja BOOKER 2013.)

SLS-tekniikalla saavutettavat toleranssit ja pinnankarheudet ovat DMLS-tekniikan tasoa. Kerrosten korkeus on tyypillisesti välillä $0,075$ - $0,15$ mm riippuen pulverista. (SWIFT ja BOOKER 2013.)



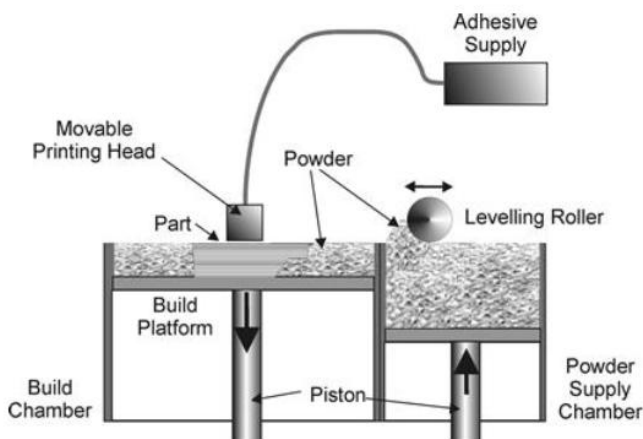
Kuva 2. Jauhepetiprosessin toimintamalli (SWIFT ja BOOKER 2013).

2.3 3DP

Kolmantena vaihtoehtona metallin ainetta lisäävälle valmistukselle on MIT:n kehittämä 3DP eli 3D Inkjet Powder Printing, jossa laserin sijaan käytetään tulostuspäällä levitettävää liima-ainetta. Liima-aineella pulveri sidotaan kiinteäksi kappaleeksi (kuva 3). Liima-aine pitää kappaleen kasassa vihreässä tilassa, kunnes se poltetaan kappaleesta sintrausvaiheessa. Sintrauksen jälkeen kappaleen huokoiset täytetään SLS-tekniikan tavoin imeytysmetallilla infiltraatioprosessissa. 3DP-tekniikasta on olemassa yksipäisiä sekä monipäisiä laitteita. Monipäisellä laitteella voidaan kerros tehdä yhden ylimenon aikana nopeuttaen tulostusnopeutta huomattavasti. 3DP-tekniikalla valmistetut kappaleet ovat tyypillisesti 50 % sidosainetta ja 50 % jauhetta. (SWIFT ja BOOKER 2013.)

Verrattuna muihin metallisten aineiden AM-tekniikoihin on 3DP-tekniikka epätarkka $\pm 0,1\text{--}\pm 0,5$ mm toleransseilla. Myös kappaleen pinnankarheus on tyypillisesti luokkaa $60 \mu\text{m Ra}$. (SWIFT ja BOOKER 2013.)

MIT:n kehittämää 3DP-tekniikkaa on jatkojalostanut ExOne. Laitteet ovat suurimpia valmistuskammion ($800 \times 500 \times 400$ mm) valmistustilavuudella mitattuna. (EXONE, 2012.) Pinnanlaatua on saatu parannettua $15 \mu\text{m Ra}$, liima-aineen suhdetta jauheeseen on supistettu 40-prosenttiin ja kerrosvahvuus on supistettu $50 \mu\text{m}$ minimiin (kuva 4). Resoluutio eli valmistuksen erottelutarkkuus on sivuttaissuunnille $0,0635$ mm ja pystysuunnalle $0,100$ mm. (EXONE 2012.)



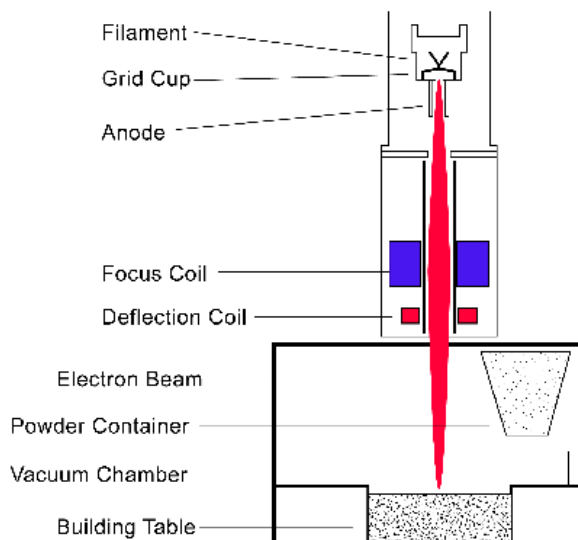
Kuva 3. 3DP-valmistusprosessin toimintamalli (SWIFT ja BOOKER 2013).



Kuva 4. 3DP-tekniikalla valmistettu roottori (EXONE 2012)

2.4 EBM

EBM eli Electron Beam Melting on Arcam AB:n kehittämä ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa jauhepetiin kohdistetaan suurtehoisia elektronisäteitä (kuva 5). Työstökammiossa on valmistuksen aikana 1×10^{-5} mBar tyhjiö. Säteitä on käytössä useita, joka nopeuttaa kerrosten valmistamista. EBM-tekniikalla valmistetut kappaleet ovat täysin kiinteitä kuten DMLS-tekniikassa. Lämpökäsittelylle ei kuitenkaan ole tarvetta sillä koko jauhepetiä esilämmitetään koko prosessin ajan. Täten kappaleet päästetään prosessin aikana. (ARCAM 2014.)

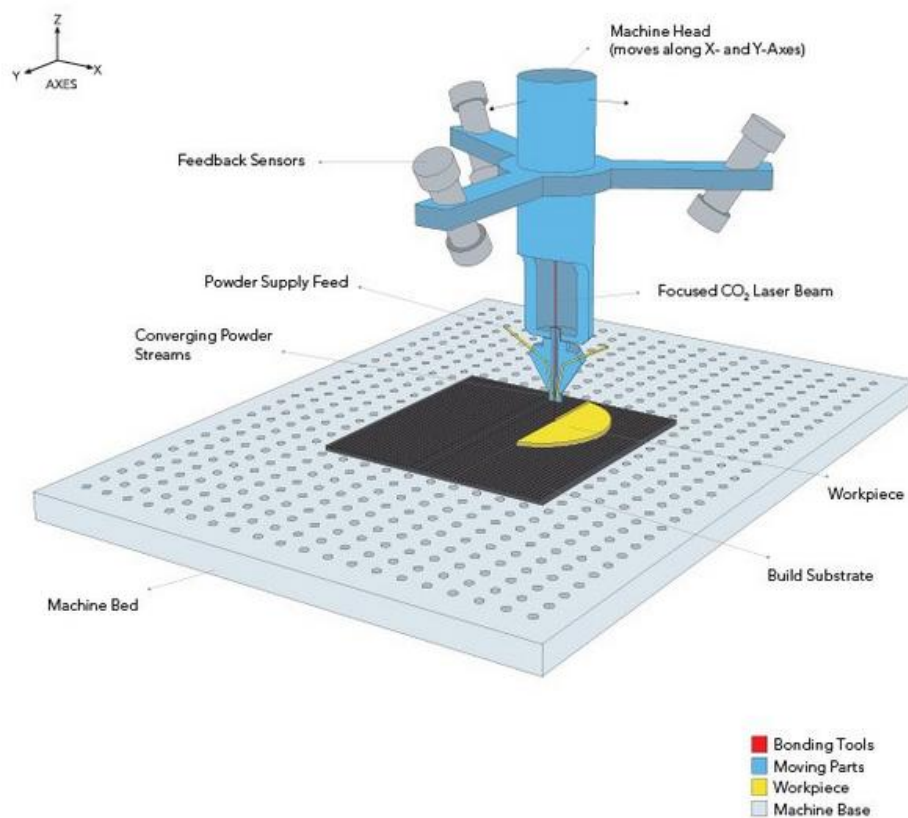


Kuva 5. EBM-prosessin toimintamalli (HIEMENZ 2007).

2.5 LENS

LENS eli Laser Engineered Net Shaping on ainetta lisäävä valmistusmenetelmä, jossa metallijauhetta syötetään suuttimesta kohdistettuun laseriin, joka sulattaa jauheen kappaleen pintaan (kuva 6). Muista ainetta lisäävistä menetelmistä poiketen LENS-tekniikalla pystytään lisäämään olemassa olevaan kappaleeseen ainetta. Tämä ominaisuus mahdollistaa olemassa olevien osien muokkauksen ja korjauksen. Toisena erikoisena ominaisuutena menetelmällä on mahdollisuus sekoittaa useaa materiaalia kappaleen valmistuksen aikana. Tämä mahdollistaa komposiittimateriaalit, joiden materiaaliominaisuudet ovat valmistettavan osan käytön, taloudellisuuden tai valmistusajan mukaan optimoituja. LENS-tekniikka on suuttimen käytön takia hitaampi verrattuna muihin metallien ainetta lisääviin menetelmiin. LENS-menetelmällä tukimateriaalien tuottaminen on haastavaa, joten roikkuvien pintojen tekeminen ei ole kannattavaa. (BRYDEN 2014.)

Tyypillinen kerrosvahvuus vaihtelee välillä 1,6-0,1 mm. Kerrospaksuuden suuruuden takia kappaleet ovat karheita ja vaativat jälkikäsittelyä. (BRYDEN 2014.)



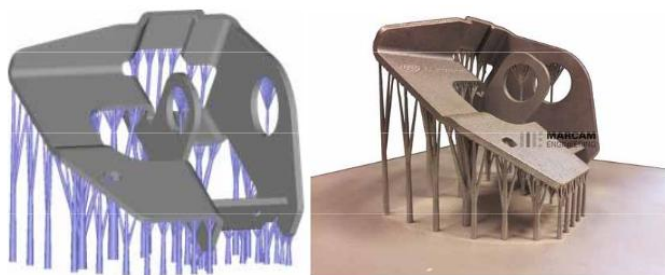
Kuva 6. LENS-tekniikan toimintamalli (BRYDEN 2014).

2.6 Tukirakenteet

Tukirakenteet ovat välttämättömiä DMLS-tekniikkaa käyttäessä, kun kappaleen ulokkeiden pinnat ovat jyrkässä kulmassa tulostusalustasta katsottuna (SOLID CONCEPTS 2014). Eri materiaaleilla on eri minimikulmat, ruostumattomilla teräksillä kulma on 30 astetta (AYRE 2014.). Esimerkkejä jyrkistä muodoista ovat ympyrät, pallot, kaaret ja suorat sillat. Tukimateriaalia tarvitaan myös lämmön siirtämiseen kappaleesta, jotta se voi jäähtyä tarpeeksi nopeasti. Tukirakenteista pyritään luomaan helposti irrotettavia. (PURTONEN, SALMINEN ja PIILI 2014-10-21.)

SLS- ja 3DP-tekniikassa kappaleen huokoisuuden ansiosta jauhe pystyy tukemaan työstettävän kappaleen roikkuvia pintoja, vaikkakin valmistetun kappaleen riippuvan pinnan on syytä olla muita kohtia paksumpi. Esimerkiksi i.materialise suosittelee 6 mm paksuja riippuvia pintoja ja muille pinnoille 3 mm minimi paksuutta. (SWIFT ja BOOKER 2013.; I.MATERIALISE 2014.)

Yhtenä vaihtoehtona ovat puutyypiset tukirakenteet, joiden tarkoituksena on tukea kappaletta mahdollisimman suurelta alueelta, käyttämättä koko alustaa tukirakenteelle. Tämä säästää materiaalia varsinkin suurissa kappaleissa (kuva 7).



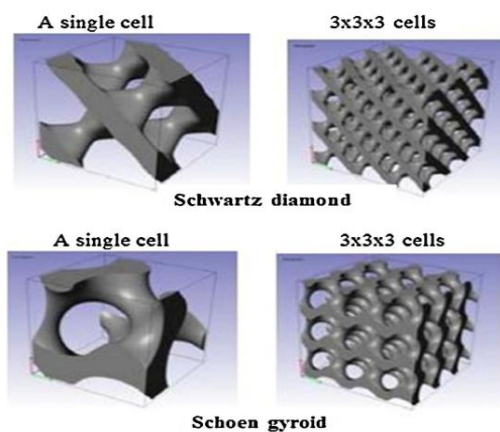
Kuva 7. Puutyypin tukirakenteen havainne kuva (PIILI 2013).

Toinen vaihtoehto tukimateriaalille on huokoisten pilareiden tulostaminen. Pilareiden päissä on ohut tartuntapinta, joka helpottaa aineen poistamista. Huokoisten pilareiden käyttö soveltuu parhaiten pienimmille kappaleille, joissa materiaalin käyttö ei riistädy käsistä (kuva 8).



Kuva 8. Huokoiset pilarit tukirakenne havainne kuva (PIILI 2013).

Monimutkaisemmista tukirakenteista hyviä esimerkkejä ovat Schwartzin timantti ja Schoen gyroidi (kuva 9). Hyötyjä näissä tukirakenteissa ovat geometria, jolla saadaan 8 – 15 % ainetiheydellä saadaan tuettua kiinteitä roikkuvia pintoja, 92 % jauhenkierrätettävyys eli huomattavan pieni tukirakenteesta aiheutuva materiaalihukka ja muotojen kestävyys, sekä hyvä lämmönjohtokyky. Tukirakenteen solujen mitoitus tuo kuitenkin haasteita, sillä liian pieni tukirakennesolu rikkoutuu valmistuksen aikana ja liian suuri tukirakennesolu ei tuo tarvittavaa tukea tuettavalle pinnalle (taulukko 1). (HUSSEIN, HAO, CHUNZE, HAO, EVERSON ja YOUNG 2013.)



Kuva 9. Schwartzin timantti ja Schoen gyroidi havainne kuva (HUSSEIN, HAO, CHUNZE, HAO, EVERSON ja YOUNG 2013).

Taulukko 1. Schwartzin timantin ja Schoen gyroidin DMLS-tekniikalla valmistettavissa olevat mitat ja tiheys (HUSSEIN, HAO, CHUNZE, HAO, EVERSON, ja YOUNG 2013).

Manufacturability of lattice support structures.

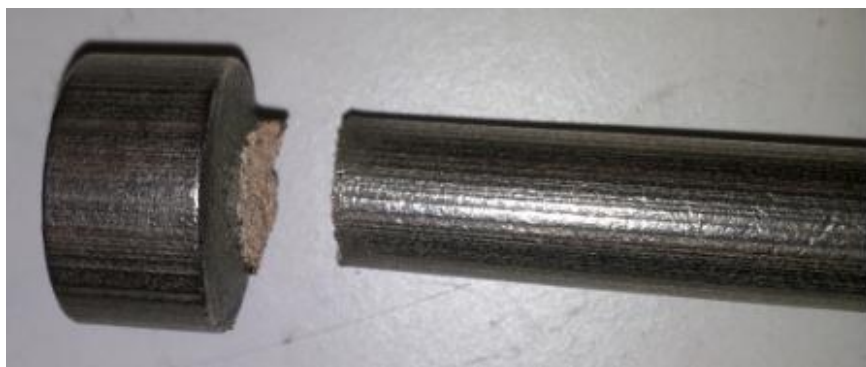
Type	Cell size (mm)	Volume fraction (%)	Build condition
Diamond	4	10	×
Diamond	4	12	✓
Diamond	4	15	✓
Diamond	5	10	×
Diamond	5	12	✓
Diamond	5	15	✓
Gyroid	3	8	✓
Gyroid	3	12	✓
Gyroid	3	15	✓
Gyroid	4	8	✓
Gyroid	4	10	×
Gyroid	4	12	✓
Gyroid	4	15	✓
Gyroid	5	8	×
Gyroid	5	10	×
Gyroid	5	12	✓
Gyroid	5	15	✓

✓/: successfully build; ×: build failure.

2.7 Huomiointi suunnittelussa

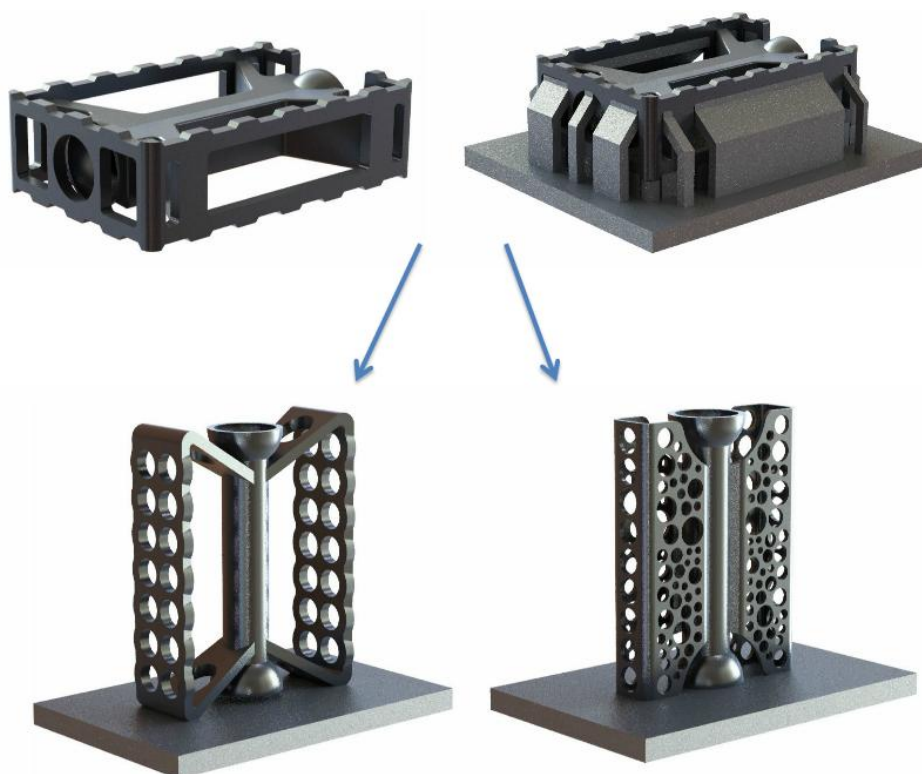
Ainetta lisäävä valmistus mahdollistaa kappaleen optimoinnin sen funktion mukaan. Jäähdytys-, kaas- ja nestekanavat voidaan suunnitella virtaukselle optimaalisiksi. Myös kappaleen sisäinen rakenne voidaan optimoida esimerkiksi painon tai rasituksen mukaan. Menetelmillä on myös rajoitteensa. Laittekohtaista minimiseinänpaksuutta on syytä käyttää. Minimiseinänpaksuus vaihtelee 0,1 – 3 mm välillä AM-tekniikasta ja laitteesta riippuen. Valmistaja ilmoittaa tämän omista menetelmätieläissaan. Toinen huomiota vaativa tekijä on onttojen kappaleiden jauheenpoisto, mikäli AM-tekniikka käyttää jauhepetiprosessia. Jauhepetiprosessia käyttävissä menetelmissä käytettävä metallijauhe tarvitsee poistumisaukon kappaleeseen, mikäli kappaleessa on käytössä sisäisiä onttonnuksia. Onttonnuksia voivat olla esimerkiksi kenno- ja ristikkorakenteet. Jauheenpoiston on syytä olla kooltaan yli millimetrin kokoinen, mutta mitä suurempi poisto, sitä helpompi jauhe on poistaa. (SOLID CONCEPTS 2014; SWIFT ja BOOKER 2013.)

Tekniikoissa joissa käytetään infuusioprosessia, on syytä noudattaa aineenpaksuuksien tasapaksuutta. Paksut muodot lämpenevät ja jäähtyvät ohuita muotoja hitaammin, joka aiheuttaa kappaleeseen sisäisiä jännitystiloja ja jopa halkeamia tai säröjä. (I.MATERIALISE 2014) 3DP-tekniikalla tuotetuissa vetosauvoissa tämä ilmiö nähtiin käytännössä molempien vetosauvojen katketessa aineenpaksuuden muutosalueella (kuva 10).



Kuva 10. 3DP-vetosauva

Lisäksi DMLS-, EBM- ja LENS-tekniikkoja käyttäessä on syytä pyrkiä välttämään alle 30 asteen riippuvia pintoja, jolloin tukimateriaalia täytyy käyttää, sillä tukimateriaalin käyttö luo hukkamateriaalia ja sen poistaminen vaatii jälkikäsittelyä. 30 asteen kulma pätee ruostumattomille teräksille, mutta vaihtelua on paljon käytettävästä materiaalista riippuen. Titaanilla vastaava kulma on 20-30 astetta, alumiinilla 45 astetta ja koboltti kromilla 30 astetta. Reikien valmistuksessa kuuden millimetrin halkaisijaa suuremmat reiät on tuettava tukimateriaalilla tai muotoiltava pisaran muotoiseksi. Muita huomioitavia seikkoja ovat terävien sivujen välttäminen, tarpeettoman paksut aineenvahvuudet välttäminen ja pyöristämättömät kulmat (kuva 11). Jälkikäsittely on huomioitava suunnittelussa koneistus- ja kiillotusvaroina, jos mitat ovat tarkasti toleroituja. (SOLID CONCEPTS 2014; AYRE 2014.)

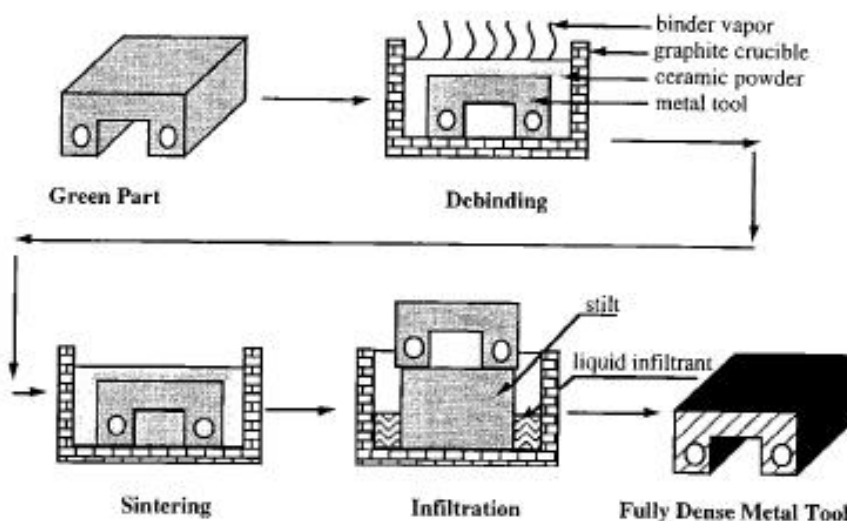


Kuva 11. Alkuperäinen poljin malli kuvassa yläpuolella ja kaksi DMLS-optimointia vaihtoehtoista mallia alapuolella (AYRE 2014).

2.8 Materiaalin kierrätys ja kappaleen jälkikäsittely

Jauhepetiprosessia hyödyntävissä tekniikoissa metallijauhe kierrätetään prosessin sisäisesti. Seuraava kappale voidaan valmistaa hyödyntäen jo prosessikammiossa ollutta jauhetta. (PURTONEN, SALMINEN ja PIILI 2014-10-21.)

SLS- ja 3DP-tekniikoilla valmistetuille kappaleille tehdään aina imeytyskäsittely eli infiltraatio tai infuusio. Infiltraatiokäsittelyssä kappaleeseen imeytetään 1100 °C uunissa metallia, mikä täyttää kappaleen huokoisuuden (kuva 12). 3DP-tekniikalla valmistetulle kappaleelle tehdään ensin liima-aineen poltto, jota seuraa sintraus ja lopulta imeytys. Imeytys tehdään kappaleeseen liitettävien tukien kautta, jotka poistetaan prosessin jälkeen. Yleisin infiltraatiossa käytetty metalli on pronssi sen imeytymisen ja hyödyllisten materiaaliominaisuuksien takia. (HONGLIN 1998, 21.)



Kuva 12. Infiltraatioprosessi (HONGLIN 1998, 21.)

Valmiiden kappaleiden jälkikäsittely voidaan tehdä AM-tekniikalla valmistetulle kappaleelle usealla eri tavalla. Esimerkiksi DMLS-tekniikalla valmistettu kappale voidaan jälkikäsitellä muun muassa hiekkapuhaltamalla, kiillottamalla, koneistamalla, pinnoittamalla ja maalaamalla. (SOLID CONCEPTS 2014.)

Kuulapuhaltamalla kappaleen väsymiskestävyyttä kasvatetaan jopa 1000 %. Se perustuu abraasion sijaan plastisuuteen. Myös kappaleen pinnankarheutta voidaan parantaa jopa 0,025 µm Ra asti käyttämällä erilaisia kiilloitustekniikoita. Kappaleet ovat lämpökäsiteltävissä ja niille voidaan tehdä jännityksenpoisto tai erkautuskarkaisu käytettävästä materiaalista riippuen. (SOLID CONCEPTS 2014.)

3 MURTUMISMEKANIikka

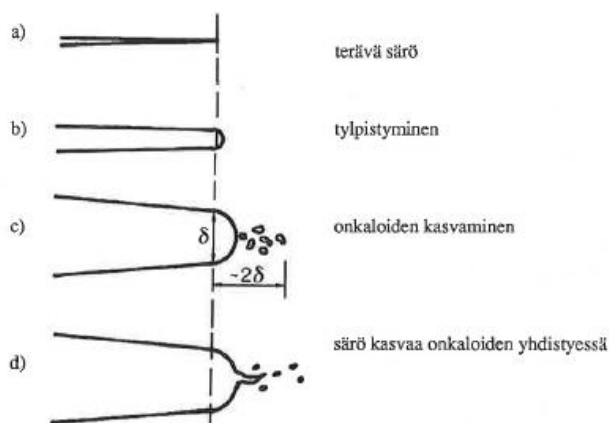
Murtumismekaniikassa tarkastellaan säröllisen kappaleen murtumiseen liittyviä ilmiöitä ja yritetään löytää ilmiöön liittyviä lainalaisuuksia. Murtumismekaniikka voidaan jakaa kahteen osa-alueeseen: aineen mikrorakenteen tutkimiseen ja makroskooppiseen murtumismekaniikkaan. Mikrorakenteen tutkiminen koostuu kiteiden ja hilavirheiden tutkimuksesta, kun taas makroskooppinen murtumismekaniikka tutkii murtumista ilmiönä suuremmissa mittakaavoissa, menemättä aineen sisäisen rakenteen yksityiskohtiin. Nämä kaksi osa-aluetta muodostavat kokonaisuuden, jolla kappaleen murtumisherkkyyttä voidaan arvioida. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 15.)

3.1 Murtumisen vaiheet

Murtuminen voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen: ydintymiseen, särönkasvuun ja lopulliseen murtumaan (JINDAL 2012).

Särön ydintyminen voidaan jakaa kahteen vaiheeseen: mikro- ja makrosärön ydintymiseen. Mikrosäröt muodostuvat dislokaatioiden, vakanssien ja muiden hilavirheiden liikkuaessa ja vähitellen ydintyessä kappaleen joutuessa rasituksen alaiseksi. Esimerkiksi ferriittisissä ja bainiittisissä teräksissä ydintyjänä tyypillisesti on karbidisulkeima. Riittävän korkea jännitystila on edellytys ydintymisen jatkumiselle. Mikrosäröt yhdistyvät jännitystilan pysyessä makrosäröiksi. Mikro- ja makrosäröjä saattaa olla kappaleessa työstön jäljiltä valmiiksi, nopeuttaen ydintymisvaihetta huomattavasti. Jopa 90 % kappaleen eliniästä saattaa olla ydintymisvaihetta. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 44.)

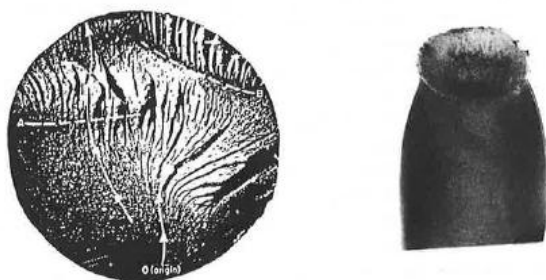
Makrosärön kasvaessa kappaleessa, alkaa särönkasvuvaihe. Särönkasvu etenee aineessa joko sitkeästi tai hauraasti. Sitkeässä särönkasvussa suurin jännitys sijoittuu särön terävään kärkeen, joka laajenee, tylpistyy ja luo uuden terävän särön muodostuneiden onkaloiden yhdistyessä (kuva 13). Hauraassa aineessa särö etenee tasojen erkaantuessa kohdista, joista kiderakenne on särönkasvulle otollisin. Näitä kohtia ovat mm. raerajat ja hilatasot. Kuten sitkeässä särönkasvussa, hauraassa aineessa särön kasvu vaatii vetojännitystä särön laajentumiseksi. Lopulta särö on kasvanut kriittiseen mittaansa ja tapahtuu murtuminen. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 47–49.)



Kuva 13. Särön kasvu sitkeästi (IKONEN ja KANTOLA 1986, 49.)

Murtuminen tapahtuu joko haurasmurtumana tai sitkeänä murtumana. Haurasmurtumaan tarvittava energia on pieni ja se etenee alkuun päästyään nopeasti. Haurasmurtuma näkyy kappaleessa kiiltävänä murtopintana, jossa on paljaalla silmällä erotettavissa olevia jokikuvioita (kuva 14). Myös sitkeät metallit saattavat murtua hauraasti rakeiden läpi etenevän murtuman seurauksesta. Tätä haurasmurtuman alalajia nimitetään lohkomurtumaksi. Lohkomurtuma etenee rakeiden läpi lähes äännopeudella, eikä helposti pysähdy alkuun päästyään, vaikka kuormitustaso laskisikin. Lohkomurtumalle erityisen alttiita ovat TKK-hilaiset metallit, sekä niiden seokset kuten α -rauta, kromi ja volframi. PKK-hilaiset metallit kuten kupari, austeniittinen teräs ja alumiini eivät ole taipuvaisia lohkomurtumille. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 47-49.)

Murtuman ollessa sitkeä, murtopinta venyy plastisesti ennen lopullista murtumaa. Sitkeä murtuma on tyypillinen niissä mikrorakenteissa, joissa särön etenemiselle ei ole tiivispakkasuksien kidefasojen vuoksi helppoa kulkureittiä. Särö etenee kappaleessa, kunnes ainetta on liian vähän estämään plastista murtumista. Murtopinta on ulkonäöltään himmeä ja valoa heijastamaton (kuva 14). (IKONEN ja KANTOLA 1986, 49-50.)

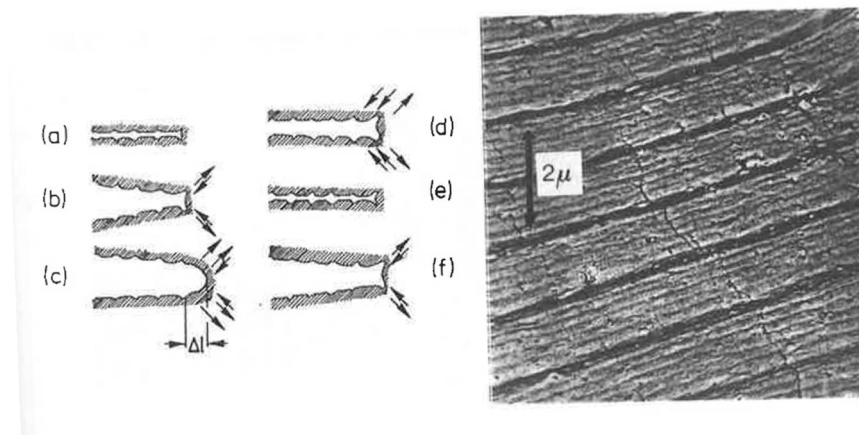


Kuva 14. Hauras murtopinta (vasemmalla) ja sitkeä murtopinta (oikealla)
(IKONEN ja KANTOLA 1986, 48.)

3.2 Väsyminen

Väsyminen on ilmiö, joka aiheutuu, kun rakenteeseen kohdistuu vaihteleva ja useita kertoja toistuva kuormitus. Jopa 90 % metallisten osien rikkoutumisista tapahtuu väsymisen seurauksena. Lopullinen väsymismurtuminen tapahtuu yllättäen ja nopeasti. Jopa normaalisti sitkeät aineet käyttäytyvät hauraasti väsyttävän kuorman alaisena. (JINDAL 2012)

Väsymismurtuminen jaetaan muiden murtumien tapaan ydintymis-, etenemis- ja murtumisvaiheisiin. Ydintymisvaihe kattaa n. 90 % väsymismurtumaan kuluva ajasta, jota nopeuttavat väsymiselle otolliset alkusäröt ja epäjatkuvuuskohdat. Teräksillä särönkasvu aiheuttava jännitys on noin puolet sen murtolujuudesta. Tätä jännityksen arvoa kutsutaan väsymislujuudeksi. Ydintymisvaiheen jälkeen särönkasvu kiihtyy etenemisvaiheessa. Jokaisen jännityssyklin aikana säröön kohdistuu vetoa ja puristusta, jonka seurauksena särö laajenee ja supistuu edeten harppauksin jokaisen vetojännityksen kohdalla (kuva 15). Kappale lopulta murtuu, joko sitkeästi tai hauraasti, kappaleen poikkipinnan pienten jännitykseen nähden riittävästi. Väsymismurtuman tunnistaa murtumapinnan etenemisjäljistä, jotka muistuttavat puun vuosirenkaita. Väsymisen etenemisjälkiä ei voida normaalisti kuitenkaan havaita paljaalla silmällä. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 47-49.)



Kuva 15. Särön kuormitusjaksoa vastaava eteneminen (IKONEN ja KANTOLA 1986, 51)

3.3 Särönkasvun ja kappaleen kestoiän arviointi

Väsyttävän kuormituksen aiheuttamaa särönkasvua voidaan ennustaa Parisin kaavalla:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^n \quad (1)$$

missä a on särönleveys, N on kuormitussyklien lukumäärä, C ja n ovat materiaalikohtaisia kertoimia ja ΔK on jännitysintensiiteettikertoimen vaihtelu (IKONEN ja KANTOLA 1986, 202).

Monimutkaisille kappaleille jännitysintensiiteettikerroin voidaan laskea FEM-analyysin avulla. Särönkasvun etenemisen laskeminen jätettiin pois tutkimuksesta tutkimuksen keskittyessä särön etenemisen kuluvan ajan sijaan sen etenemiseen ja ydintymiseen sisäisessä rakenteessa. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 202.)

Perinteisissä valmistusmenetelmissä käytettävien rautametallien väsymisikää voidaan arvioida Mineirin säännöstä ja yksinkertaistetusta teräksen Wöhler-käyrästä johdetulla kaavalla (SALMI ja PAJUNEN 2010, 361, 367 ja 371):

$$N = 10^{-\alpha/b} * \sigma_a^{1/b} \quad (2)$$

missä N on kuormituskertojen lukumäärä, σ_a jännitysamplitudi, a ja b ovat parametreja. Kuormituskertojen lukumäärän pitää säilyä alueella $N > 10^4$, jolloin puhutaan High Cycle -alueesta. Kuormituskertojen lukumäärän ollessa High Cycle -alueella, voidaan käyttää perinteistä väsymislaskentaa. (SALMI ja PAJUNEN 2010, 355.)

Parametrien a ja b arvot johdetaan kaavoista:

$$\alpha = \log \left(\frac{\sigma_{1000}^2}{\sigma_w^{red}} \right) \quad (3)$$

$$b = -\frac{1}{3} * \log \left(\frac{\sigma_{1000}}{\sigma_w^{red}} \right) \quad (4)$$

joissa σ^{1000} on jännitys tuhannen syklin kestoajalla ja σ_w^{red} on redusoitu vaihtolujuus.

σ^{1000} voidaan laskea kaavalla:

$$\sigma^{1000} = R_m * 0,9 \quad (5)$$

missä R_m on materiaalin murtolujuus.

Vaihtolujuus redusoidaan redusointi parametreilla C_1 , C_2 ja C_3 . C_1 huomioi kappaleen koon, C_2 aksiaalisen kuormituksen ja C_3 pinnanlaadun. Redusointi parametreja on näiden lisäksi lukuisia, mutta tässä työssä haettiin suuntaa-antava arvio koekappaleen kestoajalle soveltaen mainittuja redusointi parametreja. Redusoitu vaihtolujuus lasketaan kaavasta:

$$\sigma_w^{red} = C_1 * C_2 * C_3 * \sigma_w \quad (6)$$

missä σ_w on vaihtolujuus. Se voidaan laskea kaavalla:

$$\sigma_w = 0,5 * R_m \quad (7)$$

(SALMI ja PAJUNEN 2010, 361, 367 ja 371.)

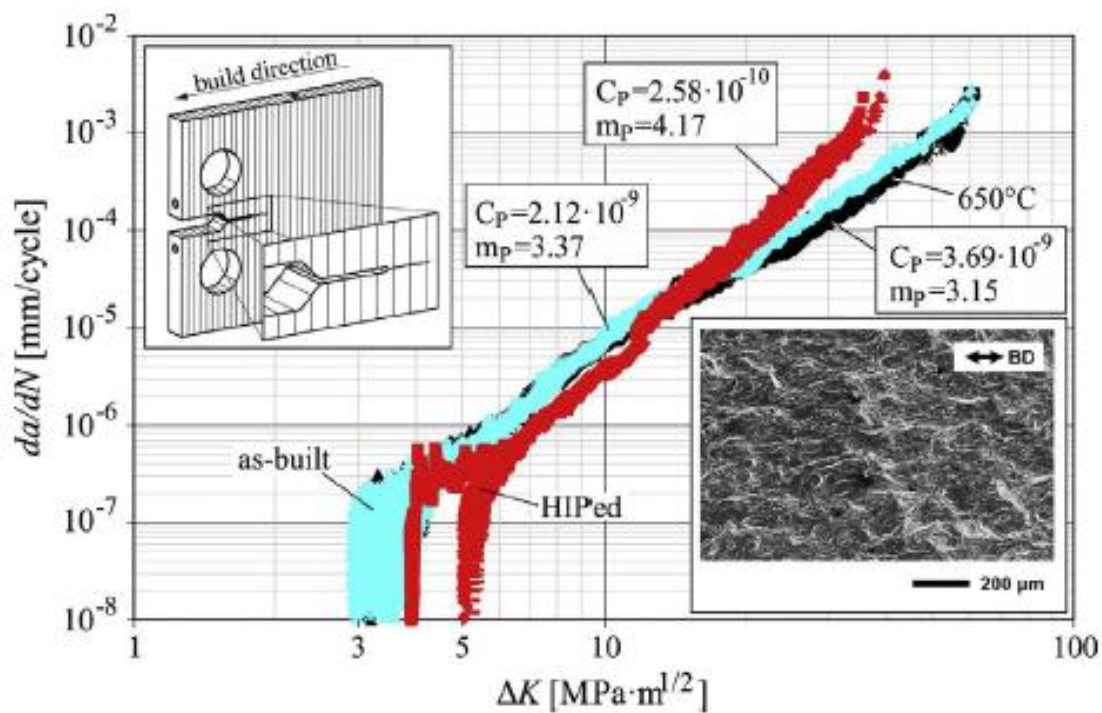
Hyödyntäen kaavan 2 vastausta ja kuormituksen taajuutta voidaan väsymiseen kuluvaksi ajaksi arvioida:

$$T_{väsyminen} = \frac{N}{F} \quad (8)$$

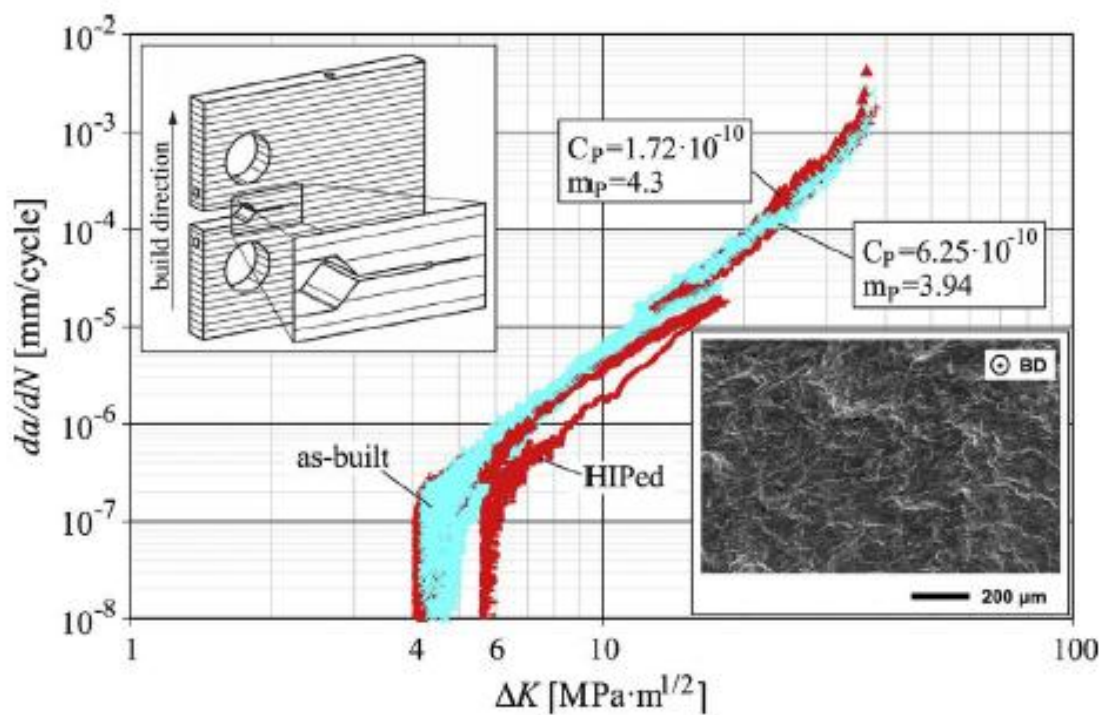
3.4 Särönkasvu metallien ainetta lisäävässä valmistuksessa

Riemeran, Leudersan, Thönean, Richardan, Trösteran ja Niendorfin toteuttamassa tutkimuksessa on selvitetty ainetta lisäävällä valmistuksella tehtyjen kappaleiden särön etenemistä. Kokeiden avulla on päästy kuvaajista 1 ja 2 nähtäviin arvoihin, joista selviää, että kerrosten valmistussuunnalla on vaikutus särön etenemiseen ja sen etenemisreittiin. (RIEMERA, LEUDERSA, THÖNEA, RICHARDA, TRÖSTERA ja NIENDORFD 2014.)

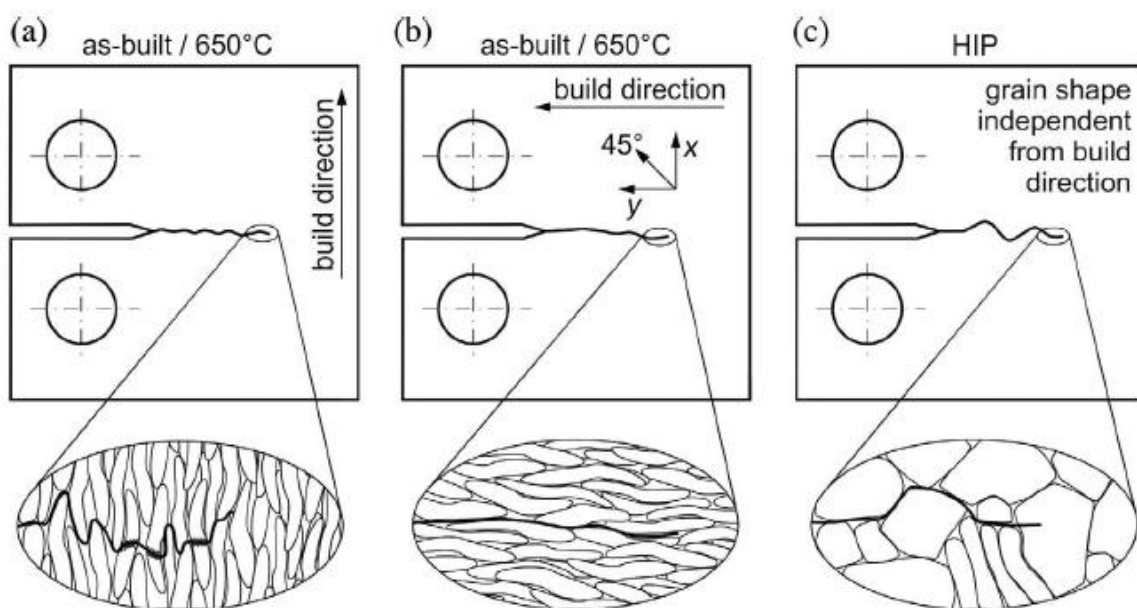
Valmistussuunta vaikuttaa särönkulkureittiin, sen pituuteen ja siten myös särönkasvun etenemisaikaan ennen murtumaa. Särö etenee lyhyempää reittiä kerroksia kohtisuoraan kuin kerrosten myötäisesti (kuva 16). Myös särönkasvunpysähtyminen tilanteissa a ja c tapahtuu suuremmilla rasituksilla kuin tilanteessa b. Lämpökäsittelyn jälkeen kuormitussuunnan merkitys pienenee rakeiden kiteytyessä uudelleen. (RIEMERA, LEUDERSA, THÖNEA, RICHARDA, TRÖSTERA ja NIENDORFD 2014.)



Kuvaaja 1. Kerroksia vastaan etenevän särön kasvaminen AISI 316L aineessa. (RIEMERA, LEUDERSA, THÖNEA, RICHARDA, TRÖSTERA ja NIENDORFD 2014.)



Kuvaaja 2. Kerroksia myöten etenevän särön kasvaminen AISI 316L aineessa. (RIEMERA, LEUDERSA, THÖNEA, RICHARDA, TRÖSTERA ja NIENDORFD 2014.)



Kuva 16. AM-tekniikalla valmistettujen kerrosten suunnan vaikutus särön etenemiseen, oikealla pystysuunnassa, keskellä vaakasuunnassa ja vasemmalla lämpökäsiteltynä 650 °C:ssa (RIEMERA, LEUDERSA, THÖNEA, RICHARDA, TRÖSTERA ja NIENDORFD 2014.)

3.5 Suunnitteluperiaatteet väsymisen estämiseksi

Tyypillisin tapa varautua kappaleen väsymiseen on käyttää äärettömän eliniän periaatetta. Tämä on myös vanhin suunnitteluperiaate. Äärettömän eliniän periaatteessa kappale suunnitellaan siten että jännitykset jäävät väsymisrajan alapuolelle. Yleisin käyttökohte tälle periaatteelle ovat osat, kuten akselit, joita kuormitetaan miljoonia kertoja. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 235.)

Safe life -periaatteessa kappale on suunniteltu kestävänsä äärellinen määrä kuormitusjaksoja. Kappale poistetaan käytöstä ennen kuormitusjaksojen täyttymistä. Sovelluksia ovat esimerkiksi paineastiat, laakerit ja suihkumoottorit. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 235-236.)

Fail safe -periaatteessa rakenne suunnitellaan siten, ettei murtumista tapahdu ilman ennakkovaroitusta. Fail safe -periaate on käytössä esimerkiksi lentokoneiteollisuudessa, jossa perinteisen varmuuskertoimen lisäämä paino osissa on haitallista, ja jopa vaarallista. (O'CONNOR, KLEYNER 2012)

Damage tolerant -periaate on kehitetty edelleen Fail safe -periaatteesta. Periaate sopii sitkeille metalleille niiden hitaan särön etenemisen vuoksi. Säröt pyritään paljastamaan ennen murtumaa esimerkiksi "vuoto ennen murtumaa" -tilanteella jossa särö paljastuu putkiston tai paineastian alkaessa vuotaa. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 236.)

Väsymiskestävyyttä voidaan parantaa siirtämällä voimia, jouhevilla geometrioilla, materiaalin valinnalla, sekä kappaleen viimeistelyn avulla. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 210.)

Kaikkien rasiustyyppien kuormittaessa kappaletta eri tavoin, voidaan geometriaa muokkaamalla pyrkiä saamaan rasitus puristusjännitykseksi. Puristusjännitys on väsymiskestävyyden kannalta edullinen, koska särönkasvun vaatimaa vetoa ei synny. Tukirakenteita suunniteltaessa tämä voidaan toteuttaa asettamalla tuet rasitettavan pinnan alapuolelle, jolloin veto muuttuu puristukseksi. Taivutusta voidaan vähentää keskeissymmetriaa käyttämällä, jolloin ylimääräiseltä taivutukselta mahdollisesti vältytään. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 210.)

Epäjatkuvuuskohdat, kuten terävät kulmat, olakkeet, lovet ja pienet pyöritykset aiheuttavat jännityskeskittymiä, joista särön ydintyminen alkaa. Näissä kohdissa jännitys on muita kohtia huomattavasti suurempi. Kun näitä muotoja vältetään, saadaan kappaleen väsymiskestävyyttä parannettua. (SALMI ja PAJUNEN 2010, 374.)

Materiaalia valittaessa hienorakeisuus vaikuttaa eniten väsymiskestävyyteen. Käyttämällä sitkeitä metalleja, kuten austeniittista ruostumatonta terästä, voidaan väsymisreaktiota hidastaa. (IKONEN ja KANTOLA 1986, 47–49, 211.)

Kuulapuhaltaminen ja karkaiseminen parantavat väsymiskestävyyttä aiheuttamalla puristusjännitystä. Kuulapuhalluksessa kuulat tekevät kappaleeseen pieniä lommoja, aiheuttaen puristusta lommon ympärillä. Materiaalin tilavuutta kasvattava karkaisu aiheuttaa puristustilan kappaleen pinnassa. Pinnan laatua parantamalla voidaan kappaleen väsymisikää kasvattaa huomattavasti. Pinnanlaadun merkitys kasvaa etenkin teräksen lujuuden kasvaessa. (O'CONNOR, KLEYNER 2012)

4 KENNO- JA RISTIKKORAKENTEET

Ristikko- ja kennorakenteet ovat saaneet uusia sovelluksia ainetta lisäävän valmistuksen myötä sisäisissä rakenteissa ja tukirakenteissa. Kenno- ja ristikkorakenteita käytetään tyypillisesti kohteissa, joissa halutaan keveyttä, ja joissa kappaleeseen kohdistuvia rasituksia voidaan arvioida. Ristikkorakenteiden tyypillisiä käyttökohteita ovat nosturit, sillat, hallirakennukset ja korkeat tukirakenteet, kun taas kennoja käytetään esimerkiksi huonekalujen sisuksissa. (FPINNOVATIONS 2008; HANK 2009-09-20.)

4.1 Ristikot

Ristikkorakenteen avulla rakenteen jäykkyyttä voidaan lisätä juuri oikeaan paikkaan. Kiinteän aineen vähennetty käyttö johtaa keveämpiin rakenteisiin. Tämän ansioista ristikkorakenteita hyödynnetään paljon korkeissa kohteissa, kuten nostureissa ja sähkönjakeluverkon linjarakenteissa (kuva 17). Suurissa rakenteissa, kuten silloissa, ristikot mahdollistavat tuennan juuri oikeaan paikkaan ja rakenteen painon minimoinnin. (HANK 2009-09-20.)



Kuva 17. Rakennusnosturi (HANK 2009-09-20.)

Useat AM-tekniikalla tuotetut ristikkorakenteet muistuttavat muodoltaan suuren mittakaavan ristikkorakenteita. AM-tekniikka mahdollistaa suurien ristikkorakenteiden pienentämisen tarvittaessa millimetrin osiin. Ristikkorakenteen muodostamiseen on ohjelmistoja, jotka rakentavat ristikon kappaleeseen rasiusten sijaintien ja tyyppien mukaan tai tasaiseksi verkoksi koko kappaleeseen. Yksi näistä ohjelmista on Within Medical. Within Medical on pääsääntöisesti proteesien valmistusta varten kehitetty ohjelmisto. Tästä huolimatta Within Medical tarjoaa laajat mahdollisuudet kappaleen sisäisten kenno- ja ristikkorakenteiden hyödyntämiseen. Ohjelmasta löytyy myös rakenneoptimointia varten kehitetty versio, Within Enhance, johon on yhdistetty myös FEM-analyysiominaisuuksia (kuva 18). (WITHINLABS, 2014.)



Kuva 18. Laakeripesän konseptimalli (WITHINLABS 2014-05-30.)

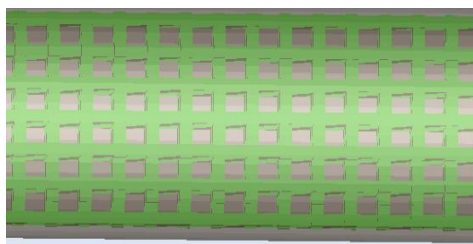
Within Medical –ohjelmalla on mahdollista muodostaa seitsemää erilaista sisäistä rakennetta: X, Grid, Star, Trabecular, Voronoi, Hexagonal ja VinTiles. Näistä varsinaisia ristikkomaisia rakenteita ovat X, Grid, Star ja Hexagonal. (Within Medical –ohjelma 2014.)

X–rakenne soveltuu kevyiden kappaleiden valmistukseen ja sen avulla voidaan levittää kappaleen ti-
lavuutta haluttuun mittaan, säästyen suurelta painon kasvulta. Rakenteessa sisäiset tuet ovat ni-
menmukaisesti kirjainta X muistuttavassa muodostelmassa (kuva 19). Täysin onttoon kappaleeseen
verrattuna X–rakenne antaa suojaa lommahduksilta ja taipumiselta rasituksen alla (Within Medical -
ohjelma 2014).



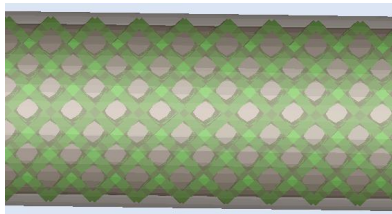
Kuva 19. X –rakenne (Within Medical –ohjelma 2014.)

Grid-rakenne muistuttaa perinteistä ristikkorakennetta. Poikkeavuutena on kuitenkin poikittukien
puuttuminen (kuva 20). Hilamainen Grid-rakenne antaa edellytyksen taipumiselle ja painumiselle pa-
remmin kuin X- tai Star-rakenne. (Within Medical –ohjelma 2014.)



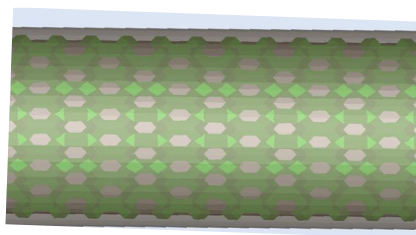
Kuva 20. Grid –rakenne (Within Medical –ohjelma 2014.)

Star- eli tähtirakenteessa tuet ovat nimensä mukaan tähtimäisessä muodostelmassa. Tuet yhtenevät yhteen pisteeseen, josta ne jakautuvat kuuteen eri suuntaan yhtyen toiseen samanlaiseen pisteeseen muodostaen tiheän verkon (kuva 21). Tähtirakenne luo X-rakennetta hieman jäykemmän verkon tukien tiheyden ollessa suurempi. (Within Medical –ohjelma 2014.)



Kuva 21. Star-rakenne (Within Medical –ohjelma 2014.)

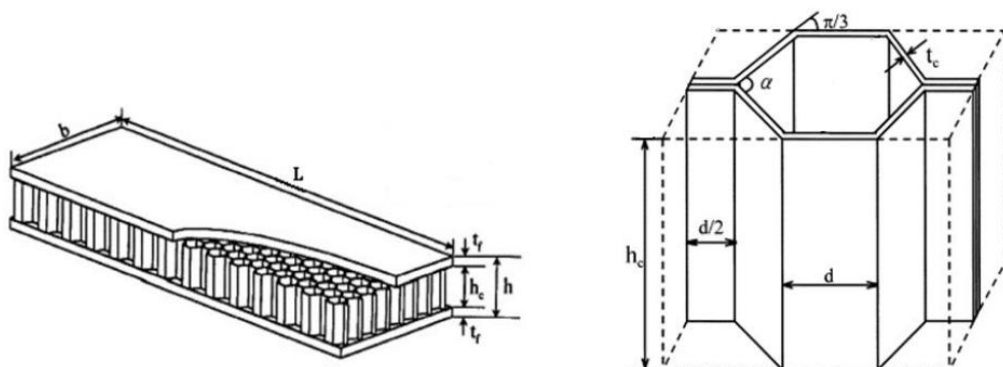
Hexagonal- eli kuusikulmaisessa rakenteessa asetetaan tuet toisiinsa kiinnittyviin kuusikulmisiin kehiin. Kuusikulmainen rakenne on huomattavan samankaltainen hunajakennon kanssa (kuva 22). Se on eräällä tavalla kennomaisen rakenteen ja ristikkorakenteen sekoitus. (Within Medical –ohjelma 2014.)



Kuva 22. Hexagonal-rakenne (Within Medical –ohjelma 2014.)

4.2 Kennot

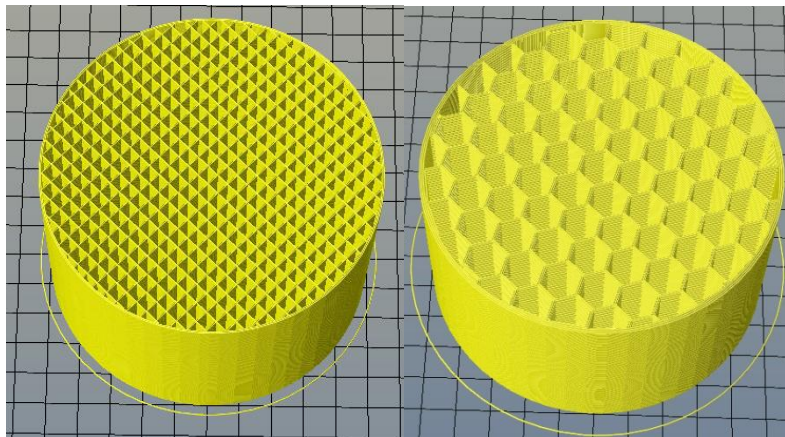
Käyttäessä ainetta lisäävää valmistusta, voidaan kennorakenteita hyödyntää kappaleen keventämiseksi. Perinteisesti kennorakennetta hyödynnetään laajassa mittakaavassa huonekaluteollisuudessa. Kennolevy koostuu kahdesta levystä, sisäisestä kennostosta ja reunalevyistä (kuva 23). Esimerkiksi kennorakenteen käyttäminen huonekaluissa keventää huonekalua yli kolmasosan täydestä aineesta tehtyyn verrattuna, samalla säilyttäen tarvittavan puristuskestävyyden ja jäykkyyden. Keveys parantaa myös kappaleen käsiteltävyyttä. (FPINNOVATIONS, 2008.)



Kuva 23. Kennolevy vasemmalla ja yksittäinen kennosolu oikealla, (ABBADI, TIXIER, GILGERT 2014.)

AM-tekniikoita käytettäessä kennoranne on yksi yleisimmistä täyttötavoista sen säästäessä materiaalia, ja antaen silti tarvittavan jäykkyyden. Eniten kennorakenteesta hyötyvät suuttimia käyttävät koneet, sillä kennorakenne nopeuttaa kappaleen valmistusta huomattavasti suuttimen liikeradan kutsuessa (kuva 24). (GARCEAU 2013-05-03.)

Kennorakenteen muodostaminen 3D-malliin voidaan tehdä automaattisesti esimerkiksi Slic3r tai Cura -ohjelmalla. Ohjelmasta pystyy valitsemaan rakenteen täyttöprosentin ja vaipan paksuuden. (HOT-WORLD GMBH & CO KG 2014.)



Kuva 24. Kennorakenne ainetta lisäävällä valmistuksella vasemmalla Cura, oikealla Slic3r (HOT-WORLD GMBH & CO KG 2014)

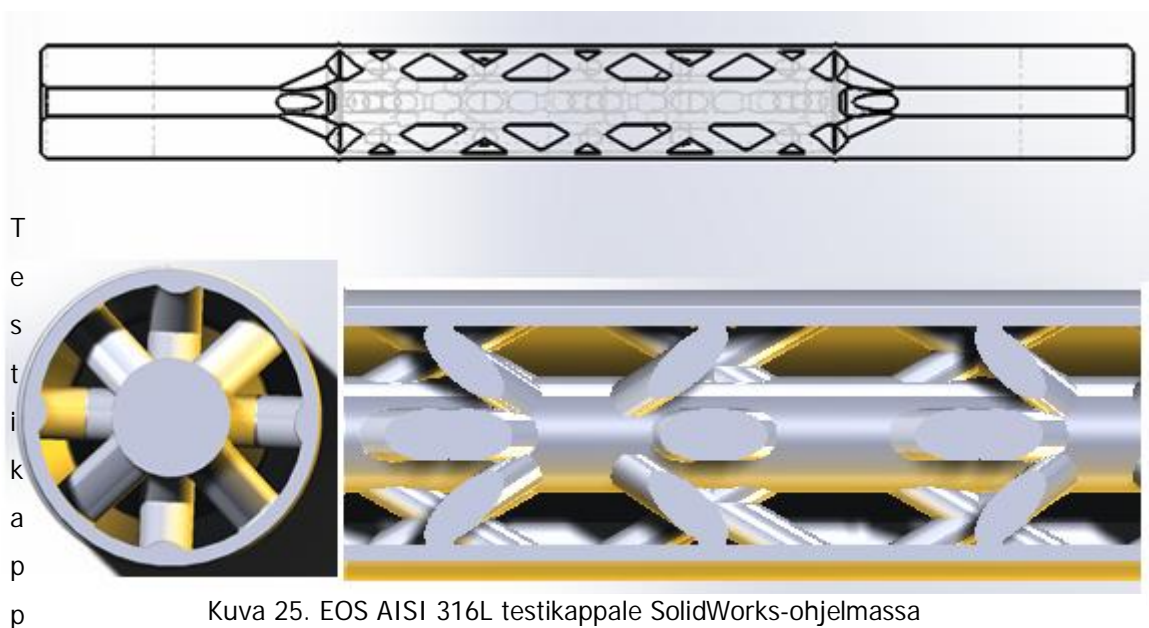
5 KENNO- JA RISTIKKORAKENTEIDEN VÄSYMINEN

Tässä työssä tehdyn testin päämääränä oli selvittää, onko väsymismurtuman etenemistä mahdollista pysäyttää sisäisiä rakenteita hyödyntäen. Testikappaleeksi testissä valittiin akseli, jonka sisälle rakennettiin monitasoinen ristikkorakenne. Monitasoristikon käytön avulla säröltä pyrittiin katkaisemaan mahdollisuus edetä kiinteää ainetta pitkin koko kappaleen läpi. Särön puhkaistua vaipan, joutuisi se ydintymään uudelleen ristikkorakenteeseen, jonka jälkeen viimeinen murtuva osa rakenteesta olisi sen ydin.

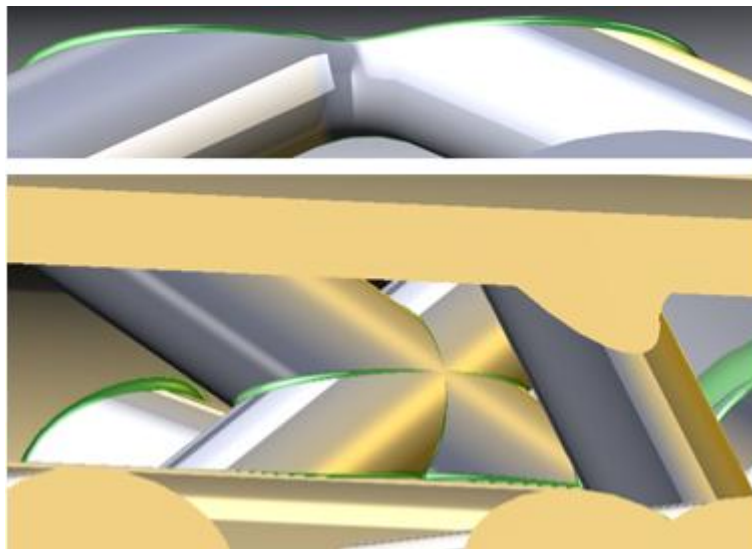
Perinteisen kennorakenteisen kappaleen kaikki pisteet ovat yhteydessä toisiinsa kaksikulotteisella pinnalla (kuva 24). Kokeiden keskittyessä tutkimaan voidaanko särön eteneminen katkaista, oli kennorakenteen kaksikulotteinen muoto haitallinen ja kokeisiin sopimaton. Täten kennorakenne hylättiin sisäisenä rakenteena, koska se antaa särölle selkeän kulkureitin koko rakenteen läpi.

Erillisessä tutkimuksessa tehtyjen testien perusteella Minerin sääntö ei toimi kennorakenteiselle kappaleelle. Kennorakenteet kestävät myös heikosti vetojännitystä. Tämä supistaa mahdollisuuksia käyttää kennorakennetta monikuormitteisissa kappaleissa. (ABBADI A., TIXIER J. GILGERT Z. 2014.)

5.1 Koekappaleiden ja kokeiden suunnittelu



Koekappale suunniteltiin SolidWorks-ohjelmalla siten, että se hyödyntäisi mahdollisimman paljon olemassa olevia ratkaisuja jännitysten kohdistuksen ja väsymiskestävyyden saralla (kuva 25). Sisäinen rakenne suunniteltiin monitasoristikoksi, jonka geometrinen muotojen tarkoitus oli minimoida epäjatkuvuuskohdat (kuva 26). Kaikkia epäjatkuvuuskohtia ei rakenteesta saatu poistettua mallinnuksen aikana. Nämä epäjatkuvuuskohdat paljastuivat FEM-analyysin kautta ja korjattiin lopullisesta testikappaleesta.

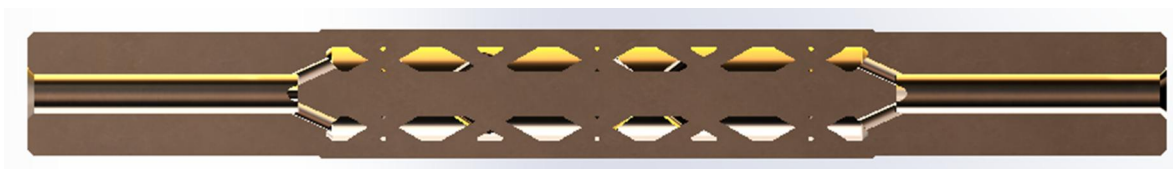


Kuva 26. Epäjatkuvuuskohtien korjauksia vihreällä korostettuna

Kokeeseen suunniteltiin kaksi koekappaletta. Yksi oli DMLS-järjestelmää varten, joka valmistettiin E-Sint M-series ainetta lisäävällä valmistuskoneella (liite 1), ja toinen suunniteltiin 3DP-tekniikalla valmistettavaksi. Käytetty materiaali DMLS-tekniikalla valmistettavassa koekappaleessa oli EOS AISI 316L ja 3DP-tekniikalla valmistettavassa koekappaleessa 420SS/pronssi (kuva 27). Materiaaliominaisuudet ja koostumukset voidaan nähdä liitteistä 2 ja 3. Ainetta lisäävä valmistus huomioitiin testikappaleessa jauhepetiprosessin vaatimukset täyttävillä jauheenpoistorei'illä. Lisäksi sisäinen ristikko suunniteltiin siten että 30 asteen sääntö säilyy läpi koko kappaleen. Kappale tehtiin symmetriseksi ja se oli mahdollista valmistaa kohtisuorassa jauhepetiin nähden ilman tukirakenteita, riippumatta valitusta päästä. 3DP-tekniikalla valmistettavan koekappaleen muotoja paksunnettiin menetelmän minimimittojen ollessa suuremmat (kuva 28).

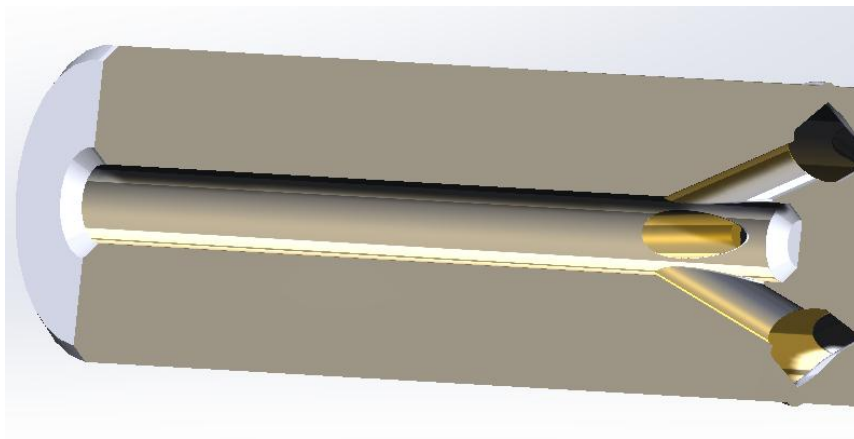


Kuva 27. 420/Pronssi -koekappale valmistettuna 3DP-tekniikalla



Kuva 28. 420SS/Pronssi -koekappale SolidWorks-ohjelmassa

Kuormituskehän leukoja varten koekappaleeseen suunniteltiin kiinteä osuus, jonka jauheen poistoreikä voitiin täyttää pyörötangolla tarvittaessa (kuvat 29 ja 30). Tartuntapintojen ja sisäisen ristikon rajalla mallinnettiin olake, joka ilmaisee puristuspinnan tarkan sijainnin (kuva 31). Täten välttyttiin ristikon murskaantumiselta.



Kuva 29. Jauheen poistoreiän havainne kuva

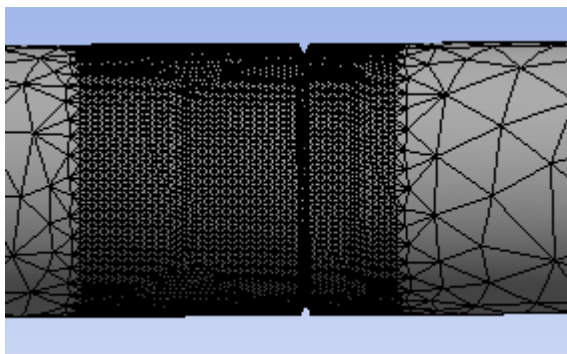


Kuva 30. Jauheen poistoreikä tukittuna 3DP-koekappaleessa



Kuva 31. Kohdistusolake ja vaipan paksunnus 3DP-koekappaleessa

Solidworks-ohjelmalla mallinnettua testikappaleen 3D-mallia hyödyntäen, toteutettiin FEM-analyysi Ansys-ohjelmalla. Kappaleen sisäisen ristikon ollessa äärimmäisen vaikea mallintaa Ansys-ohjelmalla, kompensoitiin solidin käyttämistä verkkoa kohdentamalla (kuva 32). Analyysi paljasti ensimmäisestä mallista useita epäjatkuvuuskohtia, jotka saatiin korjattua. Toinen kierros paljasti lisää epäjatkuvuuskohtia, joihin puututtiin mallissa. Rakenneoptimointia jatkettiin, kunnes kaikki epäjatkuvuuskohdat oli saatu poistettua kappaleen sisäisestä ristikosta.



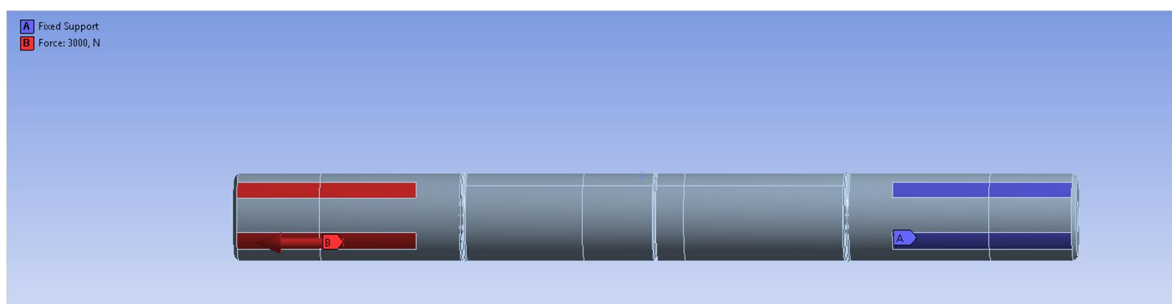
Kuva 32. Verkonkohdennus uran läheisyydessä

Rakenneoptimoinnin jälkeen edettiin alustavaan FEM-analyysiin. Analyysin avulla etsittiin sopivat raja-arvot kokeelle ja arvioitiin miten monitasoinen ristikko käyttäytyy ulomman kerroksen murtuessa. Analyysista saatujen tulosten perusteella arvioitiin, että mikäli särö rikkoisi ulkoisen vaipan, ei se siitä huolimatta etenisi kappaleen ytimeen asti, ja lopullinen murtuma estyisi. Myös ydintymisen arvioitiin alkavan vaipan murtumisen jälkeen uudelleen. Ydintymisen ollessa noin 90 % väsymismurtumaan johtavasta prosessista, pidentäisi sisäinen rakenne arvioiden mukaan kappaleen elinikää huomattavasti väsyttävässä kuormassa.

Lopullinen FEM-analyysi jaettiin kolmeen osaan. Ensimmäisessä tapauksessa kappaleen keskelle mallinnettiin 0,7 mm syvä ura, josta särön etenemisen oli määrä alkaa myös empiirisessä testissä. Vastaava ura oli SS420/prossi-koekappaleessa 0,5 mm aineen ollessa hauraampaa kuin EOS 316L -koekappaleessa (kuva 33). Toisessa tapauksessa vaippa poistettiin keskeltä ja tarkasteltiin sisäiseen ristikkoon tulevaa jännitystä. Kolmannessa tapauksessa vaipasta poistettiin keskeltä vain puolet, synnyttäen taivutusta keskelle mallia. Kaikissa tapauksissa kappaleeseen kohdistettiin staattista vetoa 3 kN verran.



Kuva 33. 0,5 mm syvä ura 3DP-koekappaleessa

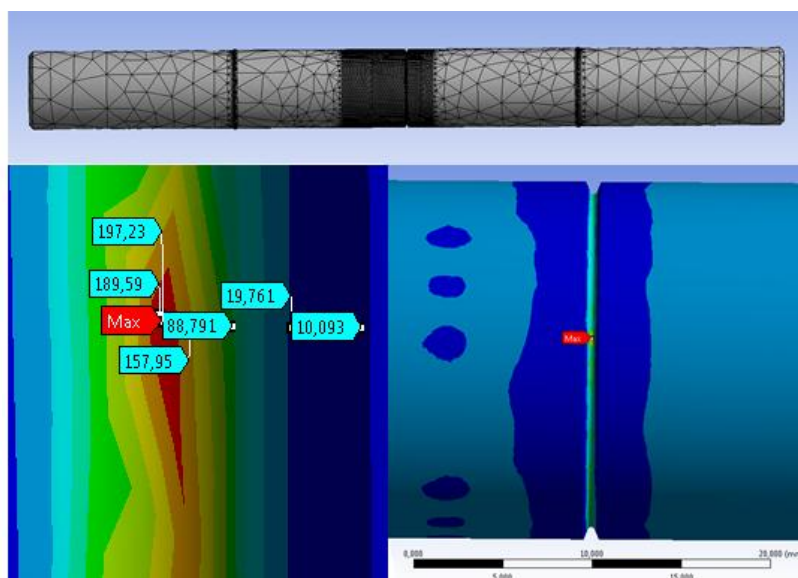


Kuva 34. Ensimmäinen tapaus, voimat ja kiinnitykset

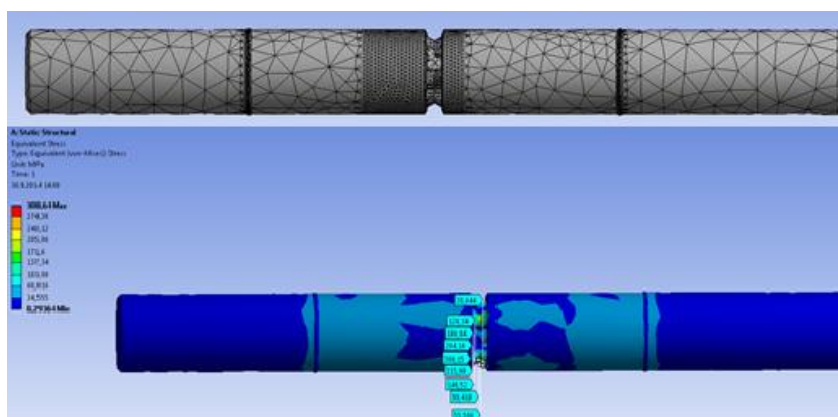
FEM-analyysin tapaus 1 toteutettiin asettamalla toiseen päähän kappaletta kiinteä kiinnitys (kuvassa 34 sininen pinta) ja toiseen päähän 3 kN vetokuormitus (kuvassa 34 punainen pinta). Tämän oli määrä mallintaa tulevaa kuormituskehällä tehtävää väsymiskoetta. Myös kuormituskehän leukojen puristusvoimalle tehtiin analyysi, jolla voitiin todeta, ettei puristus etene kappaleen keskelle sekoittamaan tuloksia. Puristukset poistettiin varsinaisesta analyysistä niiden vaikeuttaessa keskialueen jännitysten lukemista.

Verkkoa tihennettiin keskeltä kappaletta 0,5 mm kokoluokkaan. Maksimijännitykseksi ensimmäisessä tapauksessa saatiin 197,23 MPa, joka keskittyi suunnitellun mukaisesti keskelle uraa (kuva 35).

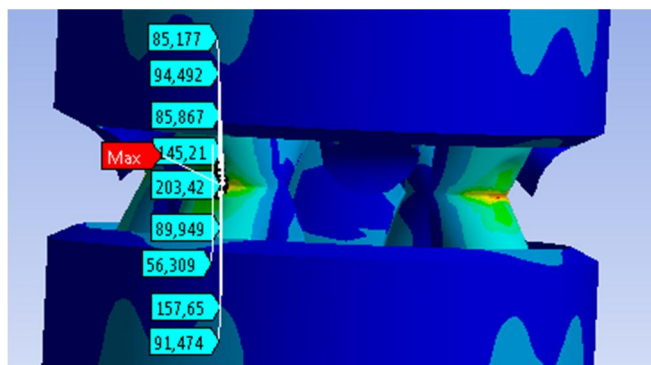
Tapauksessa 2 tarkasteltiin, miten sisäinen ristikko käyttäytyy, kun vaippa murtuu joka puolelta. Tapauksesta tehtiin ylikorostettu, jotta ristikon jännitysjakautumia voitaisiin tarkastella. On epätodennäköistä, että koko vaippa murtuu kerralla ilman selkeitä muodonmuutoksia, 316L-materiaalin ollessa sitkeästi murtuvaa (liite 2). 420/pronssi kappaleelle sen sijaan koko vaipan murtuma on mahdollinen materiaalin murtovenymän ollessa huomattavasti pienempi (liite 3). Verkkoa tihennettiin esille tulleista ristikoista (kuva 36) ja suurin jännitys 203,42 MPa kohdistui keskelle kappaletta ristikon haaraan (kuva 37).



Kuva 35. Tapaus 1: verkko ja tulokset

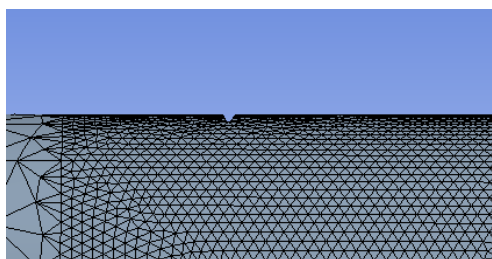


Kuva 36. Tapaus 2: verkko ja tulokset

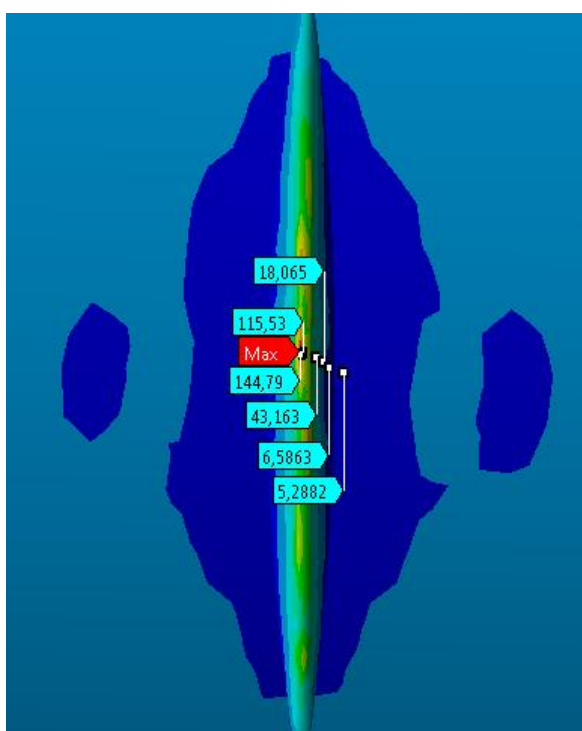


Kuva 37. Tapaus 2: tulokset

Tapauksessa 3 kappaleeseen tehtiin toispuolinen railo (kuva 38). Tapauksessa tutkittiin tuleeko kappaleeseen selvä jännityspiikki epäsymmetrisestä muodosta syntyvän taivutuksen seurauksena. Maksimijännitys muodostui railon keskelle. Maksimijännitykseksi saatiin 144,79 MPa, joka oli noin 59 MPa pienempi kuin tapauksessa 1 (kuva 39). Tämän pääsiallinen syy oli suurempi jännityspinta-ala verrattuna tapauksiin 1 tai 2.



Kuva 38. Tapaus 3: verkko



Kuva 39. Tapaus 3: tulokset

Molemmille koekappaleille määritettiin parametrit (taulukko 2) ISO 1099:2006 –standardia seuraten. SS420/pronssi -koekappaleelle asetettiin suurempi kuormitustaso vaipan suuremman ainepaksuuden takia. Työssä päädyttiin lopulta yhden 3DP-koesauvan testaamiseen valmistusviivästyksien takia. DLMS-koekappaleita olisi alkuperäisen suunnitelman mukaan pitänyt valmistaa kaksi ja 3DP-koekappaleita yksi. Valmistuksessa tapahtuneen viivästyksen takia DLMS-koekappaleiden testaus siirrettiin erilliseen projektiin.

Taulukko 2. Väsytykokeen parametrit

Parametri	EOS 316L	SS420/Pronssi
Materiaaliominaisuudet ilman lämpökäsittelyä		
-Myötölujuus	470 ± 90 MPa	455 MPa
-Murtolujuus	540 ± 50 MPa	682 MPa
-Kimmokerroin	180 GPa	147 GPa
-Murtovenymä	50 ± 20 %	2,30 %
Testimateriaalin sijainti kappaleessa	52-142 mm	52-142 mm
Koekappaleen muoto ja nimellimitat	Pyöreä, ø20,5 x 194 mm	Pyöreä, ø22 x 194 mm
Koekappaleen pinnanlaatu	Ra ~10 µm	Ra ~60 µm
Poikkileikkausmitta	min. 109,96 mm ²	min. 229,34 mm ²
Minimi ja maksimi voima	-kN 3/kN 3	-kN 5/kN 5
Aiheutetut kuormitustilat	197,23 MPa	230 MPa
Taajuus ja väsymisikä	20 Hz / 1 h 40 min	10 Hz / 1 h 39 min
Koelaitteen kuvaus	Katso taulukko 1	Katso taulukko 1
Testin lopettamisen syy	MicroCT-kuvaus	MicroCT-kuvaus

Kuormituksen sopivuus EOS AISI 316L -koekappaleille laskettiin käyttäen kaavoja 2-7 ja FEM-analyysin tuloksia.

Ensi haettiin redusointiparametrit C_1 , C_2 ja C_3 , jotka valittiin seuraavasti:

$C_1 = 1$, aksiaalinen kuormitus,

$C_2 = 0,7$, aksiaalinen kuormitus ja

$C_3 = 0,7$, kappaleen pinnanlaadun vastaavuudeksi valittiin kuumavalssattu pinta.

Tämän jälkeen laskettiin vaihtolujuus käyttäen kaavaa 7 ja liitettä 2:

$$\sigma_w = 0,5 * 540 \text{ MPa} = 270 \text{ MPa} \quad (7)$$

Se redusointiin kaavalla 6:

$$\sigma_w^{red} = 1 * 0,7 * 0,7 * 270 \text{ MPa} = 132,3 \text{ MPa} \quad (6)$$

Jännitys tuhannen syklin kestoikällä saatiin kaavalla 5:

$$\sigma^{1000} = 540 \text{ MPa} * 0,9 = 486 \text{ MPa} \quad (5)$$

Sen vastausta voitiin hyödyntää kaavoissa 4 ja 5:

$$b = -\frac{1}{3} * \log\left(\frac{486 \text{ MPa}}{132,3 \text{ MPa}}\right) = -0,18836 \quad (4)$$

$$\alpha = \log\left(\frac{486^2 \text{ MPa}}{132,3 \text{ MPa}}\right) = 3,251713 \quad (3)$$

Kertoimia α ja b käytetään lopuksi kaavassa 2:

$$N = 10^{-3,251713/-0,18836} * 197,32^{\frac{1}{-0,18836}} \text{ MPa} = 120045 \text{ sykliä} \quad (2)$$

Tuloksesta todettiin, että kappaleen syklien määrä N asetti kokeen High Cycle –vyöhykkeelle. Kun tiedetään kuormituksentaajuus ja syklien lukumäärä, voidaan kaavaa 8 käyttäen arvioida väsymiseen kuluva aika:

$$T_{\text{väsyminen}} = \frac{N}{F} = \frac{120045}{20 \text{ Hz}} = 6002 \text{ s} \approx 100 \text{ min} \approx 1 \text{ h } 40 \text{ min} \quad (8)$$

Vastauksen avulla arvioitiin kokeeseen kuluva aikaa.

Mainitut kaavat 2-7 eivät päde suoraan ainetta lisäävällä valmistuksella tehtyjen kappaleiden arvoihin. Kappaleessa 3.3 käsiteltyjen kokeiden mukaan särön kasvuun voi kulua huomattavasti pidempään särön kasvaessa sille epäedullisessa raerakenteessa. Vastaavalla tavalla ei voida myöskään laskea SS420/pronssi -koekappaleen väsymisikää sillä kaavan lainalaisuudet eivät päde kuparimetalleille. SS420/pronssi -koekappaleelle tehtiin vain empiirinen testaus. Aiheesta tehtiin DeAdMan-hankkeessa opinnäytetyö (MATTI KESONEN, Ainetta lisäävällä valmistuksella tuotettujen metallisten kappaleiden väsyminen), jossa kiinteiden kappaleiden väsymistä on tutkittu syvemmin. Opinnäytetyö on saatavilla Theseus-tietokannasta.

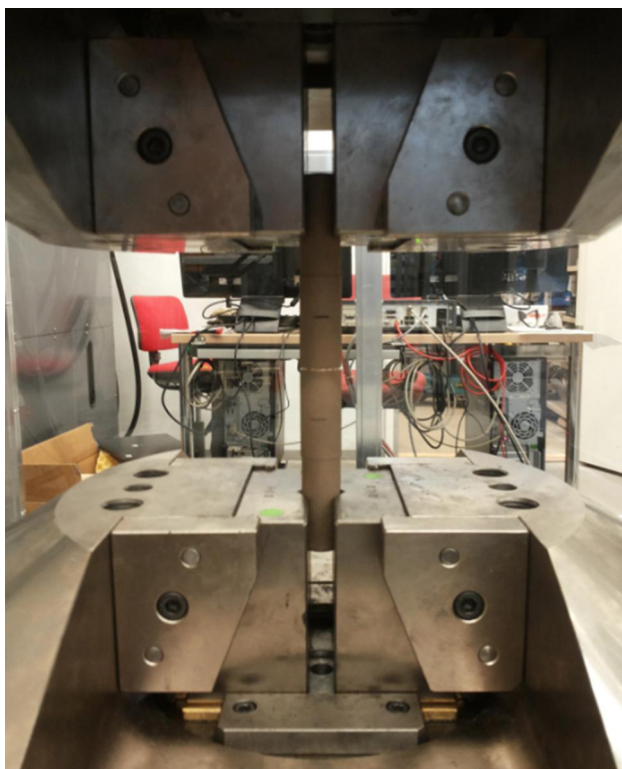
5.2 Kokeiden suorittaminen

Väsytykskoe suoritettiin Walter + Bai AG:n LFV 500-HH -kuormituskehällä. Laite on suunniteltu kappaleiden veto- ja väsymistestaamiseen. (WALTER + BAI, 2014). Tarkat tekniset tiedot LFV 500-HH -kuormituskehästä on nähtävissä taulukosta 3.

Taulukko 3. Kuormituskehän tekniset tiedot (WALTER + BAI, 2014.)

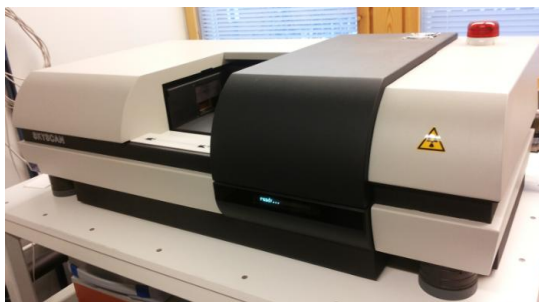
Tekniset tiedot Walter + Bai AG LFV 500-HH	
Suoritusarvot	
Maksimikuorma:	500 kN dynaamista
Kuorman mittaus:	Load Cell Type 1248EAW 500 kN
Mittaustarkkuus alue:	2,500 to 500,000 kN
veto/puristus:	Grade 0.5, ISO 7500-1 T2
Männän iskupituus:	400 mm
PAC-134:	
Työpaine:	315 bar
Pumpun tuotto P1:	134 l/min
Tankin tilavuus:	n. 500 litres
Öljyn viskositeetti:	46 cSt 40°C:ssa
(Hydraulic oil DIN 51524 T2, DIN 51519; ISO VG 46)	

3DP-koekappaleeseen tehtiin vetävä esijännitys, jonka jälkeen aloitettiin kuormittaminen ensin 5 kN veto-puristustykyttämällä, joka myöhemmin kasvatettiin 10 kN. Voiman muutos tehtiin, kun huomattiin FEM-tulosten ja laskujen olevan kaukana todellisuudesta. 3DP-koekappaletta kuormitettiin yhteensä 20 000 sykliä särönkasvattamiseksi molemmilla voimilla 10 000 sykliä (kuva 40).

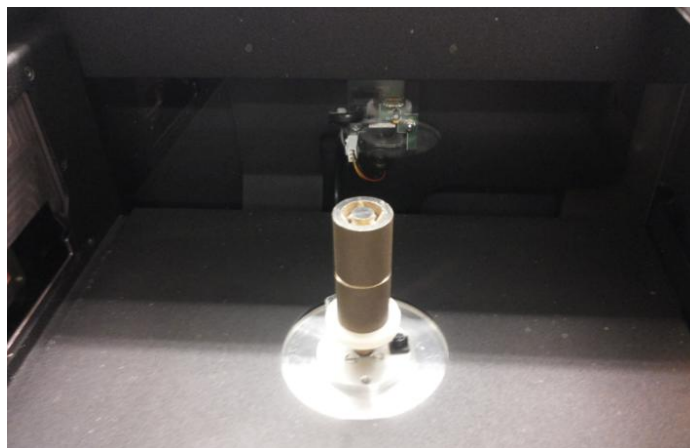


Kuva 40. 3DP-koekappale kuormituskehässä

Koekappale leikattiin väsytykskokeen jälkeen 50 mm pituiseksi ja röntgenkuvattiin MicroCT-laitteella 34,7 μm resoluutiolla (kuvat 41 ja 42). Röntgenkuvauksella oli tarkoituksena selvittää särön etenemisreitti rakenteessa. Vaipan paksuuden vuoksi, MicroCT-laitteen röntgensäteet eivät kuitenkaan kyenneet läpäisemään ainetta ristikkorakenteeseen asti. Menetelmän käyttö peruttiin, kun ensimmäisen kuvan oton jälkeen huomattiin menetelmän sopimattomuus särön etenemisen tarkastelussa.



Kuva 41. MicroCT-laite



Kuva 42. 3DP-koekappale MicroCT-laitteessa

MicroCT-laitteen sopimattomuuden paljastuttua siirryttiin tunkeumanestetarkastukseen. Tunkeumanestetarkastukset tehtiin Bycotest-sarjan aineilla (kuva 43). Koekappaleelle tehtiin kaksi tarkastusta. Ensimmäisessä tarkastuksessa tunkeumaneste suihkutettiin sisäpinnalle ja kehite ulkopinnalle. Tällä tavalla tarkastettiin, onko kappaleeseen syntynyt läpimeneviä säröjä (kuvat 44 ja 45). Tarkastus osoitti, että kappaleeseen ei ollut syntynyt testin aikana läpimeneviä säröjä.



Kuva 43. Testiin käytetyt tunkeumaneste, kehite ja puhdistusaine



Kuva 44. Tarkastus 1: tunkeumaneste kappaleen sisäpinnalla



Kuva 45. Tarkastus 1: kehite kappaleen ulkopinnassa

Toisessa tarkastuksessa tunkeumanestettä suihkutettiin kappaleen ulkopinnalle, ja pinnan pesemisen jälkeen samalle pinnalle suihkutettiin kehite (kuvat 46 ja 47). Tarkastuksessa keskityttiin uran läheisyyteen suurimman teoreettisen jännityksen ollessa urassa. Tarkastuksessa ilmeni materiaalin huokoisuus. Ulkopintaan imeytyi paljon tunkeumanestettä, mikä osoitti käytännössä 5 % huokosuuden vaikutuksen kappaleen pinnan tiiveyteen (kuva 47). Tarkastuksen yhteydessä löydettiin yksi särö uran ylälaidasta. Tämä erottui selkeästi koneistetun uran ollessa tiiviimpi pinnaltaan, jolloin tunkeumanestettä ei imeytynyt itse aineen huokosiin vain ainoastaan säröihin.



Kuva 46. Tarkastus 2: tunkeumaneste koekappaleen ulkopinnassa

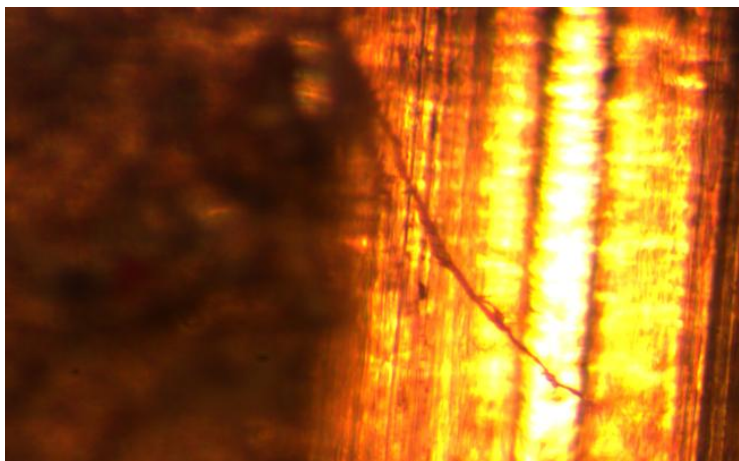


Kuva 47. Tarkastus 2: kehite koekappaleen ulkopinnassa. Särö punaisen tussin osoittamalla puolella ja paikalla



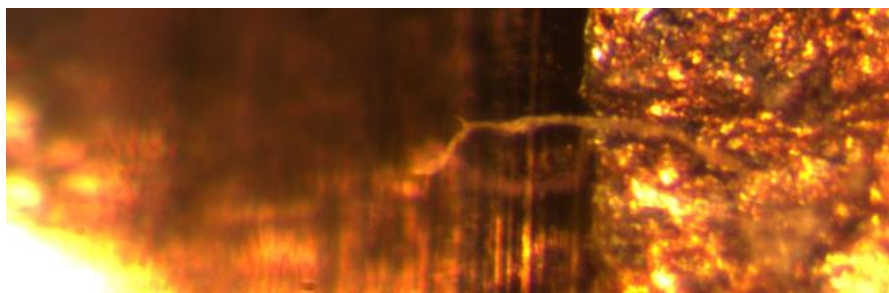
Kuva 48. Stereomikroskooppi

Tunkeumanestetarkastuksen löytö tarkastettiin stereomikroskoopilla (kuva 48). Tunkeumanestetarkastuksessa löydetty särö osoittautui makrosäröksi (kuva 49). Stereomikroskoopilla löydettiin useita muitakin säröjä kappaleesta, jotka kaikki osoittautuivat mikrosäröiksi. Osa näistä säröistä löydettiin uran keskeltä, mutta suurin osa löytyi kuitenkin uran reunalta. Suurin osa säröistä kasvoi uraan päin.

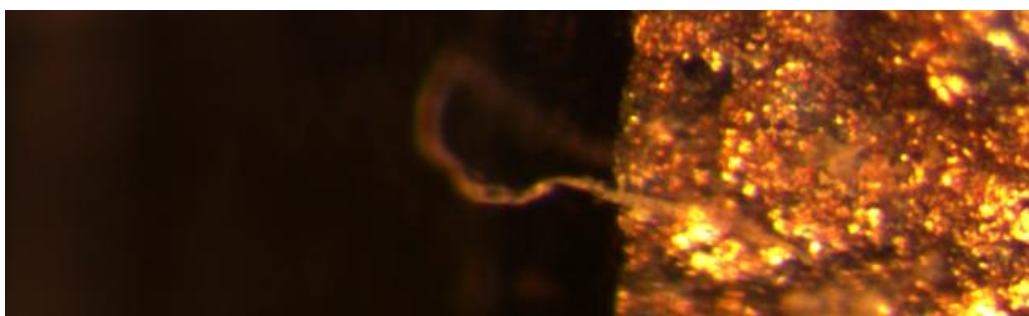


Kuva 49. Tunkeumanestetarkastuksessa paljastunut >1,2 mm makrosärö

Kuvissa 50 ja 51 nähdään vastaavanlaisia säröjä, mutta kyseiset säröt ovat vielä mikrosärön kokoluokkaa. Molemmat säröt ovat ydintyneet hieman terävän kulman toiselle puolelle karheaan aineeseen ja lähteneet kasvamaan uran jännityskeskittymää kohti. Karhea pinta antaa otolliset mahdollisuudet ydintymiseen varsinkin kun 420SS/pronssi on noin 5 % huokoinen materiaali. Myös koneistetun pinnan rajalla on selvästi karhea ja terävä vyöhyke, joka on jopa uraakin vakavampi epäjatkuvuuskohta. Tämä selittää osittain säröjen ydintymisen tämän koneistetun alueen reunan lähelle.

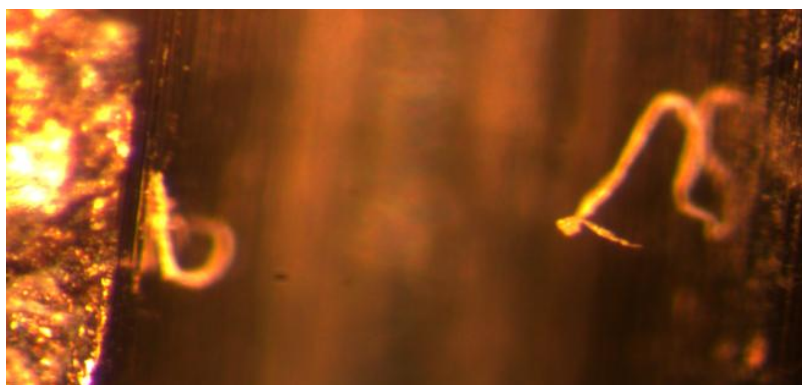


Kuva 50. Mikrosärö uran reunalla



Kuva 51. Uran reunalta ydintynyt mikrosärö

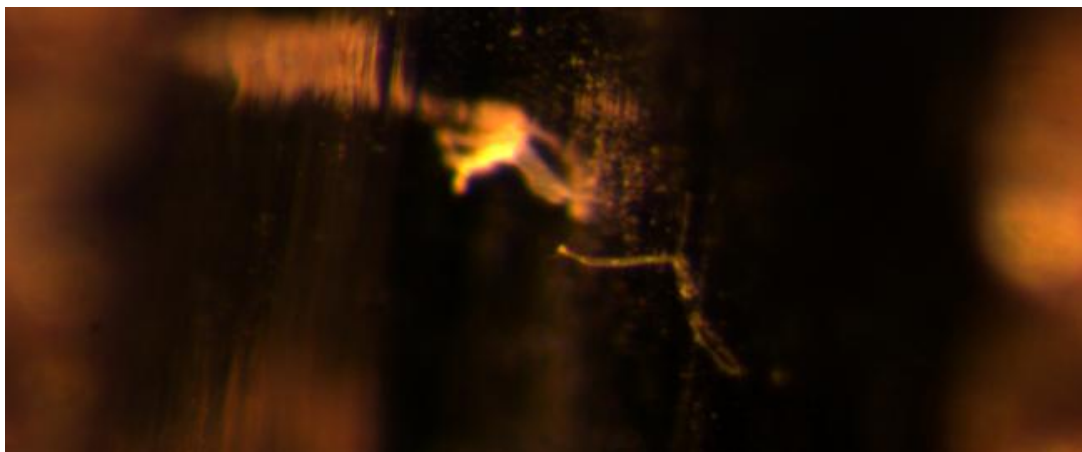
Kuvassa 52 nähdään kaksi mikrosäröä, jotka ovat ydintyneet uran rajojen sisäpuolelle. Kyseiset säröt ovat voineet lähteä uran koneistuksesta jääneestä naarmusta. Kuvassa 53 nähdään, että oikeanpuoleinen mikrosärö on kasvanut syvemmälle kappaleeseen kuin vasemman puoleinen. Tämä paljastui, kun samaa aluetta tarkasteltiin kirkkaammalla valolla.



Kuva 52. Kaksi mikrosäröä urassa



Kuva 53. Kirkkaammalla valaistuksella otettu kuva kuvan 52 alueesta



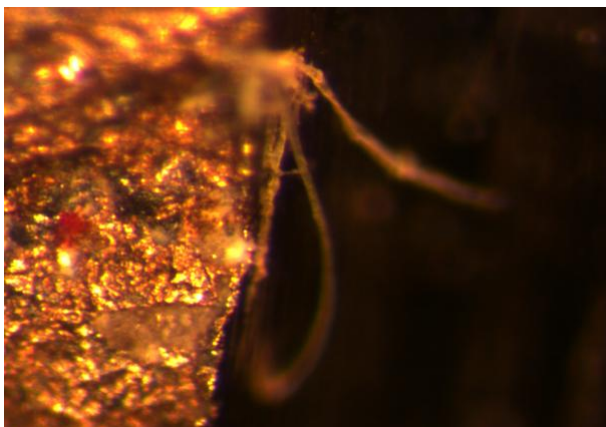
Kuva 54. Kaksi mikrosäröä uran keskellä

Kuvassa 54 näkyy kaksi uran keskelle ydintynyttä mikrosäröä. Nämä kaksi säröä ovat ainoat, jotka sijoittuvat uran keskelle. Vaikka teoreettinen maksimijännitys on uran keskellä, on säröjen vaikea ydintyä siihen koneistuksessa tulleen muokkauslujittumisen ja pinnanlaadun paranemisen vuoksi.

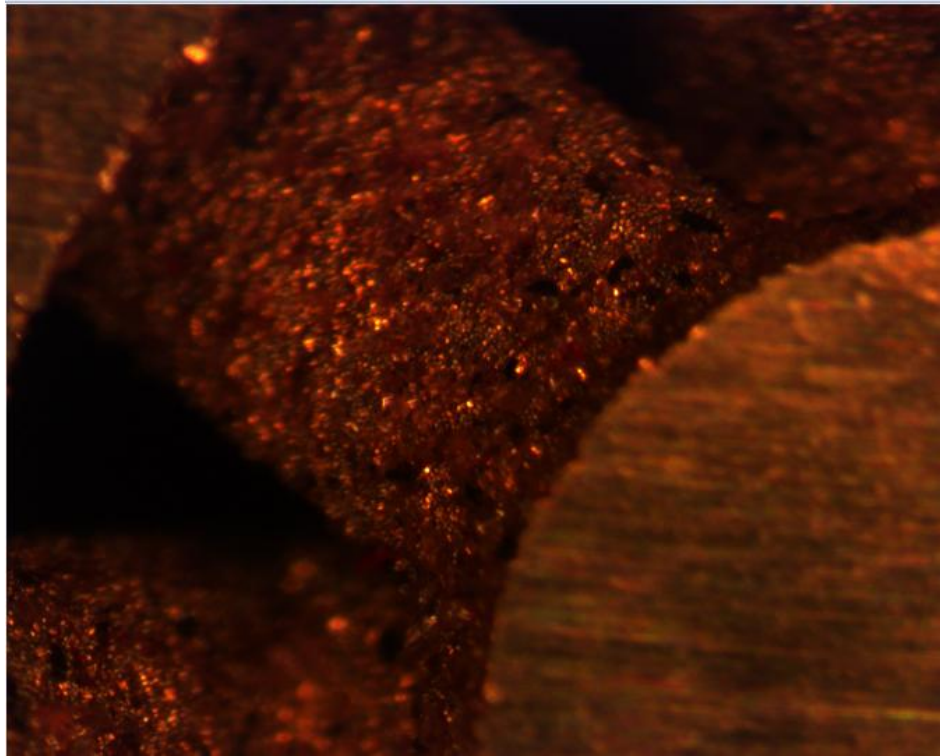
Koekappeleesta löydettiin myös kaksi mikrosärökokoluokan rajalla olevaa säröä, jotka olivat jo haarautuneet useasti (kuvat 55 ja 56). Kuvassa 56 näkyvä mikrosärö on ydintynyt uran reunalle ja lähtenyt etenemään kohti uran keskustaa. Kuvassa 55 näkyvä mikrosärö sen sijaan on ydintynyt uran sisälle ja lähtenyt etenemään kohti uran reunaa.



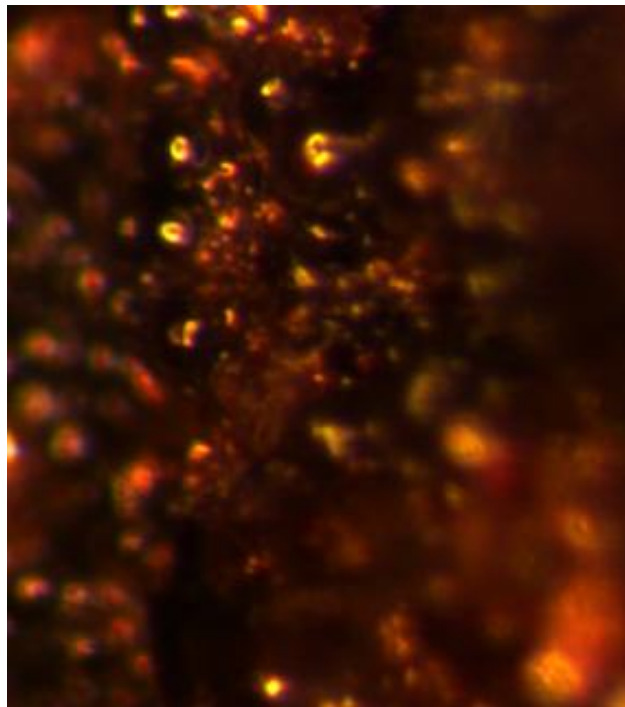
Kuva 55. Haarautunut mikrosärö uran keskellä



Kuva 56. Uran reunalta ydintynyt ja haarautunut mikrosärö

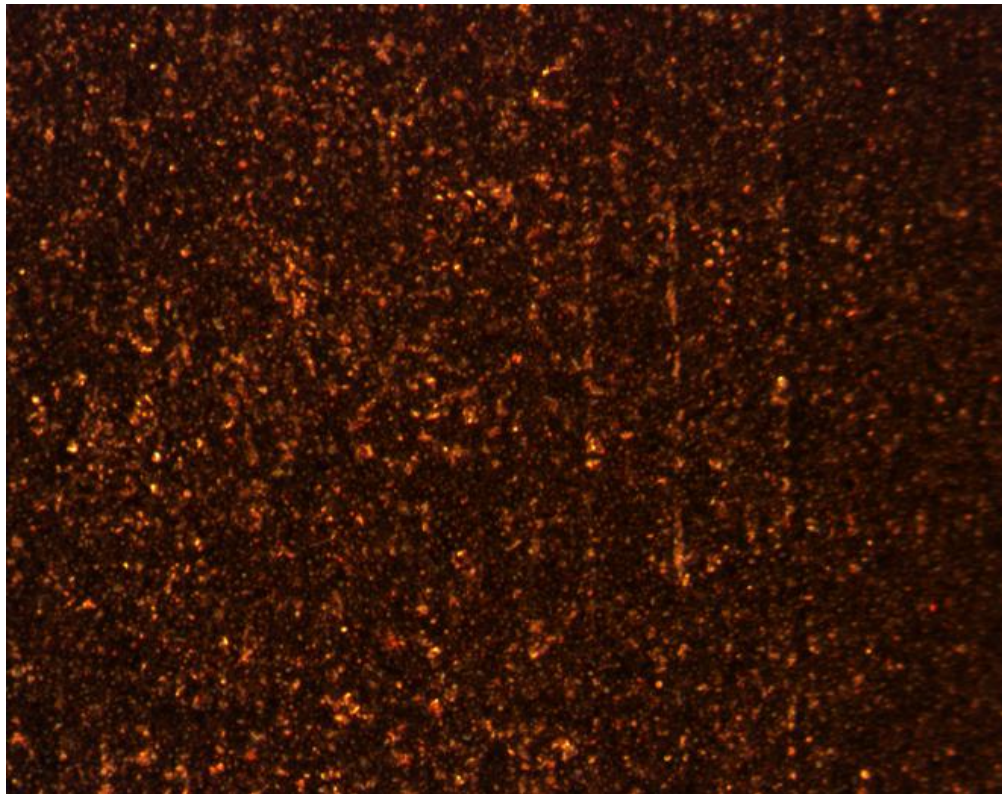


Kuva 57. 3DP-koekappaleen sisäisen ristikon pinnanlaatu



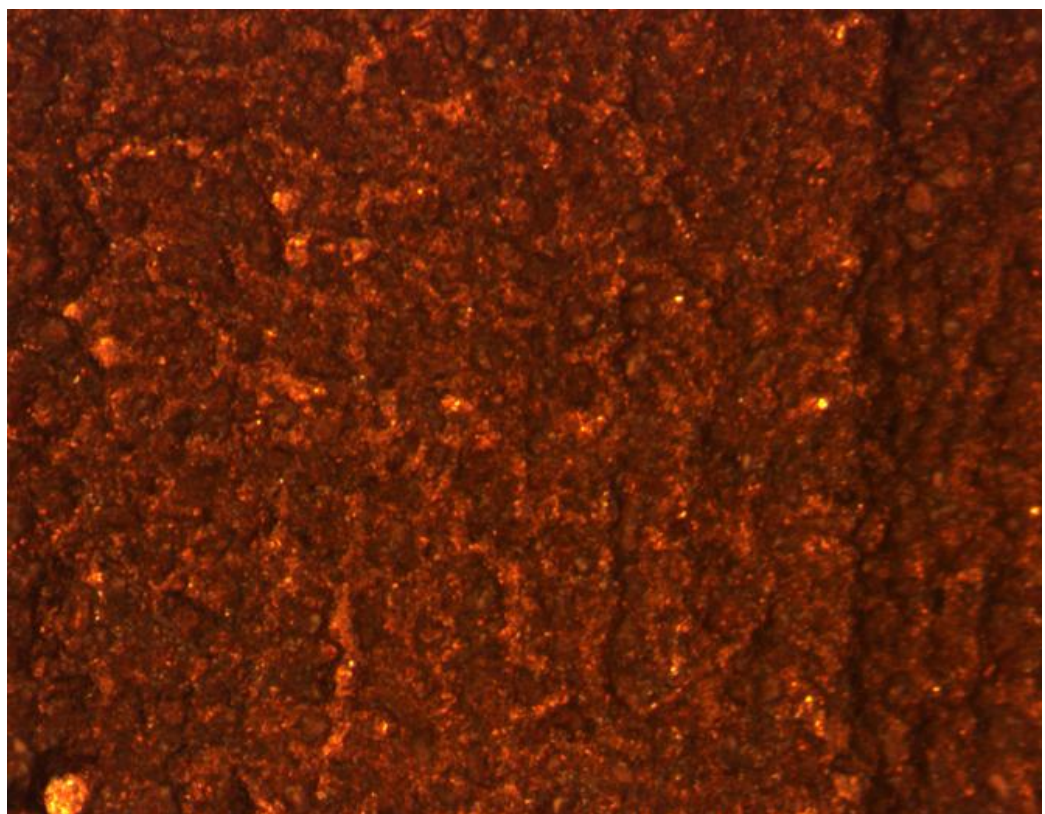
Kuva 58. 3DP-koekappaleen sisäisen ristikon pallomaiset kiteet

Stereomikroskoopilla otettiin myös kuvia sisäisen rakenteen pinnasta. Pinta oli pinnanlaadultaan karkeaa ja siinä on näkyvissä pallomaisia rakeita (kuva 57). Nämä rakeet ovat jauheenpoiston yhteydessä sisäiseen rakenteeseen jäänyttä irtojauhetta, joka on sulanut rakenteeseen kiinni (kuva 58).



Kuva 59. DMLS-tekniikalla tuotetun väsytestisauvan pinnanlaatu

Kuvista 59 ja 60 voidaan nähdä DMLS-tekniikalla ja 3DP-tekniikalla tuotettujen kappaleiden pinnanlaadun eroavaisuus. Molemmat kuvat otettiin stereomikroskoopilla kappaleiden ulkopinnasta. 3DP-tekniikalla tuotetun sisäisen ristikon pinnanlaatu on molempien tekniikoiden ulkopintojen pinnanlaatu heikompi (kuva 57).



Kuva 60. 3DP-koekappaleen pinnanlaatu

5.3 Lopputulokset ja virhearvioinnit

Alkuperäinen väsytestin kuormitus oli rajusti alimitoitettu. On todennäköistä, että löydetty säröt syntyivät vasta, kun voima tuplattiin. 420SS/pronssin väsymisikää ei voida arvioida käyttämällä rautametalleille suunnattuja kaavoja.

MicroCT-laitteen käyttöön olisi pitänyt tutustua perusteellisemmin ennen varsinaista testiä laajemmin. Tutustumisella olisi voitu välttää laitteen käyttö, jolloin olisi välttytty myös kappaleen sahaamiselta. Sahaamattoman kappaleen olisi voinut pitää väsytestissä rikkoutumiseen saakka. Sisäisen rakenteen tutkiminen ilman rikkovaa testausta osoittautui todella hankalaksi, sillä sisäisen rakenteen käyttäminen estää ultraäänen käyttämisen. MicroCT-laitteen jälkeen vaihtoehdoiksi jäi vain tunkeumanestetarkastaminen, kohdistettu röntgentarkastus ja pinnan tutkiminen mikroskoopilla. Tunkeumanestetarkastuksen ja stereomikroskoopin yhdistetyllä käytöllä saatiin tietoa koekappaleen vaipan säröjen ydintymisestä ja etenemisestä.

Koekappaleen säröistä 4/9 säröistä oli ydintynyt uran reunalle ja 5/9 uran reunan sisäpuolelle, joista kaksi oli ydintynyt keskelle uraa. Tästä voidaan päätellä, että FEM-analyysistä saadut arviot pitävät maksimijännityksen paikannuksen puolesta paikkaansa. Koneistettu pinta oli muuta kappaleen pintaa sileämpi, johtaen väsymiskestävyyden kannalta kestävämpään uraan. Tämä nähdään säröjen hajonnassa. Koneistuksen yhteydessä syntynyt muokkauslujittuminen on todennäköisesti myös vaikuttanut tähän hajontaan, 420SS/pronssin ollessa voimakkaasti muokkauslujittuvaa. Varsinaista empiiristä tietoa sisäisen rakenteen väsymiskestävyydestä ja särön ydintymisestä saatiin suppeasti, sillä vaipassa ei ollut läpimeneviä säröjä. Yksikään palkki ristikossa ei testin aikana kuitenkaan murtunut, vaikka 3DP-tekniikalla tehdyn kappaleen sisäpinnan pinnanlaatu oli heikko. Pinnanlaadun heikkouden takia on epätodennäköistä, että 3DP-tekniikalla valmistetun kappaleen sisäiset rakenteet kestävät väsyttävää kuormitusta merkittäviä aikoja vaipan murruttua (kuva 56). Sisäpinnassa on myös paljon otollisia paikkoja ydintymille ylimääräisen jauheen muodostamien kiteiden liitospinnoissa (kuva 57).

316L-koekappaleiden viivästyminen supisti työtä huomattavasti. Tämän vuoksi tässä opinnäytetyössä käsitellään EOS 316L –materiaalin väsymistä ja murtumismekaniikkaa vain teoreettisella tasolla. Tilatut koekappaleet testataan erillisessä testierässä. Teoriatiedon ja käsitellyistä testeistä voidaan kuitenkin arvioida, että EOS 316L –materiaali on sisäisten rakenteiden väsymiskestävyyden kannalta parempi vaihtoehto, sillä valmistustekniikan pinnanlaatu on huomattavasti parempi (kuvat 59 ja 60).

6 YHTEENVETO

Siitä huolimatta, että testit eivät menneet täysin suunnitellun mukaisesti, saatiin niistä tietoa 420SS/pronssin väsymiskäyttäytymisestä ja alustavaa tietoa tekniikan sopivuudesta sisäisten rakenteiden muodostamiseen. EOS 316L –koekappaleiden valmistuksessa tapahtuneiden viivästyksien vuoksi, kyseisiä koekappaleita ei voitu tämän opinnäytetyöprojektin aikana testata. Kappaleet testataan erillisessä testierässä niiden saavuttua.

6.1 Tutkimustulokset ja päätelmät

420SS/pronssi kestää hyvin väsymistä, vaikkakin käyttäytyy arvaamattomasti valmistajan infuusio-prosessin epätasaisuuden takia. 3DP-tekniikalla tuotettujen sisäisten rakenteiden pinnanlaatu on ulkopintojen pinnanlaatua heikompi, joten voidaan arvioida, että sisäiset rakenteet eivät kestä huomattavia määriä syklejä ulkopinnan murruttua. EOS 316L –materiaalista tehtyjen koekappaleiden pinnanlaatu on parempi, joten voidaan päätellä, että DMLS-tekniikka soveltuu 3DP-tekniikkaa paremmin väsymistä kestävien sisäisten rakenteiden luomiseen.

Sisäisiä rakenteita on huomattavan vaikeaa testata ilman rikkovaa testausta, sillä kuvauksia ei voida suorittaa MicroCT- tai ultraäänilaitteilla. MicroCT-laitteelle kappaleen vaippa ja kappaleen ontouden vaihtelu estävät kuvauksen, röntgen säteiden imeytyessä kokonaan kappaleeseen. Kohdistetulla röntgenillä on mahdollista saada tuloksia, mutta tekniikan kuvantamismahdollisuudet ovat rajatut. Ultraäänilaitteella tarkastaminen estyy sisäisen rakenteen hajottaessa aallot niiden päästessä vaipan läpi.

FEM-analyysien voimien paikannukset pitivät paikkansa säröjen ydintyessä maksimivoiman lähettyville. Sisäisen rakenteen FEM-analyysiä ei voitu todentaa ilman rikkovaa testausta.

Jatkotutkimusten kannalta olisi hyvä tutkia sisäisten rakenteiden väsymistä rikkovalla testaamisella, laajalla koesauvaerällä, useita AM-valmistustekniikoita hyödyntäen. Myös ohjelmistoilla luotujen rakenteiden väsymistä olisi syytä tutkia syvemmin.

LÄHTEET

- ABBADI A., TIXIER J. GILGERT Z. 2014. Experimental study on the fatigue behavior of honeycomb sandwich panels with artificial defects, Composite Structures. ELSEVIER: Lontoo
- ARCAM, 2014. EBM® Electron Beam Melting. Viitattu 2014-10-9. Saatavissa: <http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/>
- BRYDEN D, 2014. CAD and Rapid Prototyping for Product Design. LAURENCE KING: Edinburgh (e-kirja)
- EOS, 2014. EOS Stainless Steel 316L, Viitattu 2014-10-2. Saatavissa: <http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/77d285f20ed6ae89/32071e4249738be6f1dc5b7bd699164d/EOSStainlessSteel316L.pdf>
- EXONE, 2012. Metal Ulterra. Viitattu 2014-29-10. Saatavissa: http://www.exone.com/sites/default/files/Case_Studies/metal_Ulterra.pdf
- EXONE, 2012. Metals. Viitattu 2014-29-10. Saatavissa: <http://www.exone.com/en/materialization/what-is-digital-part-materialization/metal>
- EXONE, 2012. Systems. Viitattu 2014-29-10. Saatavissa: <http://www.exone.com/en/materialization/systems>
- EXONE, 2014. X1 Material Data 420SS, Viitattu 2014-10-20. Saatavissa: http://www.exone.com/sites/default/files/brochures/X1_MaterialData_420SS.pdf
- FPINNOVATIONS, 2008. TP09-01 Lightweight Panels. Viitattu 2014-5-30 Saatavissa: http://www.solutionsforwood.ca/_docs/reports/TP09-01LightweightPanels.pdf
- GARCEAU Chris, 2013-05-03. [verkkoaineisto]. Best Practice for 3D Printing Parts. Viitattu 2014-05-30. Saatavissa: <http://blog.capinc.com/2013/05/best-practice-for-3d-printing-parts/>
- HANK, 2009-09-20. [verkkoaineisto]. The Basic Structure of Tower Cranes. Viitattu 2014-05-30. Saatavissa: <http://www.construction-machine.org/2009/08/the-basic-structure-of-tower-cranes/>
- HIEMENZ J. 2007. Rapid prototypes move to metal components. Viitattu 2014-10-9. Saatavissa: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1274037
- HONGLIN, Guo 1998. Alloy Design for Three-Dimensional Printing of Hardenable Tool Materials. Massachusetts institute of technology. Materiaalitekniikanlaitos. Tohtorinväitös. Viitattu 2014-22-10. Saatavissa: <http://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/29979/54769230.pdf?sequence=1>
- HOT-WORLD GMBH & CO KG, RepetierHost-ohjelma, Viitattu 2014-1-10.
- HU L., HE X., WU G. ja YU T. 2014. Dynamic crushing of the circular-celled honeycombs under out-of-plane-impact. ELSEVIER: Lontoo (tieteellinen julkaisu)
- HUSSEIN Ahmed, HAO Liang, CHUNZE Yan, HAO Liang, EVERSON Richard ja YOUNG Philippe 2013. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. UNIVERSITY OF EXETER: Exeter (tieteellinen julkaisu)
- I.MATERIALISE, 2014. Stainless steel design guide. Viitattu 2014-22-10. Saatavissa: <http://i.materialise.com/materials/stainless-steel/design-guide>
- IKONEN K. ja KANTOLA K. 1986. Murtumismekaniikka. Otatieto Oy: Helsinki

JINDAL U. 2012. Experimental Stress Analysis. Pearson: Intia (e-kirja)

MATILAINEN, Ville 2012. Benchmarking of laser additive manufacturing process. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Metalliteknologianlaitos. Kandyö. Viitattu 2014-22-10. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/84863/BSc%20Thesis%20Matilainen%20fv.pdf?sequence=1%E2%80%8B>

O'CONNOR, KLEYNER. 2012. Practical Reliability Engineering. JOHN WILEY & SONS: Chichester (e-kirja)

PEELS Joris, 2011. DMLS: guidelines & technical specifications for titanium 3D printing. Viitattu 2014-5-30. Saatavissa: <http://i.materialise.com/blog/entry/dmls-guidelines-technical-specifications-for-titanium-3d-printing>

PIILI Heidi, 2014. Mestari 2013 esitelmä. Viitattu 2014-5-30. Saatavissa: http://mestari2013.bonsait.fi/resources/public/Luennot//PiiliHeidi_Lisaava-valmistus.pdf

AYRE Mike, 2014. [verkkoaineisto] DMLS design guide V4 - A basic guide to designing parts for the Direct Metal Laser Sintering '3D print' process. Viitattu 2014-11-14. Saatavissa: <https://prezi.com/q55mkdhc7dwo/dmls-design-guide-v4/>

PURTONEN, Tuomas, SALMINEN, Antti ja PIILI, Heidi 2014-10-21. [Palaveri.] Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto
WALTER + BAI, 2014. Instructions Manual for LFV 500-HH. WALTER + BAI: Löhningen

RIEMERA A., LEUDERSA S., M. THÓNEA, RICHARDA H.A., TRÖSTERA T. ja NIENDORFD T. 2014. On the fatigue crack growth behavior in 316L stainless steel manufactured by selective laser melting. ELSEVIER: Lontoo (tieteellinen julkaisu)

SALMI T. ja PAJUNEN S. 2010. Lujuusoppi. Pressus Oy: Tampere

SOLID CONCEPTS, 2014. DMLS design guidelines. Viitattu 2014-5-30 Saatavissa: <http://www.solidconcepts.com/resources/design-guidelines/dmls-design-guidelines/>

SWIFT K. ja BOOKER J. 2013. Manufacturing Process Selection Handbook. ELSEVIER: Lontoo (e-kirja)

WITHINLABS, 2014. Within Medical Brochure(v1.0). Withinlabs: New York.

WITHINLABS, Within Medical –ohjelmisto. Viitattu 2014-6-20.

LIITE 1: EOS M-SERIES AINETTALISÄÄVÄ VALMISTUSLAITE



(MATILAINEN, Ville 2012. Benchmarking of laser additive manufacturing process.)

LIITE 2: EOS 316L MATERIAALIOMINAISUUDET

(EOS, 2014. EOS Stainless Steel 316L)

EOS StainlessSteel 316L			
Materialin koostumus	Aine	Min	Max
	Fe	Eroitus	
	Cr	17,00	19,00
	Ni	13,00	15,00
	Mo	2,25	3,00
	Cr		0,030
	Mn		2,00
	Cu		0,50
	P		0,025
	S		0,010
	Si		0,75
	N		0,10
Suhteellinen tiheys standardi asetuksilla			n. 100 %
Tiheys standardi asetuksilla		min.	7,9 g/cm ³
		min.	0,285 lb/in ³
Tulostettuna ilman jälkikäsittelyä			
Murtolujuus			
horisonttaali (XY)			640 ± 50 MPa
vertikaali (Z)			540 ± 55 MPa
Myötölujuus			
horisonttaali (XY)			530 ± 60 MPa
vertikaali (Z)			470 ± 90 MPa
Kimmokerroin			
horisonttaali (XY)		tyypillinen	185 GPa
vertikaali (Z)		tyypillinen	180 GPa
Murtopitenemä			
horisonttaali (XY)			40 ± 15 %
vertikaali (Z)			50 ± 20 %
Pinnankovuus		tyypillinen	85 HRB

LIITE 3: 420SS / PRONSSI MATERIAALIOMINAISUUDET

(EXONE, 2014. X1 MATERIAL DATA 420SS)

420SS / Pronssi			
	Lämpökäsitelty 95%+	Käsittelemätön 95%+	
Suhteellinen tiheys			
Murtolujuus	496	682	MPa
Myötölujuus (0,2 %)	427	455	MPa
Kimmokerroin	147	147	GPa
Tiheys	7,86	7,86	g/cm ³
Murtovenymä	7,00 %	2,30 %	
Pinnankovuus	20	25	HRC
Koneistettavuus	Koneistettavissa	Kuten ohjeistettu	
Hitsausmenetelmä	Silikooni pronssi lisäaine + TIG		