



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PETRI KOSKELA

KUPARISEN VIRRANKERÄYSNAUHAN VÄSYMISKESTÄVYYS

Diplomityö

Tarkastajat: professori Pekka Ruuskanen
ja Tkt Terhi Glas.

Tarkastajat ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 03. lokakuuta 2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KOSKELA, PETRI: Kuparisen virrankeräysnauhan väsymiskestävyys

Diplomityö, 69 sivua, 8 liitesivua

Joulukuu 2012

Pääaine: Elektroniikan materiaalit

Tarkastaja: professori Pekka Ruuskanen ja TkT Terhi Glas

Avainsanat: Raekoko, kupari, kuparinauha, väsymiskestävyys

Tämän työn tavoitteena oli mitata kuparisen virrankeräysnauhan väsymiskestävyyttä. Virrankeräysnauha kerää aurinkopaneelin tuottaman sähköenergian ja yhdistää kennot toisiinsa ja akkuihin. Siihen kohdistuu aurinkopaneelien käyttöympäristön vuorokautisen lämpötilanvaihtelun aiheuttama rasitus. Sen vaikutus virrankeräysnauhan väsymiskestävyteen selvitettiin kuormittamalla nauhasta valmistettuja näytteitä lämpötilanvaihtelun aiheuttamaa jaksottaista veto-puristusjännitystä vastaavalla voimalla. Testattavana oli eri parametreilla valmistettuja nauhoja, sekä pinnoittamattomina, että tinalyijyhopeaseoksella (SnPbAg) pinnoitettuna. Testeissä eri parametreilla valmistettuja pinnoittamattomia ja pinnoitettuja nauhoja käsiteltiin eri materiaaleina.

Virrankeräysnauhan valmistajan toimittamista näytteistä tehtiin koekappaleet liimamalla näytteet CNC-ohjatulla piirilevyjyrsimellä valmistettuihin koesauvoihin. Koekappaleet kiinnitettiin testeissä käytettyyn, magnetostriktiiviseen aktuaattoriin perustuvaan testilaitteeseen. Koekappaleita kuormitettiin siniaallon muotoisella kuormitusamplitudilla. Testeissä käytetty rasitusmuoto oli vaihtokuormitus, jonka keskijännityksen arvo oli nolla.

Kuparin lämpötilakertoimen ja lähtötiedoissa annetun vuorokautisen lämpötilaeron avulla määriteltyä lämpötilanvaihtelun aiheuttamaa venymää vastaava kuormitusamplitudi saatiin määritettyä ja vakioitua koekappaleeseen kiinnitetyn venymäliuskan ja venymän takaisinkytkennän avulla. Väsytestien kanssa samanaikaisesti tehdyillä nelipistemittauksilla seurattiin koekappaleen sähkönjohtavuudessa tapahtuneita muutoksia. Tallennetuista testituloksista laadittiin väsymiskäyttäytymistä esittävät kuvaajat.

Testitulokset osoittavat, että virrankeräysnauha täyttää sille asetetut väsymiskestävyys- ja sähkönjohtavuuskäytön säilymistavoitteet kaikkien tutkittujen, eri parametreilla valmistettujen, nauhojen osalta. Valmistusmateriaalin raekolla on vaikutusta virrankeräysnauhan väsymiskestävyteen, mutta vaikutus jää aurinkopaneelin käyttöolosuhteissa merkityksettömäksi. Tinalyijyhopeapinnoitus parantaa kuparisen virrankeräysnauhan väsymiskestävyttä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

KOSKELA, PETRI: Fatigue Life of Copper Interconnect Ribbon

Master of Science Thesis, 69 pages, 8 appendix pages

December 2012

Major: Electronic Materials

Examiners: Professor Pekka Ruuskanen and D.Sc. (Tech.) Terhi Glas

Keywords: Grain size, copper, copper ribbon, fatigue life

The purpose of this study was to observe the fatigue life and the fatigue behavior of copper interconnection ribbon. The interconnection ribbon collects the electrical energy generated by solar cells and connects the solar cells and accumulators. It is subjected to cyclic stress due to daily variations of temperature. In order to solve the effect the mentioned stress has on the ribbon's fatigue life, the samples made of interconnection ribbon material were loaded with cyclic tension-compression stress corresponding to stress provided by the daily temperature variation. The test material consisted of ribbons manufactured with different parameters, both uncoated and coated with tin-lead-silver (SnPbAg) alloy. The ribbons manufactured with different parameters, coated and uncoated, were treated as different materials during the tests.

The samples were made from the material provided by the producer of the interconnection ribbon by gluing a precut piece of test material on top of the test sticks, which were manufactured using CNC-controlled circuit board milling machine. The samples were then attached to test device, based on a magnetostrictive actuator. During the tests the samples were loaded with sinusoidal load amplitude. The form of used stress was exchange load with zero mean stress value.

The cyclic load amplitude corresponding to the strain defined by temperature coefficient for copper and the temperature variation given in initial data was defined and kept constant by attaching a strain gauge on top of the specimen, measuring the strain and using strain feedback. Four point measurements were carried out simultaneously with fatigue tests in order to monitor possible changes in the conductivity of the samples. The figures characterizing the fatigue behavior of the interconnector ribbon were drawn about the restored test results.

The test results point out, that the copper interconnection ribbon fulfills the demands set for its fatigue life and the loss of conductivity in case of all tested materials. The grain size of materials effects to fatigue life of the interconnection ribbon, but under the common operation conditions of the solar cells the effect remains meaningless. The tin-lead-silver coating improves the fatigue life of copper interconnection ribbon.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus tehtiin Luvata Pori osakeyhtiölle, jota haluan kiittää mielenkiintoisen ja haastavan diplomityöaiheen tarjoamisesta. Tutkimus virrankeeräysnauhan väsymiskestävydestä oli erittäin antoisa ja kehittävä kokemus.

Työn ohjaajina Luvata Pori Oy:ssä toimivat TkT Terhi Glas, joka toimi myös toisena työn tarkastajana, sekä DI Tuomas Korvenkangas. Tampereen teknillisellä yliopistolla työn tarkastajana toimi professori Pekka Ruuskanen. Heitä haluan kiittää asiantuntevista neuvoista ja hyvästä ohjauksesta. Haluan myös kiittää kaikkia työn eri vaiheissa avustaneita henkilöitä.

Lämmin kiitos kuuluu myös kaikille läheisille, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua sekä opiskelun, että tämän diplomityön tekemisen aikana.

Porissa 12.12.2012

Petri Koskela

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Kuparin väsymiseen liittyvät tekijät.....	2
2.1	Kuparin mikrorakenne	2
2.1.1	Hilarakenne	2
2.1.2	Hilaviat.....	3
2.1.3	Dislokaatioiden muodostuminen	4
2.2	Myötäminen ja muodonmuutokset.....	5
2.2.1	Myötäminen	5
2.2.2	Elastinen ja plastinen muodonmuutos	6
2.2.3	Virheettömän kiteen muodonmuutos.....	6
2.2.4	Muodonmuutosmekanismi	7
2.2.5	Todellisen kiteen muodonmuutos.....	8
2.2.6	Todellisen kiteen lujuus	8
3	Kuparin väsyminen	10
3.1	Wöhler-käyrä ja Smithin piirros.....	10
3.2	Murtuman ydintyminen.....	13
3.3	Murtuman eteneminen	15
3.4	Murtumistyyppit.....	17
3.5	Väsymistyyppit	18
3.5.1	Jännityksen hallitsema väsyminen.....	18
3.5.2	Venymän hallitsema väsyminen	20
3.6	Väsymiskestävyyyteen vaikuttavia tekijöitä	21
3.6.1	Alkusärö.....	21
3.6.2	Rakenne ja pinnanlaatu	22
3.6.3	Ympristötekijät	23
3.7	Kuparin väsymisen tutkimusmenetelmiä	24
3.8	Aurinkokennojen kestävyystarkastelu	26
3.9	Raekoon ja pintarakenteen vaikutus kuparin väsymiseen.....	28
3.10	Väsymisen aiheuttama pinnan muodonmuutos.....	32
3.11	Kumulatiivinen väsymisvaurio	38
4	Väsytykokeet	43
4.1	Koejärjestelyt	43
4.2	Koemateriaali	46
4.2.1	Virrankeräysnauhan valmistusprosessi.....	46
4.2.2	Koekappaleiden valmistus	46
	Testilaitteet ja ohjelmat	50
4.2.3	Venymäliuska	50
4.2.4	Voima-anturi.....	51
4.2.5	Magnetostriktiivinen aktuaattori.....	52

4.2.6	Mittakortti	53
4.2.7	DBU-120 Moduuli	53
4.2.8	Nelipistemittauspää.....	54
4.2.9	Ohjelmat.....	55
5	Tulokset ja niiden arviointi	58
5.1	Väsytykokeiden keskeiset tulokset.....	58
5.2	Tulosten arviointi	65
6	Johtopäätökset.....	67
	Lähteet.....	70
	LIITE 1: Väsytykokeiden tulokset, pinnoittamaton kelattu materiaali	72
	LIITE 2: Väsytykokeiden tulokset, pinnoitettu kelattu materiaali	73
	LIITE 3: Väsytykokeiden tulokset, pinnoittamaton suora materiaali	74
	LIITE 4: Väsytykokeiden tulokset, pinnoitettu suora materiaali	75
	LIITE 5: Sähkönjohtavuusmittausten tulokset prosentteina	76
	LIITE 6: Venymäliuskatetestien tulokset pinnoittamaton materiaali	77
	LIITE 7: Venymäliuskatetestien tulokset pinnoitettu materiaali	78
	LIITE 8: Näytteiden merkinnät.....	79

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	materiaalivakio
da	särön pituuden muutos
dN	kuormitusjaksojen muutos
$\Delta\varepsilon_p$	plastinen venymäamplitudi
$\Delta\sigma$	jännityksen muutos
ΔK	jännitysintensiiteetti
ε_p	plastinen myötymä
ε_f	väsymissitkeyskerroin
K_{th}	jännitysintensiiteetin kynnyisarvo
μ	leikkausmoduuli
N	kestoluku
N_0	normaalkuormitusjaksojen lukumäärä
N_1	toisiokuormituslohkojen kuormitusjaksojen lukumäärä
N_2	normaalkuormitusjaksojen lukumäärä
N_f	syklien lukumäärä
p	materiaalivakio
P_{max0}	normaalkuormituslohkon maksimikuormitus
P_{min}	normaalkuormituslohkon minimikuormitus
R_e	myötöraja
R_m	murtolujuus
σ_a	jännitysamplitudi
σ_D	väsymislujuus
σ_N	aikalujuus
σ_m	keskijännitys
σ_{max}	ylempi rajajännitys
σ_{min}	alempi rajajännitys
σ_L	alempi myötöraja
σ_w	vaihtolujuus

SnPbAg	Tinalyijyhopea
AFM	Atomic Force Microscopy
CNC	Computerized Numerical Control (Tietokoneistettu numeerinen ohjaus).
CRM	Copper Rod Medium (Kuparitanko, keskisuuri raekoko).
CRTM	Copper Rod Tubular Medium (Kuparitanko, putkeksi koneistettu, keskisuuri raekoko)
CTL	Cyclic Torsion Large (Jaksottainen kierto- taivutus, suuri raekoko).
CTM	Cyclic Torsion Medium (Jaksottainen kierto- taivutus, keskisuuri raekoko).
CTS	Cyclic Torsion Small (Jaksottainen kierto- taivutus, pieni raekoko).
CSS	Copper Surface Structure (Pintarakenteellinen kupari)
HV	Hardness Vickers (Kovuus Vickers- asteikolla).
IEC	International Electrotechnical Commission (Kansainvälinen sähkötekniikan komissio).
OFHC	Oxygen Free High Conductivity (Happivapaa, korkea sähkönjohtavuus).
SEM	Scanning Electron Microscope (Pyyhkäisy- elektronimikroskooppi).

Aikalujuus	Materiaalin kyky kestää räsitusta.
Deformaatio	Muodonmuutos, usein kuormituksen aiheuttama.
Dislokaatiolähde	Kiteen liukunauhoissa muodonmuutoksen aikana tapahtuvaa useiden dislokaatioiden syntymistä selvittävä mekanismi, tunnetaan myös Frank-Read-lähteenä.
Dislokaatioteoria	Metallien plastista käyttäytymistä ja lujuutta selittävä tieteellinen otaksuma.
Jännitysenergian tiheys	Jännitysenergian määrä tilavuus-, tai pinta-alayksikköä kohti.
Magnetostriktiivinen	Ferromagneettisten materiaalien ominaisuus, jossa materiaalin fyysiset mittasuhteet muuttuvat vähittellen ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta.
Siirrosliukuminen	Ilmiö, jossa kiteet muovautuvat plastisesti siten, että niiden eri osat liukuvat toisiinsa nähden liukupintoja pitkin tiettyyn suuntaan.
Tiivispakkaus	Materiaalin rakenne, jossa atomit koskettavat toisiaan.
Valenssielektroni	Atomin ylimmällä kuorella oleva elektroni, joka osallistuu kemiallisten sidosten muodostamiseen.
Yksikkökoppi	Yksinkertaisin yksikkö, jolla kiderakenne voidaan määrittää.

1 JOHDANTO

Tässä työssä tutkitaan aurinkokennoja yhdistävän kuparista valmistetun virrankeräysnauhan väsymiskestävyyttä. Tutkimus kohdistuu nauhan kiinnijuottamattomaan osaan kennojen välissä. Siinä keskitytään aurinkopaneelien käyttöympäristön vuorokautisen lämpötilanvaihtelun aiheuttamaan kuormitukseen. Väsytyksoikeita tehdään eri parametreilla valmistetuilla materiaaleilla, jotta saataisiin selvitettyä raekoon vaikutus väsymiskestävyyteen. Väsytyksoikeiden kanssa tehdään samanaikaisesti sähkönjohtavuuden mittauksia koekappaleista. Niiden avulla kartoitetaan virrankeräysnauhan sähkönjohtavuuskyvyssä testin aikana mahdollisesti tapahtuvia muutoksia.

Toisessa luvussa esitetään kuparin väsymiseen liittyviä tekijöitä. Aluksi tarkastellaan kuparin mikrorakennetta. Sen jälkeen esitellään myötäminen, sekä muodonmuutosmekanismit.

Kolmannessa luvussa luodaan katsaus kuparin väsymisilmiöön ja sen eri tyypeihin, sekä väsymiskestävyyteen vaikuttaviin tekijöihin. Tämän jälkeen esitellään väsymiskestävyyksiä määrittelyssä käytettäviä tutkimusmenetelmiä, painopisteen ollessa tähän tutkimukseen valitussa veto-puristus-menetelmässä. Sitten esitetään lyhyesti aurinkokennojen kestävyystarkasteluun liittyviä periaatteita ja käytäntöjä. Lopuksi tarkastellaan muiden tutkijoiden aikaisemmin tekemiä kuparin väsymiseen liittyviä tutkimuksia.

Neljännessä luvussa esitetään aluksi koejärjestelyt ja kokeiden tekemisen periaatteet. Seuraavaksi kuvaillaan koemateriaali, sen valmistusprosessi ja koekappaleiden valmistus. Lopuksi esitellään kokeissa käytetyt laitteet ja tietokoneohjelmat.

Viidennessä luvussa esitetään kokeista saadut keskeisimmät tulokset kuvaajina. Taulukoidut tulokset ovat liitteenä. Sen jälkeen tarkastellaan saatuja tuloksia ja niihin vaikuttaneita tekijöitä. Lopuksi arvioidaan tutkimustulosten oikeellisuutta ja niiden käyttökelpoisuutta.

Kuudennessä luvussa tehdään yhteenveto tutkimustuloksista ja vastataan tutkimuksen tavoitteiksi asetettuihin kysymyksiin. Tulosten ja kokeiden aikana tehtyjen havaintojen pohjalta esitetään mahdollisia kehitysideoita ja ehdotetaan mahdollisia lisätutkimuskohteita.

2 KUPARIN VÄSYMISEEN LIITTYVÄT TEKIJÄT

Toisessa luvussa esitellään aluksi kuparin mikrorakenne; hilarakenne ja hilaviat, joilla on keskeinen vaikutus väsymiskestävyys-venymä-käyrän pohjalta kuormituksesta aiheutuvia fysikaalisia ilmiöitä. Niistä tutkitaan myötämistä, sekä elastista ja plastista muodonmuutosta. Muodonmuutoksen yhteydessä käsitellään erikseen sekä virheetön, että todellinen kide. Niin kutsuttu todellinen kide saattaa sisältää hilavikoja ja mahdollisia epäpuhtauksia.

Seuraavaksi tutkitaan kuparin väsymistä; murtuman ydintymistä ja etenemistä, sekä kuvaillaan eri murtumistyyppit. Sitten esitellään väsymiskäyttäytymisen jako venymän ja jännityksen hallitsemiin tapauksiin. Lopuksi esitetään kuparin väsymisen yleisemmin käytettyjä tutkimusmenetelmiä, joista tarkemmin keskitytään tässä tutkimuksessa käytettyyn veto-puristus-menetelmään.

2.1 Kuparin mikrorakenne

Kuparilla on kiteinen sisäinen rakenne. Kiteet liittyvät raerajoilla toisiinsa. Ne rakentuvat hilasta, jossa atomit ovat hyvin lähellä toisiaan kolmiulotteisessa säännöllisessä järjestyksessä. Tätä järjestystä kutsutaan avaruushilaksi, tai vain lyhyesti hilaksi. Kuparin kaikki kiteet ovat samanlaatuisia, joten sen rakenne on homogeeninen.[1]

Kuparin ominaisuudet, joita ovat esimerkiksi lujuus, kovuus, muovattavuus, lastuttavuus, kulumisenkestävyys, sähkönjohtavuus ja pituuden lämpötilakerroin, riippuvat sen käsittelytilasta, sisäisestä ja rakenteesta koostumuksesta. Kappaleen ominaisuudet ovat riippuvaisia myös ympäristötekijöistä, joista tärkeimpiä ovat lämpötila ja korroosiovaikutukset. myös aika voi aiheuttaa muutoksia kuparin ominaisuuksiin. Kuparin myötö- ja murtolujuus, sekä kimmomoduuli pienenevät lämpötilan kohotessa, mutta murtovenymä sekä kurouma suurenevät. [2]

2.1.1 Hilarakenne

Muiden metallien tapaan kupariatomit pyrkivät luovuttamaan uloimmalla elektronikellä olevat elektroninsa, eli valenssielektronit kaikille atomeille yhteisiksi, vapaiksi elektroneiksi. Atomeista tulee positiivisesti varautuneita ioneja, jotka samanmerkkisinä hylkivät toisiaan, mutta elektronit vetävät niitä puoleensa. Atomien keskinäisen etäisyyden määrää tasapainotila, joka syntyy veto ja poistovoimien ollessa yhtä suuria. Metallinen sidos syntyy samalla, kun ionit asettuvat hilan mukaiseen järjestykseen. [2]

Kupari voi muokkautua melko paljon kiteisen rakenteen häviämättä, koska kupari-ionien väliset sidokset eivät ole mihinkään hilasuuntiin sidottuja. Kupariatomit muodostavat jähmettymisessä atomitasoja, joissa kutakin atomia sivuaa kuusi muuta atomia. Tällä tavalla muodostuu kuparin kiderakenne. Kyseessä olevaa tasoa nimitetään tiiviisti pakatuksi, koska mainittu lukumäärä (koordinaatioluku) on suurin mahdollinen määrä toisiaan sivuavia atomeja tietyssä tasossa. Tiiviisti pakatut tasot järjestyvät päällekkäin siten, että toisiaan sivuavien atomien määrä lisääntyy kuudella. Tällöin kunkin atomin koordinaatioluvuksi tulee suurin mahdollinen 12. Tällainen rakenne on nimeltään tiivispakkaus. Kide voidaan jakaa tietyt symmetriaehdot täyttäviin rakenneyksiköihin, eli yksikkökoppeihin. Kiderakenne voidaan muodostaa toistamalla näitä rakenneyksiköitä kolmeen ulottuvuuteen. Kuparin yksikkökoppi on pintakeskeinen kuutio. Pintakeskeisessä kuutiossa ovat kaikki lävistäjä- eli oktaedritasot tiiviisti pakattuja. Niitä on neljä erisuuntaista paria. Tiivispakkaussuuntia on yhteensä 12 kappaletta. [2]

2.1.2 Hilaviat

Todellisuudessa kuparin hilarakenne ei ole matemaattisen säännöllinen. Kupariin muodostuu sen jähmettyessä poikkeamia teoreettisesta hilajärjestyksestä. Muokkaamisen yhteydessä niitä syntyy lisää. Näitä epäsäännöllisyyksiä kutsutaan hilavioiksi, jotka sisäisen rakenteen ohella vaikuttavat kuparin ominaisuuksiin. Tyypillisimpiä hilavikoja ovat pistemäiset, kuten vakanssit, välisija- ja korvausatomit, yksiulotteiset, eli dislokaatiot, kaksiulotteiset, esimerkiksi raerajat ja kolmiulotteiset, kuten vakanssien tai vieraiden atomien kertymät. [2]

Pistemäisiä hilavikoja, joissa säännöllisen hilajärjestyksen mukainen atomi puuttuu paikaltaan, nimitetään vakansseiksi, joita on sekä kiteen sisällä että raerajoilla. Niitä syntyy esimerkiksi kylmämuokkauksessa. Niiden lukumäärä lisääntyy kuparia kuumennettaessa ja vähenee jäädytettäessä. Vakanssit helpottavat atomien liikkumista hilassa, eli diffuusiota. Ne voivat itsekkin siirtyä paikasta toiseen, jolloin jokin atomeista täyttää vakanssin jättäen oman paikkansa tyhjäksi, eli uudeksi vakanssiksi. [2]

Muita pistemäisiä hilavikoja ovat välisija- ja korvausatomit. Korvausatomi on liuenneen aineen atomi, joka korvaa kantahilan atomin. Sen tulee olla lähes samankokoinen kuin alkuperäinen atomi, halkaisijat eivät saa erota yli 15 %. Korvausatomi aiheuttaa kantahilaan häiriöitä, minkä vuoksi se luokitellaan pistemäiseksi hilavioksi, kuten myös välisija-atomi, joka on niin pieni, että se mahtuu hilan tyhjien tilojen muodostamiin aukkoihin. Kaikki pistemäiset hilaviat aiheuttavat jännitystilan ympäristöönsä. [2]

Raerajat ovat kiteitä erottavia sisäisiä pintoja. Ne ovat muutaman atomietäisyyden paksuisia epäsäännöllisyysalueita, jotka sisältävät vakansseja, joskus seos- ja epäpuh-
tausatomeja, tai jopa raerajakalvoja. Rajalla olevat atomit ovat välittäjinä kiteiden kesken, eivätkä ole järjestyneet kummankaan naapurikiteen kidesuuntiin. Jokaisella kiteellä on oma, täsmällinen sisäinen suuntauksensa. Näiden hilasuuntien suuntaero on raerajal-

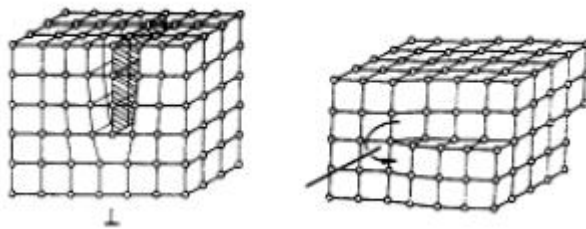
la vähintään 15 astetta. Tavallista raerajaa voidaan sanoa suurenkulman rajaksi. Jos kiteen atomit jättävät paikkansa ja asettuvat toisen kiteen hilasuuntien mukaisiin kohtiin, voi raeraja tämän vaikutuksesta siirtyä. [2]

Dislokaatio merkitsee liukutasossa olevaa kapeaa epäjärjestysaluetta. Se siirtyy liukutasolla jännityksen voimasta ja aiheuttaa yhden tai useamman atomivälin suuruisen siirrosliukuman (yleensä johonkin tiiviisti pakattuun suuntaan) ohittamassaan kohdassa. Jos sen aiheuttama siirrosliukuma tapahtuu tarkalleen dislokaation liikesuuntaan, kyseessä on särmädislokaatio. Se liikkuu siten, että sen asema siirtyy viereiselle atomitasolle ja äskeinen vajaa taso täydentyy. Mikäli siirrosliukuminen tapahtuu kohtisuoraan dislokaation liikesuuntaa vastaan, puhutaan ruuvidislokaatiosta. [2]

2.1.3 Dislokaatioiden muodostuminen

Seosatomit, sulkeumat ja muut häiriötekijät aiheuttavat sen, että hilarakenne ei voi muodostua virheettömäksi kiteen jähmettyessä sulatteesta. Niistä aiheutuvien sisäisten jännitysten pienentämiseksi jotkut atomitasot jäävät vajaiksi. Näin muodostuu särmädislokaatio. Joissakin tapauksissa osa hilapisteistä jää täyttymättä, jolloin syntyy tyhjä paikka, eli vakanssi. Nämä ovat termodynaamisista tasapainoehdoista aiheutuvia dislokaatioita, joiden määrä vaihtelee todellisissa kiteissä 106- 108 kpl/cm² rajoissa. Niiden keskimääräiseksi etäisyydeksi tulee täten noin 10⁻⁴ senttimetriä (1mikrometri). [4]

Dislokaatioilla on kaksi perusmuotoa, särmä- ja ruuvidislokaatio, jotka on esitetty kuvassa 2.1. [2]



Kuva 2.1. Vasemmalla särmädislokaatio ja oikealla ruuvidislokaatio. [2]

2.2 Myötäminen ja muodonmuutokset

Kuparin käyttäytyminen siihen kohdistuvan jännityksen alaisena riippuu pääasiallisesti kuparin rakenteesta. Se puolestaan määräytyy kuparin koostumuksesta ja sille tehdyistä käsittelyistä. Näiden lisäksi vaikuttavat lämpötila, sekä jännityksen tyyppi.[2]

Jaksottaisesti vaihteleva jännitys voi aiheuttaa kuparikappaleeseen väsymismurtuman, vaikka se kestäisi murtumatta vastaavan suuruisen staattisen kuormituksen. Kuparin kestävyyttä tarkastellaan erilaisten kokeiden avulla. Niillä pyritään mahdollisimman tarkasti jäljittelemään olosuhteita, joille kuparista valmistetut komponentit joutuvat alttiiksi niitä käytettäessä. Toisaalta kokeiden avulla voidaan tutkia eri tekijöiden vaikutusta jännityksen alaisten komponenttien kestävyYTEEN. Kokeita varten valmistettuja näytteitä kuormitettaessa niissä tapahtuu myötäminen, joka on tiettyyn rajaan asti elastista ja sen yläpuolella osittain myös plastista. [2]

2.2.1 Myötäminen

Kupari myötää jännityksen voimasta joko elastisesti tai plastisesti. Kun kuparikappaleeseen kohdistetaan vetojännitys, on sen aiheuttama venymä elastinen, kunnes myötöraja R_e saavutetaan. Myötörajan alapuolella venymä noudattaa Hooken lakia:

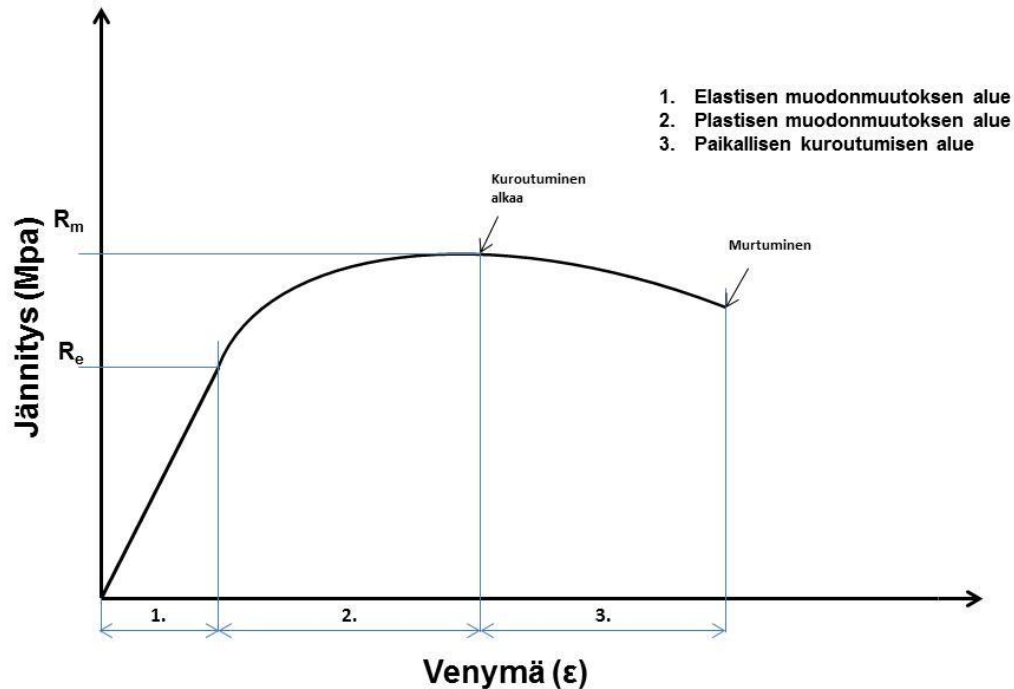
$$\varepsilon = \sigma/E \quad (2.1)$$

jossa σ on vetojännitys, ε venymä ja E kuparin kimmomoduuli.

Myötöraja on tärkeä aineen ominaisuus, sillä sitä käytetään rajajännityksenä aineen plastisen muodonmuutoksen alkamiselle. Kuparin myötörajaan voidaan vaikuttaa seostusta, valmistustekniikkaa tai lämpökäsittelyä muuttamalla. [3].

Kupari lujittuu plastisen muodonmuutoksen yhteydessä alhaisissa lämpötiloissa. Tämä ilmenee venymiseen tarvittavan jännityksen (muodonmuutosvastuksen) kasvuna. Koesauva venyy pituusakselinsa suuntaisesti venymisen edellyttämän voiman kasvaessa jatkuvasti kunnes muokkauslujittuminen ei enää kompensoi sauvan ohenemisen vaikutusta. Sauvaan syntyy paikallinen kurouma, jonka kohdalta venyminen jatkuu, kunnes sauva katkeaa. Sauvan paikallisen kuroutumisen alkamista vastaavaa nimellisjännitystä, eli jännitysvenymäkäyrän suurinta arvoa, kutsutaan murtolujuudeksi R_m , jolla on vankka asema metallien lujuusominaisuuksia kuvaavana suureena. [3]

Kuvassa 2.2 on esitetty puhtaan kuparin jännitys-venymäkäyrä, johon on merkitty myötöraja ja murtolujuus, elastisen ja plastisen muodonmuutoksen alueet, paikallisen kuroutumisen alue, sekä koesauvan murtumispiste.



Kuva 2.2. Puhtaan kuparin jännitys-venymäkäyrä.

2.2.2 Elastinen ja plastinen muodonmuutos

Jännityksen lakatessa vaikuttamasta täydellisesti palautuva muodonmuutos on elastinen. Plastinen myötäminen tarkoittaa muodonmuutosta, joka ei palaudu, kun jännitys lakkaa vaikuttamasta. Molemmat ovat formaalisia teorioita, jotka perustuvat idealisoituun käsitykseen kuparin mikrorakenteesta ja käyttäytymisestä jännityksen alaisena. Kupari esiintyy monikiteisenä ja kiteet ovat yleensä satunnaisesti suuntautuneita toisiinsa nähden. Siksi monikiteisen kappaleen käyttäytyminen antaa keskiarvon yksityisten kiteiden käyttäytymisestä. [2]

2.2.3 Virheettömän kiteen muodonmuutos

Yksittäisen kiteen muodonmuutos tapahtuu pintakeskeisessä kuutiossa tiiviisti pakattujen tasojen suuntaisina siirrosliukumisina. Liukumissuunta noudattaa aina tiiviisti pakattuja suuntia, joissa metalli-ionit ovat lähinnä toisiaan. Ulkoisen jännityksen vaikuttaessa kiteeseen, siirrosliukumista voi tapahtua vain, jos kuormittavalla jännityksellä on jonkin liukutasen suuntainen komponentti. Liukutasoa vastaan kohtisuoralla komponentilla ei ole suurta vaikutusta siirrosliukumisen suuruuteen. [2]

Suurin kimmoinen siirrosliukuma on alle neljäsosa atomietäisyydestä. Liukutasot palaavat tässä tapauksessa entiseen tasapainoasemaansa jännityksen lakatessa vaikutt-

masta. Siirrosliukuman ollessa tasan atomietäisyyden neljäsosan suuruinen, tilanne on epävakaa ja johtaa yleensä tiiviisti pakattujen tasojen asettumiseen uuteen tasapainoasemaan. Tällöin ne siirtyvät toisiinsa nähden vielä $\frac{3}{4}$ atomietäisyyttä. [2]

Tässä tilanteessa on tapahtunut pysyvä siirrosliukuma. Liukuman pienin yksikkö on täten yksi atomietäisyys tiiviisti pakatussa suunnassa. Liukutasojen suuntaisen jännityskomponentin, eli leikkausjännityksen, yrittäessä siirtää liukutasoja toisiinsa nähden, atomitasot joutuvat etäämmälle toisistaan. Voima joutuu työskentelemään liukutasojen välistä vetovoimaa vastaan, mikä ilmenee liukuvastuksena. Liukuma on tällöin suoraan verrannollinen leikkausjännitykseen. Leikkausjännityksen ja sen aiheuttaman liukuman suhteen ilmoittaa leikkausmoduuli μ . Eri tasojen ja liukusuuntien suunnassa mitattu leikkausmoduuli vaihtelee melkoisesti yksittäisissä kiteissä. Monikiteisen kuparin kimmomoduli riippuu eri kidetasojen leikkausmoduulien tilastollisesta keskiarvosta. Rakenteessa, jossa kiteet ovat tietyllä tavalla suuntautuneet, eli tekstuurisissa, saadaan normaalista poikkeavia kimmomodulin arvoja. Leikkausmoduuli kuvaa virheettömän kiteen teoreettista lujuutta. Tässä tapauksessa siirrosliukumisen on ajateltu tapahtuvan siten, että kaikki liukutasojen atomit siirtyvät tasapainoasemasta toiseen yhtä aikaa. Pysyvän siirrosliukumisen syntymiseen tarvittava kriittinen jännitys, kiteen leikkauslujuus (t_m) on tällöin $\mu / 30$, jossa μ = leikkausmoduuli. [2]

Teoreettista lujuutta vastaa siirrosliukuma, jonka suuruus on kymmenesosa atomivälistä. Tämä merkitsee 10 % kimmoista venymää. Puhtailla kuparikiteillä tehdyillä vetokokeilla on kriittisen leikkauslujuuden arvoiksi saatu suuruusluokaltaan vain 1/1000 teoreettisesta arvosta. Kimmoisan venymän arvoksi on vastaavasti saatu 0,001 %. Saatujen tulosten perusteella siirrosliukuminen ei voi tapahtua oletetun mekanismin mukaan siten, että kaikki liukutasojen atomit siirtyvät yhtä aikaa samassa tahdissa. Ilmennyttä ristiriitaa pyrittiin 1930-luvulla ratkaisemaan ja sen myötä päädyttiin usealla taholla yhtä aikaa dislokaatioteorian kehittämiseen. [2]

2.2.4 Muodonmuutosmekanismi

Dislokaatioteorian perusidea sisältyy toteamukseen: Liukutasot eivät voi siirtyä kokonaisina toisiinsa nähden. Sen vuoksi niiden täytyy siirtyä pienempinä osina. Tasojen välillä vaikuttava leikkausjännitys pyrkii siirtämään liukutasojen yläpuolella olevan kiteen osaa alapuolella olevaan osaan nähden. Rajaviivaa, joka erottaa alueen, jossa siirrosliukuminen on jo tapahtunut, siitä osasta liukutasoa, jossa siirrosliukumista ei vielä ole tapahtunut, kutsutaan dislokaatioksi. [4]

Pientääkseen niihin sitoutunutta kimmoenergiaa, dislokaatiot pyrkivät järjestyseen tiettyihin symmetrisiin rakennelmiin kiteessä. Ne saattavat muodostaa toisiaan leikkaaville liukutasoille kolmiulotteisia verkkoja, tai kaksiulotteisia dislokaatiovalleja, joissa muodostuu pienenkulman raja, kun kaksi kidettä yhdistyy toisiinsa niiden hilatasojen välisen kulman ollessa pienempi kuin 15 astetta. Käytännössä esiintyvän suuruuksia

muodonmuutoksia muokkautumattomassa kiteessä ei yksistään dislokaatiitiheys riitä selittämään. Yhdessä liukutasossa havaittuun liukumiseen tarvitaan tuhansia dislokaatioita, joten niitä täytyy muodostua lisää muokkauksen aikana. [4]

2.2.5 Todellisen kiteen muodonmuutos

Todellisen kiteen muodonmuutos eroaa virheettömän kiteen muodonmuutoksesta todellisen kiteen sisältämien hilavirheiden ja epäpuhtauksien takia. Yleisin muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttava hilavirhe on dislokaatio. Useimmissa väsymiskestävyyskokeissa on tutkittu dislokaatioiden syntymisen ja liikkumisen vaikutusta plastiseen muodonmuutokseen yksittäisen rakeen sisällä ja sitä kautta kappaleen väsymiskäyttäytymiseen.[2]

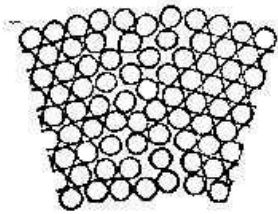
Toinen kiteen muodonmuutuskäyttäytymiseen vaikuttava tekijä on kiteen sisältämät epäpuhtausatomit. Ne sijoittuvat kokonsa perusteella joko korvaus- tai välisijoihin ja vääristävät kidettä paikallisesti. Epäpuhtausatomit ovat vuorovaikutuksessa hilavirheiden kanssa, vaikuttaen voimakkaasti sitä kautta moniin materiaalien ominaisuuksiin. [2]

2.2.6 Todellisen kiteen lujuus

Kiteen lujuus merkitsee sitä liukutasossa vaikuttavaa jännitystä, jolla dislokaatioiden syntymistä ja liikkumista edellyttävät prosessit lähtevät käyntiin. Tämä johtuu siitä, että siirrosliukuminen tapahtuu näillä mekanismeilla. Dislokaatioiden muodostumista ja liikkumista vastustavat voimat, toisin sanoen kiteen lujuus, koostuu useista eri tekijöistä. Niistä tärkeimmät ovat: Frank-Readin dislokaatiolähteen kriittinen jännitys, liukutasolla olevat esteet, sekä raerajat ja muut epäjatkuvuuskohdat. Kriittinen jännitys on sitä suurempi, mitä lyhyempi lähteenä toimiva dislokaatio on. Kriittinen jännitys riippuu lisäksi liukutason leikkausmoduulista ja yhden dislokaation aiheuttaman siirrosliukuman suuruudesta. [4]

Korvaussija-atomit, epäkoherentit sulkeumat tai koherentit erkaumat ovat mahdollisia liukutasolla olevia esteitä. Metallihilaan liuetessaan suuriatomiset seosaineet aiheuttavat seosaineiden ja dislokaatioiden väliseen vuorovaikutusenergiaan perustuvaa lujittumista. Seosaineatomien ympäristöön muodostuu kimmoisia jännityksiä, koska liuottavan ja liunneen metallin atomikoot eroavat yleensä aina toisistaan. Seosaineatomia ympäröivä jännityskenttä ja dislokaation jännityskenttä ovat keskenään vuorovaikutuksessa. Tällöin ei synny dislokaation liikettä estävää voimaa, jos seosaineatomit ovat tilastollisesti jakautuneet. Seosatomien ja dislokaation jännityskenttien vuorovaikutuksesta tapahtuu kuitenkin jonkunlaista järjestäytymistä. Sen seurauksena kimmoenergian kokonaismäärä pienenee. Jotta dislokaatio lähtisi liikkeelle tästä matalan kimmoenergian omaavasta asemasta, vaaditaan energiaa. Tästä aiheutuu myös dislokaation liikettä jarruttava voima. Näistä tekijöistä aiheutuu kiteen lujuuden kasvu. [4]

Toinen ryhmä liukutasolla olevista esteistä muodostuu epäkoherenteista sulkeumista. Ne ovat yleensä suuria ja niitä esiintyy harvassa. Dislokaatio ei pysty ylittämään niitä, mutta pienenkin leikkausjännityksen vaikutuksesta se pystyy ohittamaan ne. Dislokaatio pullistuu kahden vierekkäisen sulkeuman välistä. Sulkeumien suurten välien vuoksi tarvitaan vain pieni leikkausjännitys, jotta kriittinen kaarevuussäde ($= \frac{1}{2} \times$ sulkeumien välinen etäisyys) saavutettaisiin. Dislokaatiolenkki kasvaa tämän jälkeen pienenevän leikkausjännityksen vallitessa. Vierekkäisistä väleistä kasvaneiden kaartien yhtyessä sulkeuman edessä, ne hävittävät aina toisensa kosketuskohdassa. Lopputuloksena sulkeuman ympärille jää dislokaatiolenkki ja alkuperäinen dislokaatio pääsee jatkamaan matkaansa. Käytännössä kupari esiintyy aina monikiteisinä kappaleina, joissa kiderajat muodostavat tehokkaan esteen dislokaatioiden liikkeelle. Dislokaation on siirryttävä kiderajalla olevan epäjärjestysalueen lävitse naapurikiteen liukutasolle, jotta sen olisi mahdollista jatkaa liikettään. Kuvassa 2.3 on esitetty rareajan rakenne. Raerajaan liittyvä epäjärjestysalue on selkeästi havaittavissa. [4]



Kuva 2.3. Raerajan rakenne. [4]

Dislokaatio ei pysty ylittämään raerajaa, vaan jää sitä vastaan lukituksi, mikäli naapurikiteessä ei ole aktiivista liukutasoa sopivassa suunnassa alkuperäiseen liukutasoon nähden. Raerajaa vastaan painautunut dislokaatoruuhka syntyy, kun perässä seuraavat dislokaatiot pysähtyvät myös. Kunnes dislokaatoruuhkan aiheuttama vastajännitys pysäyttää dislokaatiolähteen toiminnan uusia dislokaatioita keräytyy ruuhkaan. [4]

Liukutasossa vaikuttava leikkausjännitys, dislokaatioiden keskinäinen poistovoima, sekä dislokaatioiden ja raerajan välinen vuorovaikutus ovat tällöin tasapainossa keskenään. Jokainen dislokaatio painaa seuraavaa dislokaatiota kohti raerajaa tasossa vaikuttavan leikkausjännityksen suuruisella jännityksellä. Ruuhkan kärjessä olevat dislokaatiot ahtautuvat tiiviisti raerajaa vastaan. Raerajaan kohdistuva jännitys $= n \times t$, jossa n = ruuhkassa olevien dislokaatioiden määrä ja t on liukutasossa vaikuttava leikkausjännitys. Raerajaan kohdistuva jännitys leviää naapurikiteeseen kimmoisena jännityskenttänä. Se auttaa liukutasolla olevia dislokaatiolähteitä toimimaan. Plastinen muodonmuutos leviää tällä tavalla kiteestä toiseen. Monikiteisessä kuparissa plastisten muodonmuutosten on tapahduttava siten, että kiteet säilyttävät yhteyden toisiinsa. Jotta tämä olisi mahdollista, liukumisen tulee tapahtua ainakin viidellä erisuuntaisella liukutasolla yhtä aikaa. [4]

3 KUPARIN VÄSYMINEEN

Kolmannessa luvussa tarkastellaan kuparin väsymistä. Aluksi esitellään kuparin väsymislajuuden esittämisessä käytetyt Wöhler-käyrä ja Smithin piirros. Seuraavaksi esitetään murtuman ydintyminen ja eteneminen. Tämän jälkeen ovat vuorossa murtumis- ja väsymistyyppit.

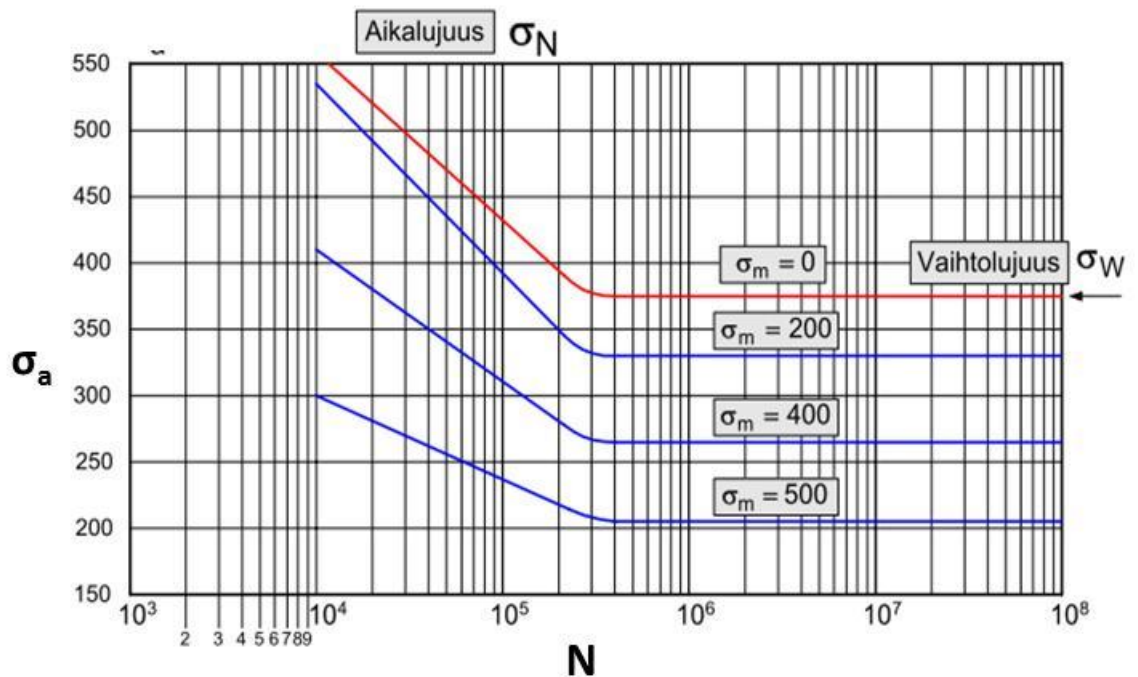
Tarkastelu jatkuu väsymiskestävyyteen vaikuttavien tekijöiden esittämisellä. Sitten esitellään yleisimpiä kuparin väsymisen tutkimusmenetelmiä. Sen jälkeen luodaan katsaus aurinkokennojen kestävyystarkastelun periaatteisiin ja käytäntöihin. Aliluvuissa 3.8-3.10 esitellään muiden tutkijoiden aikaisemmin tekemiä väsytykskokeita ja niiden tuloksia.

Kuparia voidaan sen perusominaisuuksien mukaisesti kuormittaa vaihtelevalla kuormalla tiettyyn rajaan, niin sanottuun väsytyksrajaan asti. Väsytyksrajan jälkeen kupariin syntyy tavallisesti murtumisen, tai rakenteen muun vioittumisen aiheuttavia muutoksia. Toistuva jännitys, joka väsymiseen tarvitaan, voi olla huomattavastikin kuparin myötörajaa alhaisempi. Suurinta jännitystä, jonka kupari murtumatta kestää vaihtelevien kuormitusten lukumäärän rajattomasti kasvaessa, pidetään väsymislajuutena. Koska väsytykskokeiden jatkaminen rajattomiin ei ole mahdollista, koe on sovittu keskeytettäväksi, kun rajavaihtoluku on saavutettu, eli kupari on kestänyt tietyn määrän kuormanvaihtoja. Kokeen keskeyttävä jännitysjaksojen lukumäärä määräytyy tutkittavan materiaalin mukaan. Kuparille käytetään standardin SFS 3099 mukaan lukua $n = 10^8$. [3; 5]

3.1 Wöhler-käyrä ja Smithin piirros

Kuparin väsymislajuus voidaan esittää Wöhler-käyrinä tai Smithin piirroksena. Koetuloksista saadaan Wöhler-käyrä merkitsemällä ne jännitys-kestolukukoordinaatistoon. Jännitystä varten käytetään joko lineaarista tai logaritmistä asteikkoa ja keistolukuasteikko on yleensä logaritminen. Keskijännitystä tai jännityssuhdetta voidaan käyttää parametrina käyrien esityksessä. Kuparin väsymisrajan ylempi ja alempi rajajännitys keskijännityksen funktiona esitetään Smithin piirroksessa, jolloin saadaan aikaan määritettyjen väsymislajuusarvojen kokonaisesitys useilla eri kuormitustyypeillä. [3; 5]

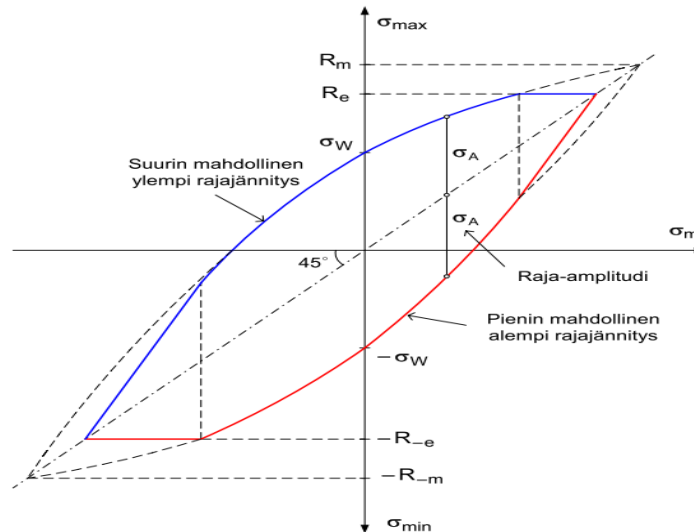
Kuvassa 3.1 on esimerkki Wöhler-käyrästä.



Kuva 3.1. Wöhler-käyrä, [3]

Kestoluku N on jännitysyhdistelmää (σ_m , σ_a) vastaava väsymismurtuman aiheuttava kuormitusjaksojen lukumäärä. Sitä vastaava jännitysamplitudi on kestoraja tai aikalujuus, jota merkitään termillä σ_N . Wöhler-käyrä esittää väsytykskoesarjan tulokset koordinaatistossa, jonka akselina ovat kesto N ja jännitysamplitudi σ_a . Jokainen käyrä liittyy keskijännityksen σ_m tiettyyn arvoon. Kestoluku ilmaistaan yleensä logaritmisella asteikolla, jolloin metallien käyrän kalteva osa on yleensä lähes suora. Tätä osaa nimitetään aikalujuusalueeksi. Väsymismurtumaa ei monilla materiaaleilla synny, kun amplitudi σ_a on riittävän pieni, vaikka $N = \infty$ (teoriassa, standardissa 10^7 tai 10^8 materiaalista riippuen). Tällaisessa tapauksessa Wöhler-käyrä on vaakasuora tietystä jännitysamplitudista eteenpäin. Useilla materiaaleilla käyrä kuitenkin laskee koko ajan, eikä vaakasuoraa osaa ole. Vaakasuoraa osaa vastaavaa amplitudia sanotaan vaihtolujuudeksi σ_w , kun keskijännitys $\sigma_m = 0$. [3; 5]

Kuvassa 3.2 on koetuloksista saatu Smithin väsymislujuuspiirros. Raja-amplitudi on jännitysamplitudi väsymisrajalla. Kun $\sigma_m = 0$ ja kyseessä on väsymislujuuspiirros, on voimassa $\sigma_A = \sigma_w$. [6]



Kuva 3.2. Smithin piirros. [6]

Tiettyyn kestopuun N liittyvää väsymisrajaa, eli niiden jännitysyhdistelmien (σ_m , σ_a) joukkoa, jotka koekappale kestää murtumatta kuvaa Smithin piirros. Siinä esitetään suurin mahdollinen ylempi rajajännitys, sekä pienin mahdollinen alempi rajajännitys keski-jännityksen funktiona. Mikäli $N = \infty$, on kyseessä väsymislujuuspiirros ja kestopuuta vastaava kestopuujuuksiirros jos $N < \infty$. [6]

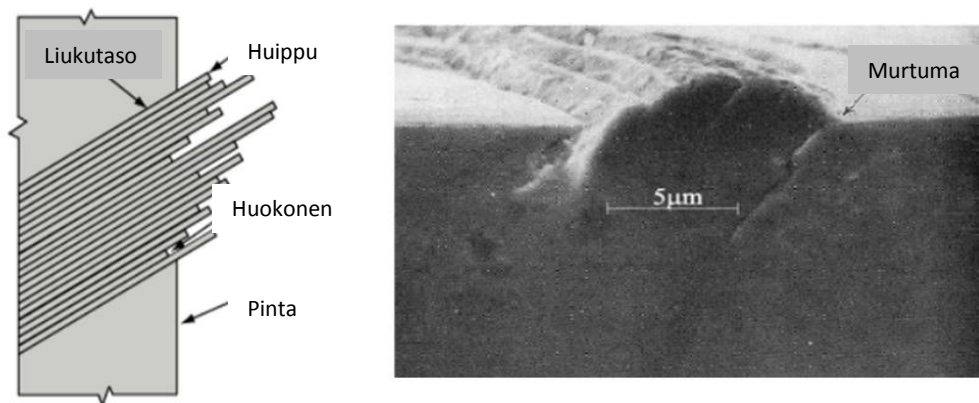
Väsyminen tarkoittaa kuparin murtumista dynaamisen kuormituksen alaisena staattista vauriorajaa alhaisemmalla jännitystasolla suuren $10^4 - 10^7$ kuormitusvaihtelun jälkeen. Murtuman aiheuttava kuormanvaihtojen lukumäärä riippuu jännitysamplitudista ja keski-jännityksestä. S-N käyrästä saadaan murtumaan johtavan jännitysamplitudin arvo kullekin kuormanvaihtokertojen lukumäärälle. Väsymislujuus laskee keski-jännityksen kasvaessa. [6]

Kuparin kykyä vastustaa väsymismurtuman etenemistä rakenteessa kuvastaa sitkeys. Muokkauslujittumiskyvyn paikallisesta loppuun käyttämisestä on seurauksena väsyminen. Väsymislujuutta mitattaessa koeksuvaan kohdistetaan vaihtosuuntainen kuormitus erisuuruuksilla amplitudeilla. Kullakin amplitudilla mitataan murtumaan johtanut kuormanvaihtokertojen lukumäärä. Väsymislujuus määritetään eri tavoin väsymiskäyttämisen riippuen S-N-käyränä esitetystä tuloksista. Kuparin murtolujuus, keski-jännitys, kuparin sitkeys, pinnan laatu, mikrorakenne, lämpötila, raekoko ja mahdollinen korroosio ovat väsymislujuuteen vaikuttavia tekijöitä. [6]

3.2 Murtuman ydintyminen

Väsymismurtuma alkaa tavallisesti mikroskooppisten säröjen syntymisellä kappaleen pinnalle kohtaan, johon syntyy kuormitettaessa jännityshuippu. Tätä tapahtumaa kutsutaan ydintymiseksi. Murtuman ydintyminen on palautumaton prosessi. Väsymiseen liittyvää murtuman ydintymistä edeltävät jaksolliset paikalliset liukumukset. Näiden muodot poikkeavat toisistaan kuormitusolosuhteiden ja ympäristön, sekä ydintymispaikkojen mukaan. Murtumat alkavat usein pinnan huokosista ja muista plastisen muodonmuutoksen muodostamista mikroskooppisista pykälistä. [7]

Kuva 3.3 esittää särön ydintymistä murtumassa. Kuormituksen vaikutuksesta muodostuu liukunauhoja, jotka liikkuvat tasapainopisteeseensä nähden. Osa liukunauhoista liikkuu ulospäin muodostaen kappaleen pinnalle huipun ja osa sisään päin muodostaen huokosen. Huippuihin ja huokosiin muodostuu jännityshuippuja, joihin ydintyy aluksi säröjä. Niistä muodostuu niiden kasvaessa ja yhdistyessä murtumia. Mikroskooppikuvassa näkyy kappaleen pintaan huipun reunaan ydintynyt särö. [7]



Kuva 3.3. Särön ydintyminen murtumassa. [7]

Ydintymisen edellytyksiä ovat ilmentyvä lovi-huippu pinnanmuoto, korkeampi paikallinen jaksottainen plastinen jännitys huokosen juuressa ja sopivan dislokaattiorakenteen olemassaolo pinnan huokosten ympäristössä. Painuma-kohouma pinnanmuoto aiheuttaa geometrisen jännityskeskittymän. Tämä ei yksistään riitä, vaan lisäksi palautumattoman muodonmuutoksen tulee olla ympäröivää aluetta suurempi huokosen juuressa. Tämä edellyttää, että dislokaattiorakenne on sellainen, että se estää yksittäisten dislokaatioiden liukumisen pois kriittiseltä alueelta ja siitä aiheutuvan paikallisen jännityksen lievenemisen. Se estää myös dislokaation liikkumisen siten, että siitä aiheutuu loven juuren teroittuminen pyöristymisen sijaan. [8]

Nykyhetkellä yleisesti hyväksytty teoria on, että väsymiseen liittyvä murtuman ydintyminen on jaksottaisen plastisen muodonmuutoksen prosessi. Sitä voidaan nimittää myös dislokaatioiden ja muiden hilavikojen kehittymisen ja liikkumisen aiheuttavaksi

tapahtumaketjuksi. Huokoisten ja murtumien välillä ei näytä olevan laadullista rajaa. Ainoa ero huokosen ja lyhyen 1-vaiheen murtuman välillä on kahden vapaan pinnan välinen kulma. Huokosen jatkuva kasvu syvälle rakeeseen voi aiheutua usean liukusysteemin toistuvasta liukumisesta.[8]

Makroskooppisesti säröttömissä kappaleissa väsymismurtumat ydintyvät yleisimmin vapaalla pinnalla. Vaurioita sisältävissä materiaaleissa murtumat saavat mieluiten alkunsa näiden vaurioiden kohdilta. Jännityskeskittymät, jotka aiheuttavat korkeampia paikallisia jaksottaisia plastisia jännityksiä, aiheuttavat nämä tapahtumat. Plastinen muodonmuutos hallitsee murtuman ydintymistä. Plastinen muodonmuutos kappaleen pinnalla, tai lähellä pintaa, on keskimääräistä suurempi johtuen pintakerroksen alentu-
neesta vastustuksesta. Tämä ilmiö on parhaiten havaittavissa monikiteisessä metallissa. Irtomateriaalissa jokainen sisusrae on ympäröivien rakeiden puristuksessa. Pintarakeilla on vähemmän ympäröiviä rakeita kuin sisurakeilla. Siksi puristus on lieventynyt ja jaksottainen plastinen muodonmuutos tapahtuu helpommin. Tasaisesti kuormitetuissa materiaaleissa, joissa huokokset, ontelot ja toisen faasin partikkelit ovat jakaantuneet enemmän tai vähemmän tasaisesti, murtumat ydintyvät näiden pinnalla, tai pinnan läheisyydessä sijaitsevien vaurioiden kohdalla. Tämä johtuu siitä, että jännityksen keskittymisvaikutus on suurempi pinnan lähellä kuin kappaleen sisällä sijaitsevaan vaurioon. [8]

Kuparin epäsymmetrisesti jaksotettu kuormitus ei koskaan aiheuta liukunauhoja, vaikka symmetrisesti jaksotettu aiheuttaa. Metalleissa, joissa esiintyy aaltomaista liukumista, esimerkiksi kupari, kuormituksen seurauksena tyypillisesti aiheutuva dislokaati rakenne on dislokaatiocelli koko kuormitetussa tilavuudessa. Keskimääräinen vetojännitys aiheuttaa jaksottaista virumista, eli kuormitetun näytteen tilapäistä pitenemistä. Virumisvenymän ei tarvitse olla suuri, mutta se ulottuu useampaan liukusysteemiin. Useampien liukusysteemien aktivoituminen johtaa väistämättä dislokaatiocellien muodostumiseen. [8]

Kokonaisen dislokaatiocellin liike liukutasojen joukossa aiheuttaa plastista muodonmuutosta. Liukumisen merkkien muodostuminen pinnalle johtuu toistuvasta ja vain osittain palautuvasta kokonaisen dislokaatiocellin liukumisesta liukutasojen joukossa. Uusia mikroskooppisia murtumia ydintyy pinnan liukuloviin. Suurilla jaksojen määrillä jaksottaisen liukumisen palautumattomuus aiheuttaa vähitellen pinnan epätasaisuuden. Metalleissa, joissa ristikkäinen liukuminen on vaikeaa tasomaisesti järjestyneiden dislokaatioiden vuoksi, liikkeen palautumaton osuus aiheuttaa painuma-kohouma pinnanmuodostuman. Näille kaikille tapauksille yhteinen piirre on mikroskooppisten murtumien ydintyminen pinnan lovissa. [8]

Väsymismurtumien ydintyminen ja alkuvaiheen eteneminen ovat hiuksenhienosti erillisiä prosesseja, niiden välillä ei ole selviä rajoja. Ne voivat hallita suurinta osaa materiaalien väsymisiäst. Siitä huolimatta niitä ei ole vielä nykyhetkellä riittävästi kuvattu

luotettavien väsymisikäskelmien laatimiseksi. Kokeellisesti on todettu, että lyhyiden säröjen kasvunopeutta ei voi kuvata samalla tavalla kuin pitkien. Sen vuoksi ydintymisen päättyminen on yleensä yksinkertaisesti liitetty ensimmäisten havaittavien murtumien esiintymiseen. Tämän käsityksen mukaan ydintymisen päättyminen on riippuvainen käytettävistä tutkimustekniikoista. [8]

Vaikka käytetäänkin hyvin epämääräisiä määritelmiä, on mahdollista arvioida ydintymisen ja alkuvaiheen etenemisvaiheiden suhteellista merkitystä väsymiskestävyyteen kokonaisuudessaan. Murtuman ydintyminen voi edustaa venymän kontrolloiman väsymisen sektorilla vain pientä murto-osaa väsymiskestävyydestä. Siitä huolimatta se voi edustaa merkittävää osaa väsymiskestävyydestä jännityksen kontrolloiman väsymisen sektorilla. Yksinkertaisin tapa määritellä ydintymisvaiheen päättyminen, on luonteenomaisen murtumakoon tai jonkin muun geometrisen parametrin käyttäminen. Jaksottaisen kuormituksen aikana kehitty useita huokosia sekä mikromurtumia, joista osan eteneminen voi pysähtyä. Sen vuoksi ydintymisen loppumista ei voida yhdistää ensimmäisten havaittavien mikromurtumien ilmenemiseen. [8]

Yksittäisessä kuparikiteessä ilmenevä keskimääräinen murtumien välimatka pienenee jaksojen määrän ja plastisen jännityksen amplitudin kasvaessa. Siihen perustuen jännityksen lieveneminen on odotettavissa, kun kriittinen keskimääräinen murtumien välimatka on saavutettu. Kapeampien murtumien kasvu päättyy ja jännityksen uudelleen jakautuminen kiihdyttää vakavaksi kehittyvän murtuman kasvua. [8]

Kaikissa esitetyissä väsymismalleissa jatkuvasti kasvavat huokokset ovat lopulta riittävän syviä, jotta niitä voidaan nimittää murtumiksi. Tämän terminologisen eroavaisuuden lisäksi huokosen ja murtuman välillä ei ole muita eroja. Jossain määrin eri luokan mallit perustuvat mikroskooppisten kolojen muodostumiseen johtavien hilavikojen kerääntymiseen. Murtumien ydintyminen raerajoille on todettu rakeen sisäisen liukumisen ja raerajan vuorovaikutuksen aiheuttamaksi. Syntyneet murtumat eivät ole vuorovaikutuksessa, kun kriittinen välimatka on saavutettu. Murtumien jakautuminen vaihtelee materiaalin, liukusysteemien ja muiden seikkojen mukaan. [8]

3.3 Murtuman eteneminen

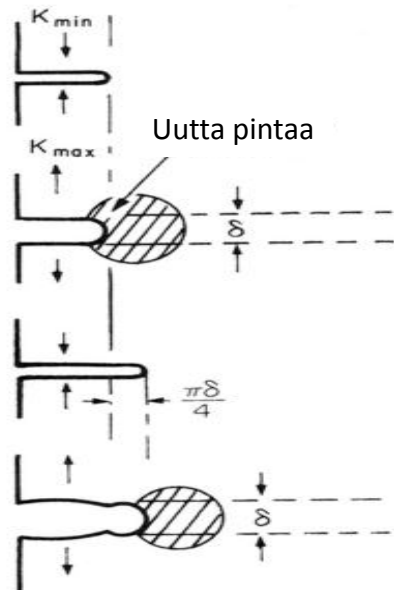
Murtuman eteneminen on kaksivaiheinen prosessi:

1. Hitaan etenemisen (vaihe I) aikana murtuma etenee ydintymiskohdasta 0,2-1,0 millimetrin syvyyteen. Vaihe I voi kattaa 90 % koko kappaleen väsymisiästä.
2. Nopean etenemisen (vaihe II) aikana murtuma etenee lähes koko poikkipinnan ylitse jättäen murtopintaan väsymismurtumalle tyypillisiä etenemis-, pysähtymis- ja yhtymisjälkiä.

Koska plastisen alueen mikrorakenne poikkeaa ympäröivän materiaalin mikrorakenteesta, plastinen alue on havaittavissa monella eri tutkimustekniikalla pitkien murtumien

tapauksessa. Siksi, tutkittaessa esimerkiksi pitkän murtuman kärkeä ympäröivää dislokaation solurakennetta, on selkeästi huomattavissa voimakasta plastisuutta. Pienten murtumien tapauksessa plastinen alue on suuri murtuman kokoon verrattuna. [7]

Kuva 3.4 esittää särön etenemisen puhtaassa kuparissa. Jännityssykli aiheuttaa särön eteen plastisen alueen. Se avaa särön kärkeä määrällä δ , jolloin syntyy uutta pintaa. Puristusjännitys painaa säröä kasaan, jolloin uusi pinta siirtyy eteenpäin ja särö kasvaa noin δ :n verran. Sama toistuu seuraavalla syklillä ja särö kasvaa. [7]



Kuva 3.4. Särön eteneminen. [7]

Murtumat etenevät kuparissa yleensä murtumien kärkien palautumattomien plastisten muodonmuutoksien kertymisen takia. Lisäksi plastisen muodonmuutoksen alueiden muodostuminen liittyy läheisesti materiaalin mikrorakenteen epätasaisuuksiin. Murtuman etenemisen määrittämiseksi murtuman kärjen palautumattoman plastisen alueen ja mikrorakenteellisten tekijöiden, kuten raekoon ja liukumien suuntautumisen väliseen yhteyteen, tulee kiinnittää huomiota. [9]

Kun murtuman kärjen palautumattoman plastisen muodonmuutoksen alue on raekoa pienempi, murtuma kasvaa rakeen sisäisen ja raerajojen paikallisen alueen yksilöllisen muodon määräämällä tavalla. Vauriot liittyvät dislokaatioihin, raerajoihin ja solukomaisiin alirakenteisiin. Tämä tarkoittaa sitä, että leviäminen kiihtyy huomattavasti niillä voiman leikkaussuunnan mukaisilla alueilla, joilla raerajojen liukuminen voi tapahtua helposti. Kun alue on 1-2 kertainen raekokoon verrattuna, murtuma etenee raerajaa pitkin. Alueen ollessa 3-4 kertainen murtuma leviää. Faasi- ja raerajat estävät tehokkaasti pienten murtumien etenemisen. Kun mikromurtuma on syntynyt, se etenee suoraan voiman leikkaussuuntaan. [10]

3.4 Murtumistyytit

Murtumat etenevät monikiteisessä kuparissa joko kiteiden läpi (transgranular), tai kide-rajvoja pitkin (intergranular). Koska materiaalissa on virheitä, esimerkiksi dislokaatioita, lovia, säröjä ja huokosia, materiaalien todellinen lujuus $\sigma_{\max} < \sigma_{\text{teor}} / 1000$. Paikallinen jännitys särön kärjessä on siis huomattavasti nimellisjännitystä suurempi. Murtumat voidaan jakaa kahteen päätyyppiin. [2]

Haurasmurtuma, jossa särö etenee nopeasti ja siihen liittyy vain pientä mikrodeformaatiota. Griffithin teoria: ”Hauraassa säröjä sisältävässä materiaalissa jännitys voi paikallisesti nousta yli teoreettisen lujuuden, vaikka nimellisjännitys on huomattavasti tätä pienempi. Särö etenee, jos kuormituksessa materiaaliin varastoituneen elastisen energian pienentyminen on vähintään yhtä suuri kuin energia, joka tarvitaan uuden pinnan muodostamiseen. Särön kärjessä tapahtuu plastista muodonmuutosta, joka pyöristää sitä. Samalla se kasvattaa teoreettista lujuutta ja murtolujuutta. Myötölujuuden kasvaessa loven tai särön kärjessä oleva plastinen alue pienenee nopeasti. Pehmeissä metalleissa on siis suuri plastinen alue ja lujissa materiaaleissa plastinen alue on hyvin pieni. Särön kärjen plastisoituminen aiheuttaa pehmeissä metalleissa kärjen pyöristymistä ja kuluttaa paljon energiaa. Murtumissitkeys on näin ollen suuri. Plastinen alue jää hauraissa materiaaleissa pieneksi, särön kärjen pyöristymistä ei tapahdu. Tämän vuoksi käy helposti niin, että jännitys kohoaa materiaalin teoreettisen lujuuden yli. [2]

Sitkeässä murtumassa tapahtuu plastista muodonmuutosta ennen särön etenemistä, sekä sen aikana. Kuparilla sitkeä murtuminen tapahtuu hitaasti repeytymällä ja siihen liittyy huomattava energian kulutus. Kun muokkauslujittuminen ei pysty kompensoimaan poikkipinta-alan pienenemisestä johtuvaa jännityksen kasvua, alkaa kuroutuminen. Se aiheuttaa kolmiaksaalisen jännityksen muodostumisen kurouman pohjaan. Kurouma-alueen keskellä vaikuttaa näytteen pituusakselin suuntaisen vetojännityksen synnyttämä hydrostaattinen komponentti. Vaikutusalueeseen syntyy mikrokoloja eli voideja, jotka kasvavat jännityksen lisääntyessä. Ne yhdistyvät muodostaen sisäisiä lovia tai säröjä. Särö kasvaa kohtisuoraan kuormituksen akselia vastaan kunnes se saavuttaa näytteen pinnan. Lopulta särö etenee liukutasoja pitkin noin 45 asteen kulmassa kuormitusakseliin nähden. Deformaatio keskittyy mikroskooppisesti tarkasteltuna särön kärjen ohuisiin liukunauhoihin, joissa vallitsee suurin leikkausjännitys. Särö etenee muodostaen yhtenäisempiä repeämiä. Koska murtopinta koostuu pitkänomaisista urista, sitkeä murtuma etenee huokosten välisten kannasten repeilynä. [2]

3.5 Väsymistyyppit

Väsyminen jaetaan usein kahteen päätyyppiin, jännityksen hallitsemaan ja venymän hallitsemaan väsymiseen, jossa kuormitus ylittää yleisesti tai paikallisesti materiaalin myötölujuuden. Kuvassa 3.5 esitetään säröttömän kappaleen väsymisen jakaantuminen eri väsymistyypeihin. [7]

<u>Jännityksen hallitsema väsyminen</u>	<u>Venymän hallitsema väsyminen</u>
<ul style="list-style-type: none"> - $\sigma < \sigma_0$ - $N_f > 10^4$ - Esimerkiksi mekaaniset värähtelyt 	<ul style="list-style-type: none"> - σ (tai σ_1) $> \sigma_0$ - $N_f < 10^4$ - Esimerkiksi lämpöjäännitykset

Kuva 3.5. Väsymistyyppit [7]

Säröttömän kappaleen väsyminen on tyypiltään jännityksen hallitsemaa, kun jännitys on myötörajaa pienempi. Vaurioon johtanut kuormitusjaksojen lukumäärä on tällöin suurempi kuin 10^4 . Tapauksissa, jolloin jännitys tai alempi myötöraja on suurempi kuin myötöraja, on kysymyksessä venymän hallitsema väsymistyyppi. Mikäli kappaleessa on alkusäröjä, väsyminen on tyypiltään aina venymän hallitsemaa. [7]

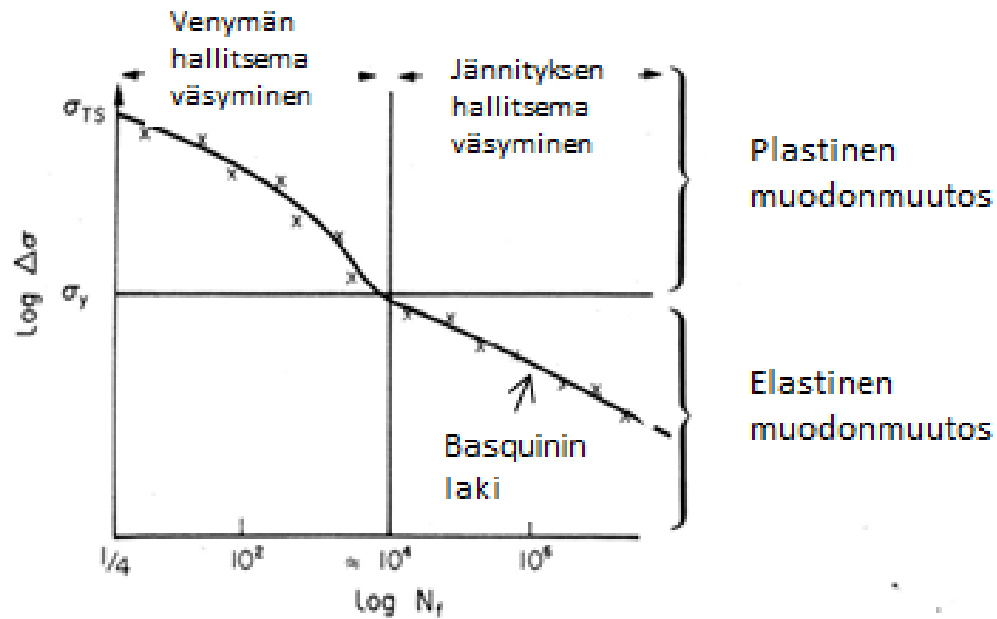
3.5.1 Jännityksen hallitsema väsyminen

Kuparin väsymistä syklisen kuormituksen vaikutuksesta jännitysten pysyessä myötörajan alapuolella kutsutaan high cycle-väsymiseksi. Sykliä lukumäärä on suuri, yli 10^4 . Kun keskijännitys $\sigma_m = 0$, voidaan koetulokset sijoittaa Basquinin lakina tunnettuun yhtälöön:

$$\Delta\sigma \cdot N_f^a = C_1 \quad (3.1)$$

jossa $\Delta\sigma$ on jännityksen muutos, N_f on syklien lukumäärä, potenssi a on useimmille materiaaleille välillä $1/8 \dots 1/15$ ja C_1 on vakio. [7]

Kuvasta 3.6 ilmenee kuormitusalue, jolla Basquinin lakia voidaan soveltaa.



Kuva 3.6. Basquinin lain soveltamisalue. [7]

Jännityksen hallitsemassa väsymisessä on mikrorakenne avainasemassa. Jaksottaisten liukumien jakautuminen on melko epätasaista, samoin kuin pienten paikallisen mikrorakenteen kanssa vuorovaikutuksessa olevien murtumien kehittyminen. Mikrorakenteessa väsyminen on monimutkainen muovautumisprosessi, jossa on mikrorakenteen arvojärjestyksestä riippuvat muodostumis- ja etenemisvaiheet. [9]

Paikallistuneiden jaksottaisten plastisten muodonmuutosten jakautuminen mikrorakenteessa on pääosassa väsymiskestävyyden määrittämisessä. Toisin kuin käyttöominaisuudet, kuten elastinen jäykkyys, väsyminen ilmenee äärimmäisistä liukumisen vahvistumista edistävästä mikrorakenteiden ominaisuuksista. Jännityksen hallitsemassa väsymisolosuhteissa plastinen muodonmuutos mikrorakenteessa on erittäin epätasaista. Pienten plastisen jännityksen keskittymiin muodostuvien murtumien pysähtyminen on olennaista väsymiskestävyyden arvioinnissa. [9]

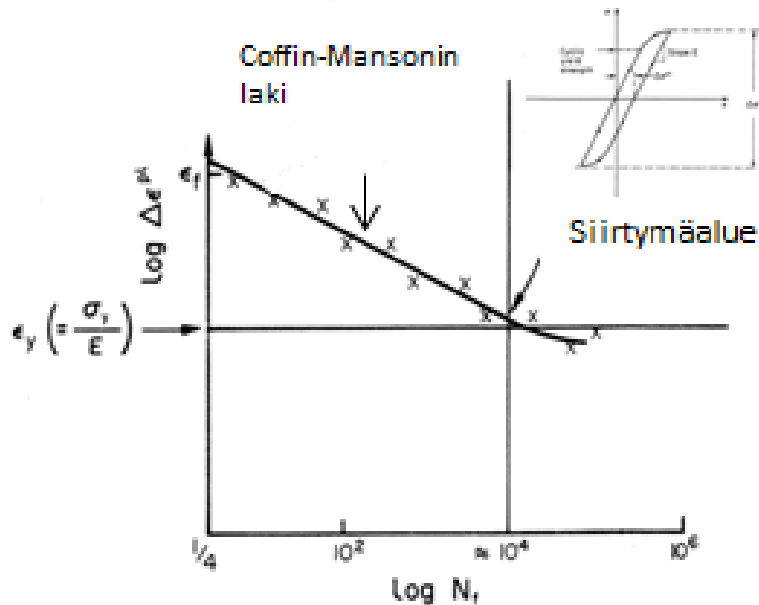
Kuormitusjaksojen määrän noustessa esimerkiksi 10^5 jaksoon, liukusysteemien jakautuminen on vähemmän epätasaista. Ne eivät myöskään enää esiinny eristyneillä alueille. Jännityskuormituksen amplitudin noustessa liukumat jakaantuvat tasaisemmin. Silti mikrorakenne luo osaltaan liukumien yhteyksiä, jotka edistävät pienten murtumien muodostumista ja kasvua mikrorakenteessa. [9]

3.5.2 Venymän hallitsema väsyminen

Säröttömän kappaleen venymän hallitsemassa, eli low-cycle väsymisessä jaksottaiset jännitykset ovat myötörajaa suurempia ja siksi murtumaan johtava jaksojen lukumäärä on yleensä pieni. Esittämällä plastinen myötymä ε_p N_f :n funktiona logaritmiasteikolla saadaan lineaarinen riippuvuus jota kutsutaan Coffin-Mansonin laiksi

$$\frac{\Delta\varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f (2N)^c \quad (3.2)$$

jossa $\Delta\varepsilon_p$ on plastinen venymäamplitudi, ε_f on venymäakselin leikkauspisteestä ($2N = 1$) saatava väsymisittekeyskerroin $\approx \varepsilon_f$ useille metalleille (todellinen murtovenymä), $2N$ vaurioon johtava on jännitysvaihtojen lukumäärä (1sykli = $2N$) ja c on väsymisittekeyksen eksponentti. Kuvasta 3.7. ilmenee kuormitusalue, jolla Coffin-Mansonin lakia voidaan soveltaa. [7]



Kuva 3.7. Coffin-Mansonin lain soveltamisalue. [7]

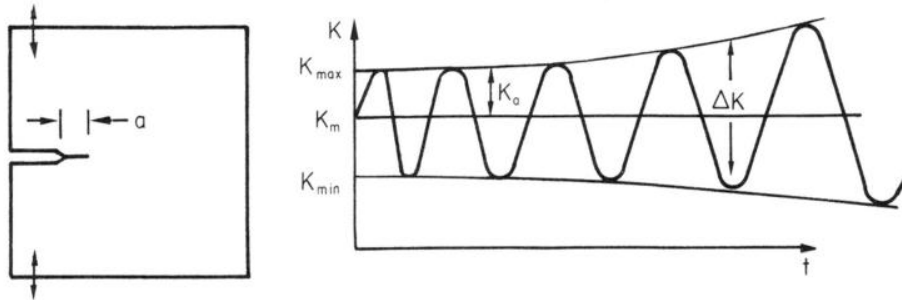
3.6 Väsymiskestävyyteen vaikuttavia tekijöitä

Kuparin väsymistä on tutkittu lukuisilla kokeilla. Testeissä on pyritty löytämään vastuksia väsymisilmiön esille tuomiin kysymyksiin vaurioiden synty- ja etenemismekanismista. Niissä on tutkittu myös raekoon ja koostumuksen, sekä erilaisten ulkoisten tekijöiden, kuten kappaletta rasittavien voimien ja ympäristöolosuhteiden vaikutusta kappaleen väsymiskestävyyteen. [7]

Kappaleen väsymiskestävyyteen vaikuttavat olennaisesti kappaleen rakenne ja pinnanlaatu, sekä se, sisältääkö kappale säröjä. Lisäksi ympäristötekijöillä on oma vaikutuksensa. Kappaleet joutuvat usein käyttöympäristönsä vuorokautisen lämpötilanvaihtelun aiheuttamien rasitusten alaisiksi. [7]

3.6.1 Alkusärö

Kupari saattaa sisältää säröjä. Siksi on tärkeää tietää kuinka monta kuormituskertaa tarvitaan, eli kuinka kauan kestää, ennen kuin rakenteessa oleva särö on kasvanut kriittiseen kokoon ja yhtäkkinen murtuminen tapahtuu. Kuva 3.8 havainnollistaa alkusärön kasvamista kuormitussyklien lukumäärän noustessa. [7]



$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = \sigma_r \sqrt{\pi a}; K_m = \frac{K_{\max} + K_{\min}}{2}; K_a = \frac{K_{\max} - K_{\min}}{2}$$

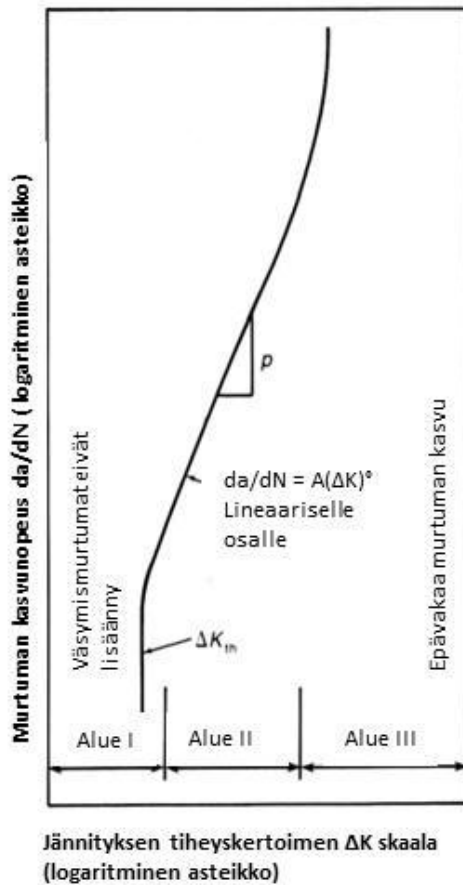
Kuva 3.8. Alkusärön kasvaminen kuormitussyklien lukumäärän noustessa. [7]

Jos alkusärön pituus on a_0 ja murtumaan johtavan särön pituus a_f on tunnettu, voidaan murtumaan johtavien syklien lukumäärä (N_f) laskea käyttämällä Parisin lakia:

$$N_f = \int_0^{N_f} dN = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A \times \Delta K^p} \quad (3.3)$$

jossa N_f on murtumaan johtavien kuormitusjaksojen lukumäärä, a_0 on alkusärön lähtöpituus, jolla särön kasvaminen alkaa, a_f on kriittinen särön pituus, jolla äkillinen murtuminen tapahtuu, A ja p ovat materiaalivakioita, da on särön pituuden muutos, dN on kuormitusjaksojen muutos ja ΔK on jännitysintensiiteetti.

Kuvassa 3.9. esitetään särön kasvunopeus jännitysintensiteetin funktiona.[7]



Kuva 3.9. Särön kasvunopeus jännitysintensiteetin funktiona. [7]

Jännitysintensiteetti ΔK ($= \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$) kasvaa vakio jännitysamplitudilla särön kasvaessa. Jos ΔK on tiettyä kynnsarvoa K_{th} pienempi, särö ei kasva ollenkaan (alue 1), mutta kun $\Delta K \geq K_c$, murtuma tapahtuu välittömästi (alue 3). Näiden välissä vakautuneessa vaiheessa särö kasvaa jokaisella kuormanvaihdolla ja sen seurauksena ΔK kasvaa nopeudella $da/dN = A\Delta K^p$. A ja p ovat materiaalivakioita. [7]

3.6.2 Rakenne ja pinnanlaatu

Kuparin väsymiskestävyys on hyvin riippuvainen sen mikrorakenteesta. Koska leikkausjännitykset vaikuttavat suuresti väsymiseen, voidaan kuparin leikkauslujuutta nostamalla parantaa sen väsymiskestävyttä. Dislokaatioiden liukumista voi vaikeuttaa pienentämällä raekokoa, hienojakoisilla erkaumilla, tai liuoslujittamisella. Homogeeninen faasirakenne on edullinen, koska se tuottaa mahdollisimman tasaisen liukumisen. [11]

Raekoko ja rakenne vaikuttavat voimakkaasti jännitys-muodonmuutosvasteeseen. Kuparin väsymisvaurioituminen riippuu voimakkaasti rakeiden väsymiskestävydestä. Myös raerajoilla on vaikutusta monikiteisen kuparin väsymiseen. Raekoon pienentyessä

raerajojen merkitys korostuu sekä muodonmuutoksessa että väsymisvaurioitumisessa Kuparissa on havaittavissa jaksottaisen kuormituksen vaikutuksesta kolme erilaista murtumistaipumusta: leikkausmurtuma, vetomurtuma ja sekamurtuma. Leikkausmurtumatapauksissa väsymismurtumat ovat maksimaalisen leikkausvoiman suuntaisia, vetomurtumissa väsymismurtumaa havaitaan normaalijännityksen vaikutuspinnalla ja sekamurtumaa esiintyy, kun murtuminen alkaa normaalitasolta veto/puristusjännityksen vaikutuksesta. Kuparilla on venymän kontrolloimassa väsymisessä taipumus leikkausmurtumiin ja jännityksen kontrolloimassa väsymisessä veto- ja sekamurtumiin. [11]

Kappaleen lopulliseen väsymiskestävyyteen vaikuttavat voimakkaasti pinnan laatu ja muotoilu. Kourut, naarmut, kiilaurat, lovet, pienet pyörityssäteet, kappaleen väärä muotoilu, kappaleen pinnan vetojännitys, korroosio ja heikko pinnanlaatu ovat tavallisimpia kappaleen väsymislujutta heikentäviä tekijöitä. Väsymiskestävyyttä parantaa kappaleen pinnan kylmämuokkaus, esimerkiksi kuulapuhallus, silovalssaus tai pintarullaus. Pintakarkaisulla on sama vaikutus. Kappaleen pintaan syntyy kylmämuokkauksen yhteydessä puristusjännityksiä, jotka vaikeuttavat murtuman ydintymistä. [3]

3.6.3 Ympäristötekijät

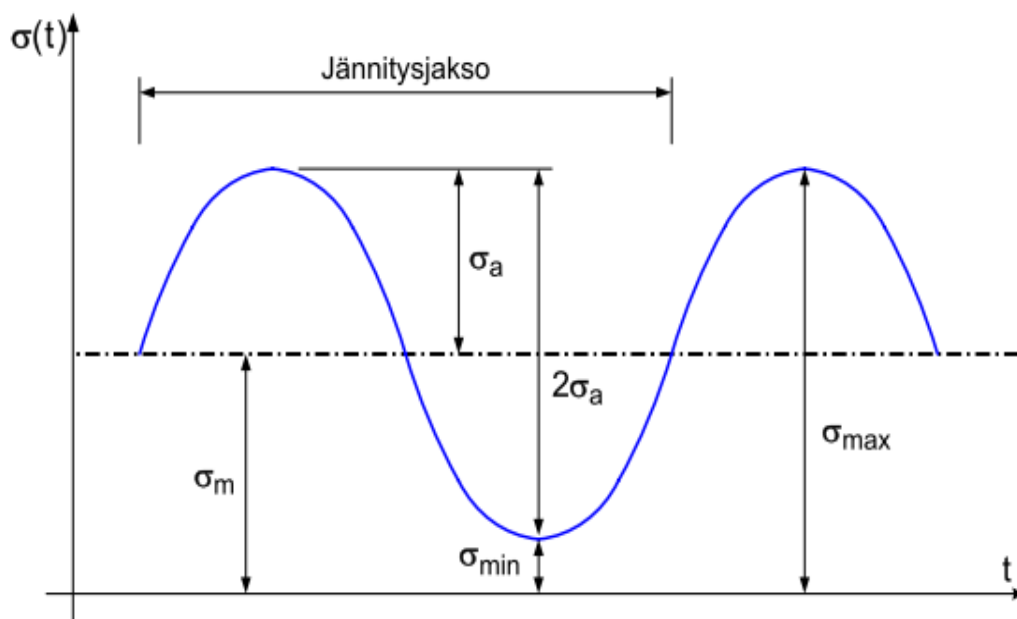
Lämpötilan muutokset vaikuttavat kuparin väsymiskestävyyteen. Lämpötilan noustessa kuparista valmistettu kappale pitenee ja laskiessa lyhenee. Tästä johtuen kappaleeseen kohdistuu jaksottaista kuormitusta, vuoroin puristus- ja vetojännitystä. Lämpötilan muutoksista aiheutuva jaksottainen kuormitus aiheuttaa aikaa myöten plastista muodonmuutosta kappaleen mikrorakenteessa ja sitä kautta väsymisvaurioita, jotka lopulta mahdollisesti johtavat kappaleen rikkoutumisen. Plastinen muodonmuutos ja väsymisvauriot nostavat lisäksi kuparikappaleen resistiivisyyttä, jolloin sen sähkönjohtavuuskyky alenee. [12]

Eri ympäristötekijöistä aiheutuva korroosio syövyttää vähitellen kuparia. Ainepaksuuden ohentuessa aiheutuu muutoksia myös väsymiskestävyyteen. Kuparin korroosionkestävyys on tavallisesti hyvä, mutta epäedullisissa olosuhteissa korroosiota saattaa esiintyä. Syöpymisen edellytyksenä on hapettavan aineen vaikutus. [12]

3.7 Kuparin väsymisen tutkimusmenetelmiä

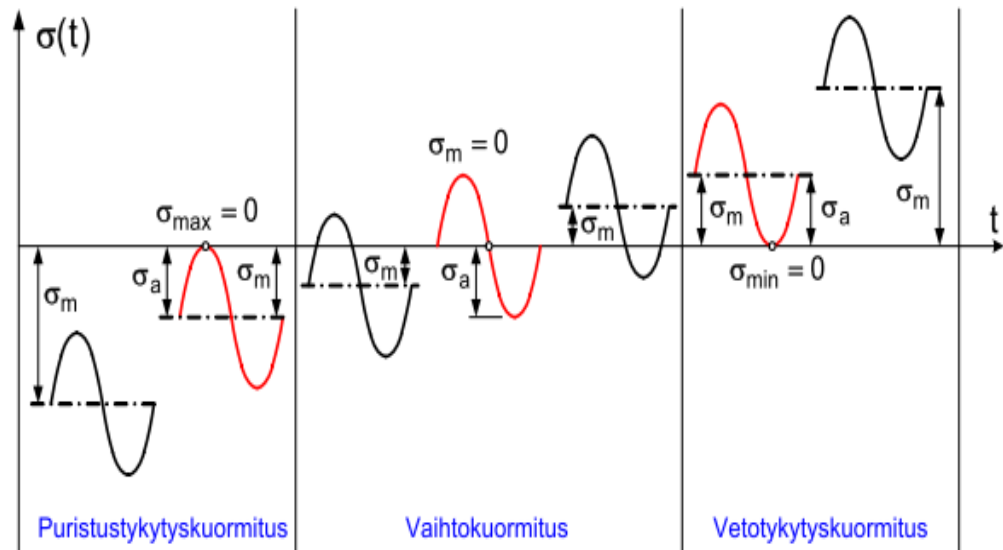
Kuparin väsymisilmiötä voidaan tutkia mekaanisilla väsytykskokeilla, sähköisillä mittauksilla, sekä mikrorakennetutkimuksilla. Testeissä simuloidaan halutun ajanjakson aikana koekappaleeseen kohdistuvien, esimerkiksi lämpötilan vuorokausivaihteluiden aiheuttamien jännitysten vaikutusta sen ominaisuuksiin. Testi voidaan suorittaa nopeutettuna, sillä kuparin muodonmuutos ja myötölujuus eivät riipu muodonmuutosnopeudesta. [2; 3]

Mekaanisissa väsytykskokeissa käytetään tavallisesti kuormitustapauksia vastaavia standardisoituja veto-puristus-, taivutus-, tai vääntökokeita, mutta tarvittaessa voidaan tehdä kokeita myös jännityksien yhdistelmillä. Rasitusmuoto vaihtelee tavallisesti ajan suhteen sinikäyrän mukaisesti, riippumatta siitä, mitä muotoa käytetään. Sen mukaan, miten keskijännitys ja jännitysamplitudi kuormittavat kappaletta, puhutaan puristustykytyksestä, vaihtokuormituksesta, tai vetotykytyksestä. Aineen väsymislujuus σ_D on se keskijännityksen σ_m ja jännitysamplitudin σ_a arvopari, jolla koekappale kestää sovitun jännitysjaksojen lukumäärän ($\sigma_D = \sigma_m \pm \sigma_a$). Kuvassa 3.10. on esitetty väsytykskokeen jännitys-aikapiirros. [2; 3]



Kuva 3.10. Jännitys-aikapiirros väsytykskokeessa. [3]

Kuvassa 3.11 esitetään väsytyksokkeen jännitysajaksotyypit.. Vaihtokuormituksessa jännitys vaihtaa suuntaansa jakson aikana. Tykytyskuormituksessa jännitys vaikuttaa koko jakson ajan samaan suuntaan. Tapauksessa, jossa normaalijännitys on koko ajan vetoa, on kyseessä vetotykytyskuormitus ($\sigma_{\min} \geq 0$). Kun normaalijännitys on koko ajan puristavaa, on kyseessä puristustykytyskuormitus ($\sigma_{\max} \leq 0$). [2; 3]



Kuva 3.11. Väsytyksokkeen jännitysajaksotyypit.[3]

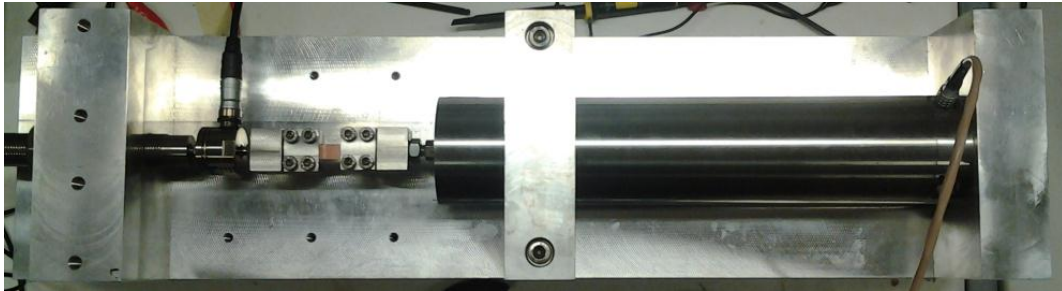
Vaihtolujuus σ_w on suurin mahdollinen jännitysamplitudi σ_a , jonka materiaali kestää väsymättä, kun keskijännitys $\sigma_m = 0$. Tykytyslujuus on suurin mahdollinen ylempi rajajännitys σ_{\max} , jonka materiaali kestää väsymättä, kun alempi rajajännitys $\sigma_{\min} = 0$. [2; 3]

Materiaalin valinta väsyttävän kuormituksen alaisiin rakenteisiin riippuu vaadittavasta kestoästä, eli kuormanvaihtokertojen lukumäärästä. Mikäli kuormanvaihtokertojen lukumäärä on pieni, tärkein valintaperuste on sitkeys (da/dN-mitoitus). Tapauksissa, joissa kuormanvaihtokertojen lukumäärä on suuri, valintaperusteet ovat väsymislujuus ja siihen vaikuttavat tekijät (S-N- mitoitus). [2; 3]

Riippuen siitä, miten väsyttävän kuorman amplitudia kontrolloidaan, puhutaan vakioamplitudisesta ja vaihtuva-amplitudisesta väsytyksestä. Vakioamplitudinen väsytyks jaetaan edelleen vakiojännitysamplitudin ja vakiomyötymäamplitudin väsytyksiin. Vaihtuva-amplitudisesta väsytyksestä on esimerkkinä umpimähkäinen väsytyks eli random fatigue, jossa amplitudi vaihtelee satunnaisesti. [6]

Väsytyksokkeen yleisimmät toteutustavat ovat kiertotaivutus, edestakainen taivutus, veto-puristus ja vääntöväsytyks. Kaikilla tavoilla saadaan aikaiseksi sinimuotoinen kuormitus, jonka taajuutta ja amplitudia pystytään säätämään. Sinimuotoisella kuormituksella aikaansaadaan kuormituksen jännitysajaksot. [6]

Veto-puristus väsytykskoe toteutetaan laitteella, jonka avulla kuormitus saadaan jaksotaisesti aiheuttamaan koekappaleeseen vuoroin vetojännitystä ja puristusjännitystä. Tarkoitukseen sopii kuvassa 3.12 esitetty magnetrostriktiivinen aktuaattori. [13]



Kuva 3.12. Magnetrostriktiivisellä aktuaattorilla toteutettu veto-puristus väsytyslaitte.[13]

Väsyminen vaikuttaa kuparikappaleen sähkönjohtavuuskykyyn. Väsymisen etenemistä voidaan seurata mittaamalla koekappaleen sähkönjohtavuutta väsytykskokeen aikana. Koekappale eristetään sähköisesti ympäristöstä ja se kytketään virtalähteeseen. Samalla mitataan jännitettä kuormituskohdan yli. Ohmin lain avulla saadaan koekappaleen resistanssiarvo, jonka käänteisarvona saadaan sähkönjohtavuus.

Ennen kuormituksen aloittamista mitataan koekappaleen sähkönjohtavuus referenssiarvoksi ja johtavuutta mitataan jatkuvasti kokeen aikana. Mittaustulokset tallennetaan dataloggeriin ja tallennetun datan avulla voidaan piirtää sähkönjohtavuuskuvaaja joko ajan, tai kuormitussykliä lukumäärän funktiona.

3.8 Aurinkokennojen kestävyystarkastelu

Luvata Oy, Valtion tieteellinen tutkimuslaitos, Aalto-yliopisto ja Tampereen teknillinen yliopisto ovat aikaisemmin tutkineet aurinkokennorakenteiden pitkäaikaiskestävyyttä, mutta näiden tutkimusten yhteydessä ei ole kuitenkaan selvitetty tämän tutkimuksen aiheena olevaa virrankeräysnauhan kestävyyttä.

Aurinkokennon kustannuksia ja toisaalta sen tuottamaa hyötyä määriteltäessä on kestävyys yksi sen tärkeimmistä ominaisuuksista. Tuotetun energian määrään vaikuttaa suuresti ajan myötä tehon alentuminen, eli degradaatio. Kansainvälinen sähkötekniikan komissio (IEC) on standardoinut kiihdytetyin menetelmin tehtävän aurinkokennojen tyyppihyväksyntätestauksen, josta selvinneiden laitteiden voidaan olettaa kestävän yli 20 vuotta käyttöä ulkoilmaolosuhteissa. [14]

Paneelivalmistajien antama takuu perustuu edellä mainitun kaltaisiin testauksiin, esimerkiksi standardissa IEC 61215 määriteltyyn testiin, jossa paneelit altistetaan ilmastovaihteluille, sekä mekaaniselle ja sähköiselle rasitukselle. Paneelien takuu koskee

yleisesti materiaaleja, asennusta ja paneelin tuottamaa tehoa. Materiaali- ja asennustakuut vaihtelevat yleensä yhden ja viiden vuoden välillä. Paneelin tuottamalle teholle annetaan yleensä takuuarvoiksi yli 90 % 10 vuoden käytön ja vähintään 80 - 85 % alkuperäisestä 25 vuoden käytön jälkeen. Suuntaus on, että takuiden kesto nousee aina 30 käyttövuoteen. Monet paneelivalmistajat ovat viime vuosien aikana määritelleet uudelleen tehotakuunsa. Näissä uusissa määritelmässä otetaan huomioon noin 5 % tehokeranssi ja suunnilleen 3 % mittaustarkkuus. [14]

Aurinkosähkömoduulien testauksissa noudatetaan kehittyneitä alan standardeja. Moduulien laatuvaatimukset määritellään IEC 61215, sekä IEC 61646 standardeissa ja niitä koskevat turvallisuusasiat IEC 61730 standardissa. Nämä standardit eivät kuitenkaan varmistavat, että moduulit toimivat 25 vuotta käyttöolosuhteissa. Niiden lisäksi on käytettävissä kolme pääasiallista testausmenetelmää, joissa moduulit altistetaan nopeutetusti käyttöympäristön vaikutuksille. Testattavaksi valittu moduuli altistetaan vain yhdelle kuormitukselle. Käytettäviä menetelmiä ovat jaksottainen lämpötilanvaihtelu kuormitus (lämpötila vaihtelee jaksottaisesti -40 °C ja +85 °C välillä), lämpökuormitus kosteissa olosuhteissa (1000 tuntia +85 °C lämpötilassa ja 85 % suhteellisessa kosteudessa) ja jäädytys kosteissa olosuhteissa (10 jaksoa -40 °C ja +85 °C välillä 85 % suhteellisessa kosteudessa). [15]

Moduulityypit määräytyvät valmistusmateriaalin ja prosessin, sekä teholuokan mukaan. Erä moduuleja altistetaan edellä kuvatuille olosuhteille ja tutkitaan, täyttyvätkö standardien vaatimukset. Testauksen läpäisseet moduulit saavat sertifiointin. Standardit edustavat uusien tai muunneltujen moduulien alinta hyväksyttävää vaatimustasoa ja vastaavat 3-5 vuoden käyttöikää normaaleissa käyttöolosuhteissa. Jotta voidaan varmistaa, että moduulit kestävät yli 25 vuotta käyttöä kenttäolosuhteissa, on tarpeen tehdä lisätestauksia. [15]

Aurinkomodulivalmistaja Suntech Power on perustanut ISO/IEC 17025-standardien mukaisen koelaboratorion, jonka maailman johtavat testausviranomaiset ovat yleisesti hyväksyneet. Laboratoriossa on yli 30 kehittyntä ympäristöolosuhteiden simulointi- ja analysointilaitteistoa. Suntech tekee hiekkamyrsky- ja tuulikuormitustestejä sekä moduuli, että systeemitasolla sertifioitujen laboratorioden ja yhteistyökumppanien kanssa. Todettuaan IEC-standardin mukaiset testit riittämättömiksi moduulivalmistaja Pacific Solar kehitti IEC 61215-standardiin perustuvan laajennetun testausmenetelmän, jota kutsutaan nimellä Combined Cycle. Se koostuu 200 lämpötilajaksosta, 1000 tunnin lämpökuormituksesta kosteissa olosuhteissa ja kymmenestä kosteissa olosuhteissa tapahtuvasta jäädytysjaksosta. Tässä testissä kaikki jaksot kohdistetaan samaan moduuliin. Yksi Combined Cycle-testi kestää neljä kuukautta. Mikäli testattavat moduulit läpäisevät testit, testausta jatketaan, kunnes moduulin tehontuotto laskee alle 80 prosenttiin alkuperäisestä. Lineaarisen interpoloinnin avulla arvioidaan missä vaiheessa käyttöikä tehon aleneminen tapahtuu. [15]

3.9 Raekoon ja pintarakenteen vaikutus kuparin väsymiseen

Jixi Zhang ja Yanyao Jiang tutkivat tammikuussa 2005 julkaistussa tutkimuksessaan raekoon ja pintarakenteen vaikutusta kuparin väsymiseen. He testasivat näytekappaleita puristus-jännitys- ja epäsuhteellisella kuormituksella, sekä torsiokelellä. [11]

Koemateriaalina oli happivapaasta, korkean sähkönjohtavuuden omaavasta kuparista (OFHC) kuumapursotettuja tankoja (CRM ja CRTM näytteet) ja kylmävedettyjä putkia (CTS, CTM ja CTL näytteet). Kuumapursotetuista tangoista koneistettiin lieriömäisiä, halkaisijaltaan 12,7 millimetriä olevia näytteitä ja putkimaisia sisä- ja ulkohalkaisijoiltaan 20 ja 24 millimetriä olevia näytteitä. Kylmävedetyistä putkista koneistettiin putkimaisia näytteitä sisä- ja ulkohalkaisijoiltaan 19,05 ja 22,22 millimetriä. Kaikkien valmistettujen mittapituus oli 25,4 millimetriä. [11]

Näytteet lämpökäsiteltiin ennen kokeita. Taulukosta 3.1 ilmenee näytteiden keskimääräiset raekoot hehkutuksen jälkeen, sekä hehkutusajat ja lämpötilat. Hehkutuksessa käytettiin suojakaasuna Argonia. [11]

Taulukko 3.1. Näytteiden lämpökäsittely [11]

Näyte	Alkutila	Hehkutus argonissa		Keskimääräinen raekoko hehkutuksen jälkeen (µm)
		lämpötila(°C)	aika (h)	
CRM GRTM	Kuumap. tankoja	500	1	75
CTS	Kylmäved. putkia	500	1	10
CTM	Kylmäved. putkia	650	3	75
CTL	Kylmäved. putkia	1000	48	2000

Materiaalin käyttäytymistä syklisessä kuormituksessa testattiin kolmella eri kuormitus-tavalla: veto-puristus, jossa aksiaalisen jännityksen amplitudi vaihteli välillä 3×10^{-4} – $1,5 \times 10^{-2}$ ja taivutusväsytyks, jossa leikkauskuormituksen amplitudi oli välillä 4×10^{-4} – 2×10^{-2} , sekä kiertotaivutus, jossa leikkausvoiman ja aksiaalisen jännityksen amplitudin suhde oli $\sqrt{3}$. [11]

Kokeet tehtiin seuraavilla kuormitusolosuhteilla:

1. Ekvivalentti, venymän hallitsema vakiokuormitus. Kaikki kuormitustavat.
2. Korkea-matalasekvenssinen kuormitus. Koekappaleita kuormitettiin ensin jaksottaisesti korkeammalla jännitysamplitudilla ennalta määrätyn kuormitusjaksomäärän verran. Sen jälkeen koetta jatkettiin matalammalla jännitysamplitudilla väsymisvaurioon asti.
3. Jaksottainen kuormitus, joka oli keskiarvoltaan nolosta poikkeava, sekä jännityksen hallitsema. Ensimmäisten kuormitusyökkien aikana odotettavissa olleen liiallisen plastisen muodonmuutoksen estämiseksi näytteet alistettiin aluksi venymän hallitsemalle jaksottaiselle kuormitukselle kyllästymispisteen saavuttamiseen asti.

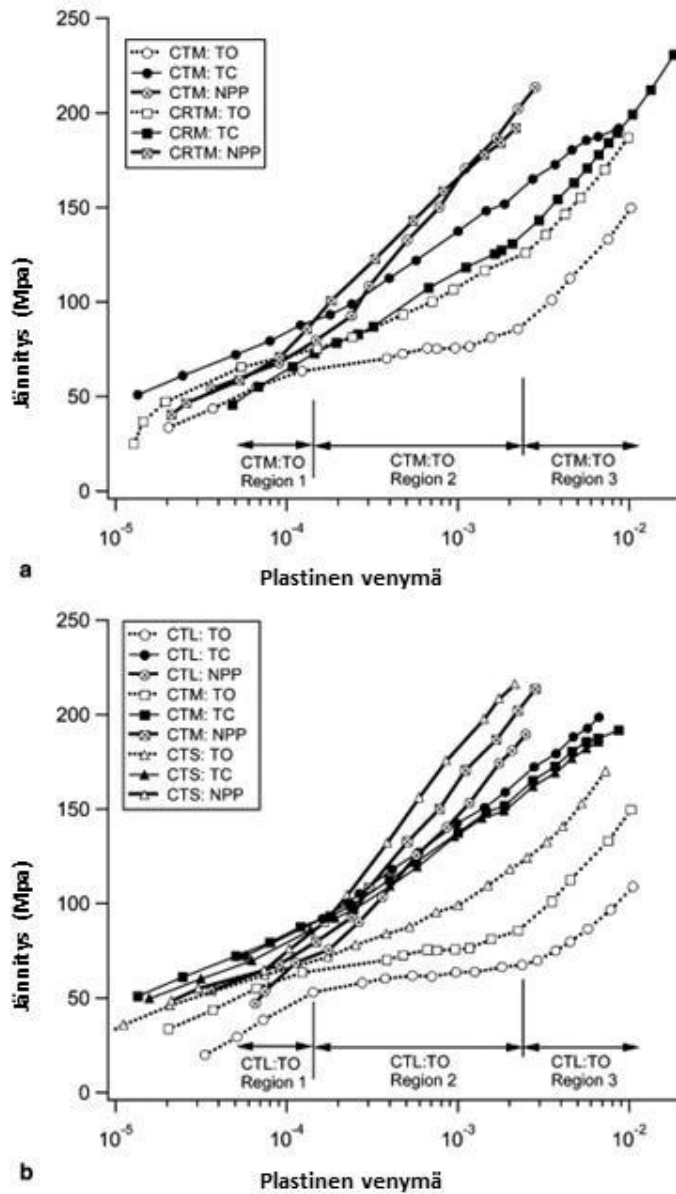
Kokeissa käytettiin sinikäyrän muotoista kuormitusta. Kuormitus, vääntö ja venymämittarin lukemat tallennettiin automaattisesti. Kultakin mittarilta tallennettiin 200 datapistettä kuormitusjakson aikana. Putkimaisten näytteiden koko mittapituudelta saatujen jännitys- ja venymäarvojen keskiarvoja käytettiin koetulosten raportoinnissa. [11]

Raekoolla ja pintarakenteella todettiin olevan merkittävä vaikutus jännitys-venymäkäyrään. Veto-puristuskuormituksessa vakioitunut jännitysamplitudi ja hystereesikäyrän pinta-ala olivat alhaisimmat pintarakenteettomilla CRM – näytteillä. Pintarakenteisten näytteiden vastaavat arvot kohosivat hieman raekoon kasvaessa. Jaksottaisessa kiertotaivutuksessa saturaatiojännityksen amplitudi ja hystereesikäyrän pinta-ala olivat suurimmat rakenteettomilla CRTM -näytteillä. Pintarakenteellisten näytteiden vastaavat arvot alenivat dramaattisesti raekoon kasvaessa. Koe osoitti selvästi, että raekoolla ja pintarakenteella on huomattavasti suurempi vaikutus jännitys-venymäkäyrään kiertotaivutuksessa veto-puristukseen verrattuna. [11]

Pintarakenteettomien näytteiden (CRM) jännitys-venymäkäyrät veto-puristuskuormituksessa ja jaksottaisessa kiertotaivutuksessa olivat lähes samat. Saturaatiojännityksen suuruus kasvoi jatkuvasti venymän amplitudin kasvaessa. Plastisen jännityksen suuruuden noustua yli 10^{-4} , havaittiin merkittävää epäsuhteellista kovenemista, jonka aste suureni jännitysamplitudin kasvaessa. [11]

Pintarakenteellisten näytteiden (CSS) jännitys-venymäkäyrät olivat veto-puristuskuormituksessa paljon korkeammat kuin jaksottaisessa kiertotaivutuksessa. Näytteistä, joiden raekoko oli suurempi, saatiin jaksottaisessa kiertotaivutuksessa tulokseksi matalampi jännitystaso verrattuna pienemmän raekoon omaaviin näytteisiin.

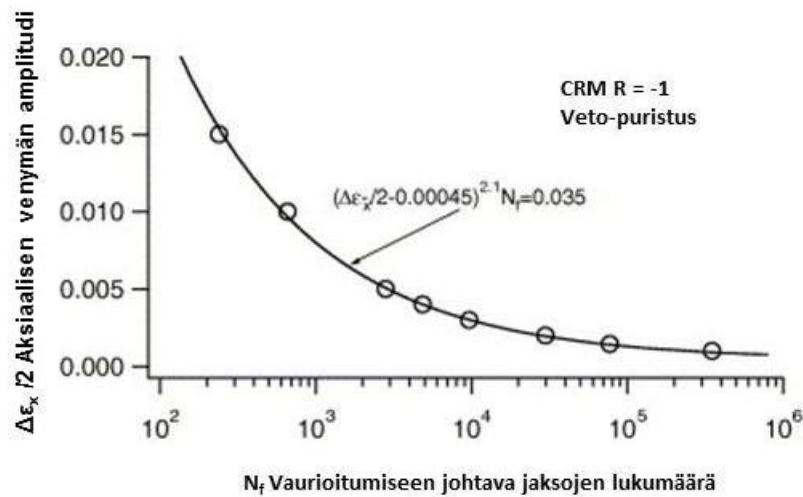
Kuvassa 3.13 esitetään raekoon ja pintarakenteen vaikutuksia jännitys-venymäkäyrään. a) pintarakenteeton kupari CRM ja CRTM näytteet, sekä pintarakenteellinen kupari CTM näytteet samalla raekoolla 75 mikrometriä ja b) pintarakenteellinen kupari eri raekoolla CTS 10 mikrometriä, CTM 75 mikrometriä ja CTL 2000 mikrometriä. [11]



Kuva 3.13. Jännitys-venymä käyrä.[11]

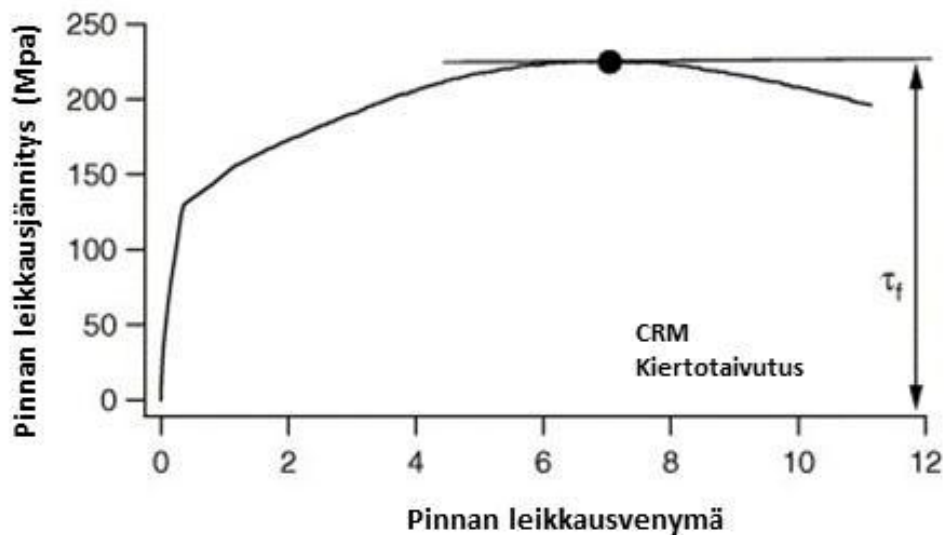
Näytteiden raekoon vaihtelualueella (75 mikrometriä – 2 millimetriä) havaittiin useimmissa testatuissa näytteissä rakeiden läpi eteneviä murtumia. Kun raekoko on hyvin pieni, raerajoilla on suuri vaikutus sekä plastiseen muodonmuutokseen, että väsymiskestävyyteen.

Kuvassa 3.14 nähdään CRM-näytteiden veto-puristuskuormituksessa saavutettu väsymiskestävyyskäyrä. [11]



Kuva 3.14 .Veto-puristuskuormituksen väsymiskestävyyskäyrä. [11]

Kuvassa 3.15 on CRM-näytteiden kiertotaivutuskokeen leikkausjännitys-leikkausvenymäkäyrä. [11]



Kuva 3.15 .Kiertotaivutuskuormituksen leikkausjännitys-leikkausvenymäkäyrä.[11]

Tutkimustulosten perusteella esitetyt väsymiskestävyysennustukset perustuvat jaksottaisesti kuormitetun materiaalin testituloksista saatuun jännitys-venymä vasteeseen. [11]

3.10 Väsymisen aiheuttama pinnan muodonmuutos

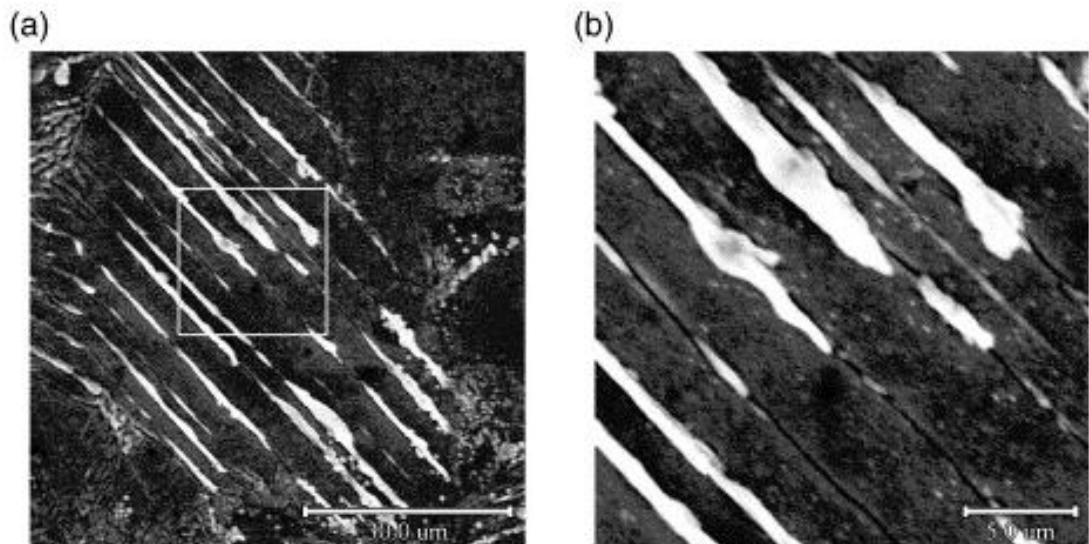
L. Gretegnny ja A. Saxena tutkivat vuonna 2000 monikiteisen kuparin pinnan muodonmuutoksia venymän kontrolloimalla väsytystestillä käyttäen tulosten tarkastelussa atomienergiamikroskooppia (AFM), joka on suhteellisen uusi työkalu pinnan muotojen tutkimiseen. Suoritettussa venymän kontrolloimassa väsymistestissä sitä käytettiin monikiteisen kuparin liukunauhojen sekä ulkonemien kehittymisen tutkimiseen 0,161 ja 0,255 % venymän aiheuttavilla kuormitusvoiman amplitudeilla. Kummankin amplitudin aiheuttamat keskimääräiset liukunauhojen korkeudet ovat vertailukelpoisia. Se osoittaa, että liukunauhojen kasvu saavuttaa kyllästymispisteen tietyssä korkeudessa. [16]

Pinnalla olevan paikallisen liukuman pysyvyydelle määritettiin parametri, jota voidaan käyttää minkä tahansa tyyppisen pinnan muodonmuutoksen tarkastelussa riippumatta tarkasteltavan alueen koosta. Sen ansiosta väsymismurtumien todennäköisten ilmenemisalueiden pinnan muodonmuutosten arviointi on mahdollista. Näiden havaintojen perusteella voidaan määritellä kriteerio väsymismurtuman ydintymiselle. Väsymismurtuman ydintyminen ja kasvu ovat jaksottaisesti kuormitettujen kappaleiden väsymiskestävyysien päävaiheet. Makromurtuman muodostuminen, sen kasvu ja vaurion ilmeneminen, voidaan ennustaa murtumismekaniikan avulla. [16]

Väsymistestit tehtiin erittäin suuren puhtausasteen ja korkean puhtausasteen omaavasta monikiteisestä kuparista (OFHC) valmistetuilla näytteillä. Näytteiden keskimääräinen raekoko oli noin 40 mikrometriä ja mittapituus 8,9 millimetriä. Niiden pinnat kiillotettiin sekä mekaanisesti että kemiallisesti.[16]

Testit suoritettiin vakiolla 0,005 Hz taajuudella kuormitusasteella $R = -1$. Kuormitusvoiman amplitudit aiheuttivat 0,161 % ja 0,255 % venymät koekappaleisiin. Molemmilla voiman amplitudeilla tehtiin useita testejä, joiden jälkeen näytteet jaoteltiin elektronimikroskooppi (SEM) ja atomienergiamikroskooppi (AFM) tutkimuksia varten. Jokaisen näytteen koko mittapituudelta analysoitiin kaksikymmentä kuvausta ja lisäksi useista paikoista niiden kehältä. [16]

Yleisin pinnan muodonmuutoksen ilmenemismuoto on rakeen sisällä säännöllisesti jakaantuneiden liukunauhojen muodostuminen. Kuvassa 3.16 on esimerkki liukunauhojen tyypillisestä, koko laajan kuparin pintarakeen peittävästä ryhmittymisestä 0,161 % venytetyssä näytteessä. [16]

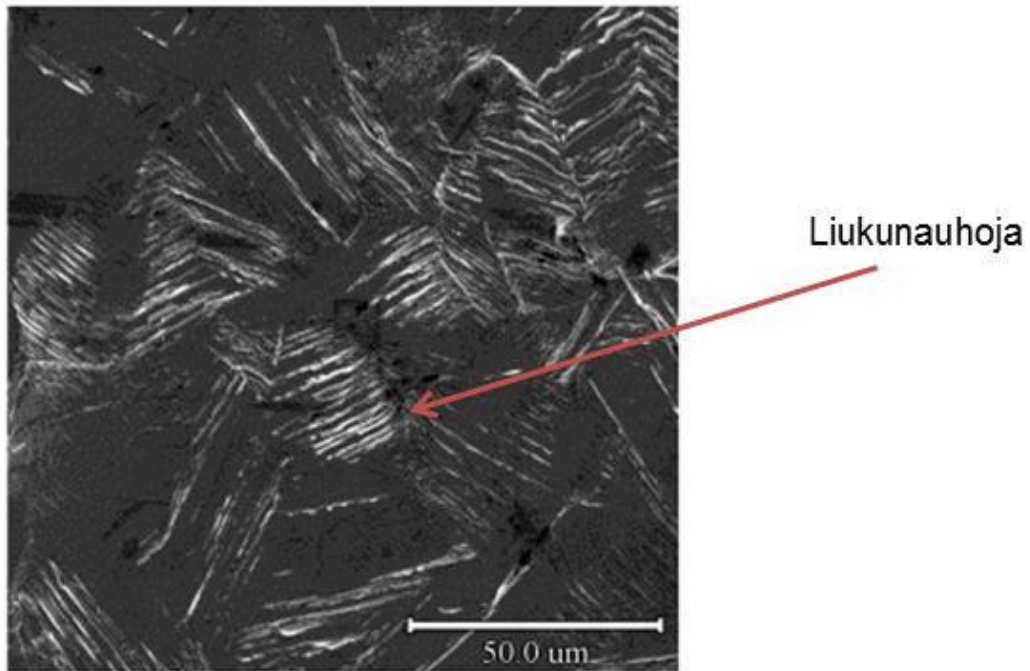


Kuva 3.16. Liukunauhojen tyypillinen ryhmittyminen kuparissa eri mittakaavassa. [16]

Havaittiin, että suurin osa liukunauhoista työntyy ulospäin ja vain harvoja sisäänpäin siirtymisiä on nähtävissä. AFM tarkastelujen perusteella liukunauhojen korkeus vaihteli välillä 30 - 900 nanometriä, keskiarvon ollessa noin 200 nanometriä. Korkeimpia liukunauhoja havaittiin yksinomaan väsymisiin loppuvaiheissa, kun taas matalampia esiintyi kaikissa väsymisiin vaiheissa. Tämä osoittaa, että sekä uusien liukunauhojen syntymistä, että niiden kasvua ilmenee läpi koko väsymisiin. [16]

Liukunauhojen muodostuminen yksittäisessä rakeessa on riippuvainen aktiivisten liukusysteemien suuntautumisesta rakeen sisällä. Mikäli yksikään aktiivinen liukusysteemi ei ole suuntautunut kohti materiaalin pintaa, tai useiden liukusysteemien vuorovaikutus aiheuttaa kolmiulotteisen dislokaatioiden järjestymisen, joka estää laajan mittakaavan liukuman pitkin yksittäistä nauhaa, ei pintaan voi muodostua häiriöitä ja tasainen raepinta on havaittavissa. [16]

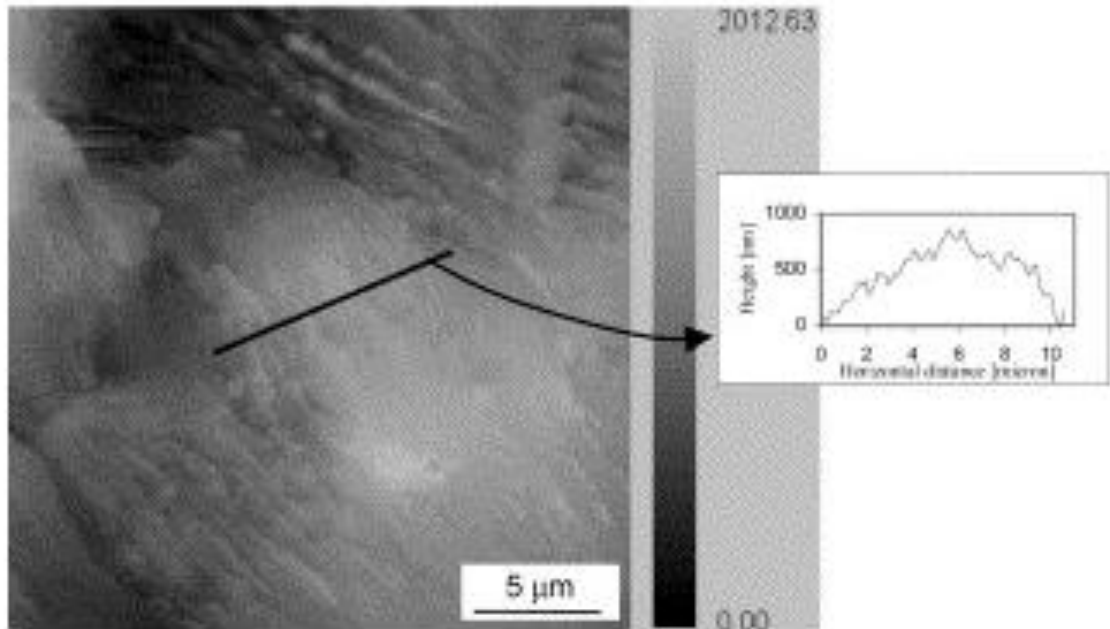
Kuva 3.17 esittää tämän ilmiön, jossa osassa rakeista on täysin kehittyneitä liukunauharyhmiä, kun taas viereisissä rakeissa havaitaan vain vähäistä, tai ei minkäänlaista muodonmuutosta. [16]



Kuva 3.17. Liukunauhojen jakautuminen kuparissa. [16]

Testeissä havaittiin liukunauhojen muodostumista kummallakin kuormitusamplitudilla. Väsymisiän loppupuolella 0,255 % kuormitusamplitudilla ulkonemista tuli pinnan vaurioiden hallitseva ilmenemismuoto. Ulkonemat aiheuttivat huomattavaa, noin yhden mikrometrin korkuista ja 10- 20 mikrometrin levyistä pinnan pullistumista. [16]

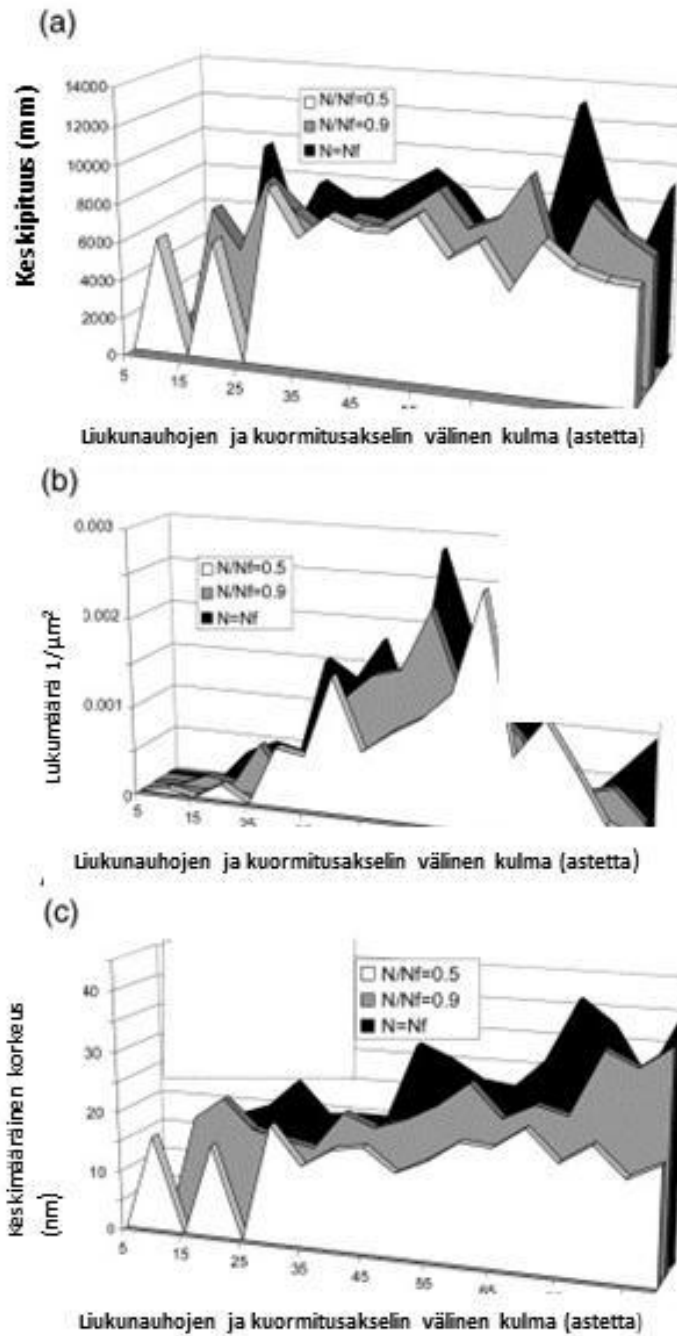
Kuvassa 3.18 näkyy kuormituksen 0,255 % aiheuttama purse. Korkeus on esitetty nanometreinä kuvan oikean reunan käyrässä. [16]



Kuva 3.18. AFM kuva purseesta kuparin pinnalla. [16]

Liukunauhat ovat pintavaurioiden ensisijainen muoto ja väsymisiän loppupuolella alkaa korkeammalla kuormitusamplitudilla (0,255 %) esiintyä myös purseita. Vaurioita tarkasteltiin määrällisesti erottelematta niitä, sillä ne molemmat olivat peräisin samasta pinnan muodonmuutosmekanismista. Esimerkiksi purseita, joka koostuu kymmenestä liukunauhasta, tarkasteltiin ryhmänä ja liukunauhojen yksilöllisistä mitoista laskettiin ulkonemalle keskiarvot. Pintavaurion kehittymistä seurattiin kolmen mitan avulla: liukunauhojen pituus, liukunauhojen lukumäärä ja liukunauhojen korkeus. [16]

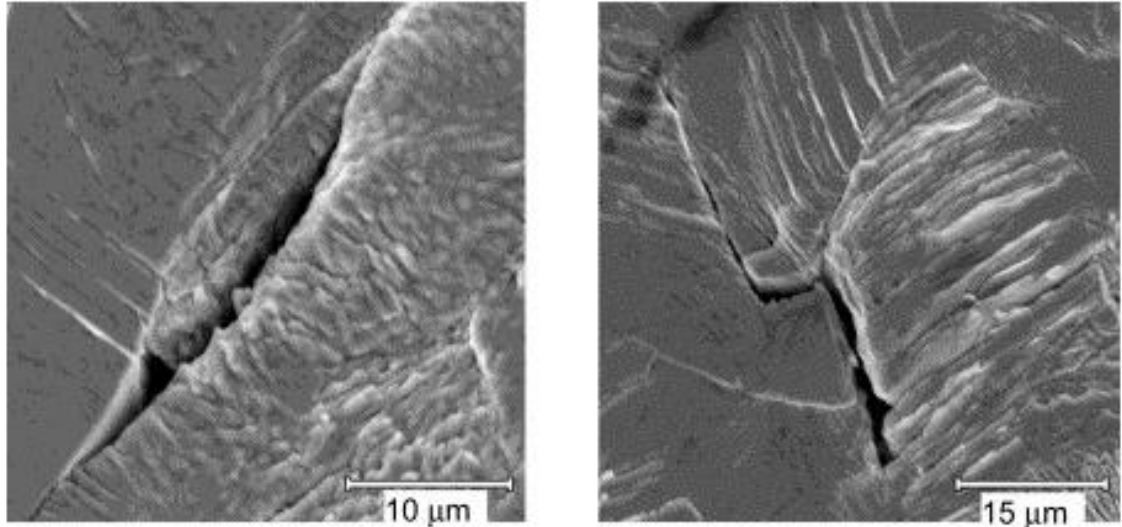
Kuva 3.19 a) esittää liukunauhojen keskimääräistä pituutta väsymisiin eri vaiheissa, b) esittää liukunauhojen lukumäärää ja c) liukunauhojen keskimääräistä korkeutta monikiteisellä kuparilla 0.161 % venymän aiheuttaman kuormituksen vaikutuksessa. [16]



Kuva 3.19. Venymän aiheuttaman kuormituksen vaikutus monikiteisessä kuparissa.

a) liukunauhojen keskimääräinen pituus väsymisiin eri vaiheissa, b) liukunauhojen lukumäärä ja c) liukunauhojen keskimääräinen korkeus.[16]

Kuvasta 3.20 ilmenee murtumien systemaattinen ydintyminen raerajoilla jaksottaisesti 0,161 ja 0,255 % venymän aiheuttavalla kuormitusamplitudilla kuormitetuissa kuparinäytteissä. [16]



Kuva 3.20. Murtumien systemaattinen ydintyminen raerajoilla kuormitetuissa kuparinäytteissä. [16]

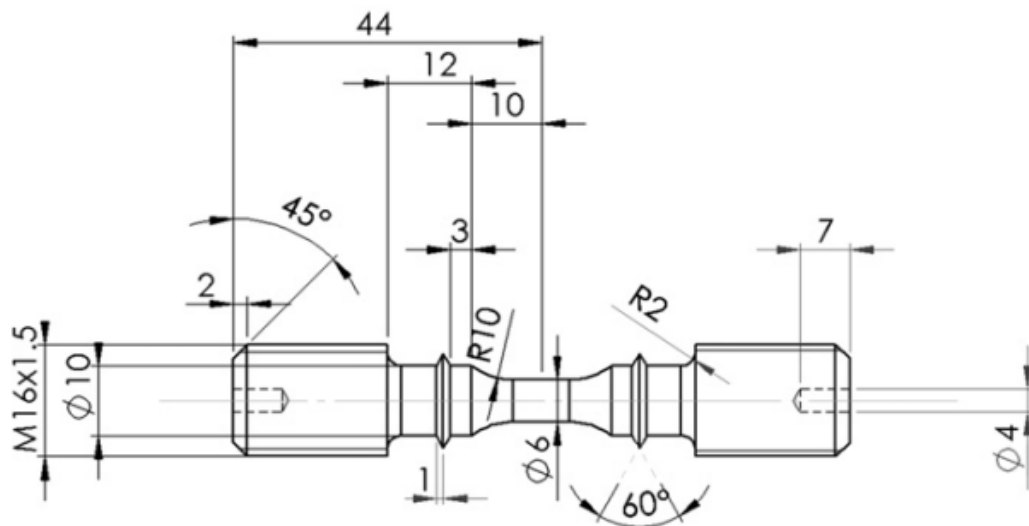
Liukunauhojen suuntautumisella todettiin olevan suuri vaikutus väsymiskestävyyteen molemmilla kuormitusvoiman amplitudeilla. Kummallakin amplitudilla saavutettiin sama keskimääräinen liukunauhojen korkeus vauriokohdissa, suuruudeltaan noin 250 nanometriä. Tämä osoittaa, että monikiteisellä kuparilla, jonka raekoko on 40 mikrometriä, liukunauhojen korkeuden kasvu päättyy tähän korkeuteen. Raerajoja pitkin eteneviä murtumia esiintyi kummallakin amplitudilla. Murtumien ydintyminen oli systemaattista voimakkaasti muokkautuneiden ja vähäisiä muutoksia omaavien rakeiden välisillä raerajoilla. Jännityksen epätasaisuus kahden rakeen välillä todettiin pääsyyksi havaittuun ilmiöön. [16]

3.11 Kumulatiivinen väsymisvaurio

M. Ghammouri, M. Abbadi, J. Mendez, S. Belouettar ja M. Zenasni tutkivat vuonna 2010 kumulatiivista väsymisvauriota ja väsymiskestävyyden ennustamista eri syklisen puristus-jännityskuormituksen amplitudeilla. Murtuman pitenemistä seurattiin useiden elektronimikroskooppikuvien avulla. Murtuman pitenemiseen perustuen määritettiin malli murtuman kehittymiselle. [17]

Koetulokset osoittivat, että Minerin lineaarinen vaurioitumissääntö ja hallitsevan särön etenemislaki soveltuvat täysin jäljellä olevan eliniän ennustamiseen matalasta kuormituksesta korkeaan vaihtuvassa sekvenssissä. Koetulosten ja Minerin säännön välillä ilmeni kuitenkin suuri ristiriita kuormituksen korkeasta matalaan vaihtuvassa sekvenssissä. Sen vuoksi käytettiin lähestymistapaa, joka perustui sekä Groverin muotoiluun, että siirtymiseen raerajoja pitkin etenevästä rakeen läpi etenevään murtuman etenemiseen. [17]

Kokeet tehtiin happivapaasta korkean lämmönjohtavuuden omaavasta 99,95 % puhtaasta kuparista valmistetuilla näytteillä. Materiaalia hehkutettiin tyhjiössä kolme tuntia 460 °C lämpötilassa. Saavutettu raekoko oli noin 30 mikrometriä. Väsytykset tehtiin pehmeillä näytteillä. Näytteiden muoto ja mitoitus on esitetty kuvassa 3.21. [17]



Kuva 3.21. Näytteiden muoto ja mitoitus. [17]

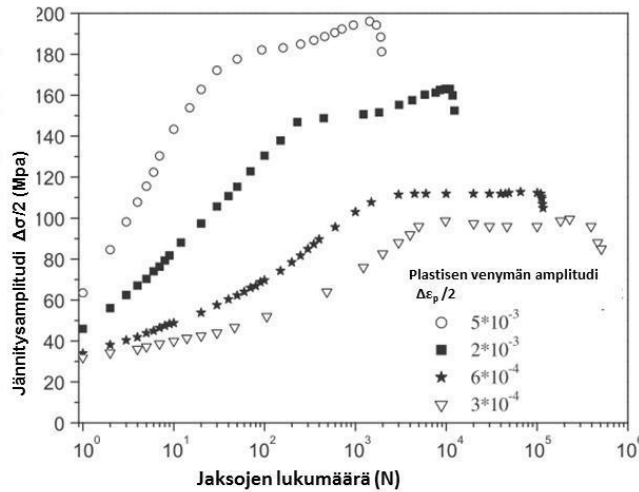
Venymän tarkkailua varten suunniteltiin laipat, joihin voitiin kiinnittää venymäliuskat. Koneistuksen jälkeen näytteet kiillotettiin mekaanisesti hiontapaperilla ja timanttijauheilla. Lopuksi näytteet kiillotettiin elektrolyytisesti. [17]

Kaikki testit tehtiin huoneen lämpötilassa normaalissa ilmastossa. Testeissä käytettiin elektromeekaanista venytys-puristuslaitetta, jonka kuormituskapasiteetti oli 10 tonnia. Näytteitä kuormitettiin jaksottaisella veto-puristuskuormituksella ennalta määrätyllä amplitudilla. Signaalin aaltomuoto oli kolmiomainen, joka mahdollisti vakioitaajuuden 2×10^{-3} hertsiä. Jokaiselta kuormitusjaksolta tallennettiin kuormitusamplitudin arvo, jotta saatiin laadittua kuvaaja voiman amplitudista kuormitus syklien lukumäärän funktiona. Testissä käytetyt amplitudit olivat 3×10^{-4} , 6×10^{-4} , 2×10^{-3} ja 5×10^{-3} . Testejä jatkettiin joko vaurioon asti, tai ne keskeytettiin määrätyn ajan kuluttua. Täten mahdollistettiin testattujen näytteiden pinnan tarkasteleminen elektronimikroskoopilla. Väsymisikä määriteltiin vakioituneen kuormitusamplitudin 7 % alentumaa vastaavien kuormitus syklien määränä, tai maksimikuormituksena, riippuen siitä, ilmenikö vakioitunut amplitudi vai ei. Testin lopetuskriteeriä käytettiin mikroskooppitutkimusta häiritsevän vaurioiden pintojen tummumisen estämiseksi. [17]

Vaurioiden luonnehdinta ja määrällinen arviointi tehtiin elektronimikroskoopilla näytteiden pinnasta tehtyjen havaintojen perusteella. Ensimmäisessä vaiheessa pyrittiin löytämään hallitseva vaurio irrottamalla näyte määrääjain testilaitteesta kuormituksen jälkeen väsymiskestävyysien eri vaiheissa ja tutkimalla sitä mikroskoopilla. Kun hallitseva vaurio oli havaittu, se merkittiin rastilla sen kasvun seuraamiseksi. Kuormitusta jatkettiin ja sama menettely toistettiin useita kertoja samalla näytteellä. Näin saatiin laadittua kuvaaja hallitsevan vaurion pituudesta kuormitus syklien lukumäärän funktiona. [17]

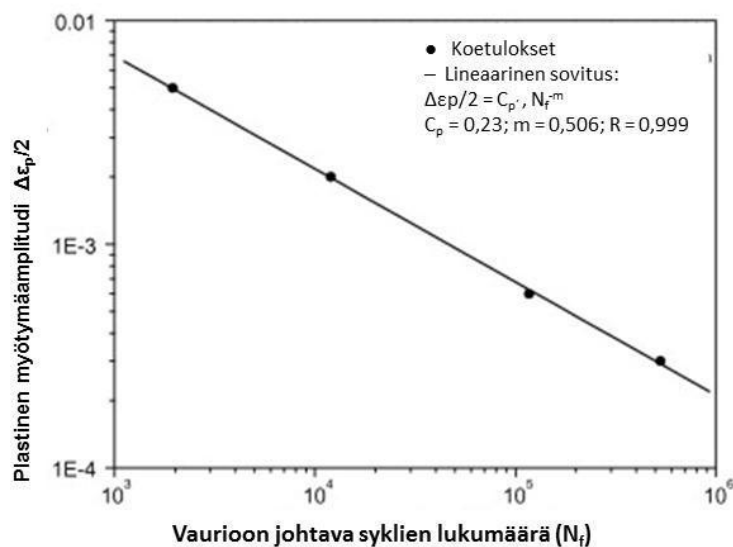
Testien lopussa näytteet murrettiin vetokokeessa ja murtopintaa tutkittiin elektronimikroskoopilla. Tällä menettelyllä saatiin hallitsevan vaurion ydintymis- ja etenemisvaiheet erotettua toisistaan. Kun murtuman ydintymiskohta oli määritetty pienellä suurennoksella, uurteiden esiintymismerkit paikannettiin isolla suurennoksella. Uurteiden esiintymistiheyttä arvioitiin vertaamalla murtuman kärjestä edetyn matkan pituutta peräkkäisten uurteiden lukumäärään. [17]

Testien tulokset esitetään S-N kuvaajana eri kuormitusjännityksen arvoilla kuvassa 3.22. Kuvaajasta ilmenee alustava kovenemistaso, jonka merkitys korostuu voima-amplitudin kasvaessa. Suuremmilla voima-amplitudeilla ei ole havaittavissa amplitudin vakioitumisaluetta. Jännitysamplitudi jatkaa kasvuun vaurioon asti. Tämä johtuu siitä, että suuret amplitudit aiheuttavat useita liukusysteemejä. Venymän kontrolloiman väsymisen testitulokset ilmoitetaan usein kuvaajalla, jossa jännitysamplitudi esitetään kuormitusjaksojen lukumäärän funktiona. Tämä empiirinen väsymiskestävyyslaki on nimeltään Manson-Coffin laki. [17]



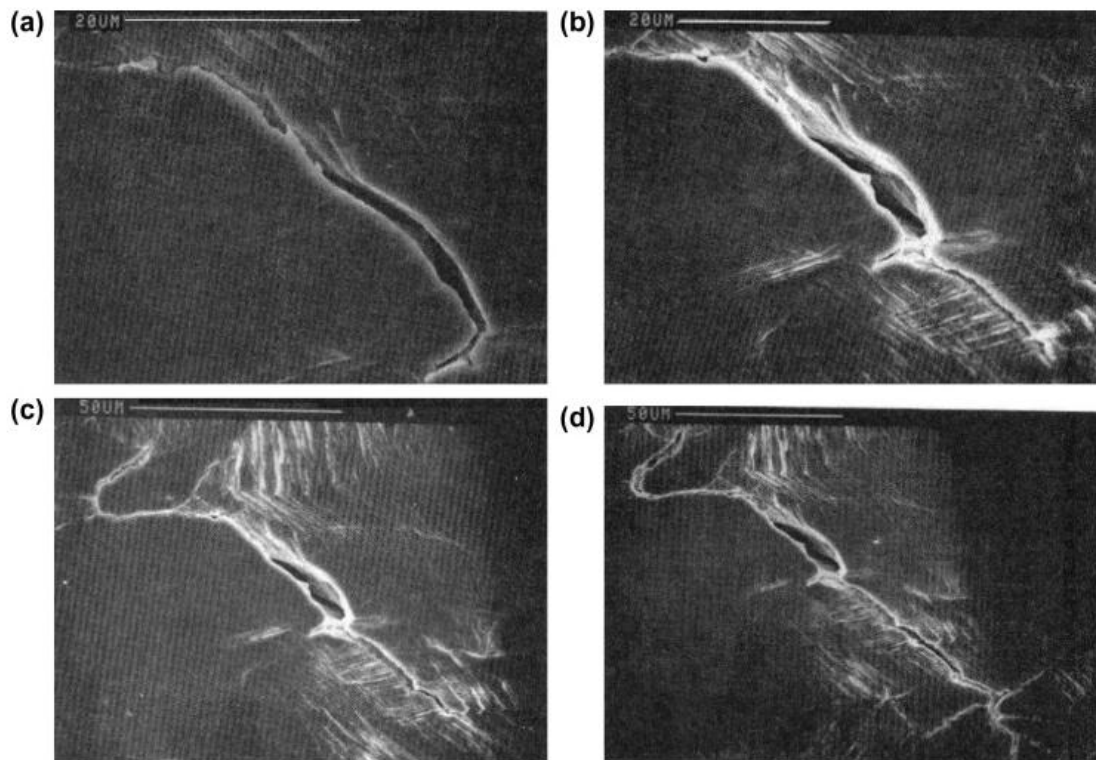
Kuva 3.22. Kuormitusamplitudi esitettynä kuormitusjaksojen lukumäärän funktiona eri kuormitusjännityksen arvoilla. [17]

Kuvassa 3.23 on kuvaaja testien tuloksista. Jännityksen amplitudi esitetään kuormitusjaksojen lukumäärän funktiona. Kuvaajassa on määritetty lineaarinen suora, jota koetulokset mahdollisimman hyvin noudattavat. [17]



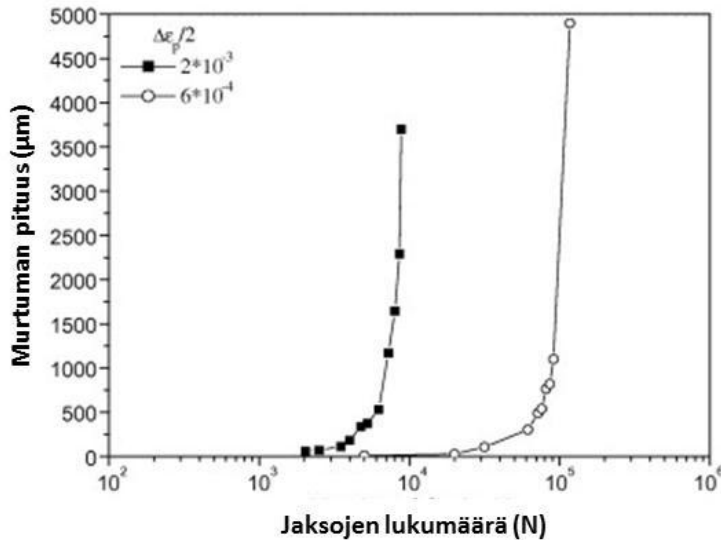
Kuva 3.23. Jännityksen amplitudi kuormitusjaksojen lukumäärän funktiona. [17]

Testien jälkeiset mikroskooppitarkastelut paljastivat raerajoja pitkin eteneviä murtumia näytteiden pinnalla. Kuvassa 3.24 on esimerkkinä näyte, jota kuormitettiin jaksottaisesti jännitysamplitudilla 2×10^{-3} . Testi keskeytettiin 1500, 4000, 6250 ja 8500 kuormitusjakson kohdalla ja kehittyneen murtuman pitenemä mitattiin. Kaikissa tarkastuksissa todettiin murtuman etenevän raerajoja pitkin näytteen pinnalla. Kuvassa a on esitetty murtuma 1500 kuormitusjakson jälkeen, kuvassa b 4000, kuvassa c 6250 ja kuvassa d 8500 kuormitusjakson jälkeen. [17]



Kuva 3.24. Murtuman eteneminen kuparissa raerajoja pitkin, kun kuormitusjaksojen lukumäärä kasvaa. [17]

Kun hallitseva murtuma oli havaittu, sen pituus mitattiin säännöllisesti ja sen kehittymistä laadittiin kuvaaja kuormitusjaksojen lukumäärän funktiona. Kuvassa 3.25 esitetään mainittu murtuman kehittyminen kahdella eri kuormitusamplitudilla, eli 6×10^{-4} ja 2×10^{-3} . Murtuman ydintymistä havaittiin molemmilla amplitudeilla erittäin aikaisessa vaiheessa, vaikka etenemisvaihe hallitsee olennaisesti väsymiskestävyysikä. [17]



Kuva 3.25. Murtuman kehittyminen kahdella erisuuruisella kuormitusamplitudilla, 6×10^{-4} ja 2×10^{-3} . [17]

Murtuman ydintymiselle ei ole olemassa yleisesti hyväksyttyä murtuman minimipituuden määritelmää. Mendez ja Violan ovat asettaneet pituuden alarajaksi 100 mikrometriä, sillä mainittu pituus on helppo havaita ja se vastaa rakeen koon metallurgista mitta-kaavaa. Näillä perusteilla ajateltiin, että murtuman ydintyminen oli tapahtunut, kun murtuman pituus oli 20 mikrometriä. Myöhemmin todettiin, että tämä vastaa raerajan segmentin pituutta, jonka alapuolella ei ollut helposti havaittavissa murtumia. [17]

Mikroskooppitarkastelun avulla on mahdollista yksilöidä testatuissa näytteissä murtumien ydintymiskohdat ja myöhemmät etenemissuunnat. Näytteet katkaistiin murtumakohdista ja molemmat puolikkaat tutkittiin elektronimikroskoopilla. Havaittiin, että murtumat ydintyivät näytteen pinnalla ja etenivät myöhemmin syvemmälle näytteen sisään. Ydintyneiden murtumien todettiin olevan aina laadultaan haurasmurtumia kaikilla kuormitusvoiman amplitudeilla. Lisäksi havaittiin, että murtumat etenivät sekä raerajoja pitkin, että rakeiden läpi. Urteiden muodostumisen todettiin olevan pääasiallinen syy murtumien etenemiselle rakeiden läpi. Murtumien syvyys riippui plastisen muodonmuutoksen asteesta. Muodonmuutosasteen ollessa matala, murtumat etenivät pääasiallisesti raerajoja pitkin. Kumulatiiviset väsymiskestävyystestit osoittivat, että murtumat ydintyivät matalalla kuormituksella ja etenivät lineaarisesti. [17]

4 VÄSYTYSKOKEET

Neljännessä luvussa esitellään tutkimukseen liittyvät väsytykset, joiden tulosten perusteella vastataan tutkimuskohteena olleeseen kysymykseen: täytyvätkö virranke- räysnauhan pitkäaikaiskestävyydelle asetetut vaatimukset.

Ulkoilman lämpötilan vaihdella vuorokausittain virranke- räysnauhan kiinnijuotta- mattomiin osiin kohdistuu lämpölaajenemisen vaikutuksesta vuoroin vetävä ja puristava kuormitus. Jaksottainen kuormitus aiheuttaa ajan myötä väsymistä nauhan rakenteessa ja lopulta nauha murtuu. Virranke- räysnauhan pitkäaikaiskestävyyttä tutkittiin suoritta- malla väsytykset ja mittaamalla samanaikaisesti näytteen sähkönjohtavuutta nelipis- temittauksella.

4.1 Koejärjestelyt

Käytettävissä olevista väsymiskestävyyden tutkimusmenetelmistä valittiin veto- puristusmenetelmä, koska se soveltui hyvin vuorokautisen lämpötilanvaihtelun simu- lointiin. Lähtötiedoissa annettua vuorokautista lämpötilanvaihtelua vastaavan lämpötila- eron virranke- räysnauhaan aiheuttama pitenemä Δl , saatiin kaavasta

$$\Delta l = l_0 * \Delta T * \alpha \quad (4.1)$$

missä l_0 on nauhan alkuperäinen pituus, ΔT on käyttöolosuhteita vastaava vuorokauti- nen lämpötilaero (100 °C) ja α on kuparin lineaarinen lämpölaajenemiskerroin, jota käy- tetään tutkittaessa kappaleen laajenemista vain yhdessä suunnassa. Kirjallisuudesta saa- dulla kuparin lineaarisen lämpölaajenemiskertoimen arvolla $17,0 * 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ saatiin pitenemän Δl arvoksi 1700 mikrometriä/metri. Kun ajateltiin lähtötilanteen lämpötilaksi 0 °C ja lämpötilaero ΔT jaetaan tasan negatiiviseen ja positiiviseen suuntaan, lämpötilan ääriarvoiksi saatiin -50 °C ja +50 °C. Tällöin laskemalla saatu pitenemä jakaantui kah- teen itseisarvoltaan yhtä suureen osaan. Toinen osa aiheutti virranke- räysnauhaan veny- män ja toinen puristuman. Kun lähtötilanteen lämpötilaksi valittiin 0 °C, saatiin vastaa- vasti keskijännityksen σ_m arvoksi 0. Väsytyksissä kuormittavan voiman amplitudin tuli aiheuttaa koekappaleelle venymä, joka oli yhtä suuri kuin virranke- räysnauhalle las- kemalla saatu pitenemä. Tämä venymä koostui, vastaavasti kuin pitenemä, kahdesta itseisarvoltaan yhtä suuresta osasta, eli venyttävän kuormitusjakson koekappaleeseen aiheuttamasta venymästä ja puristavan kuormitusjakson aiheuttamasta puristumasta.

Venyttävä ja puristava kuormitusjakso toteutettiin käyttämällä siniaallon mukaista kuormitusta, jonka taajuus oli 20 hertsiä.

Aluksi oli määritettävä koekappaletta kokeen aikana kuormittavan jaksottaisen voiman amplitudi. Koekappaleeseen kiinnitettiin venymäliuska, jonka avulla mitattiin koekappaleeseen kohdistetun veto-puristusvoiman aiheuttama venymä ja puristuma. Venymäliuska liimattiin venymäliuskaliimalla vesihiomapaperilla ja kankaalla puhdistetun koeksuvaan liimatun koemateriaalin päälle, koeksuvan keskellä olevan kavennuksen kohdalle, tarkasti sen puoliväliin ja leveyssuunnassa koemateriaalin keskelle kuvan 4.1 mukaisesti.



Kuva 4.1. Pinnoitettuun koemateriaalin kiinnitetty venymäliuska.

Kun venymäliuskalla mitattu venymä oli suuruudeltaan yhtä suuri kuin laskemalla saatu pitenemä, merkittiin muistiin vastaava voima-amplitudi. Venymäliuskamittauksia tehtiin jokaiselle testimateriaalille viisi kappaletta. Liitteissä 7 ja 8 esitetään venymäliuskatestiä tulokset materiaaleittain. Saaduista tuloksista määritettiin materiaaleittain keskiarvot ja pyöristettiin ne kymmenen Newtonin tarkkuuteen. Näin saatuja voima-amplitudiarvoja käytettiin väsytykskoikeissa simuloitaessa käyttöolosuhteita.

Taulukossa 4.1 esitetään voima-amplitudit materiaaleittain.

Taulukko 4.1. Voima- amplitudit ja niitä vastaavat venymät koemateriaaleittain.

		Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)								
		1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
Pinnoittamaton A	Pyör. ka. (N)	150	160	180	190	200	210	230	240	250
	Pinnoitettu A	150	170	180	190	210	220	240	240	250
Pinnoittamaton B	Pyör. ka. (N)	150	160	170	190	200	210	220	230	240
	Pinnoitettu B	150	160	170	180	200	210	230	240	250
Pinnoittamaton C	Pyör. ka. (N)	140	160	170	180	190	200	220	230	240
	Pinnoitettu C	150	160	170	180	200	210	230	240	250
Pinnoittamaton D	Pyör. ka. (N)	130	140	150	150	180	190	210	220	240
	Pinnoitettu D	140	150	160	180	190	210	220	230	240

Venymäliuskamittausten avulla määritettiin vastaavasti myös suurempia venymiä vastaavat voima-amplitudit. Nämä venymät vastasivat pitenemiä, jotka normaaleja käyttöolosuhteita suuremmat lämpötilanvaihtelut aiheuttaisivat virrankeräysnauhalle.

Väsytykskoesarjat tehtiin kaikilla koemateriaaleilla. Kokeissa käytettiin 20 hertsin kuormitustaajuutta. Aluksi koekappaletta kuormitettiin lämpölaajenemista vastaavalla voima-amplitudilla ja tehtiin 12×10^3 jakson väsytykskoe. Koe toistettiin viisi kertaa. Koska murtumaa ei tapahtunut, väsytystä jatkettiin samalla voima-amplitudilla virrankeräysnauhan valmistajan kanssa sovittuun kuormituskertamäärään $7,3 \times 10^3$, joka vastaa 200 vuotta aurinkopaneelin käyttöolosuhteissa. Murtuman aiheuttavan voima-amplitudin määrittämiseksi voima-amplitudia muutettiin portaittain suuremmaksi ja tehtiin väsytykskojeita, kunnes murtuma ilmeni. Murtuman aiheuttavalla voima-amplitudilla tehtiin viiden kokeen sarja. Tämän jälkeen tehtiin viiden kokeen sarja murtuman aiheuttanutta 10 Newtonia alemmalla voima-amplitudilla kuormituskertamäärään $7,3 \times 10^3$. Lopuksi tehtiin vielä yksi koe murtuman aiheuttanutta selvästi korkeammalla voima-amplitudilla Wöhler-käyrien aikalujuusarvojen määrittämiseksi. Tehdyt väsytykskoesarjat esitetään taulukossa 4.2.

Taulukko 4.2. Kaikilla koemateriaaleilla 20 hertsin taajuudella tehdyt väsytykskoesarjat.

Koe-sarja	Lämpölaajenemisdemonstraatio	Väsytyks murtumaan asti sama amplitudi	Murtuman aiheuttavan amplitudin määrittäminen	Väsytyks murtumaan asti murtuman aiheuttava amplitudi	Väsytyks murtuman aiheuttanutta 10 N alemmalla amplitudilla
Testien lukum.	5	5	Tarvittava määrä (3-5)	5	5

Väsytykskojeiden aikana mitattiin myös virrankeräysnauhan sähkönjohtavuutta. Sähkönjohtavuusmittaukset tehtiin reaaliaikaisesti kuormituksen yhteydessä nelipistemittauksella, murtuman aiheuttavalla voima-amplitudilla kuparittomilla koesauvoilla. Koekappaleet eristettiin testilaitteesta liimaamalla kiinnitysleukoihin eristemuovit testien ajaksi.

Mittaukset tehtiin A:lla merkityillä pinnoitetulla ja pinnoittamattomalla tuotteella. Mittauksia tehtiin viisi kappaletta molemmilla materiaaleilla koemateriaalin murtumiseen asti. Ennen testien alkamista mitattuja sähkönjohtavuusarvoja käytettiin referenssiarvoina ja niiden arvoksi annettiin 100 %. Testien edetessä mitatut arvot suhteutettiin referenssiarvoihin, jolloin tuloksista oli suoraan luettavissa kullakin mittaushetkellä jäljellä oleva sähkönjohtavuuskyky prosentteina alkuperäisestä.

4.2 Koemateriaali

Koemateriaalin toimittaja valmistaa kuparinauhaa, jota käytetään aurinkopaneeleissa virrankeräysnauhana. Nauhalla yhdistetään paneelit toisiinsa ja kerätään niiden tuottama sähkövirta. Nauha ja kennot on liitetty toisiinsa juottamalla. Kennojen välinen etäisyys on 1-4 millimetriä. Nauhan juottamaton mittapituus vaihtelee 6-10 millimetriin, eli nauhoja ei ole juotettu aivan kennojen reunoihin asti.

4.2.1 Virrankeräysnauhan valmistusprosessi

Nauha valmistetaan valulangasta jatkuvavalumenetelmällä. Aluksi lanka valssataan. Sen jälkeen lanka vedetään sarjaketokoneella. Hehkutusvaiheen jälkeen lankaa vedetään vielä pienempiin mittoihin, joista lopuksi valssataan eri levyisiä ja paksuisia virrankeräysnauhoja. Osa valmiista nauhoista pinnoitetaan tinalyijyhopeaseoksella.

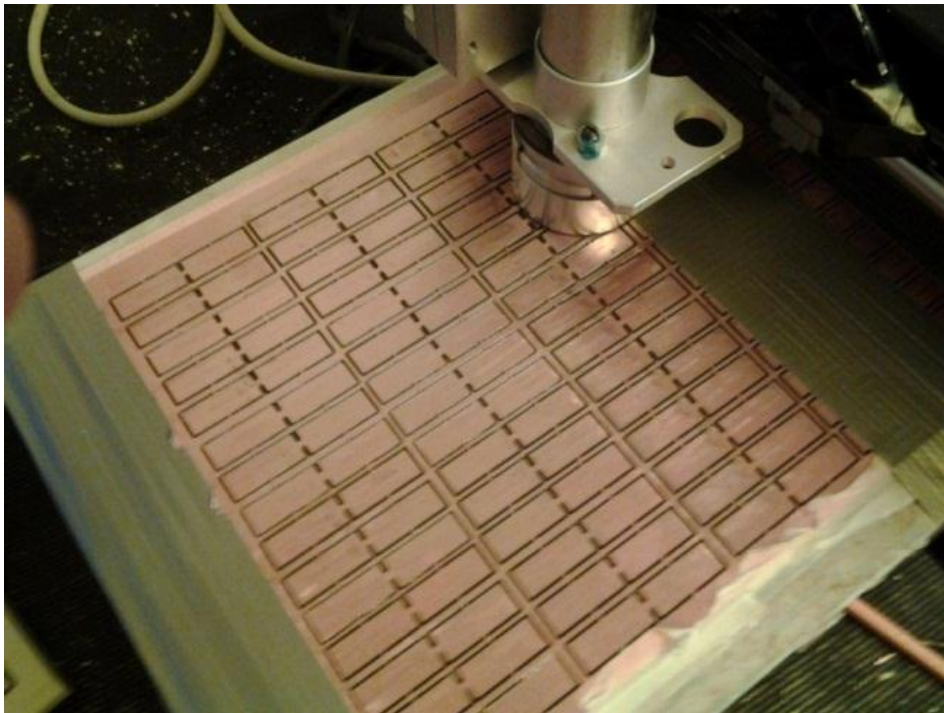
4.2.2 Koekappaleiden valmistus

Valmistajan toimittamat nauhanäytteet nimettiin liitteen 8 mukaisten tunnusten ja toimintustavan yhdistelmällä (esimerkiksi A kelattu, tai D suora). Kokeissa testattiin 4 eri tunnuksen omaavaa näyttemateriaalia suorana ja kelattuna, sekä tinalyijyhopeaseoksella pinnoitettuna, että pinnoittamattomana. Kelatuista näytenuhoista poistettiin muutama kerros kelan päältä, jotta testattava materiaali olisi mahdollisimman virheetöntä. Testimateriaalista leikattiin sivuleikkureilla sopivan mittaisia pätkiä tasaisella pöytäpinnalla, purkaen materiaalia varovasti kelalta. Koemateriaalin vetämistä, taivuttamista tai vääntämistä varottiin tarkasti.

Kokeita varten oli tarpeellista valmistaa koesauvoja koemateriaalin pehmeiden ja pienen koon vuoksi. Koemateriaali kiinnitettiin koesauvoihin ja niiden avulla edelleen testilaitteeseen. Koesauvan tehtävänä oli lisäksi tukea koemateriaalia siten, ettei se lommahtamaan puristavan kuormitus syklin aikana. Koesauva oli mahdollista valmistaa kahdesta kokonaan erillisestä kappaleesta, joiden väliin olisi koemateriaalin kiinnityksen yhteydessä jätetty noin 1 millimetrin rako. Koemateriaali olisi ollut tällöin keskikohdaltaan mainitulta matkalta kokonaan ilman tukea. Kokeen tilaajan kanssa käydyissä neuvotteluissa todettiin paremmaksi vaihtoehdoksi käyttää yhtenäistä koesauvaa, joka on keskikohdaltaan ohennettu. Tärkeimmät päätökseen vaikuttavat tekijät olivat parempi vastaavuus todelliseen tilanteeseen ja näytteen helpompi käsiteltävyys. Saadut tulok-

set ovat täten käyttökelpoisempia ja näytteiden käsittelystä tuloksiin aiheutuvat virheet vähenivät oleellisesti.

Yhtenäisen koesauvan kaventaminen keskikohdaltaan oli seuraava ratkaistava asia. Useita erilaisia kavennustapoja ja kavennuksen muotoja tutkittiin ja kokeiltiin. Koesauvan valmistamisen oli oltava helppoa ja nopeaa. Lisäksi sauvojen tuli olla mitoiltaan ja muodoiltaan täydellisesti samanlaisia, jotta kokeiden tulokset olisivat vertailukelpoisia. Näiden kriteerien perusteella valittiin sauvojen muodoksi suorakaide, mitoiltaan 10 x 50 millimetriä. Sauva kavennettiin keskikohdalta 2,0 millimetriä leveäksi 2,0 millimetrin matkalta. Koevalmistuksessa ja tehdyissä testauksissa todettiin, että koesauvan tulee olla myös riittävän paksua materiaalia, jotta se ei katkea tai lommahda väsytykokeen aikana. Soveltuvaksi materiaaliksi todettiin 1,0 millimetrin paksuinen FR-4 piirilevy-materiaali, joka oli molemmilta puoliltaan kuparoitu (pinnoitteen paksuus molemmilla puolilla 70 mikrometriä). Erilaisista kokeilluista koesauvan valmistusmenetelmistä valittiin jrsintä CNC-ohjatulla piirilevyjrsimellä. Valmistusmenetelmä takasi sen, että kaikki valmistetut koesauvat olivat täsmälleen samanlaisia muodoiltaan ja mitoiltaan. Yhdellä ohjelmoinnilla oli mahdollista valmistaa 75 kappaletta koesauvoja. Sama ohjelmointi puolestaan oli mahdollista toistaa rajattoman monta kertaa. Kuva 4.2 esittää koesauvojen jrsintää.



Kuva 4.2. Koesauvojen jrsintä CNC-ohjatulla piirilevyjrsimellä.

Jyrsintävaiheen päätyttyä materiaaliarkki irrotettiin piirilevyjyrsimestä. Materiaaliarkki huuhdeltiin ja kuivattiin, jotta arkin pinnalle jäänyt pöly saatiin poistettua. Koesauvaihiot väännettiin pienellä ruuvimeisselillä irti materiaaliarkista.

Väsytykskokeissa käytettyjä koesauvoja valmistettiin yhteensä 450 kappaletta. Materiaalina käytettiin FR-4 piirilevylaminaattia, jota leikattiin koesauvojen jyrsintää varten A4-kokoisiksi arkeiksi. Koesauvojen valmistusmateriaalin tasalaatuisuuden varmistamiseksi niille tehtiin venymäliuskatestejä. Testaukseen sattumanvaraisesti valittuihin koesauvoihin kiinnitettiin venymäliuskat ja suoritettiin niille väsytykskoeket. Tällä tavalla määritettiin kutakin venymää vastaavat voima-amplitudit. Tuloksista laskettiin keskiarvot ja ne pyöristettiin 10 Newtonin tarkkuuteen. Taulukossa 4.3 esitetään koesauvojen venymäliuskatestien tulokset.

Taulukko 4.3. Koesauvojen venymäliuskatestien tulokset

Testi n:o	Tyhjä alusta								
	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	60	65	70	80	85	90	95	100	105
2	65	70	75	85	90	100	105	110	115
3	60	65	70	75	80	85	90	95	100
4	65	75	85	90	95	100	105	110	120
5	60	65	75	80	85	90	95	100	110
Keskiarvo:	62	68	75	82	87	93	98	103	110
Pyör. ka.	60	70	80	80	90	90	100	100	110

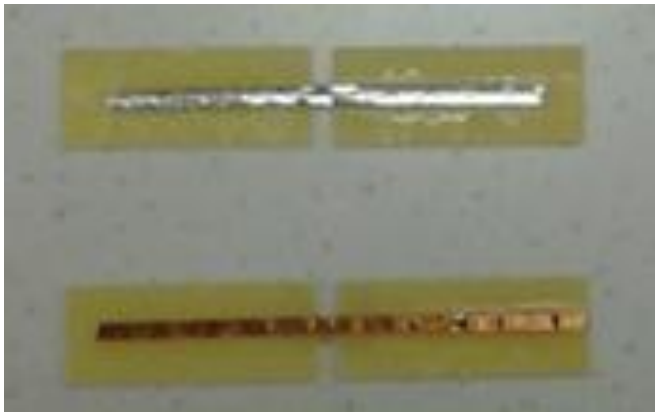
Koemateriaali kiinnitettiin koesauvoihin liimaamalla. Liimasauman tuli kestää väsytykskokeen aiheuttama rasitus, eli koemateriaali ei saanut irrota koesauvasta kokeen aikana. Useita eri liimavaihtoehtoja ja liimaustekniikoita kokeiltiin parhaan tuloksen löytämiseksi. Testattiin esimerkiksi venymäliuskaliimaa, 2-komponenttista metallin liimaukseen tarkoitettua Araldit-liimaa, Loctite Super Glue 3-liimaa sekä hyytelönä, että ohuena. Koesauvan kuparoitu pinta puhdistettiin ja karhennettiin vesihiomapaperilla ja pyyhittiin kankaalla ennen liimausta. Sen jälkeen koemateriaalista leikattu pala liimattiin poikittais- ja pitkittäissuunnassa koesauvan keskelle, mahdollisimman suoraan vertailukelpoisten tulosten saavuttamiseksi. Paras liimaustulos saavutettiin ohuella Loctite Super Glue 3-liimalla, jota käytettiin varsinaisessa kokeessa käytettyjen koesauvojen ja testimateriaalien liimauksessa. Liimausten annettiin kuivua 24 tuntia ennen väsytykskoekiden aloittamista. Näin varmistettiin, että liimasauma on saavuttanut täyden lujutensa.

Kuvassa 4.3 on sekä pinnoitettu että pinnoittamaton koemateriaali koesauvoihin liimattuna.



Kuva 4.3. Pinnoitettu ja pinnoittamaton koemateriaali koesauvoihin liimattuna.

Sähkönjohtavuusmittauksissa käytetyistä koesauvoista poistettiin pinnoitteena ollut kupari etsaamalla ja koesauva eristettiin kiinnitysleuoista. Kuvassa 4.4 on sähkönjohtavuusmittauksissa käytettyjä koesauvoja, joihin on kiinnitetty koemateriaalia.

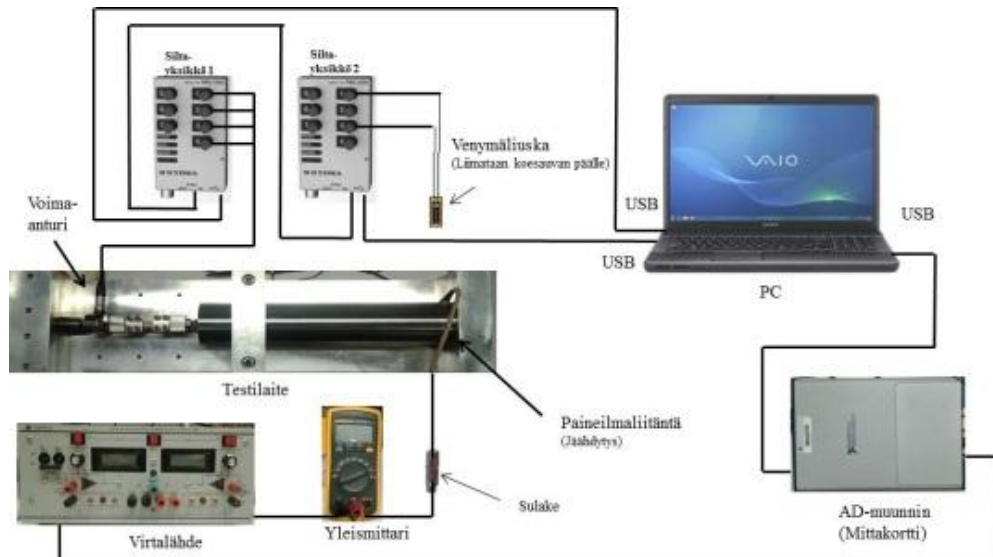


Kuva 4.4. Sähkönjohtavuusmittauksissa käytettyjä koesauvoja.

Koesauvat karhennettiin vesihiomapaperilla ja pyyhittiin kankaalla ennen koemateriaalin liimaamista niiden pintaan. Koemateriaalin päälipinnalle tarttunut liima poistettiin ennen mittausten alkua.

Testilaitteet ja ohjelmat

Väsytykskoeksessa käytetty tutkimuslaitteisto rakennettiin tarvittavista komponenteista itse Tampereen teknillisen yliopiston Porin yksikön elektroniikan laboratoriossa. Kuvassa 4.5 esitetään väsytykskoeksessa käytetty laitteisto.



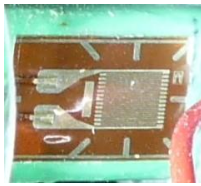
Kuva 4.5. Väsytykskoelaitteisto.

Testilaitteen alumiinista valmistettuun runkoon kiinnitettiin aktuaattori, jonka männänvarteeseen liitettiin toinen koesauvan kiinnitysleuoista. Aktuaattoria jäähdytettiin kokeiden aikana instrumentti-ilmalla. Toiseen kiinnitysleukaan liitettiin Kyowa LUX-B-2kN voima-anturi, joka edelleen kiinnitettiin testilaitteen runkoon. Voima-anturi liitettiin DBU-120 moduulin kautta tietokoneeseen. Voima-anturin avulla pystyttiin mittaamaan koesauvaan kohdistuvaa sinikäyrän muotoista, taajuudeltaan 20 hertsiä ollutta voima-amplitudia. Voima-amplitudi pidettiin vakiona takaisinkytkennän avulla. Voima-amplitudin hallinta tapahtui säätämällä virtalähdettä tietokoneen ja National Instrumentin valmistaman mittakortin avulla aktuaattorille syötettävää virtaa, jonka todellista voimakkuutta seurattiin yleismittarilla. Kokeissa käytetyt venymäliuskat kytkettiin toiseen DBU-120 moduuliin ja edelleen tietokoneeseen.

4.2.3 Venymäliuska

Venymäliuska-anturi on materiaalin venymisen mittaamiseen tarkoitettu anturi. Sen toiminta perustuu anturissa olevan metallijohteen muodon muuttumiseen venytyksen takia, jolloin myös johteen resistanssi muuttuu. Venymäliuskan avulla mekaaninen suure ilmaistaan sähköisenä suurena. Venymäliuska-antureita käytetään voimien mittamiseen ja punnitsemiseen.[18]

Venymäliuska muodostuu herkästi venyttävään/kokoon puristavaan mekaaniseen voimaan reagoivasta pitkästä ja ohuesta johtimesta. Tyypillisesti venymäliuskan johdin on kuparilankaa tai muuta metallia, ja se kiinnitetään tiukasti esim. syövyttämällä taipuisan taustakalvon päälle. Taustakalvon tulee olla eristettyä. Venymäliuska voi olla myös yksinkertainen, kiinnitystappien väliin pingotettava johdin. Kummassakin kiinnitystavassa kiinnityksen on oltava erittäin vahva, jotta venymäliuska todella venyy yhtä paljon kuin materiaali jonka venymistä ollaan mittaamassa. Taustakalvoinen venymäliuska kiinnitetään tyypillisesti liimaamalla. Mittauksen onnistumisen kannalta on erittäin tärkeää, että tukevan kiinnityksen lisäksi venymäliuska on asetettu oikein päin venymissuuntaansa nähden. Kuvassa 4.6 on horisontaalisen venymän mittaukseen tarkoitettu venymäliuska, jollaisia mittauksissa käytettiin. [18]



Kuva 4.6. Mittauksissa käytetty venymäliuska. Mittapituus 0,2 millimetriä

Hyvä venymäliuska reagoi mahdollisimman paljon venytykseen, mutta ei muihin ympäristön muutoksiin. Liuskan ominaisuudet eivät siis saisi riippua ajasta tai lämpötilasta. Liuskan tulee olla niin pienikokoinen että mittaus voidaan ajatella pistemäiseksi. Liuskan massan tulee olla niin pieni että se ei häiritse dynaamisia mittauksia. Venymäliuskat ovat tyypillisesti kooltaan 2-10 neliömillimetriä ja huolellisella käytöllä pystytään mittaamaan jopa 10 % suhteellista venymää. Merkittävin venymäliuskamittauksiin virhettä aiheuttava tekijä on lämpötilan vaikutus venymäliuskan resistanssiin. Tätä virhettä voidaan kompensoida käyttämällä useampaa venymäliuskaa, joista osa mittaa mittauskohteen venymää ja osa lämpötilasta johtuvaa resistanssin muutosta ilman venytystä. [18]

Venymäliuskoja voidaan valmistaa paitsi metallista, myös puolijohteista. Tällaisen liuskan venymäkerroin on paljon suurempi kuin metallisen, mutta ne ovat myös kalliimpia, herkempiä lämpötilanmuutoksille ja helpommin rikkoutuvia kuin metalliset. On olemassa myös kapasitanssin muutokseen perustuvia venymäliuskoja.[18]

4.2.4 Voima-anturi

Voima-anturi muuntaa voiman tai painon sähköiseksi signaaliksi, jota voidaan tarvittaessa vahvistaa. Signaali mahdollistaa esimerkiksi toimilaitteen aiheuttaman voiman suuruuden mittaamisen tietokoneen ja ohjelmiston avulla. Takaisinkytkennän avulla voidaan toimilaitteen aiheuttama voima pitää vakiona. Venymäliuskoihin perustuvia antureita käytetään mitattaessa suuria staattisia voimia. Voima-anturiin sijoitetaan neljä venymäliuskaa siten että kahteen kohdistuu positiivinen ja toisiin kahteen negatiivinen jännitys. Liuskat kytketään Wheatstonen siltaan, jolloin liuskoihin kohdistuva jännitys muuttaa niiden vastusarvoja ja sillan antama sähköinen viesti on suhteessa mitta-

menttiin kohdistuvaan voimaan. Liuskoilla voidaan mitata taipumaa, leikkausvoimaa tai sylinterimäiseen elementtiin kohdistuvaa puristusta tai vetoa. [19; 20] Kuvassa 4.7 on väsytykskoikeissa käytetty voima-anturi.



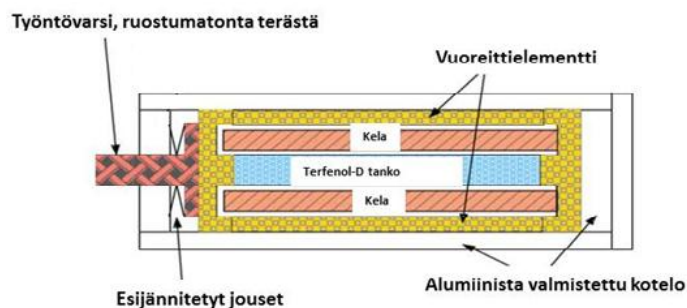
Kuva 4.7. Voima-anturi.

Pietsosähköiset voima-anturit soveltuvat veto- ja puristusvoiman mittauksiin. Venymäliuska-anturiin verrattuna niillä saavutetaan parempi resoluutio. Alhaisin näillä antureilla mitattava taajuus riippuu käytettävästä signaalinkäsittelylaitteesta. Alhaisin taajuusalue on välillä 0.1 - 1 Hz. Pietsosähköinen voima-anturi voidaan kytkeä tavanomaiseen varausvahvistimeen. [19]

Magneetikentän muutokseen perustuvassa anturissa on neljä reikää, joihin on pujoitettu kaksi käämiä. Ensiökäämiin syötetään vaihtovirta, toisiokäämi on mittauskäämi. Käämit ovat toisiinsa nähden 45 asteen kulmassa. Magneettista vuorovaikutusta ei ilmene, jos anturiin ei kohdistu ulkoista voimaa. Kun anturiin kohdistuu ulkoinen voima, magneetikenttä muuttuu. Tällöin magneettivuon permeabiliteetti kasvaa voiman suunnassa. Magneettivuon symmetria muuttuu ja indusoi toiseen käämiin voimaan verrannollisen jännitteen. [21]

4.2.5 Magnetrostriktiivinen aktuaattori

Väsytykskoikeiden testilaitteiston pääosa oli kuvassa 4.8 esitetty magnetrostriktiivinen aktuaattori.



Kuva 4.8. Magnetrostriktiivinen aktuaattori Terfenol-D. Valmistaja Etrema.[13]

Magnetostriktiivisyys on eräiden ferromagneettisten aineiden magneettisten ja mekaanisten ominaisuuksien voimakkaaseen yhteyteen perustuva ilmiö. Synnytetyn magneettikentän vaikutus tuottaa jännityksiä samaan aikaan, kun mekaaniset kuormitukset materiaaleissa aiheuttavat magnetointiin mitattavia muutoksia. Tätä ilmiötä voidaan käyttää ohjaukseen ja tunnistukseen. Aktuaattorin käämin tuottama magneettikenttä ohjaa varren jännitystä, joka muttuu aktuaattorin ulostulovarren siirtymäksi, veto tai puristusvoimaksi. [13]

Aktuaattoriin syötettävän siniaallon muotoisen vaihtovirran avulla saadaan aikaan jaksottaisesti vaihteleva veto-puristusjännitys koekappaleeseen. Vaihtovirran voimakkuutta muuttamalla säädetään voima-amplitudia ja taajuutta muutetaan ohjaamalla virtalähdettä funktiogeneraattorilla tai tietokoneella. [13]

4.2.6 Mittakortti

Testilaitteistossa käytettiin mittakorttina National Instruments-yhtiön valmistamaa tiedonkeruu- ja ohjausyksikköä, kauppanimeltään NI X Series Multifunction Data Acquisition. Mittakortti sisältää kehittyneet ajanotto- synkronointi- ja liipaisuominaisuudet, joihin kuuluu neljä laskuria/ajastinta, 100 megahertsin aikaperusta, toisistaan riippumattomat analoginen ja digitaalinen ajanotto, sekä uudelleenliipaistavat mittaussuurekollisuudet analogiselle ja digitaaliselle I/O:lle ja ajastimille tai laskureille. [22]

Mittakortti liitetään mikrotietokoneeseen USB-väylän kautta. Ohjattavat laitteet liitetään ruuvi liittimien avulla mittakortin sisääntuloihin. Mittakortissa on myös AD-muunnin. [22]

4.2.7 DBU-120 Moduuli

Siltayksikköinä käytettiin japanilaisen mittauslaitteisiin ja -järjestelmiin erikoistuneen Kyowan valmistamaa DBU-120- moduulia. Venymäliuska ja voima-anturi yhdistettiin kumpikin pikaliittimien avulla omaan DBU-120 moduuliinsa ja niiden kautta edelleen USB-väylän kautta tietokoneeseen. Kuvassa 4.9 on DBU-120A-moduuli. [23]

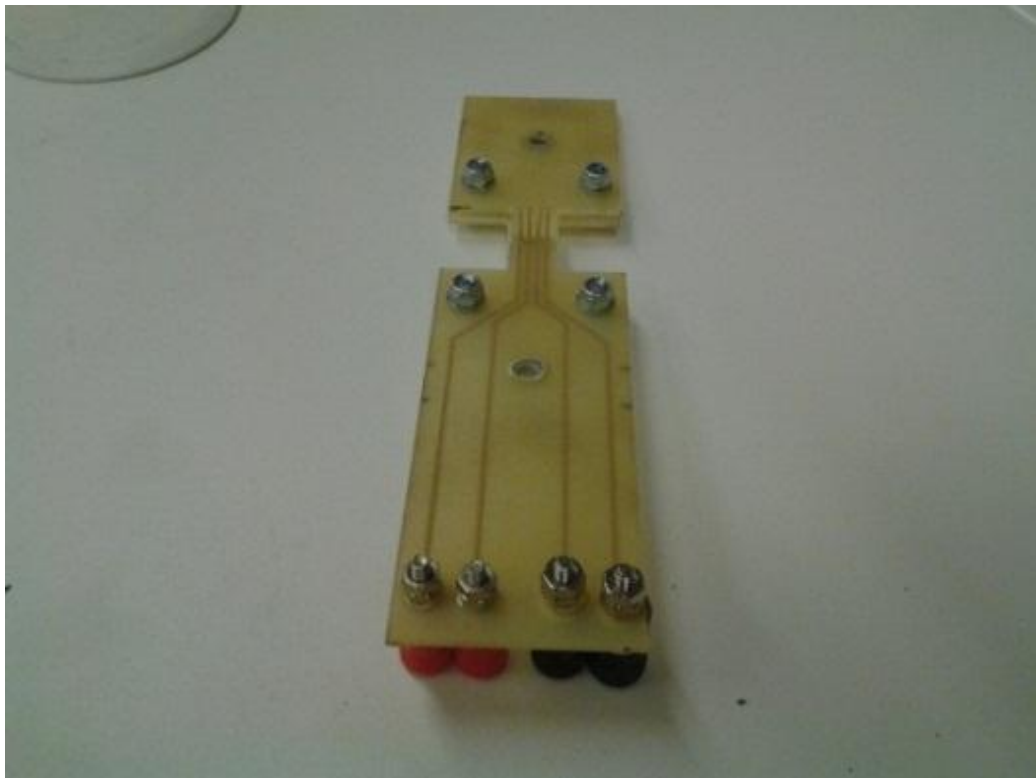


Kuva 4.9. DBU-120A-moduuli.[23]

DBU-120 on online-tilassa toimiva siltayksikkönä käytettävä mittalaite, joka kytketään mikrotietokoneeseen USB-väylän kautta. Kytkentäpaneelissa on jousipalautteiset pikakytkentänastat, joihin esimerkiksi venymäliuska ja voima-anturi voidaan helposti ja nopeasti kytkeä. DBU-120-moduulissa on sisäänrakennettu vahvistin ja A-D muunnin. Moduulia ohjataan mikrotietokoneen avulla käyttäen ohjaukseen tarkoitettua standardiohjelmaa. USB-väylään liittyvän virtalähteen ansiosta erillistä AC-virtalähdettä ei tarvita. Moduulin näytteenottotaajuusalue on 1-20 kilohertsiä, minkä ansiosta DBU-120 pystyy mittaamaan useita ilmiöitä staattisista dynaamisiin. [23]

4.2.8 Nelipistemittauspää

Väsytykskoekiden aikana mitattiin sähkönjohtavuudessa rasituksen vaikutuksesta tapahtuvia muutoksia. Mittauksia varten suunniteltiin ja valmistettiin itse kuvan 4.10 mukainen nelipistemittauspää.

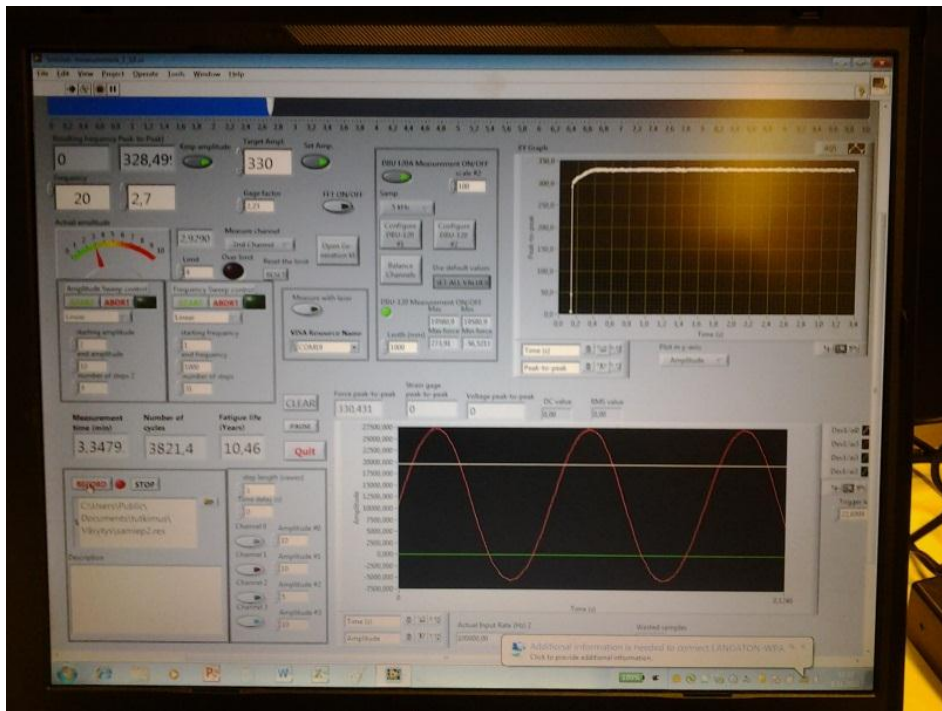


Kuva 4.10. Mittauksia varten suunniteltu ja valmistettu nelipistemittauspää.

Nelipistemittauksessa uloimpiin johtimiin syötetään virtaa, jonka voimakkuus tunnetaan. Sisempien johtimien välistä jännite-eroa mitataan volttimittarilla.

4.2.9 Ohjelmat

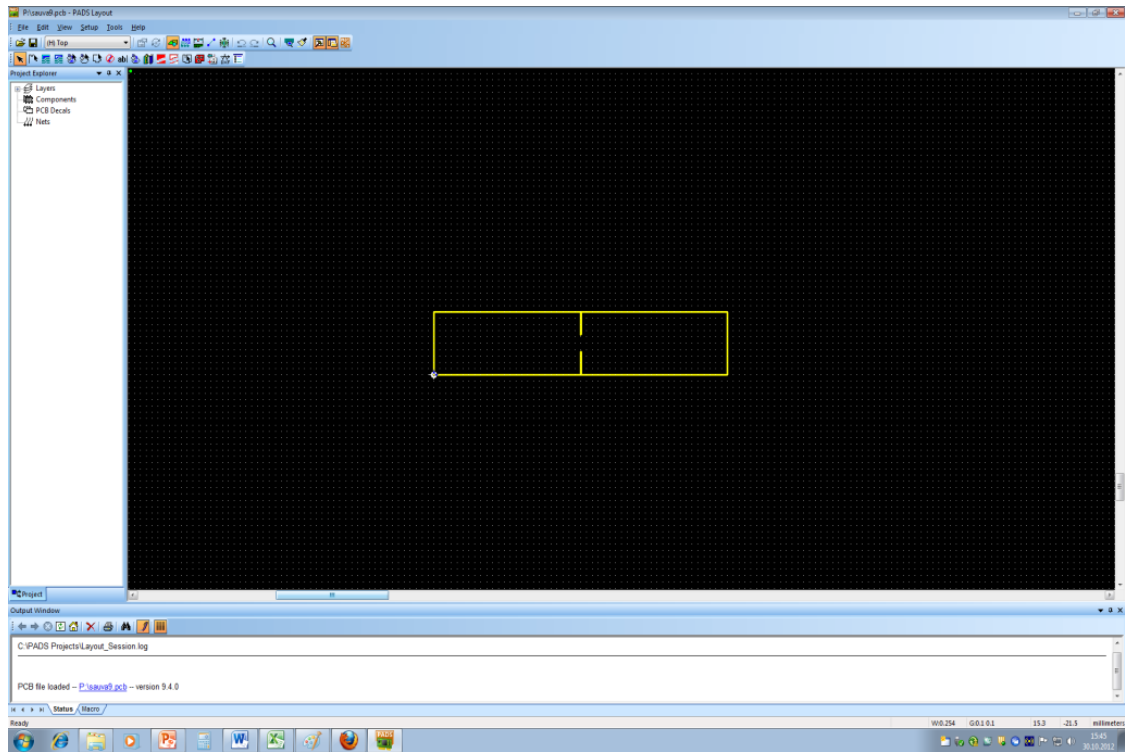
Tietojen keruussa, signaalien prosessoinnissa, sekä testilaitteen ohjauksessa käytettiin National Instrumentsin laatimaa ohjelmointiympäristöä LabVIEW, joka perustuu graafiseen G-kieleen. Ohjelman ominaisuuksiin kuuluu, että laadittaessa ohjelmaa Blockvälilehdelle, se luo samalla käyttäjärajapintana toimivalle näytölle tarvittavat valinta- ja säätönappeimet, sekä mittarit. Käytettävä ohjelma laaditaan aina tapauskohtaisesti tehtävien mittausten ja kerättävien tietojen asettamien tarpeiden mukaisesti. Kuvassa 4.11 on väsytykskoetta varten laadittu tietokonenäyttö.



Kuva 4.11. LabVIEW-ohjelman tietokonenäyttö

Väsytykskoetta varten laadittuun ohjelmaan rakennettiin tiedonkeruu mittakortilta ja antureilta, taajuuden säätö mittakortin avulla, valitun taajuuden näyttö, ohjausnappeimet aktuaattorin virran voimakkuudelle, mittaustulosten tallentamiselle ja ohjelman pysäyttämiseksi. Näytölle luotiin kuvaajat voima-amplitudista, sekä siniaaltona, että suorana. Alemmassa kuvaajassa näkyy valkoisella piirrettyä myös venymä, kun venymäliuska on kytkettyä laitteistoon. Kuormitus syklien lukumäärälle, väsymiskestävyydelle ja väsytykskokeen kestoajalle tehtiin myös digitaaliset mittarit.

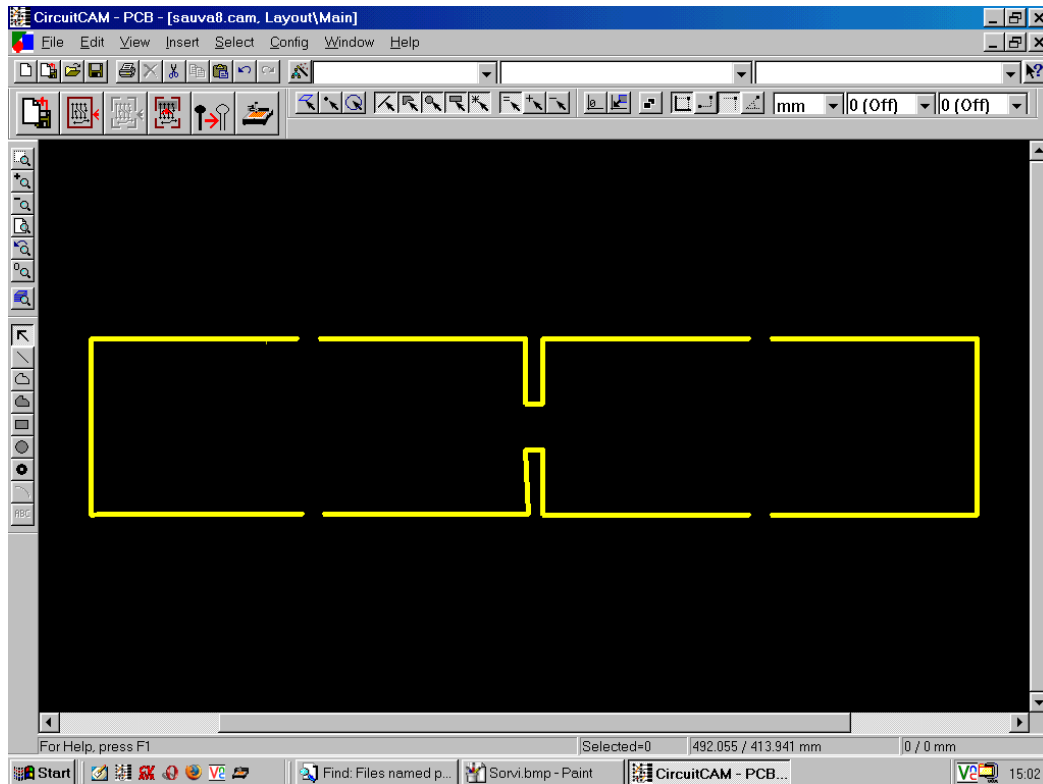
Koesauvat piirrettiin valmistusta varten piirilevyn suunnitteluohjelmalla (PADS). Kuvassa 4.12 on esitettyä PADS-ohjelmalla piirretty koesauva.



Kuva 4.12. PADS-ohjelmalla piirretty koesauva.

Seuraavaksi kuva siirrettiin käsittelyohjelmaan (Circuit Cam). Tällä ohjelmalla koesauvan kuva muunnettiin CNC-jyrsimen käyttöohjelman edellyttämään muotoon.

Kuvassa 4.13 koesauva on Circuit Cam ohjelman näytöllä.



Kuva 4.13. Koesauva Circuit Cam-ohjelman näytöllä.

Koesauvan aihioon lisättiin myös kuvassa katkoksina näkyvät kiinnityskannakset. Niiden avulla jyrситyt koesauvat pysyvät jyrсinnän aikana kiinni materiaaliarkissa.

5 TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen keskeisimmät tulokset ja arvioidaan niitä. Kokeet tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikan laboratoriossa. Koska virranke-räysnauhan väsymiskestävydestä ei aikaisemmin ole tehty vastaavia mittauksia, ei saa-duille tuloksille ole suoraa vertailupohjaa.

Tulosten oikeellisuutta on mahdollista arvioida vain tutkimalla kokeen suorittami-seen liittyviä muuttujia. Tutkimuksen tulosten perusteella virranke-räysnauha täyttää kaikkien tutkittujen materiaalien osalta sekä väsymiskestävyydelle, että sähkönjohta-vuudelle asetetut vaatimukset.

5.1 Väsytykokeiden keskeiset tulokset

Kullekin testimateriaalille tehtiin viisi väsytyksoetta vuorokautista lämpötilanvaihtelua vastaavalla voima-amplitudilla, joka vastasi venymää 1700 mikrometriä/metri. Tehdyt väsytyksokeet osoittivat, että kaikki testatut materiaalit kestivät murtumatta mainittua kuormitusta yli kestävyystavoitteena olleen 30 käyttövuoden ajan. Seuraavaksi samalla voima-amplitudilla tehdyn viiden kokeen sarjan tulokset osoittivat, että kaikki testatut materiaalit kestävät yli 200 vuotta normaalien käyttöolosuhteiden mukaisesta lämpötilan vuorokautisesta vaihtelusta aiheutuvaa rasitusta, joten tavoitteena ollut 30 vuoden kes-toikä ylittyi selkeästi. Virranke-räysnauhan valmistajan kanssa oli sovittu, että testi kes-keytetään, kun 200 vuoden väsymiskestävyysikä saavutetaan.

Seuraavaksi etsittiin pienin murtumaan johtanut voima-amplitudi. Sen löytämiseksi tehtiin väsytyksokeita nostaan voima-amplitudia 10 Newtonin portain. Koetta jatkettiin, kunnes 200 vuoden kestoikä saavutettiin ja koe keskeytettiin, tai murtuma ilmeni. Sa-malla tavalla etsittiin murtuman aiheuttanut voima-amplitudi kaikille testattaville tuot-teille.

Tuloksista ilmeni, että murtumaan johtava voima-amplitudi on jokaisella materiaalilla erisuuruinen. Materiaalin pinnoittaminen nostaa murtuman aiheuttavaa voima-amplitudia kaikilla eri parametreilla valmistetuilla tuotteilla. Tulosten perusteella pin-noittaminen parantaa virranke-räysnauhan väsymiskestävyttä. Toimitustapa suo-ra/kelattu ei tulosten mukaan vaikuta murtuman aiheuttavaan voima-amplitudiin.

Saadut tulokset esitetään taulukossa 5.1. Murtuman aiheuttava voima-amplitudi oli sama sekä suorana, että kelattuna toimitetuilla tuotteilla.

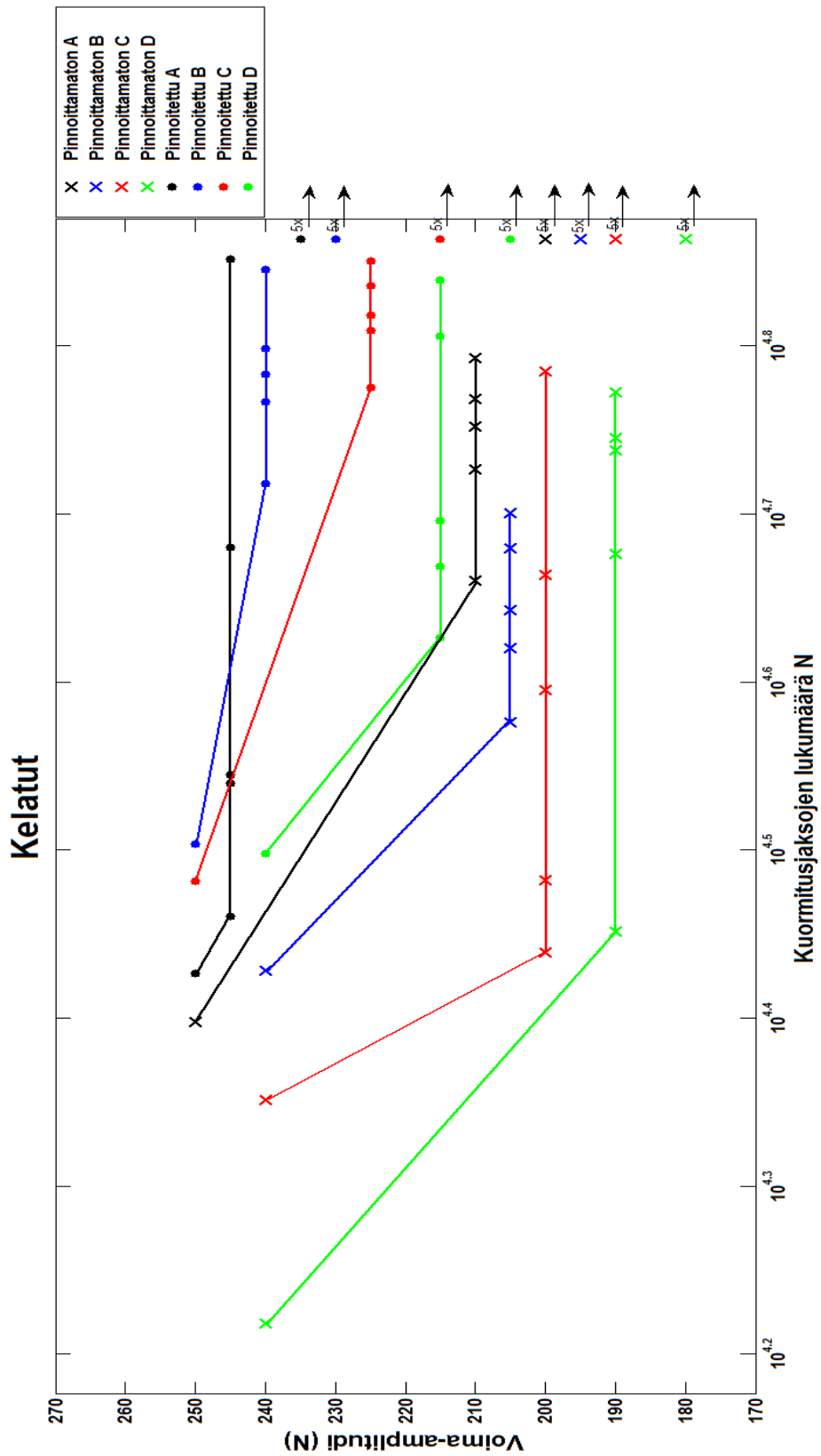
Taulukko 5.1. Murtumaan johtava voima-amplitudi materiaaleittain.

Materiaali	Murtuman aiheuttava voima-amplitudi (N)
Pinnoittamaton A	210
Pinnoittamaton B	205
Pinnoittamaton C	200
Pinnoittamaton D	190
Pinnoitettu A	245
Pinnoitettu B	240
Pinnoitettu C	225
Pinnoitettu D	215

Murtumaan johtavan voima-amplitudin määrittämisen jälkeen jokaiselle testimateriaalille tehtiin viisi väsytyiskoetta murtuman aiheuttavalla alimmalla voima-amplitudilla. Sen jälkeen tehtiin jokaiselle testimateriaalille vielä viisi väsytyiskoetta 10 Newtonia alemmalla voima-amplitudilla. Liitteissä 1-4 esitetään väsytyiskoekiden tulokset taulukoituna materiaaleittain. Materiaalikohtaisten pienimpien murtumaan johtavien voima-amplitudien määrittämiseksi tehtyjen kokeiden tuloksia ei ole taulukoitu. Taulukoiduista tuloksista laadittiin murtuman aiheuttaneen voima-amplitudin, sitä selkeästi suuremman ja sitä 10 Newtonia alemman voima-amplitudin tulosten osalta Wöhler-käyrät.

Murtuman aiheuttaneella voima-amplitudilla saadut tulokset muodostavat jokaisen materiaalin osalta Wöhler-käyrän vaakasuoran osan. Tämä on kyseisen materiaalin vaihtolujuus, eli tätä pienemmällä voima-amplitudilla koekappale ei milloinkaan murru ennen 200 vuoden väsymiskestävyysikä. Kunkin materiaalin Wöhler-käyrän aikalujuusosa on saatu yhdistämällä suuremman voima-amplitudin murtuman aiheuttanut kuormitusjaksojen lukumäärä alemman voima-amplitudin pienimpään murtuman aiheuttaneeseen kuormitusjaksojen lukumäärään. Murtuman aiheuttanutta voima-amplitudia 10 Newtonia alemmalla saadut tulokset on esitetty kuvissa 5.1 ja 5.2 200 vuoden väsymiskestävyysikä kohdalla yhdellä pisteellä merkinnällä 5x ja nuolella, joka osoittaa, että murtumaa ei tapahdu $7,3 \times 10^4$ kuormitusjaksolla, joka vastaa 200 vuoden käyttöikä.

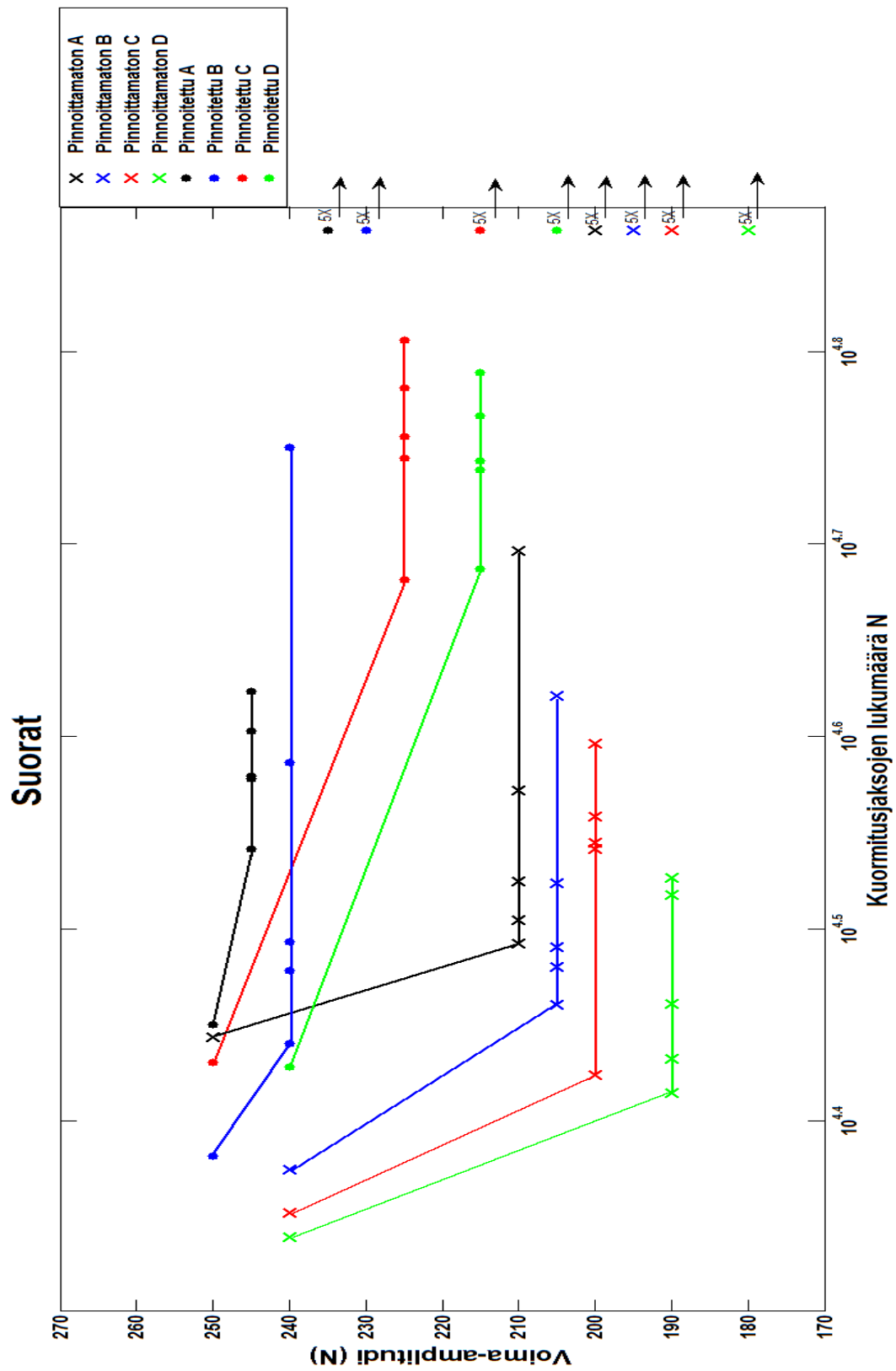
Kuvassa 5.1 esitetään kelattuna toimitettujen materiaalien Wöhler-käyrät.



Kuva 5.1. Kelattuna toimitettujen näyttemateriaalien Wöhler-käyrät.

Kuvaajasta ilmenee, että pinnoitettujen materiaalien murtumiseen tarvitaan suurempi voima-amplitudi pinnoittamattomiin verrattuna. Murtuman aiheuttava kuormitusjaksojen lukumäärä vaihtelee kaikilla tuotteilla jonkin verran. Kaikilla testatuilla materiaaleilla voima-amplitudin nostaminen lyhentää selkeästi väsymiskestävyyssikää. Pinnoitetuilla ja pinnoittamattomilla tuotteilla saavutettujen väsymiskestävyyssikätulosten hajonta on pienempi matalamman voima-amplitudin tuloksien hajontaan verrattuna. Pinnoituksella saavutettava hyöty pienenee tulosten perusteella voima-amplitudin noustessa.

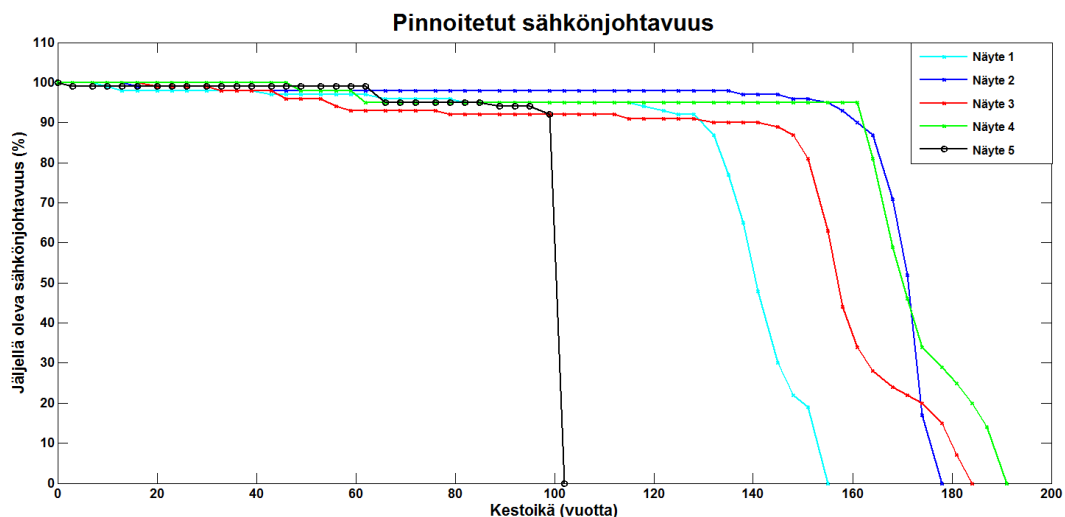
Kuvassa 5.2 esitetään suorana toimitettujen materiaalien Wöhler-käyrät.



Kuva 5.2. Suorana toimitettujen näyttemateriaalien Wöhler-käyrät.

Murtuman aiheuttava voima-amplitudi oli sama sekä kelatuilla, että suorilla materiaaleilla. Siitä huolimatta suorien materiaalien väsymiskestävyytikä on jonkin verran lyhempi kelattuna toimitettuihin materiaaleihin verrattuna. Tämä koskee varsinkin pinnoittamattomia tuotteita. Saatujen tulosten hajonta on, varsinkin materiaalikohtaisesti, pienempi kuin kelatuilla tuotteilla.

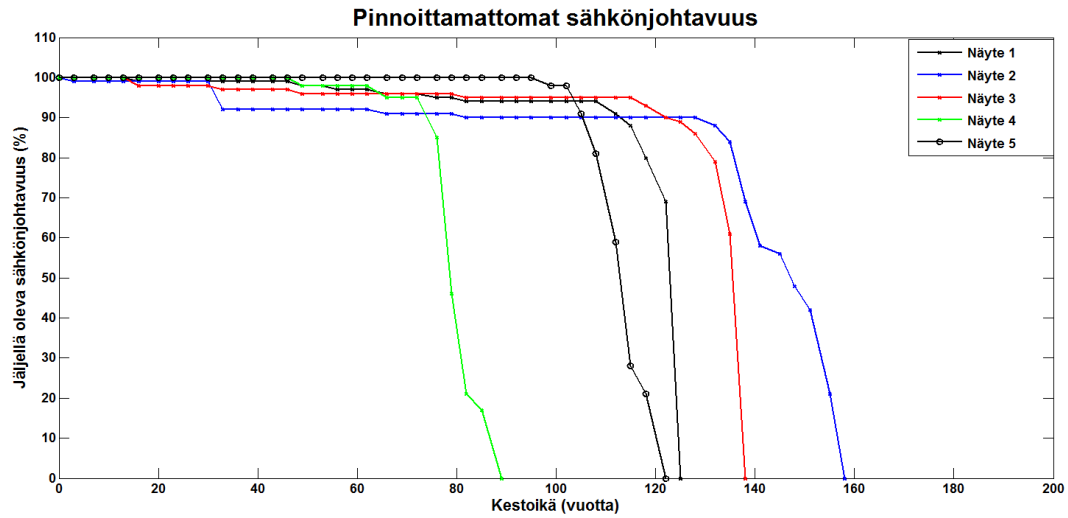
Väsytykskokeiden kanssa samanaikaisesti tehdyt sähkönjohtavuuden mittaukset osoittivat, että virrankeräysnauhan sähkönjohtavuuskyky säilyy lähes alkuperäisellä tasolla suurimman osan väsymiskestävyytiästä. Mittausten tulokset esitetään liitteissä 5 ja 6. Ennen väsytykskokeiden aloittamista mitatuista tuloksista saatua johtavuusprosenttia käytetään referenssiarvona, eli se vastaa kuvaajissa tasoa 100 %. Kokeiden aikana mitatut arvot on suhteutettu referenssiarvoihin, joten kuvaajista on suoraan nähtävissä materiaaleittain sähkönjohtavuuskyvyn aleneminen käyttöiän noustessa. Kaikki mittaukset on tehty A:lla merkityillä materiaaleilla. Kuva 5.3 esittää sähkönjohtavuuskyvyn muutoksen väsymiskestävyytiän funktiona pinnoitetuilla materiaaleilla.



Kuva 5.3. Sähkönjohtavuuskyvyn muutos väsymiskestävyytiän funktiona pinnoitetuilla materiaaleilla.

Tehdyistä mittauksista neljä antoi hyvin samankaltaiset tulokset. Sähkönjohtavuuskyky säilyy kaikissa mittauksissa yli 90 % tasolla alkuperäiseen verrattuna yli 100 vuoden käyttöikää vastaavan ajan. Vain yhdessä tapauksessa johtavuuskyky putoaa lähes pysytysuoraan nolnaan. Muissa mittauksissa on havaittavissa putoamisnopeuden alenemista ennen näytteen lopullista rikkoutumista. Sähkönjohtavuuskyky laskee pinnoitetuilla materiaaleilla sallitun 85 % rajan alapuolelle 10- 20 vuotta ennen nauhan rikkoutumista.

Kuva 5.4 esittää sähkönjohtavuuskyvyn muutoksen väsymiskestävyyksiän funktiona pinnoittamattomilla materiaaleilla.



Kuva 5.4. Sähkönjohtavuuskyvyn muutos väsymiskestävyyksiän funktiona pinnoittamattomilla materiaaleilla.

Myös pinnoittamattomilla näytteillä tehdyistä mittauksista neljä antoi samankaltaiset tulokset. Pinnoittamattomien tuotteiden kestoiät jäivät näissäkin mittauksissa lyhyemmiksi pinnoitettuihin verrattuna. Pinnoittamattomilla tuotteilla johtavuus putoaa nolnaan ilman pinnoitetuilla havaittua hidastumista. Johtavuus säilyy yli 90 % tasolla yli 100 vuotta myös pinnoittamattomilla tuotteilla. Pinnoituksella ei ole vaikutusta sähkönjohtavuuskyvyn säilymiseen. Sähkönjohtavuuskyky laskee pinnoittamattomilla materiaaleilla sallitun 85 % rajan alapuolelle 5- 10 vuotta ennen nauhan rikkoutumista.

Kuvaajista ilmenee, että virrankeräysnauhan sähkönjohtavuuskyky ei juuri alene alkuperäiseen verrattuna ensimmäisten 30 käyttövuoden aikana. Takuuehtojen määrittämä 85 % sähkönjohtavuuden säilyminen alkuperäiseen verrattuna täyttyy kokeiden tulosten perusteella. Tulosten pohjalta voidaan todeta myös, että sähkönjohtavuuskyvyn aleneminen on noin 10 % luokkaa lähes koko väsymiskestävyyksiän ajan ja varsinainen romahtaminen tapahtuu vasta murtumisen yhteydessä, pinnoittamattomalla materiaalilla selkeästi aikaisemmin pinnoitettuna verrattuna. Sähkönjohtavuusmittausten tulosten perusteella voidaan todeta, että virrankeräysnauhan mikrorakenne vaurioituu käytännöllisesti katsoen yhtä nopeasti pinnoitettuna, kuin pinnoittamattomanakin. Pinnoite siirtää näin ollen pelkästään täydellisen rikkoutumisen ajankohtaa.

5.2 Tulosten arviointi

Tulosten oikeellisuuteen ja vertailukelpoisuuteen vaikuttavia tekijöitä olivat valmistettujen koesauvojen yhtäläisyys, virrankeräysnauhan käsittely koekappaleiden valmistuksen yhteydessä, virrankeräysnauhan ja koesauvan välisen liimauksen pitävyys ja väsytykskoeksessa käytetyn voima-amplitudin oikeellisuus.

Koesauvat valmistettiin CNC-ohjatulla piirilevyjyrsimellä. Valmistustapa varmisti koesauvojen yhtäläisyyden. Tyhjille koesauvoille tehtyjen venymäliuskatestien perusteella myös niiden materiaali oli riittävän tasalaatuista. Näillä perusteilla väsytykskoeksista saadut tulokset ovat koesauvojen osalta vertailukelpoisia.

Virrankeräysnauhan käsittely näytteen valmistuksen yhteydessä oli nauhan pehmyyden vuoksi erittäin hankalaa. Käsittelyssä noudatettiin huolellisuutta ja varovaisuutta niissä puitteissa, kuin se oli mahdollista. Käsittelyn aiheuttamia virheitä pyrittiin eliminoimaan valmistamalla useampia koekappaleita. Kaikki käsittelyn aiheuttamien virheiden vuoksi muista poikkeavat koekappaleet hylättiin ennen väsytykskoeksia. Niiden tilalle valmistettiin uudet koekappaleet, jotka täyttivät vaatimukset.

Koemateriaali liimattiin koesauvan päälle Loctiten valmistamalla Super Glue 3 pikaliimalla. Liimaa levitettiin jokaisen koesauvan päälle aina saman verran. Liimausten annettiin kuivua 24 tuntia ennen väsytykskoeksien aloittamista. Tällä menettelyllä pyrittiin varmistamaan, että liimasauma olisi aina saman paksuinen ja sen täysi lujuus olisi saavutettu. Koska liimasauma on aina jonkin verran joustava, ei liimasaumojia voida kaikissa tapauksissa pitää täysin samanlaisina. Liimasaumojen aiheuttamaa koetulosten vaihtelua on mahdollista arvioida ainoastaan tekemällä useita koeksia ja tarkastella eroavaisuuksia tuloksissa.

Väsytykskoeksia tehtiin materiaaleittain venymäliuskamittausten määrittämällä voima-amplitudeilla. Voima-amplitudi pidettiin vakiona voiman takaisinkytkennän avulla. Toinen vaihtoehto olisi ollut pitää venymä vakiona takaisinkytkennän avulla koeksien aikana. Vakiovenymä ei kuitenkaan vastaa todellista tilannetta, sillä lämpölaajenemisen aiheuttama rasitus aikaansaa virrankeräysnauhaan paikallista kuroutumista. Nauha pitelee kuroutuman kohdalta. Koeksissa käytettävä vakiovenymä ei kompensoi tätä, vaan koekappaleeseen kohdistuu todellista pienempi kuormitus.

Suurin vaikutus koetulosten oikeellisuuteen on voima-amplitudin suuruudella. Siihen aiheuttaa virhettä eri venymäliuskatestien tulosten pyöristetyn keskiarvon käyttäminen. Virhe olisi kuitenkin suurempi, mikäli käytettäisiin vain yhtä venymäliuskatestillä löydettyä voima-amplitudin arvoa. Voima-amplitudin määrittäminen ilman venymäliuskatestiä on puolestaan mahdotonta. Venymäliuskatestejä tehtiin viisi kappaletta jokaisella koemateriaalilla. Verrattaessa testien tuloksia keskenään (samalla materiaalilla tehtyjä

eri testikertoja, sekä eri materiaaleilla tehtyjä testisarjoja toisiinsa), havaitaan, että tulokset eivät poikkea toisistaan kovinkaan paljon. Suurimman ja pienimmän mitatun voima-amplitudin arvon ero on korkeintaan 10 Newtonia kaikilla materiaaleilla.

Tuloksia voidaan pitää mittaus- ja arviointivirheistä huolimatta riittävän tarkkoina todelliseen tilanteeseen, eli vuorokautiseen lämpötilanvaihteluun verrattuna. Sekään ei pysy jatkuvasti vakiona, vaan vaihtelee useasta eri tekijästä, kuten säätilasta, johtuen.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämä tutkimus alkoi kuparin väsymiseen liittyvien tekijöiden tarkastelulla. Kuparin mikrorakenne ja sen sisältämät hilaviat määrittävät valmistustilan ohella pääasiallisesti kuparin ominaisuudet, kuten sen käyttäytymisen jaksottaisen mekaanisen kuormituksen alaisena. Kuparin ominaisuuksiin eniten vaikuttava hilavika on dislokaatio.

Seuraavaksi tarkasteltiin kuparin väsymistä, joka alkaa murtuman ydintymisestä ja jatkuu särön etenemisellä. Murtuman ydintyminen tapahtuu yleisesti tasaisesta pintarakenteesta poikkeavissa kohdissa, kuten huokosissa tai ulkonemissa. Ne ovat samalla paikallisten jännityshuippujen esiintymisalueita. Ydintyneet murtumat alkavat kasvaa ja edetä joko raerajoja pitkin tai rakeiden läpi. Murtuman eteneminen jatkuu, kunnes rasituksen alaisena oleva kappale rikkoutuu. Metallien murtumisessa on havaittavissa kaksi erilaista murtumistyyppiä, eli hauras ja sitkeä murtuminen. Väsyminen jaetaan myös kahteen eri tyyppiin; jännityksen tai venymän hallitsemaan väsymiseen. Tutkimuskohteenä ollut kuparista valmistettu virrankeeräysnauha joutuu käyttöolosuhteissaan alttiiksi jaksottaiselle kuormitukselle, mikä aiheuttaa nauhaan vuoroin veto- ja puristusjännitystä. Kyseessä on näin ollen jännityksen hallitsema väsyminen.

Teoreettisen tarkastelun jälkeen tehtiin testimateriaalille väsytykskojeita, joita varten valmistettiin koesauvoja. Valmistusvaiheessa testattiin useita eri paksuisia ja muotoisia sauvoja. Sauvan keskiosan kavennuksen pituudella ja muodolla, kuten myös sauvan paksuudella havaittiin olevan suuri vaikutus testin tuloksiin. Mikäli sauva oli liian paksua materiaalia, tai kavennusosa liian lyhyt, ei testattavaa nauhaa saatu murtumaan. Jos kavennusosa oli liian pitkä, nauha ei murtunut, vaan liimasaumat irtosivat. Mikäli koesauva valmistettiin liian ohuesta materiaalista, tapahtui puristavan rasitusjakson aikana koesauvan lommahtaminen. Vaikka nauha saatiin murtumaan, eivät tulokset lommahtamisen vuoksi vastanneet todellista tilannetta.

Koesauvan ja testattavan nauhan välinen liimasauma osoittautui tärkeäksi tekijäksi tulosten oikeellisuuden kannalta. Käytettävän liiman tuli olla metallin liimaukseen soveltuvaa, nopeasti kuivuvaa ja liimasauman mahdollisimman ohut, jäykkä ja pitävä.

Tehtyjen väsytykskokeiden tulokset osoittavat, että kaikki testattavana olleet versiot aurinkopaneelin virrankeräysnauhoista kestävät aurinkopaneelien normaalien käyttöolosuhteiden aiheuttamaa lämpölaajenemisrasitusta murtumatta yli 200 vuotta. Aurinkopaneelien valmistajat joutuvat antamaan valmistamilleen tuotteille 25 vuoden kestävyystakuun. Virrankeräysnauhan osalta nämä takuuvaatimukset ylittyvät selvästi. Väsytystestien kanssa samanaikaiset virrankeräysnauhan sähkönjohtavuuskyvyn mittaukset osoittivat, että aurinkopaneeleille asetetut sähkönjohtavuuskyvyn säilymisvaatimukset toteutuvat virrankeräysnauhan osalta. Testeissä ilmeni, että pinnoittamattomilla materiaaleilla johtavuus putoaa suoraviivaisemmin nolnaan, kuin pinnoitetuilla, vaikka sähkönjohtavuuskyvyn heikkeneminen alkaa samassa vaiheessa väsymiskestävyysikä. Tästä voidaan päätellä, ettei pinnoittaminen paranna virrankeräysnauhan väsymiskestävyyttä, vaan ainoastaan siirtää täydellisen rikkoutumisen ajankohtaa. Sähkönjohtavuusmittauksia suunniteltaessa esiin tullut epäily siitä, että mittakärjet voivat aiheuttaa koekappaleeseen väsymisvaurion, osoittautui todeksi. Mittakärjet painettiin koekappaleen pintaan mahdollisimman pienellä voimalla, mutta siitä huolimatta osassa mittauksista murtuma ydintyi mittakärjen kohdalle. Tämänlaisessa tapauksessa mittapää toimi johtimena murtumakohdan yli ja tulokset olivat käyttökelvottomia.

Eri koekappaleilla tehtyjen testien tulokset vaihtelevat samankin materiaalin osalta väsytykskokeiden tuloksille ominaisella tavalla jonkin verran toisistaan. Jos verrataan eri materiaalien kestämiä kuormitusjaksojen lukumääriä, on hyvin vaikeaa määrittellä, mikä materiaali kestää väsymistä paremmin ja mikä huonommin. Jos vertailuperusteena käytetään voima-samplitudia ja sen kautta venymää, jonka eri materiaaleista valmistetut nauhat kestävät murtumatta, voidaan testatut materiaalit asettaa paremmuusjärjestykseen. Kun venymän sijasta käytetään sitä vastaavaa vuorokautista lämpötilaeroa, nähdään testien tuloksista suoraan, mikä materiaali kestää suurinta vuorokautista lämpötilanvaihtelua.

Osa testatuista virrankeräysnauhoista oli pinnoitettu tinalyijyhopeaseoksella. Pinnoitus parantaa jonkin verran virrankeräysnauhan väsymiskestävyyttä. Pinnoitettu nauha kestää murtumatta pinnoittamattomaan verrattuna suurempaa voima-amplitudia, eli sitä voitaisiin käyttää normaaleja käyttöolosuhteita vaativammassa oloissa ja asetetut takuuvaatimukset saavutettaisiin. Testit osoittivat myös, että materiaalin raekoolla on jonkin verran vaikutusta nauhan väsymiskestävyteen. Erot olivat kuitenkin niin pieniä, että normaaleissa käyttöolosuhteissa niillä ei ole käytännön merkitystä. Testatuista virrankeräysnauhoista väsymiskestävyydeltään parhaaksi osoittautui pinnoitettu A:lla merkitty koemateriaali, kun taas huonoin väsymiskestävyys oli pinnoittamattomalla A:lla merkityllä koemateriaalilla. Tulosten perusteella pehmeämpi virrankeräysnauha on väsymiskestävyydeltään kovempaa parempi. Kun nauhat pinnoitetaan pehmeällä tinalyijyhopeakerroksella, väsymiskestävyys paranee tulosten perusteella kovemmilla nauhalaa-
duilla pehmeämpiä enemmän.

Väsytestien aikana ilmeni, että kun voima-amplitudi pidettiin vakiona, sen aiheuttama venymä kasvoi aivan testin alussa ja alkoi sen jälkeen pienentyä. Testiä jatkettaessa venymä alkoi taas vähitellen kasvaa. Venymän kasvu jatkui, kunnes testattava nauha murtui. Havaittu muutos venymässä noudattaa plastisen muodonmuutoksen teoriaa. Alussa nauha myötää ja venymä kasvaa. Sen jälkeen kuormittavan voiman vaikutuksesta nauhassa tapahtuu muokkauslujittumista. Saman venymän saavuttamiseksi tarvittaisiin enemmän voimaa, mutta koska voima pysyi vakiona, venymä pieneni.

Tulosten perusteella ilmenee, että hyvin pieni muutos voima-amplitudissa aiheuttaa nauhan murtumisen, kun vaihtolujuus on saavutettu. Murtuman aiheuttava voima-amplitudi oli vain 10 Newtonia suurempi, kuin se jolla nauha vielä kesti murtumatta yli 200 vuotta aurinkopaneelin käyttöolosuhteissa. Murtuman aiheuttavan voima-amplitudin muutoksen todettiin olevan sama kaikilla testatuilla materiaaleilla riippumatta siitä, oliko näyte pinnoitettu vai ei. Lisäksi oli merkittävää, että murtuma tapahtui suuremmalla voima-amplitudilla kaikilla viidellä koekappaleella ja nauha kesti murtumatta 10 Newtonia alemmalla voima-amplitudilla niin ikään kaikilla viidellä koekappaleella kaikilla testatuilla materiaaleilla.

Koska virrankeräysnauhan väsymiskestävyyttä ei aikaisemmin ole mitattu vastaavilla kokeilla, ei testin tuloksille ole suoranaista vertailupohjaa. Nauhan väsymiskestävyyttä ei osattu testiä suunniteltaessa arvioida kovinkaan tarkasti. Ainoa tiedossa ollut peruste oli valmistajan antamien takuiden edellyttämä 25 vuoden vähimmäiskestävyys. Tämä tavoite saavutettiin tehtyjen testien perusteella selvästi. Tulosten oikeellisuuteen vaikuttaa eniten se, miten hyvin testien järjestelyt ja käytetyt menetelmät vastaavat todellista tilannetta. Myös koemateriaalin käsittelyllä on suuri vaikutus tulosten oikeellisuuteen. Luotettavien ja yleispätevien tulosten saamiseksi on tehtävä lisää kokeita, samalla ja mahdollisesti myös muilla väsytestien suoritusmenetelmillä.

Tehdyt väsytestit onnistuivat hyvin. Kun tuloksia verrataan takuissa vaadittaviin arvoihin ja arvioidaan itse aurinkokennojen kestävyyttä, voidaan sanoa, että tulokset ovat riittävän tarkkoja ja tälle tutkimukselle asetetut tavoitteet saavutettiin. Tämä tutkimus keskittyi virrankeräysnauhan suoraan, juottamattomaan osaan aurinkokennojen välissä. Mahdollisia uusia virrankeräysnauhaan liittyviä tutkimuskohteita olisivat itse juotoskohtiin, tai virrankeräysnauhan taivutuksiin kohdistuvan rasituksen tarkastelu.

LÄHTEET

- [1] Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P., Tuomikoski, J., 1995 Konetekniikan materiaalioppi. 4. painos. Helsinki, Painatuskeskus Oy.
- [2] Callister, W.D. Jr. 1999. Materials Science and Engineering. 5. painos. New York, USA. Wiley & Sons Inc.
- [3]. Kivivuori, S., 2003. Muokkaustekniikan perusteet. 1.painos. Helsinki, Teknillinen korkeakoulu.
- [4] Nevalainen, H. 1984. Teräsopas. 2.painos. Helsinki, Teknillinen tarkastuskeskus.
- [5] H.M. Miekko-oja 1965. Metalliooppi. 3. painos. Helsinki, Otava.
- [6] Niemi, P. 2010. Aineen koestus. Tampereen ammattiopisto. [WWW]. [Viitattu 22.8.2012]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/PN_jalkikasittely_K.pdf
- [7] Janssen, M., Zuidema, J., Wanhill, R. 2002. Fracture Mechanics. 2. painos. New York, USA. Spon Press.
- [8]. Lukas, P., Kunz, L. 2003. Small Cracks.Nucleation, Growth and Implication to Fatigue Life. International Journal of Fatigue. Numero 25, artikkelit 9-11. ss. 855-862
- [9] Pryzbyla, G., Prasannavenkatesan, R., Salajegheh, N., McDowell, D. 2010. Microstructure Sensitive Modeling of High Cycle Fatigue. International Journal of Fatigue. Numero 32, artikkeli 3. ss. 512-515
- [10] Scripta Materialia. April 2009. Numero 60, artikkeli 8. ss. 729-732
- [11]] Zhang, J., Jiang, Y. 2006. Fatigue of Polycrystalline Copper With Different Grain Sizes and Texture. International Journal of Plasticity. Numero 22, ss. 536-556
- [12] Metalliteollisuuden Keskusliitto, Laakso, L. 2001. Raaka-ainekäsikirja 3 Kuparimetallit. 2. painos. Helsinki, Metalliteollisuuden kustannus Oy.
- [13] Baras, J., Xiaobo, T., 2002. Modeling and Control of Magnetosrictive Actuators. Automatica Numero 40 ss. 1469-1480
- [14] Lapp, T., 2009. Aurinkovoimalan käyttö lisäenergian lähteenä Kiilto Oy:ssä. Diplomityö. Tampere. Tampereen teknillinen yliopisto. ss.51-52

- [15] Jarnason, S., Decade of Photovoltaic Module Accelerated Testing and Warranty Returns. [WWW]. [Viitattu 27.11.2012]. Saatavissa: http://www.interpv.net/market/market_view.asp?idx=773&part_code=05
- [16] Creteigny, L., Saxena, A. 2001. AFM Characterization of the Evolution of Surface Deformation During Fatigue in Polycrystalline Copper. Acta Materialia Numero 49, artikkeli 18. ss. 3755-3765
- [17]] Ghammouri, M. Abbadi, M., Mendez, J., Belouettar, S., Zenasni, M. 2011. An Approach in Plastic Strain Controlled Cumulative Fatigue Damage. International Journal of Fatigue. Numero 33 ss. 265-272
- [18] Aumala, O. 2003. Mittaustekniikan perusteet 12.painos. Helsinki. Otatieto
- [19] Transducer Techniques datalehti. [WWW]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.transducertechniques.com/load-cell.aspx>
- [20] Venymäliuska-anturit. Savonia-ammattikorkeakoulu.[WWW]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: http://webd.savoniaamk.fi/projektit/moodlepublic/tewa/KnowPap_3_englanti/suomi/automation/10_process_measurements/1_basic_meas/5_weight/sensors/fr_text.htm#Venymaliuska_anturit
- [21]] MIP mittalaitteet. [WWW]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://www.mip.fi/cms/fi/mittalaitteet/vaeraehtely/vaeraehtelyanturit/mmftaerinaeanturit/voima-anturit>
- [22] National Instruments Multifunction Data Acquisition X-Series datalehti. [WWW]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: <http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-153/lang/fi>
- [23] Kyowa DBU-120A Datalehti. [WWW]. [Viitattu 6.11.2012]. Saatavissa: http://www.kyowa-ei.co.jp/eng/product/acquisition/logger/dbu_120a.html

LIITE 1: Väsytykokeiden tulokset, pinnoittamaton kelattu materiaali

A pinnoittamaton kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	210	2600	154,8	56 502
6	210	2600	170	62 050	10	210	2600	160,8	58 692
7	210	2600	125,3	45 734	11-15	200	2500	yli 200	yli 73 000
8	210	2600	146,3	53 290	16	250	3300	68,4	24 972

B pinnoittamaton kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	205	2700	114,3	41 720
6	205	2700	137,5	50 187	10	205	2700	131,1	47 815
7	205	2700	103,2	37 668	11-15	195	2600	yli 200	yli 73 000
8	205	2700	120,3	43 909	16	240	3300	73,4	26 797

C pinnoittamaton kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	140	1700	yli 200	yli 73 000	9	200	2700	126,3	46 126
6	200	2700	167	60 955	10	200	2700	75,3	27 474
7	200	2700	83,1	30 331	11-15	190	2600	yli 200	yli 73 000
8	200	2700	107,9	39 392	16	240	3300	61,5	22 447

D pinnoittamaton kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	130	1700	yli 200	yli 73 000	9	190	2700	130,1	47 456
6	190	2700	77,5	28 293	10	190	2700	163,1	59 218
7	190	2700	152,3	55 589	11-15	180	2600	yli 200	yli 73 000
8	190	2700	149,8	54 682	16	240	3300	45,3	16 540

LIITE 2: Väsytykskokeiden tulokset, pinnoitettu kelattu materiaali

A pinnoitettu kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	245	3100	131	47 849
6	245	3100	194,5	71 006	10	245	3100	96,1	35 078
7	245	3100	95,1	34 636	11-15	235	3000	yli 200	yli 73 000
8	245	3100	79,1	28 871	16	250	3300	73,1	26 691
B pinnoitettu kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	240	3000	166,1	60 662
6	240	3000	192	70 080	10	240	3000	172,1	62 829
7	240	3000	143	52 224	11-15	230	2900	yli 200	yli 73 000
8	240	3000	160,2	58 473	16	250	3300	87,3	31 859
C pinnoitettu kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	225	2900	187,6	68 505
6	225	2900	176,6	64 462	10	225	2900	194,2	70 889
7	225	2900	180,2	65 786	11-15	215	2800	yli 200	yli 73 000
8	225	2900	163,2	59 596	16	250	3300	83	30 302
D pinnoitettu kelattu									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	140	1700	yli 200	yli 73 000	9	215	2900	175,1	63 936
6	215	2900	189,2	69 079	10	215	2900	127,7	46 620
7	215	2900	136	49 654	11-15	205	2800	yli 200	yli 73 000
8	215	2900	115,8	42 281	16	240	3300	86,2	31 475

LIITE 3: Väytyskokeiden tulokset, pinnoittamaton suora materiaali

A pinnoittamaton suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	210	2600	85,1	31 079
6	210	2600	87,5	31 944	10	210	2600	136,1	49 696
7	210	2600	102,2	37 319	11-15	200	2500	yli 200	yli 73 000
8	210	2600	91,7	33 476	16	250	3300	76,1	27 786
B pinnoittamaton suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	205	2700	84,8	30 935
6	205	2700	91,5	33 407	10	205	2700	114,5	41 809
7	205	2700	82,9	30 210	11-15	195	2600	yli 200	yli 73 000
8	205	2700	79,1	28 876	16	240	3300	64,9	23 710
C pinnoittamaton suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	140	1700	yli 200	yli 73 000	9	200	2700	96	35 054
6	200	2700	72,7	26 550	10	200	2700	95,3	34 782
7	200	2700	99,1	36 167	11-15	190	2600	yli 200	yli 73 000
8	200	2700	108,1	39 483	16	240	3300	61,7	22 505
D pinnoittamaton suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	130	1700	yli 200	yli 73 000	9	190	2700	90,2	32 943
6	190	2700	74,1	27 051	10	190	2700	71,1	25 962
7	190	2700	92	33 603	11-15	180	2600	yli 200	yli 73 000
8	190	2700	79,2	28 917	16	240	3300	59,9	21 872

LIITE 4: Väsytykskokeiden tulokset, pinnoitettu suora materiaali

A pinnoitettu suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	245	3100	104	37 960
6	245	3100	103,6	37 842	10	245	3100	109,3	40 080
7	245	3100	95,3	34 783	11-15	235	3000	yli 200	yli 73 000
8	245	3100	115	41 995	16	250	3300	77,2	28 188
B pinnoitettu suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	240	3000	105,6	38 565
6	240	3000	154,3	56 299	10	240	3000	93,5	31 124
7	240	3000	82,4	30 080	11-15	230	2900	yli 200	yli 73 000
8	240	3000	75,5	27 555	16	250	3300	66,1	24 094
C pinnoitettu suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	150	1700	yli 200	yli 73 000	9	225	2900	152,2	55 560
6	225	2900	156,1	56 988	10	225	2900	175,2	63 960
7	225	2900	165,4	60 394	11-15	215	2800	yli 200	yli 73 000
8	225	2900	131,6	48 038	16	250	3300	73,8	26 937
D pinnoitettu suora									
Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys		Testi n:o	Voima-	Venymä	Kestävyys	
	amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa		amplitudi N	µm/m	Vuotta	Jaksoa
1-5	140	1700	yli 200	yli 73 000	9	215	2900	150,1	54 789
6	215	2900	151,6	55 363	10	215	2900	160,1	58 440
7	215	2900	133,2	48 647	11-15	205	2800	yli 200	yli 73 000
8	215	2900	168,6	61 561	16	240	3300	73,4	26 790

LIITE 5: Sähkönjohtavuusmittausten tulokset prosentteina

Käyttöikä Vuotta	Jäljellä oleva sähkönjohtavuuskyky prosentteina									
	Pinnoite tut					Pinnoittamattomat				
	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5	Näyte 1	Näyte 2	Näyte 3	Näyte 4	Näyte 5
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
3	100	100	100	100	99	100	99	100	100	100
7	100	100	100	100	99	100	99	100	100	100
10	99	100	100	100	99	100	99	100	100	100
13	98	100	100	100	99	100	99	100	100	100
16	98	99	100	100	99	99	99	98	100	100
20	98	99	99	100	99	99	99	98	100	100
23	98	99	99	100	99	99	99	98	100	100
26	98	99	99	100	99	99	99	98	100	100
30	98	99	99	100	99	99	99	98	100	100
33	98	98	98	100	99	99	92	97	100	100
36	98	98	98	100	99	99	92	97	100	100
39	98	98	98	100	99	99	92	97	100	100
43	97	98	98	100	99	99	92	97	100	100
46	97	98	96	100	99	99	92	97	100	100
49	97	98	96	98	99	98	92	96	98	100
53	97	98	96	98	99	98	92	96	98	100
56	97	98	94	98	99	97	92	96	98	100
59	97	98	93	98	99	97	92	96	98	100
62	97	98	93	95	99	97	92	96	98	100
66	96	98	93	95	95	96	91	96	95	100
69	96	98	93	95	95	96	91	96	95	100
72	96	98	93	95	95	96	91	96	95	100
76	96	98	93	95	95	95	91	96	85	100
79	96	98	92	95	95	95	91	96	46	100
82	95	98	92	95	95	94	90	95	21	100
85	95	98	92	95	95	94	90	95	17	100
89	95	98	92	95	94	94	90	95	0	100
92	95	98	92	95	94	94	90	95		100
95	95	98	92	95	94	94	90	95		100
99	95	98	92	95	92	94	90	95		98
102	95	98	92	95	0	94	90	95		98
105	95	98	92	95		94	90	95		91
108	95	98	92	95		94	90	95		81
112	95	98	92	95		91	90	95		59
115	95	98	91	95		88	90	95		28
118	94	98	91	95		80	90	93		21
122	93	98	91	95		69	90	90		0
125	92	98	91	95		0	90	89		
128	92	98	91	95			90	86		
132	87	98	90	95			88	79		
135	77	98	90	95			84	61		
138	65	97	90	95			69	0		
141	48	97	90	95			58			
145	30	97	89	95			56			
148	22	96	87	95			48			
151	19	96	81	95			42			
155	0	95	63	95			21			
158		93	44	95			0			
161		90	34	95						
164		87	28	81						
168		71	24	59						
171		52	22	46						
174		17	20	34						
178		0	15	29						
181			7	25						
184			0	20						
187				14						
191				0						

LIITE 6: Venymäliuskatestien tulokset pinnoittamaton materiaali

Pinnoittamaton A

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	145	165	175	185	195	210	225	235	245
2	150	160	180	190	200	215	225	235	245
3	150	165	180	190	205	215	230	xxxxxxxx	xxxxxxxx
4	150	165	175	190	200	215	225	235	250
5	150	165	180	185	195	210	220	235	245

Pinnoittamaton B

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	145	155	170	180	190	200	210	220	230
2	150	160	175	185	195	205	215	225	235
3	150	165	175	190	205	215	230	240	xxxxxxxx
4	145	160	170	185	200	210	220	230	240
5	150	165	175	185	195	205	215	225	240

Pinnoittamaton C

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	140	150	165	180	190	205	215	230	245
2	145	155	165	175	185	200	215	230	240
3	140	150	160	170	180	195	215	230	240
4	150	160	170	180	190	205	220	235	245
5	145	160	170	180	190	205	220	235	245

Pinnoittamaton D

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	140	150	160	120	185	200	215	230	245
2	135	145	155	165	180	195	210	225	240
3	130	135	150	160	175	180	195	210	225
4	130	140	150	160	175	195	205	220	235
5	130	145	155	165	180	195	210	225	240

LIITE 7: Venymäliuskatestien tulokset pinnoitettu materiaali

Pinnoitettu A

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	160	175	185	200	215	230	245	240	250
2	155	165	175	190	205	220	240	235	245
3	155	170	185	200	215	230	245	245	255
4	150	165	175	185	200	215	230	245	xxxxxxxxxx
5	150	165	175	185	195	210	225	240	255

Pinnoitettu B

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	155	165	175	185	200	215	230	245	xxxxxxxxxx
2	145	160	165	175	190	210	225	235	245
3	145	160	175	180	195	210	225	240	xxxxxxxxxx
4	150	165	175	185	200	215	230	245	xxxxxxxxxx
5	150	165	175	190	205	220	235	250	xxxxxxxxxx

Pinnoitettu C

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	150	160	170	180	190	205	220	235	250
2	145	155	165	175	190	195	210	225	240
3	145	155	165	180	195	210	225	240	xxxxxxxxxx
4	155	165	180	190	205	220	235	250	xxxxxxxxxx
5	155	165	180	190	205	220	235	245	xxxxxxxxxx

Pinnoitettu D

Venymä ($\mu\text{m} / \text{m}$)

	1700	1900	2100	2300	2500	2700	2900	3100	3300
1	140	150	160	170	185	200	215	230	245
2	145	155	170	180	195	210	220	235	250
3	115	125	135	145	160	175	190	205	220
4	140	155	170	185	200	215	230	245	xxxxxxxxxx
5	150	180	145	205	220	235	255	xxxxxxxxxx	xxxxxxxxxx

LIITE 8: Näytteiden merkinnät

Valmistus parametri	Merkintä
-20 %	A
0 %	B
20 %	C
40 %	D