

Mikko Haverinen

Jyri Tiusanen

ORTOTROOPPISEN
LASIKUITULAMINAATIN OFF-AXIS
-VÄSYMINEN

Opinnäytetyö
Materiaalitekniikan koulutusohjelma


Toukokuu 2013



MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU

Mikkeli University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

 MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkelin University of Applied Sciences	Opinnäytetyön päivämäärä 10.5.2013.		
Tekijä(t) Mikko Haverinen, Jyri Tiusanen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Materiaalitekniikka		
Nimeke Ortotrooppisen lasikuitulaminaatin off-axis -väsyminen			
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Ahlstrom Glassfibre Oy:n Mikkelin yksikkö. Opinnäytetyö käsitteli lasikuitulujitettuja komposiitteja. Työssä tutkittiin off-axis- kulman vaikutusta staattisiin ominaisuuksiin ja väsymisominaisuuksiin. Työn tavoitteena oli kehittää nopea ja kustannustehokas menetelmä eri ro-ving-hartsin yhdistelmien väsymisominaisuuksien vertailuun.</p> <p>Työhön kuului kattava kirjallisuustutkimus. Tutkimus jaettiin useaan eri osa-alueeseen käsittelevään osaan. Lasikuidun ja lasikuitulaminaatin valmistusta ja ominaisuuksia käsitellään. Väsymisilmiö selvitetään. Myös väsytestaustukseen liittyviä muuttujia ja testausparametreja sekä koekappalegeometrian vaikutusta käsitellään. Kirjallisuuskartoituksen pohjalta valittiin testattavaksi neljä off-axis - kulmaa. Koekappaleet valmistettiin kolmesta eri laminaatista. Staattisten testien perusteella määritettiin laminaattien mekaaniset perusominaisuudet, ja ne toimivat pohjana väsytestaustuksen parametrien valinnassa.</p> <p>Staattisten off-axis - ominaisuuksien ja väsymisilmiön välillä löytyi korrelaatiota, mutta jatkotutkimuksille on todennäköisesti tarvetta. Alustava suunnitelma off-axis - väsymisominaisuuksien tutkimis- ja vertailumenetelmälle kehitettiin.</p>			
Asiasanat (avainsanat) Off-axis, komposiitti, laminaatti, väsyminen			
Sivumäärä 45+31	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">Kieli Suomi</td> <td style="width: 50%;">URN</td> </tr> </table>	Kieli Suomi	URN
Kieli Suomi	URN		
Huomautus (huomautukset liitteistä)			
Ohjaavan opettajan nimi Tapio Lepistö	Opinnäytetyön toimeksiantaja Ahlstrom Glassfibre Oy		

DESCRIPTION

 <p>MIKKELIN AMMATTIKORKEAKOULU Mikkeli University of Applied Sciences</p>		Date of the bachelor's thesis 10.5.2013
Author(s) Mikko Haverinen, Jyri Tiusanen	Degree programme and option Materials engineering	
Name of the bachelor's thesis Off-axis fatigue of an orthotropic laminate		
Abstract <p>The thesis was assigned by Ahlstrom Glassfibre's Mikkeli's plant. In this thesis the effect of an off-axis angle to static and fatigue properties in a unidirectional glass fiber reinforced laminate was studied. The main goal of the thesis was to determine an easy and relatively quick testing method for comparing the fatigue properties of different roving-resin combinations.</p> <p>Much of the study was conducted via literature research. The research was divided into several sections that focused on different aspects of the thesis. Properties and manufacture of glass fiber and GRFP laminate are discussed. Fatigue as a phenomenon is explained. The parameters and factors affecting fatigue testing and the effect of test specimen geometry is also discussed. Based on the literature research, four off-axis angles were selected for testing. Test specimens were manufactured from three different laminates and tested. The static tests were carried out to determine the basic mechanical properties of the laminates and acted as background data for fatigue testing.</p> <p>The correlation between static off-axis properties and fatigue life was found, although further study may be required. Preliminary testing method for studying and comparing off-axis fatigue properties cost-effectively was developed.</p>		
Subject headings, (keywords) Off-axis, composite, laminate, fatigue		
Pages 45+31	Language Finnish	URN
Remarks, notes on appendices		
Tutor Tapio Lepistö	Bachelor's thesis assigned by Ahlstrom Glassfibre Oy	

SISÄLTÖ

1.	JOHDANTO	1
2.	KOMPOSIITIT	2
2.1	Kuidut	3
2.2	Muovikomposiitin valmistus	4
2.3	Ortotrooppinen laminaatti.....	6
2.4	Viskoelastisuus	7
2.4.1	Viruminen	9
2.4.2	Relaksaatio.....	10
2.5	Laminaatin virheet.....	10
2.5.1	Huokoisuus	11
2.5.2	Kuitusuoruus	13
3.	VÄSYMINEN.....	13
3.1	Väsymiseen vaikuttavat tekijät	14
3.2	Väsymisraja	15
4.	KOEKAPPALEET.....	16
4.1	Geometria	16
4.2	Kuitusuunta.....	18
5.	TESTAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS	19
5.1	Off-axis- kulman vaikutus	19
5.1.1	Vauriokriteerit.....	20
5.1.2	Off-axis- kulman vaikutus moduuleihin	22
5.2	Taajuuden vaikutus	23
5.3	Kuormitustason vaikutus	25
5.4	R-arvon vaikutus.....	26
6.	KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS	28
6.1	Liimaus	29
6.2	Työstö	31
7.	STAATTISET TESTIT.....	32
7.1	Testivalmistelut.....	32
7.2	Staattisten testien suorittaminen	35
8.	VÄSYTYSTESTIT	37

9. TULOSTEN ANALYSOINTI.....	39
9.1 Staattiset testit.....	39
9.2 Väsytestit.....	43
10. POHDINTA	45
LÄHTEET.....	47

LIITTEET

- 1 O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät
- 2 J-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät
- 3 H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät
- 4 S-N - käyrät absoluuttisilla ja suhteellisilla jännitysarvoilla
- 5 Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot

1. JOHDANTO

1960-luvulta lähtien etenkin ilmailu-, rakennus- ja energia-alalla materiaaleilta on vaadittu parempia mekaanisia ominaisuuksia, kuten suurempaa jäykkyyttä ja lujuutta, ja samalla matalampaa tiheyttä /1, s. 3/. Perinteisillä materiaaleilla, kuten teräksillä, mekaanisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla käsittelyillä, mutta tiheyteen on lähes mahdotonta vaikuttaa. Tällöin kyseeseen tulevat komposiitit, joissa eri materiaaleja yhdistämällä aikaansaadaan monenlaisia ominaisuuksia, kuten korkeita lujuuksia ja matala tiheys.

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ortotrooppisen lasikuitulaminaatin väsymisominaisuuksia. Työssä selvitettiin sitä, löytyykö staattisten testien ja väsytestien tulosten välille korrelaatiota. Testit suoritettiin kolmelle eri kuitutyypille. Työ on jaettu teorialueeseen ja käytännön osuuteen.

Teorialueessa selvitettiin kirjallisuuslähteiden avulla komposiitin yleisiä ominaisuuksia sekä lasikuitulaminaatin ominaisuuksia, valmistusta ja virhetekijöitä. Myös väsymisilmiötä ja väsytestauksen parametrien vaikutusta tutkittiin. Käytännön osuudessa koekappaleet valmistettiin ja niille suoritettiin sekä staattisia testejä että väsytestejä, ja lopuksi tulokset analysoitiin.

Työn toimeksiantaja oli Ahlstrom Oyj:n Mikkelin yksikkö. Ahlstrom valmistaa korkealaatuisia lasikuitulujitteita ja kuitumateriaaleja eri tuotteisiin, kuten suodattimiin, tapetteihin ja etiketteihin. Ahlstromin liiketoiminta on jakaantunut ympäri maailmaa Euroopan ollessa keskeinen markkina-alue 52 prosentin osuudella kokonaisliikevaihdosta. Ahlstromilla on yli 5000 työntekijää 20 maassa. /2./

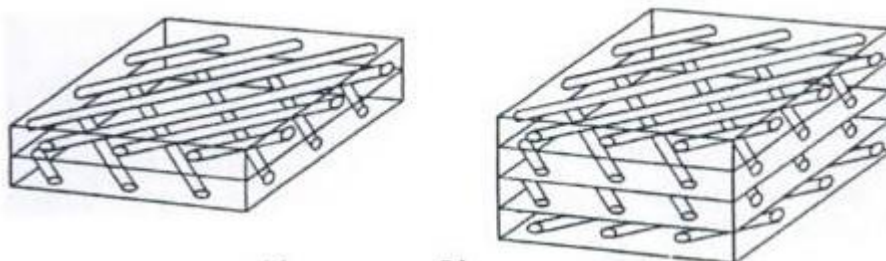
Ahlstromin liiketoiminta-alueet on jaettu taloudellisen raportoinnin segmentteihin seuraavasti; Building and Energy, Filtration, Food and Medical, sekä Label and Processing. Suurimpia asiakkaita ovat sairaala- ja terveydenhuollon tuotteiden sekä kuluttajatuotteiden valmistajat. Lisäksi Ahlstrom on mukana tuulivoimateollisuudessa. Ahlstromilla on Suomessa kolme tehdasta. Mikkelin sekä Karhulan tehtailla valmistetaan lasikuitutuotteita ja Tampereen tehtaalla suodatinmateriaaleja. /2./

2. KOMPOSIITIT

Materiaalia kutsutaan komposiitiksi silloin, kun siinä toimii yhdessä kaksi tai useampia toisistaan selvästi erottuvia materiaaleja. Tällöin materiaali on toisin sanottuna heterogeeninen. Komposiitteja voidaan jaotella eri tavoin. Yksi tapa on jakaa komposiitit partikkeli- ja kuitukomposiitteihin. Näitä pääryhmiä voidaan taas jakaa yhä edelleen spesifisempiin alaluokkiin. /1, s. 3; 3, s. 4./

Partikkelikomposiitti muodostuu nimensä mukaisesti matriisiin sidotuista partikkeleista, jotka voivat olla minkä muotoisia tai kokoisia tahansa ja voivat olla sijoittuneina miten tahansa. Betoni on yksi esimerkki partikkelikomposiitista. Kuitukomposiitissa lujittavat kuidut voivat olla jatkuvia kuituja tai katkokuituja ja katkokuidut voivat edelleen olla pitkiä tai lyhyitä. Kuitulujitettua muovikomposiittia kutsutaan usein lujitemuoviksi. /3, s. 5; 4, s. 17./

Komposiitit voidaan myös jakaa rakenteen mukaan kerroskomposiitteihin ja massakomposiitteihin. Edelleen kerroskomposiitit voidaan jakaa laminaattirakenteisiin ja kerroslevyrakenteisiin. Tässä työssä tutkitaan nimenomaan laminaattirakenteisen kerrotamuovikomposiitin ominaisuuksia. Laminaattirakenne on levymäinen rakenne, jossa lujitekuidut ovat kerroksittain levytasossa. Yleisesti laminaattirakenteissa käytetään eri kuitusuuntien yhdistelmiä, kuten kuvassa 1 on havainnollistettu. Näitä yhdistelmiä kutsutaan ristikkäislaminaateiksi. Usein laminaattirakenteisiin kohdistuu rasiitusta monista eri suunnista. Eri kuitusuunnissa olevia laminaattikerroksia yhdistämällä pyritään optimoimaan laminaatin kyky kantaa rasiitusta useissa suunnissa. /4, s. 22./



Kuva 1. Kaksi erilaista ristikkäislaminaattia. Kuitusuuntina ovat +45 astetta ja -45 astetta. /5, s. 195./

Lujitemuovien mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa neljä päätekijää: kuidun ja matriisin välinen suhde (joko massa- tai tilavuussuhde), valmistusmenetelmä, yksittäisten

komponenttien mekaaniset ominaisuudet (matriisi vs. kuitu), ja kuitusuunta (UD- eli yhdensuuntaiset, kaksisuuntaiset, off-axis – kulmat jne.). Tärkeä mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on myös kuidun ja matriisin välisen rajapinnan luonne. /6, s. 51./

Yksisuuntaiset eli UD-laminaatit ovat lujia ja jäykkiä kuitusuuntaansa, mutta kuituja vastaan kohtisuora suunta on heikko. Tämä johtuu siitä, että voimat eivät välity kuitu- ja pitkin, jolloin heikompi matriisimateriaali joutuu kantamaan komposiittiin kohdistuvat voimat. Kuitukomposiittien puristuslujuus on niiden vetolujuutta alhaisempi. /6, s. 52./

2.1 Kuidut

Lujitemuoveissa lujite voi olla kolmessa eri muodossa: partikkelina, katkokuituna tai jatkuvana kuituna. Teollisuudessa käytetään pääasiallisesti lujitteina lasi- hiili- ja aramidikuituja. Sopivan kuidun valinta riippuu pääasiallisesti vaaditusta lujuudesta, jäykkyydestä ja korroosionkestosta. Myös käytössä oleva budjetti vaikuttaa kuidun valintaan. Lasikuidut ovat näistä kolmesta vaihtoehdosta halvimpia. /6, s. 19./

Kuituja käytetään lujitemuoveissa parantamaan rakenteen mekaanisia ominaisuuksia. Kuitujen tehtävä on kantaa rakenteeseen kohdistuvat kuormitukset. Yksittäiset kuidut ovat erittäin ohuita, vain noin millimetrin tuhannesosan paksuisia. Kuidut pyritään kokoamaan kierteettömiksi kuitukimpuiksi. Lasikuitukimppua kutsutaan usein rovingiksi. /4, s. 19 -20, 74./

Lasikuitua valmistetaan monista eri lasityypeistä. Yleisin kaupallinen lasityyppi on E-lasi (electrical glass), joka omaa hyvät sähköiset ja mekaaniset ominaisuudet sekä hyvän kemiallisen kestävyuden. S-lasi (high strength glass) omaa E-lasia paremmat vetolujuuden ja kimmomoduulin, mutta sen valmistaminen on kalliimpaa. S-lasi sietää paremmin happoja, mutta emästen kesto on heikompi. Muita lasityyppejä ovat esimerkiksi A-lasi ja C-lasi. Taulukossa 1 on esitetty lasikuitutyypien ominaisuuksia. /4, s. 75./

Taulukko 1. Lasikuitutyypien koostumuksia ja ominaisuuksia. /4, s. 75./

		A	C	E	S
SiO ₂	p %	72,0	64,5	55,0	65,0
Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	p %	2,0	4,0	4,5	25,0
CaO	p %	10,0	13,5	21,5	-
MgO	p %	2,0	3,0	0,5	10,0
Na ₂ O+K ₂ O	p %	14,5	10,0	< 1,0	-
B ₂ O ₃	p %	-	5,0	7,5	-
Ominaispaino	g/cm ³	2,45	2,45	2,54	2,48
Talitekerroin	nD	-	1,541	1,549	1,523
Vetolujuus (erilliskuitu)	GPa	3,1	3,3	3,6	4,6
Vetolujuus (370 °C)	GPa	-	-	2,6	4,4
Kimmokerroin	GPa	72	70	75	86
Pehmeenempiste	°C	700	690	650	990

Lasikuitujen valmistus alkaa raaka-aineiden sulattamisesta. Raaka-aineita ovat mm. piidioksidi, kalsiumoksidi, alumiinioksidi, ja boorioksidi. Esimerkiksi E-lasissa on piidioksidia yli 50 %. Tässä työssä käytettävä S-lasi valmistetaan samalla periaatteella kuin E-lasi. S-lasin koostumus poikkeaa hieman E-lasista, esimerkiksi alumiinioksidi (Al₂O₃)- pitoisuus on korkeampi, noin 25 %. /7, s. 74-76./

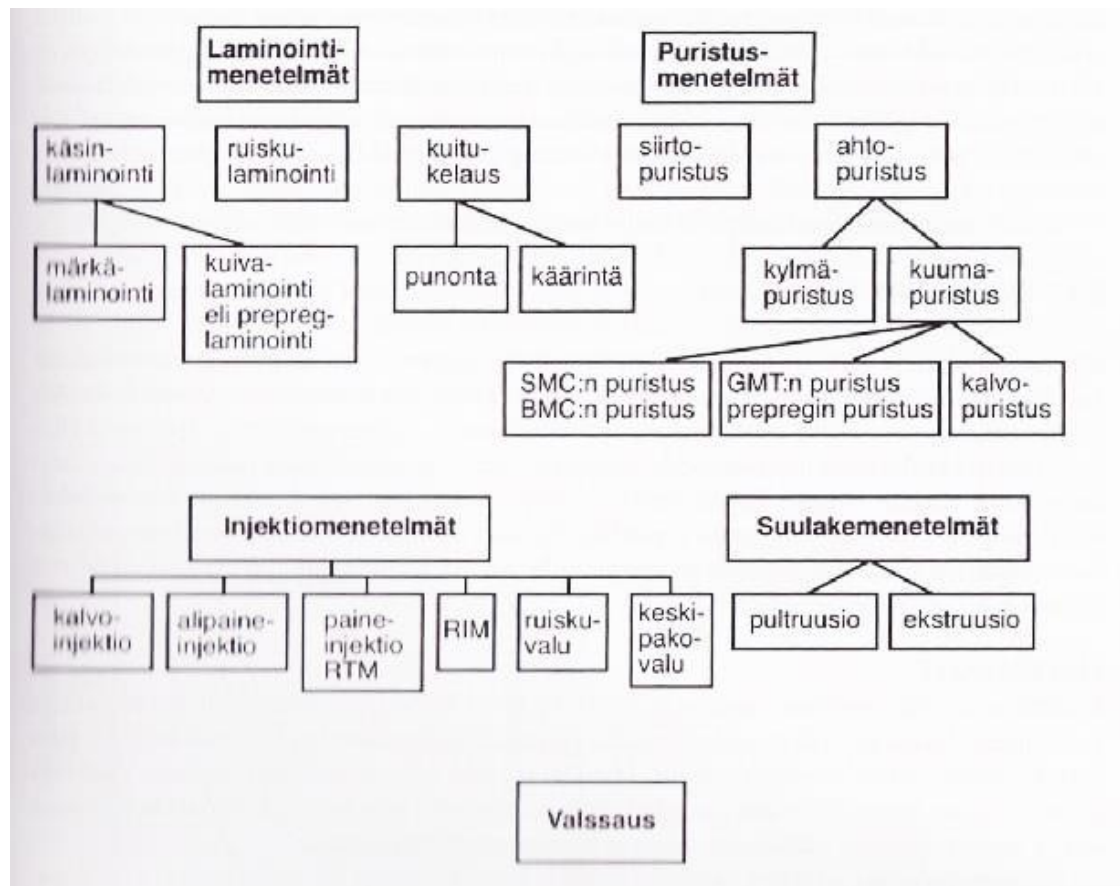
Sulassa muodossa olevia raaka-aineita sekoitetaan yleensä platinasta valmistetussa astiassa, jossa on halkaisijaltaan 1-2mm suuruisia reikiä. Sulan massan annetaan valua reikien läpi, mitä vedetään nopeasti. Veto kutistaa lasin poikkipinta-alaa, ja näin saadaan noin 10 mikrometrin paksuisia kuituja. /7, s. 74./

Kuitujen mekaanisten ominaisuuksien kannalta on tärkeää, etteivät kuitujen pinnat ole kosketuksissa mihinkään, edes toisiin kuituihin. Tästä johtuen kuidut päällystetään ennen kuin ne vedetään rullalle. Pinnoitteena käytetään yleensä tärkkelysemulsiota, tai vaihtoehtoisesti erikoispinnoitteita, joilla voidaan mm. varmistaa hyvä adheesio kuitujen ja matriisimateriaalin välillä. /7, s. 75./

2.2 Muovikomposiitin valmistus

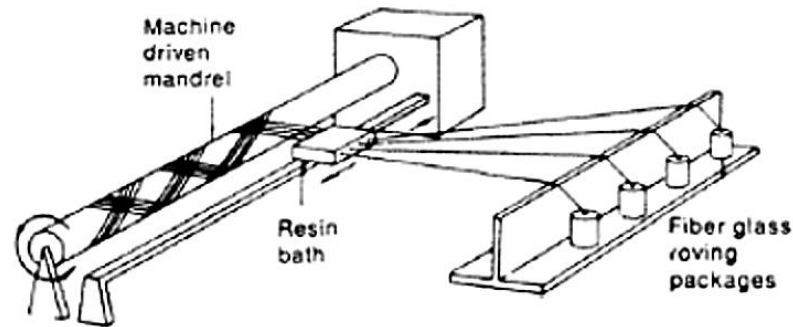
Muovikomposiittien valmistuksessa käytetään useita menetelmiä. Menetelmät on jaettu viiteen pääryhmään. Laminointimenetelmissä avomuottiin valmistetaan kerroksittain laminaatti, jonka kovetus suoritetaan joko ilman painetta, ylipaineella tai alipai-

neella. Puristusmenetelmissä raaka-aine, joka asetetaan muottiin joko puolivalmisteenä tai komponentteina, puristetaan muotoonsa. Injektiomenetelmissä komponentit syötetään muottiin joko paineen avulla tai valamalla. Suulakemenetelmien avulla valmistetaan useimmiten vakiopoikkipinta-alan omaavia putkia tai profiileja. Valssauksella valmistetaan profiloituja levyjä. Näiden viiden pääryhmien menetelmiä voidaan edelleen jaotella alaryhmiin. Valmistusmenetelmien jaottelu on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Muovikomposiittien valmistusmenetelmien jaottelu. /4, s. 153./

Tässä työssä käytetyt testauslaminaatit valmistettiin Ahlstromin Mikkelin tehtaan laboratoriossa kuitukelauksella. Kuitukelauksen avulla valmistetaan usein sylinterimäisiä tai kartiomaisia kappaleita, mutta myös levymäisiä laminaatteja voidaan valmistaa kyseisellä menetelmällä. Kuitukelauksessa roving kelataan pyörivän muotin päälle, kuten kuvasta 3 ilmenee. Märkäkelauksessa kuidut kostutetaan altaassa ja johdetaan halutun muotoiselle muotille, tässä tapauksessa tasaiselle lasipinnalle. Kuivakelauksessa preimpregnoitu roving eli prepreg kelataan nauhoina. /7, s. 319./

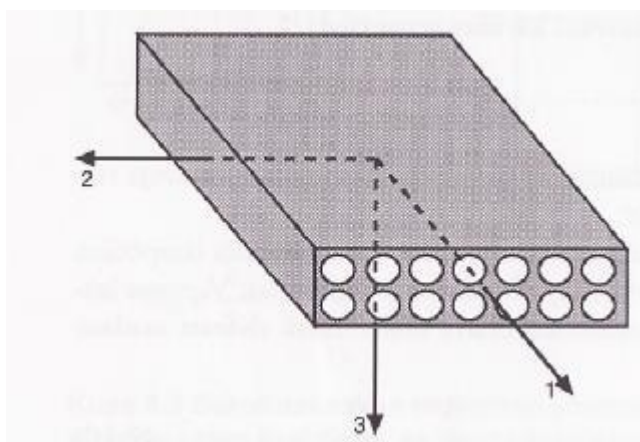


Kuva 3. Kuitukelausprosessi. Kuitu johdetaan rullilta hartsikylypyyn, josta kuitut kelataan pyörivälle muotille. /7, s. 320./

Valmistuksen aikana tapahtuu väistämättä kuitujen katkeilua rakenteen sisällä. Eräiden arvioiden mukaan missä tahansa laminaatin poikkileikkauksen kohdassa noin kymmenesosa kuituista on katkenneita. Kuitujen murtumakohdat toimivat jännityskeskittäjinä ja näin ollen murtumien ydintymispisteinä. /8./

2.3 Ortotrooppinen laminaatti

Jatkuvakuituisen laminaatin eri lamellien ominaisuudet voivat vaihdella eri suunnissa. Ne ovat kuitenkin symmetriset kolmen toisiaan vastaan kohtisuoran tason suhteen. Tämänkaltaista materiaalia tai kerrosta kutsutaan ortotrooppiseksi. Ortotrooppisella kerroksella on erilaiset lujuusominaisuudet kolmessa toisiaan kohtisuorassa suunnassa (kuva 4). /4, s. 326./



Kuva 4. Ortotrooppinen lamelli ja pääsuunnat 1, 2 ja 3. /4, s. 326./

Ortotrooppisen laminaatin mekaaniset ominaisuudet riippuvat mittaussuunnasta. Kuitulujitettu laminaatti on esimerkki ortotrooppisesta materiaalista, sillä laminaatilla on paremmat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet kuitujen suunnassa kuin poikittaisessa suunnassa kuituihin nähden. Ortotrooppisen kerroksen mekaanisen käyttäytymisen määrittävät yhdeksän riippumatonta kimmoarvoa. Esimerkiksi normaalijännitykset ovat leikkausjännityksistä riippumattomia /9, s. 34-35/. Kimmomoduulit E_1 , E_2 ja E_3 ilmaisevat veto- ja puristusjäykkyydet pääsuunnissa. Poissonin vakiot ν_{12} , ν_{13} ja ν_{23} ilmaisevat materiaalin supistumista tai laajenemista vedossa tai puristuksessa. Toisin sanoen Poissonin vakio kuvaa venymien suhdetta kaavan 1 mukaisesti:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \quad (1)$$

jossa ε_2 on poikittaissuuntainen venymä ja ε_1 vastaavasti pitkittäissuuntainen venymä. Lisäksi liukumoduulit G_{12} , G_{13} ja G_{23} ilmaisevat leikkausjäykkyydet kyseisissä tasoissa. Yleensä ortotrooppisia laminaattikerroksia voidaan tarkastella olettamalla tasoa vastaan kohtisuorat jännitykset (suunnan 3 jännitykset) mitättömiksi. Tällöin kerroksen mekaniikan kuvaamiseen tarvitaan enää viisi kimmoarvoa: E_1 , E_2 , ν_{12} , ν_{21} ja G_{12} . /4, s. 326 -327./

Ortotrooppisen materiaalin testauksessa tulee varmistua seuraavan yhtälön paikkansa-pitävyydestä.

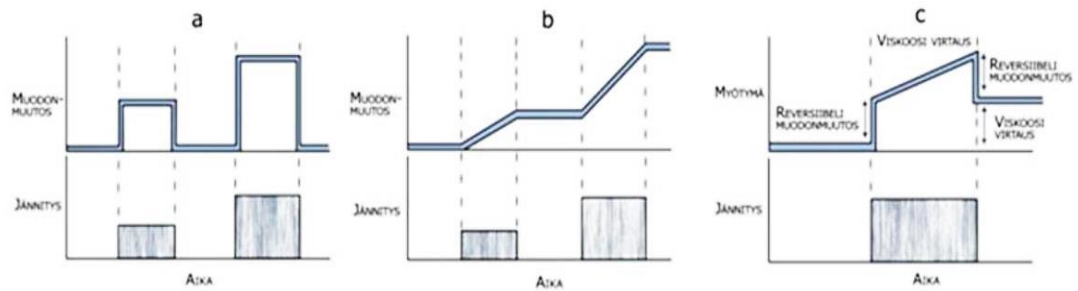
$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad (2)$$

jossa ν_{12} ja E_1 ovat kuidun suuntaiset Poissonin vakio ja kimmomoduuli, sekä ν_{21} ja E_2 ovat kuitusuuntaan kohtisuorat Poissonin vakio ja kimmomoduuli. Jos näin ei ole, yksi seuraavista vaihtoehdoista on mahdollinen; mittauksessa on virhe, laskuissa on virhe tai materiaalia ei voida kuvailla lineaarisesti elastiseksi. /9, s. 65/

2.4 Viskoelastisuus

Kuitukomposiitin polymeeriosa eli matriisi käyttäytyy viskoelastisesti. Ulkoisten voimien vaikuttaessa viskoelastiseen materiaaliin kappaleen käyttäytyminen muistuttaa kiinteän kappaleen ja viskoosin nesteen välimuotoa /10, s. 1/. Mikäli materiaali käyt-

täytyy viskoosisesti, materiaaliin jää jännityksen kohdistamisen jälkeen pysyvää muodonmuutosta. Elastisesti käyttäytyvä materiaali puolestaan saavuttaa muodonmuutoksen nopeasti ja vastaavasti muodonmuutos poistuu heti, kun jännitys poistetaan. Viskoelastisessa käyttäytymisessä on siis piirteitä molemmista edellä mainituista tapauksista. Kuvassa 5 on havainnollistettu näiden kolmen tyyppin käyttäytymistä, kun materiaaliin kohdistetaan kuormitusta.



Kuva 5. Materiaalin elastinen (a), viskoosi (b) ja viskoelastinen (c) käyttäytymisen vetojännityksen alaisena. /11, s. 7./

Hooken lain mukaan jännitys on riippuvainen kimmomoduulista E ja venymästä ε kaavan

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

mukaan. Todellisuudessa kaikki materiaalit poikkeavat tavalla tai toisella kyseisestä laista. Viskoelastisilla materiaaleilla jännityksen ja venymän suhde on riippuvainen ajasta. Tavallisimmilla metallimateriaaleilla, kuten teräksillä ja alumiineilla, viskoelastinen käyttäytyminen on huoneenlämmössä matalilla muodonmuutoksen tasoilla lähes olematonta. Polymeereillä käyttäytyminen on viskoelastista myös huoneenlämpötiloissa. Lämpötilan noustessa edellä mainittujen materiaalien ja esimerkiksi syntetttisten polymeerien viskoelastinen käyttäytyminen korostuu. /12, s.1-2./

Viskoelastisuutta selitetään Maxwellin yhtälöllä

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta t} + \frac{\sigma}{\tau} = \frac{\eta}{\tau} \dot{\lambda} \quad (4)$$

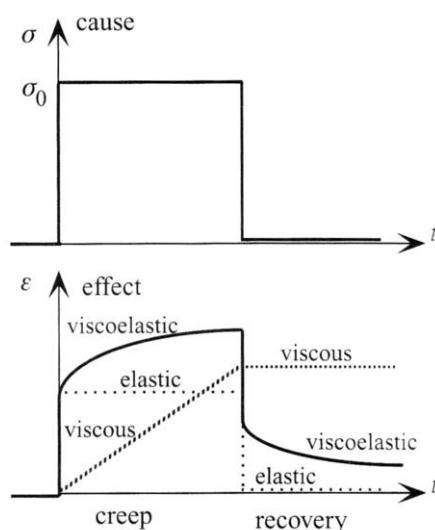
jossa $\Delta\sigma$ on jännityksen muutos, Δt on ajan muutos, σ on jännitys, t_r on viskoelastisen systeemin relaksaatioaika, η on materiaalin viskositeetti ja λ on muodonmuutosnopeus. Viskoelastisen systeemin relaksaatioaika t saadaan kaavasta

$$t_r = \frac{\eta}{G} \quad (5)$$

jossa G on materiaalin liukumoduuli /13, s. 52/. Maxwellin yhtälö kuvaa viskoelastista käyttäytymistä ainoastaan materiaalin lineaarisella eli pienten muodonmuutosten alueella, ja on täten epätäydellinen kuvaamaan viskoelastisuutta laajemmin. /13, s. 49./

2.4.1 Viruminen

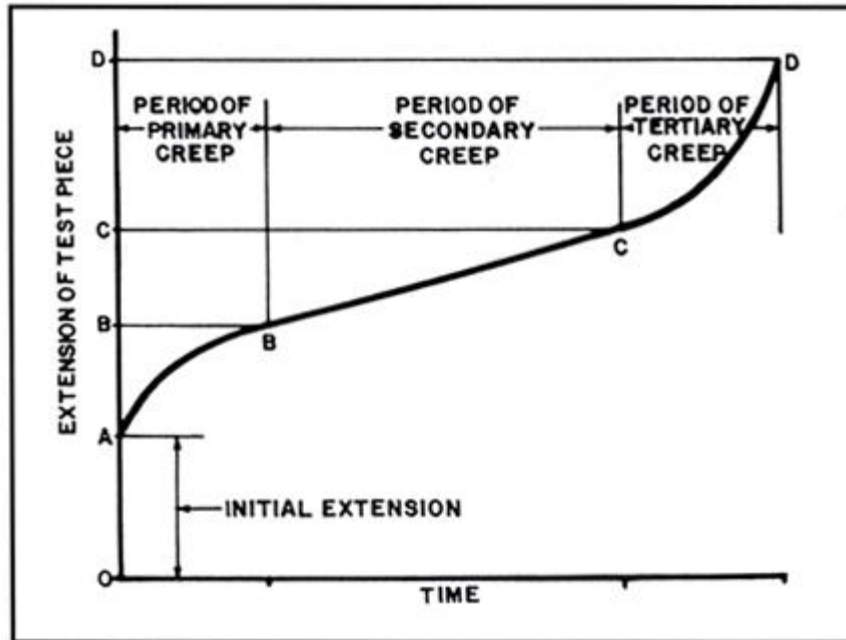
Jännityksen pysyessä vakiona venymä kasvaa ajan funktiona. Tätä ilmiötä kutsutaan virumiseksi. Viskoelastinen materiaali myötää heti kuorman lisäyksen jälkeen kuten elastinen materiaali, mutta jatkaa virumista kuvan 6 mukaisesti. Jännityksen poistuttua muodonmuutoksen elastinen osuus palautuu ensin ja sen jälkeen tapahtuu jännitysrelaksaatiota, joka tarkoittaa ajan mittaan hidastuen palautuvaa muodonmuutosta. Materiaalista riippuen muodonmuutos saattaa palautumisvaiheessa lähestyä muodonmuutoksen nollapistettä. /12, s. 4-5./



Kuva 6. Viskoelastisen materiaalin käyttäytyminen vakiojännitystilassa. /12, s. 4./

Virumisella voi olla kolme eri vaihetta; primaarinen viruminen, sekundaarinen viruminen ja tertiaarinen viruminen. Primaarisessa virumassa muodonmuutos hidastuu ajan kuluessa. Sekundaarisessa virumisessa virumisnopeus on vakio. Tertiaarisessa

virumisessa virumisnopeus kasvaa ajan kuluessa. Osasyynä tähän on kappaleen kuroutuminen, jolloin kappaleen poikkipinta-ala kutistuu eli todellinen jännitys kasvaa (kuva 7).



Kuva 7. Virumisen vaiheet viskoelastisessa materiaalissa. /14./

2.4.2 Relaksaatio

Viruminen ja relaksaatio ovat saman ilmiön kaksi eri puolta. Virumista tapahtuu vakiojännitystilassa, kun taas relaksoituminen tapahtuu muodonmuutoksen pysyessä vakiona. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kun kappaleeseen kohdistuu tietyn muodonmuutoksen aiheuttava voima ja muodonmuutos pidetään vakiona, tietyn ajan kuluttua muodonmuutoksen ylläpitävä voima alkaa pienentyä. Viskoelastisista ominaisuuksista relaksaatiota yleisemmin tutkitaan virumista, sillä sen tutkimislaitteisto on usein halvempi ja yksinkertaisempi. /11, s. 99 -101./

2.5 Laminaatin virheet

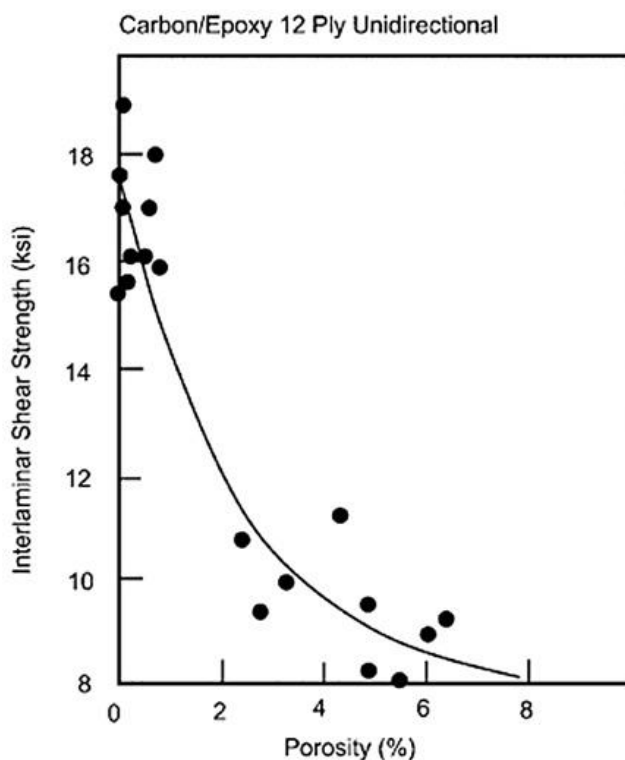
Lasikuitulaminaatissa voi ilmetä erilaisia virheitä. Näitä ovat esimerkiksi kuitupitoisuuden muutokset erisuuntaisissa poikkileikkauksissa, kuitusuoruuden vaihtelu, huokoisuus ja ulkopuoliset materiaalit. Nämä kaikki vaikuttavat laminaatin ominaisuuksiin, usein heikentävästi. Myös pinnan epätasaisuus on ominaisuuksiin vaikuttava teki-

jä. Osaa näistä voidaan kontrolloida valmistuksen aikaisessa laadunvarmistuksessa. Edellä mainittuja virheitä voidaan tarkastella esimerkiksi optisella mikroskopiolla.

Tarkastelu voidaan suorittaa 5-25- kertaisella suurennoksella. Optisen tarkastelun perusteella voidaan optimoida laminaatin valmistusprosessia, joka puolestaan vaikuttaa myönteisesti valmistettavan kappaleen suorituskykyyn. Tarkastelu on yleensä helppoa, mutta korkean kuitupitoisuuden omaavilla ja kuitukelatuilla laminaateilla voi ilmetä vaikeuksia. Näitä ongelmia voidaan kiertää muuttamalla tarkasteltavan kappaleen poikkileikkauksen kulmaa. /15, s. 137./

2.5.1 Huokoisuus

Huokoisuus on yksi haitallisimmista materiaalivioista komposiittilaminaateissa. Huokoisuutta voi muodostua sekä laminaattikerrosten välille että itse kerrosten sisälle, jo kahden tilavuusprosentin huokoisuusaste vaikuttaa negatiivisesti matriisiriippuvaisiin ominaisuuksiin. Kuidun suuntaiseen vetoon huokoisuudella on vain minimaalinen vaikutus, mutta mm. taivutus-, interlaminaarinen leikkaus- ja puristuslujuus heikkenevät huokoisuusasteen noustessa, kuten kuvassa 8 on esitetty. /16, s. 393- 394./



Kuva 8. Huokoisuuden vaikutus interlaminaariseen leikkauslujuuteen. X-akselilla on huokoisuus, Y-akselilla leikkauslujuus. /16, s.394./

Lujitemuovilaminaattiin jää aina valmistusprosessista riippuen prosentin murto-osasta 15 tilavuusprosenttiin huokoisuutta. Lisäksi tiettyjen hartsien sisältämät tai niistä koettumisreaktiossa vapautuvat ainesosat aiheuttavat huokoisuutta. Jos matriisimateriaalin ja käytetyn kuidun tiheys ja massaosuus tiedetään, voidaan huokoisuus laskea kaavalla

$$V_v = 1 - \rho_c \left(\frac{W_f}{\rho_f} + \frac{W_m}{\rho_m} \right) \quad (6)$$

Jossa ρ_c on komposiitin tiheys, W_f on kuidun massa, ρ_f on kuidun tiheys, W_m on matriisin massa ja ρ_m on matriisin tiheys /4, s. 233/. Yksi tapa saada selville vaadittavat suureet on happokylpy. Menetelmässä matriisi syövytetään kuitujen ympäriltä. Menetelmän epätarkkuudesta kertoo se, että joskus saadaan negatiivisia arvoja huokoisuusasteelle. Tämä johtuu siitä, että kuitujen ja matriisin tiheydet ovat arvioita. /16, s. 394./

Mitä huokoisempi komposiitti on, sitä enemmän se vaimentaa ääniaaltoja. Tästä johtuen huokoisuusasteen tutkimisessa voidaan käyttää ultraääntä. Vaimennuskertoimen kasvu johtuu huokosten ominaisuuksista. Ääniaallon osuessa huokosen ja matriisin rajapintaan aalto siroaa. Huokokset taas absorboivat ääniaaltoja ympäröivää matriisia paremmin. /16, s. 394./

Huokoisuutta voidaan vähentää monin eri tavoin. Tyhjiöpussia käyttämällä poistetaan ylimääräinen ilma laminaatissa ja samalla aikaansaadaan parempi adheesio laminaattikerrosten välillä. Alipaineen ansiosta ylimääräinen hartsi poistuu laminaatissa, ja näin ollen kuitupitoisuus saadaan korkeammaksi. Painesäkillä laminaattia puristetaan ulkoisen paineen avulla, ja näin saadaan eliminoitua sulkeumia. /16, s. 122./

Autoklaavilla alipaine- tai painesäkin vaikutusta voimistetaan korotetulla lämpötilalla ja/tai paineella. Autoklaavia käytetään usein korkean suorituskyvyn epoksimatriisilaminaattien aikaansaamiseksi. Autoklaavimenetelmä nostaa laminaatin valmistuskustannuksia huomattavasti, joten menetelmää käyttävät lähinnä ilmailuteollisuudessa toimivat yritykset. /16, s. 122./

2.5.2 Kuitusuoruus

Mitä pienempi materiaalin halkaisija on suhteessa sen pituuteen, sitä lujempaa se on. Kuitumainen materiaali tosin tarvitsee matriisin, mikä johtaa rasitukset kuitujen kanttavaksi. Kuitusuoruudella tarkoitetaan sitä, kuinka suorassa kuidut kulkevat laminaatissa. Tämä tekijä vaikuttaa myös osaltaan poikkileikkauksen kuitupitoisuuteen ja sen vaihteluun. /7, s. 68./

Kuitusuoruus vaikuttaa suuresti UD-laminaatin ominaisuuksiin. Kuitujen suoruus vaikuttaa osaltaan kuitujen paikalliseen suuntautumiseen matriisissa. Mitä yhdensuuntaisempia kuidut ovat, sitä tasalaatuisempi laminaatista tulee. Yhdensuuntaisuuden alentuessa poikkileikkauksen kuitupitoisuus voi vaihdella rajustikin laminaatin eri kohdissa, johtaen ominaisuuksien epäyhdenmukaisuuteen kuitusuunnassa. /8./

Komposiitin kovetusvaiheessa matriisin ollessa viskoosissa olomuodossa kuidut altistuvat virtaavan hartsin aiheuttamalle hydrauliselle paineelle. Tästä johtuen kuidut saattavat taipua ja järjestyä uudelleen komposiitissa. Myös alipainesäkin käyttö saattaa aiheuttaa kuitujen nousemista pintaan aiheuttaen ns. kuivia kuituja. Kuidut voivat taipua paikallisesti paljonkin, jolloin laminaatin puristuslujuus heikkenee: Kuidut eivät kykene kantamaan puristavia voimia ollessaan tällaisessa nk. esinurjahtaneessa tilassa. / 16, s. 397./

3. VÄSYMINEN

Väsyminen johtuu vaihtelevasta mekaanisesta tai termisestä rasituksesta. Materiaalin väsymistä tapahtuu silloin, kun kuormitusvaihtelun pääjännitys ylittää myötörajan, mutta ei materiaalin murtolujuutta. Kuormituskertojen myötä materiaaliin syntyy lisääntyvästi pysyvää muodonmuutosta, mikä voi aiheuttaa murtuman ydintymisen ja sen kasvun. Lopulta, kun kuormituskertoja on tarpeeksi, materiaali murtuu. Myös lämpötilan vaihtelu aiheuttaa muodonmuutoksia ja täten myös väsymistä mekaanisen rasituksen vaihtelun tavoin.

Väsymisessä mikroskooppiset säröt ydintyvät ja myöhemmin kasvavat ja yhdentyvät makroskooppisiksi säröiksi. Lopulta yksi ainoa kuormitusyksi aiheuttaa murtuman.

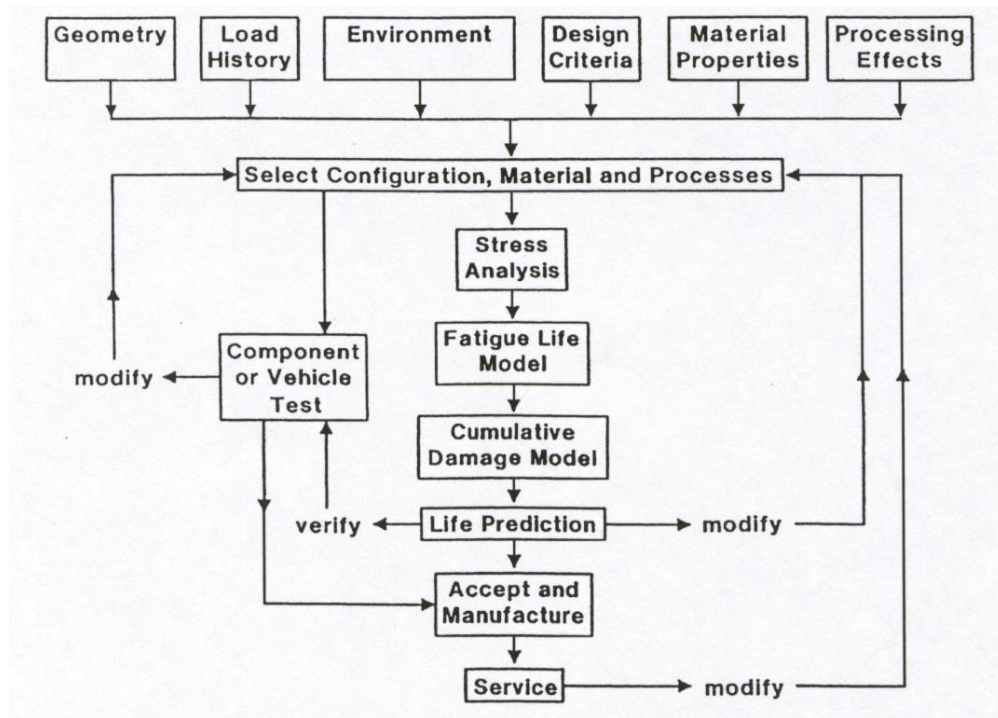
Mikroskooppisen särön ydintymispiste voi olla geometrian muutoskohta, korroosion kohta tai jännityskeskittymä /17, s. 16/. Mikroskooppisen särön voi aiheuttaa myös pintavirhe tai materiaalivirhe.

Myötöväsymiseksi kutsutaan muodonmuutosta, jossa esiintyy makroskooppista plastista muodonmuutosta. Tässä tapauksessa murtumiseen johtavia kuormitusyklejä ei yleensä ole paljoa. Yleensä väsymisessä materiaalin murtuminen tapahtuu kuitenkin vasta suuren kuormitusyklimäärän jälkeen (jopa 10^7 kuormitusykliä). Tällöin materiaalissa tapahtuu mikroskooppista plastista muodonmuutosta. /18, s. 369./

Materiaalin väsymistä kuvataan yleensä klassisella SN-käyrällä. Muuttujina tässä tapauksessa toimivat jännitys (S) ja elinikä eli kuormitusykliden määrä (N). Työssä tulee tutkia materiaalin ominaisuuksia juuri SN-käyrän avulla. Muita väsymisen kuvaamiseen käytettäviä malleja ovat esimerkiksi Smithin ja Haighin väsymislujuuspiirrokset sekä Goodmanin relaatio.

3.1 Väsymiseen vaikuttavat tekijät

Väsymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi rasituksen suuruus, rasitusaika ja ympäristö sekä näiden yhdistelmät /17, s. 2/. Näitä tekijöitä on esitetty kuvassa 9. Rasitukset voivat olla monotonisia, vakaita, vaihtuvia ja yksi- tai moniaksiaalisia. Myös lujitemuovin ominaisuudet vaikuttavat osaltaan väsymiskestävyyteen. Esimerkiksi moolimassan lisääntyminen tai ristisilloittuminen lisäävät muovien väsymiskestävyyttä. Kun jännitykset, rasitusaika ja ympäristön vaikutukset yhdistetään materiaalin valintaan, tuotantoprosessiin sekä jäännösjännityksiin, saadaan laaja valikoima erilaisia murtumamekanismeja. /17, s. 3./

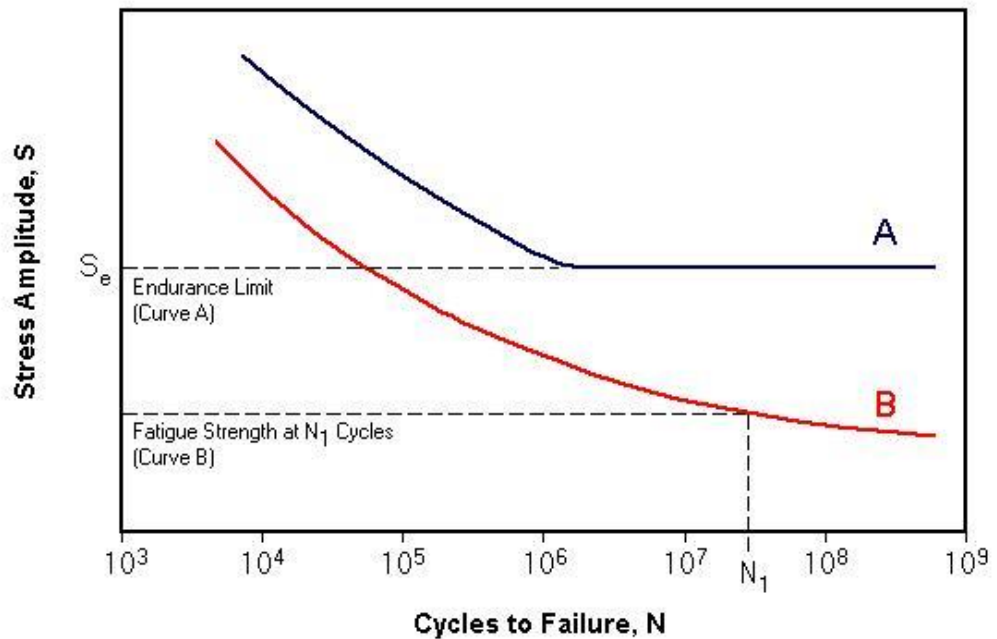


Kuva 9. Väsymissuunnittelun perusteet. /17, s. 3./

Lujitemuovilaminaatin anisotrooppisen luonteen vuoksi kuitukulma eli kuidun suunta rasiinukseen nähden vaikuttaa väsymisominaisuuksiin. Yksisuuntaisilla laminaateilla on hyvät väsymisominaisuudet kuitusuunnassa. Kuormitussuunnan poiketessa kuitusuunnasta voi ilmetä useampia vauriomekanismeja, jolloin komposiitin sisäiset jännitykset saattavat jakaantua eri tavalla muuttaen jännitys-venymä-käyrän epälineaariseksi.

3.2 Väsymisraja

Väsymisrajaksi S_f kutsutaan jännitysamplitudia, jonka alapuolella materiaaliin ei muodostu väsymismurtumaa /18, s. 375/. Kyseisellä jännityksellä esimerkiksi teräksillä S-N – käyrän kuvaaja on vaakasuorassa, kuten kuvasta 10 ilmenee. Komposiiteilla väsymisraja ei kuitenkaan ole selkeästi havaittavissa. Väsymisrajan alapuolella olevat jännitykset mahdollistavat materiaalin periaatteessa rajattoman eliniän. Väsymisrajaan vaikuttavia tekijöitä ovat pinnanlaatu, kappaleen koko, kuormitustapa, lämpötila, syövyttävät ynnä muut materiaaliin vaikuttavat olosuhteet, keski- ja jäännösjännitykset sekä jännityskeskittymät. Edellä mainituilla tekijöillä on lukemattomia yhdistelmiä, joilla on suuri vaikutus väsymisrajaan.



Kuva 10. Tyypilliset SN-käyrät. Käyrä A on tyypillinen teräkselle (selvä väsymisraja) ja käyrä B tyypillinen komposiitille. /19./

4. KOEKAPPALEET

Toimeksiantaja antoi tehtäväksi laatia ehdotuksen käytettävien koekappaleiden geometriasta. Yksi tämän opinnäytetyön tärkeistä aihealueista oli tutkia geometrian vaikutusta testauksen tuloksiin sekä kirjallisuuden että oman pohdinnan perusteella. Toimeksiantaja pyysi kahta tai useampaa erilaista ehdotusta. Tärkeimmät ehdotuksen aiheet olivat kuitusuunta, koekappaleen leveys, pituus ja paksuus sekä koekappaleiden järkevä leikkaus valmistajan käyttämästä aihioista. Koekappaleen valmistus koostuu neljästä pääosasta; laminaatin valmistus, laadunvarmistus, koekappaleen valmistus ja venymäliuskan kiinnitys /20, s. 36/.

4.1 Geometria

Standardin ASTM-D3039 mukaan testauksessa käytettävien koekappaleiden leveyden tulisi olla noin 25 millimetriä, toleranssina +/- 1 %. Paksuuden tulisi olla noin 1-2 millimetriä, toleranssina 4 %. ”End tabien” eli päätyvahvikelevyjen paksuus ja materiaali tulisivat olla tilanteeseen sopivat. Yleensä polymeerien ja lujitemuovien vetokokeissa käytetään epoksihartsista valmistettuja end tabeja, joiden pääasiallinen vaatimus on

molemmin puolin sama paksuus. Tällöin kiinnitysleukojen aiheuttama jännitys jakautuu mahdollisimman tasaisesti. /21, s. 118./

Kokemusten perusteella päätettiin, että end tabit liimataan koekappaleisiin. End tabien päistä päätettiin tehdä suorat. End tabin sauvan puoleisesta päästä voisi myös tehdä viistetyt, mutta tässä tapauksessa viistäminen hylättiin valmistuksen helpottamiseksi. Viisteiden avulla pienennetään jännityskeskittymiä sauvassa end tabin päätepinnassa.

End tab- materiaalin tulisi olla jossakin määrin muovautuvaa, mahdollistaen paremman adheesio-koekappaleeseen. Tämä on hyödyllistä etenkin silloin, kun koekappaleessa on vaihteleva paksuus. /22, s. 2/. Koekappaleen päädyn osana, johon end tab liimataan, voidaan käyttää sitä osaa laminaatista, joka ei esimerkiksi rakennevirheen vuoksi sovellu käytettäväksi koekappaleen testausmitan osassa.

Mahdollisia koekappalegeometrioita on useita. Yksi esimerkki on pituussuunnassa kavennettu malli, niin sanottu ”dog bone” eli koiranluugeometria. Toinen yleinen vaihtoehto on neliskanttinen vakiopoikkipinta-alan omaava koekappale.

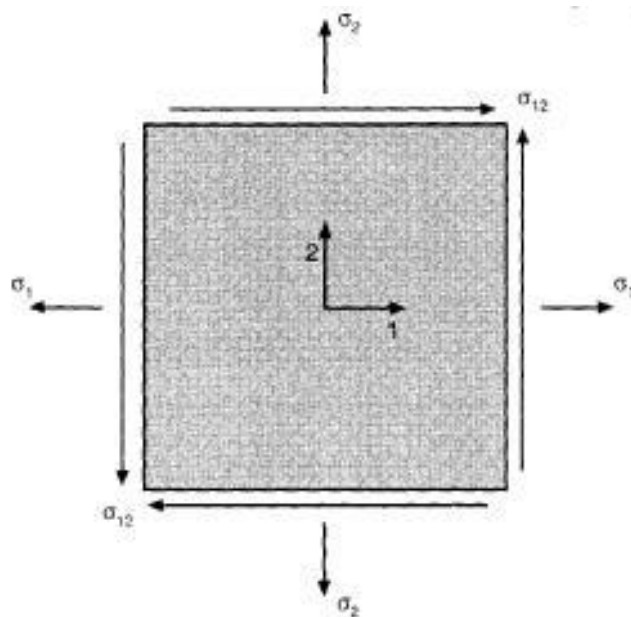
Dog bone- geometriassa muodonmuutokset saadaan kavennetulle alueelle pienempään poikkipinta-alaan kohdistuvan suuremman jännityksen ansiosta. Tästä johtuen murtopinta saadaan varmemmin koekappaleen keskiosiin. Tällöin murtovenymän mittaaminen mahdollistuu ja murtolujuus saadaan määritettyä varmemmin kuin vakiopoikkipinta-alan omaavalla kappaleella. Tämä geometria soveltuu hauraille materiaaleille.

Koekappaleiden työstön ja sahaamisen yksinkertaistamisen vuoksi päädyttiin käyttämään vakiopoikkipinta-alaa. Lisäksi tasaleveä koekappale on parempi, kun tutkitaan lujuusominaisuuksiltaan voimakkaasti suunnattua materiaalia /4, s. 294/. Ehdotuksen perusteella yritys valmisti kuitukelausta käyttäen laminaattierän, josta saatiin kaksi laminaattilevyä. Levyjen mitat olivat noin 500 mm x 600 mm. Laminaatin paksuudeksi tuli noin 2,5 mm. Koekappaleiden leikkausta lähdettiin suunnittelemaan siten, että sauvan pituus olisi 250 mm ja leveys 25 mm.

4.2 Kuitusuunta

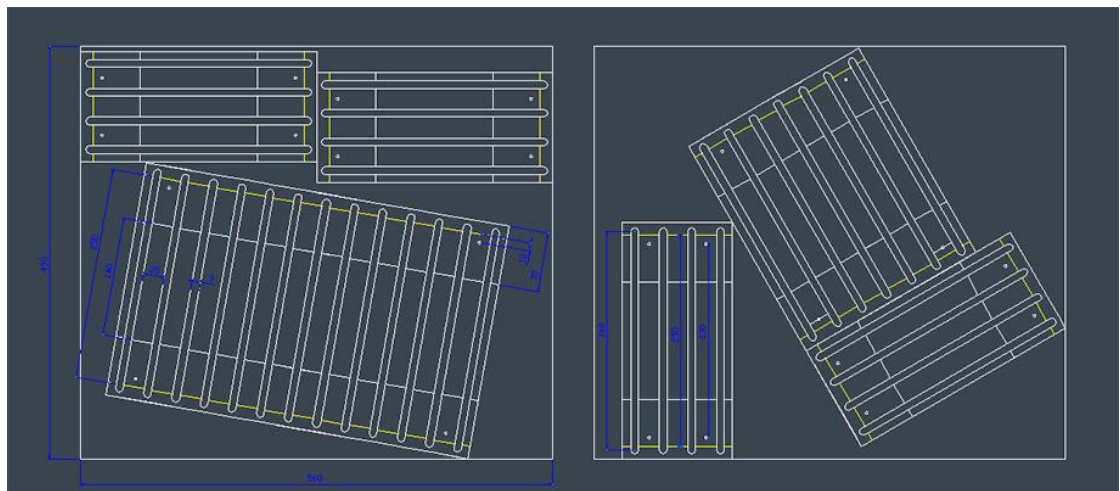
Valmistajan laminaatti valmistettiin yhdessä kuitusuunnassa kuitukelauksella. Koe-kappaleiden järkevä leikkaus ahiosta suunniteltiin CAD-ohjelman avulla. Suunnitte-lussa täytyi ottaa huomioon monta tekijää, esimerkiksi kuitukulma ja leikkauksessa käytettävän sirkkelin terän aiheuttama työvara.

Testauksissa käytettäviksi kuitusuunniksi valittiin asteluvut 0° , 10° , 30° , 60° ja 90° . Näistä kulmalle 0° tehtiin ainoastaan staattiset testit kontrollitesteinä. Asteluvun 10 valintaa on perusteltu useasti kirjallisuudessa esimerkiksi sillä, että kyseisellä kulmalla liukuma eli leikkausmuodonmuutos saavuttaa maksimiarvonsa /20, s. 104-107/. Tämä johtuu siitä, että standardeissa käytetyllä mittapituudella (150 mm x 25 mm) koko mittapituudelle tulee jatkuvaa kuitua. Kyseisellä kulmalla ongelmallista on lujuusomi-naisuuksien suhteellisen suuri hajonta, mikäli asteluku ei ole aivan tarkka. Asteluvulla 30 pyritään määrittämään leikkausjännitystä τ_{12} , joka aiheuttaa murtuman kuitu-matriisi- rajapinnalla kuidun suuntaisesti. Asteluvuilla 60 ja 90 määritetään kuitua vastaan kohtisuoraa jännitystä σ_2 , joka taas näissä tapauksissa toimii murtuman aiheuttajana. Oheisessa kuvassa 9 on havainnollistettu tasonmukaiset pääjännitykset σ_1 ja σ_2 sekä leikkausjännitys τ_{12} (kuvassa symbolilla σ_{12}) ortotrooppisen laminaatin taso-jännitystilän avulla.



Kuva 11. Ortotrooppisen laminaatin taso-jännitystila. Pääjännitykset ja leikkaus-jännitys. /4, s. 327./

Koska eri kuitukulmia varten tehtävä koekappaleiden nestaus eli leikkausgeometrian suunnittelu vie melko paljon tilaa aihioista, kävi selväksi, ettei kaikkia koekappaleita saada leikattua kahdesta laminaattiaihioista. Tilaa veivät myös leikkaukseen tarvittava työvara (noin 15 mm suuntaansa) sekä silminnähdn havaitut materiaalivirheet laminaatissa. Materiaalivirheiden joutumista koekappaleisiin tuli välttää. Yrityksestä toimitettiin kaksi lisälaminaattia, jotta koekappaleiden nestaukseen olisi enemmän aihiotilaa. Lopullinen nestaus on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Laminaattien leikkausgeometria.

5. TESTAUSPARAMETRIEN VAIKUTUS

Väsytestauksessa testausparametreja eli testauksen muuttujia on useita. Tässä opinäytetyössä yhtenä teorialuokituksen pääaiheista oli selvittää eri testausparametrien vaikutusta väsytestaukseen ja sitä myötä myös lopullisiin testauksen tuloksiin. Koekappalegeometria on yksi tärkeä testausparametri, ja sitä on käsitelty erikseen edellisessä luvussa. Muita testausparametreja ovat esimerkiksi off-axis- kulma, kuormitustaajuus, jännitysamplitudi ja R-arvo.

5.1 Off-axis- kulman vaikutus

Off-axis- kulmalla eli kuitukulmalla tarkoitetaan sitä kulmaa, joka on komposiitin kuitujen ja komposiitin x-suunnan välinen kulma. X-suunnalla tarkoitetaan tässä tapauksessa suuntaa, jossa testaukset suoritetaan, toisin sanoen kuormitussuuntaa. Koordinaatit nimetään siten, että kappaleen geometrian mukaiset symmetria-akselit ni-

metään kirjaimilla, esimerkiksi x tai y, ja kuidun suuntaiset vastaavat numeroilla, kuten 1 ja 2. Komposiitteja voidaan valmistaa kaikissa kulmissa 0° - 90° .

Off-axis- kulman muutoksella on vaikutusta komposiitin lujuusominaisuuksiin. Heikoin leikkaussuunta on kuitusuuntaan kohtisuorassa oleva suunta 2. Täten kuitukulman muutos vaikuttaa suoraan leikkauslujuuden arvoon. Komposiitin murtumismekanismiin tämä vaikuttaa siten, että murtuma on usein kuidun suuntainen.

5.1.1 Vauriokriteerit

Off-axis- kulma vaikuttaa myös komposiitin murtolujuuteen. Murtolujuus on pienimmillään off-axis- kulman ollessa 90° ja suurimmillaan off-axis- kulman ollessa 0° . Tämän perusteella voidaan todeta, että komposiitin murtolujuus on sitä suurempi, mitä enemmän rasiitusta kuidut pystyvät kantamaan. Maksimijännityskriteeri kertoo sen, aiheuttaako leikkausjännitys τ_{12} , kuidun suuntainen jännitys σ_1 vai kuitusuuntaan kohtisuora jännitys σ_2 murtuman. Maksimijännityskriteeri kuvaa murtumaa huonoiten off-axis- kulman ollessa välillä 20° - 45° . Kriteerin mukaan murtuma tapahtuu, mikäli joku seuraavista ehdoista toteutuu:

$$\sigma_x > \frac{\sigma_{1max}}{\cos^2\theta}; \sigma_x > \frac{\sigma_{2max}}{\sin^2\theta}; \sigma_x > \frac{\tau_{12max}}{\sin\theta\cos\theta} \quad (7)$$

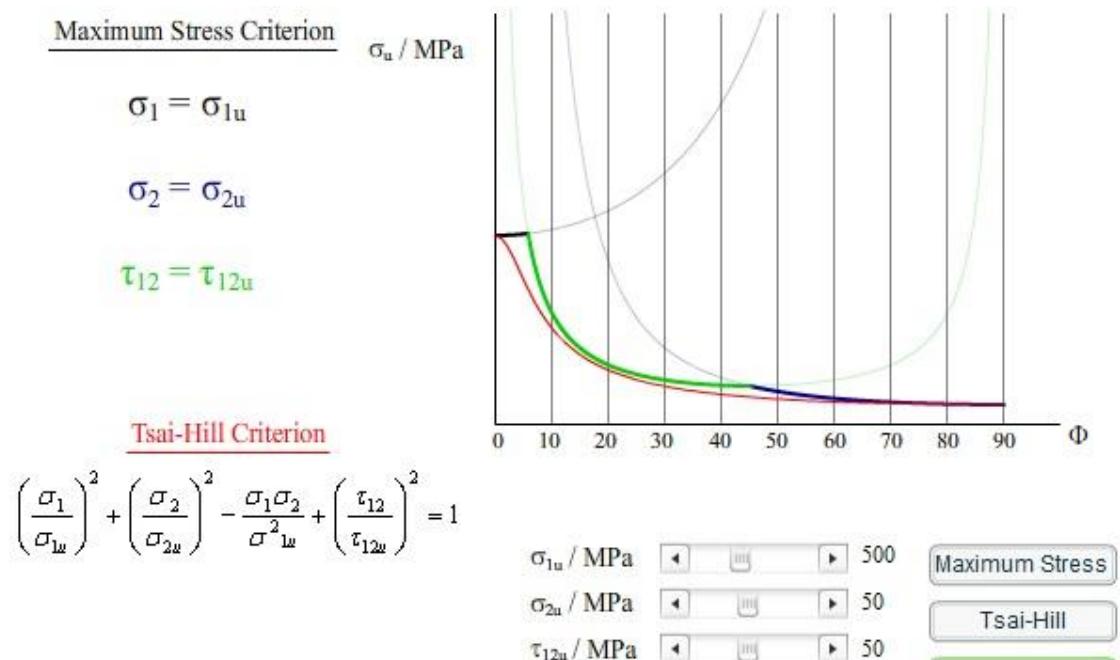
jossa σ_x on murtolujuus ja θ on off-axis- kulma. /5, s. 257- 264./

Tsai-Hill- kriteeri kuvaa murtumista paremmin myös välillä 20° - 45° . Erona näillä kriteereillä on myös se, että maksimijännityskriteeri pyrkii ennustamaan vauriomuodon, kun taas Tsai-Hill- kriteeri ei sitä tee. Tsai-Hill- kriteeri komposiiteille kuuluu seuraavasti:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{1u}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{2u}}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{\sigma_{1u}^2} + \left(\frac{\tau_{12}}{\tau_{12u}}\right)^2 = 1 \quad (8)$$

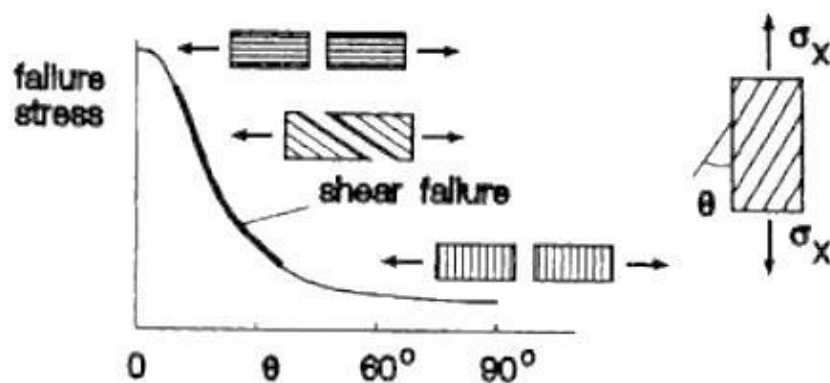
Mikäli kyseinen lauseke saa arvoksi yli 1, komposiitti murtuu. σ_{1u} , σ_{2u} ja τ_{12u} ovat murtolujuudet ja leikkausmurtolujuus kyseisessä suunnassa. /5, s. 257- 264./

Kuvassa 13 on esitetty komposiitin murtolujuus kuitukulman funktiona määritettynä maksimijännityskriteeri ja Tsai-Hill- kriteeri eräillä jännitysten arvoilla. Kuva esittää lujuuden riippuvuutta off-axis- kulmasta, kun $\sigma_{1u} = 500$ Mpa, $\sigma_{2u} = 50$ Mpa ja $\tau_{12u} = 50$ Mpa.



Kuva 13. Maksimijännityskriteerin ja Tsai-Hill- kriteerin mukainen murtolujuuden riippuvuus off-axis- kulmasta. /23./

Yleisenä sääntönä voidaan sanoa, että off-axis- kulmilla 0° - 5° murtuman aiheuttaa kuidun suuntainen jännitys σ_1 . Välillä 5° - 40° murtuman aiheuttaa leikkausjännitys τ_{12} . Kulman ollessa yli 40° murtuman aiheuttaa kuitua vastaan kohtisuora jännitys σ_2 . Kuvassa 14 tämä on havainnollistettu. /5, s. 30- 31./



Kuva 14. Murtuma vedossa eri off-axis- kulmilla. /5, s.31./

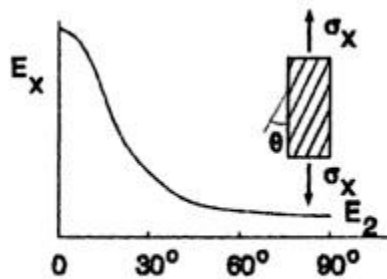
5.1.2 Off-axis- kulman vaikutus moduuleihin

Kimmomoduuli (E) ja liukumoduuli (G) ovat kertoimia, jotka kuvaavat materiaalin kykyä vastustaa siihen kohdistuvien voimien aiheuttamaa muodonmuutosta. Kimmomoduuli lausutaan seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (9)$$

jossa σ on materiaaliin kohdistuva jännitys ja ε on jännityksestä aiheutuva suhteellinen venymä.

Hooken lain mukaan materiaali käyttäytyy kimmoisesti eli elastisesti suhteellisuusrajaa pienemmällä jännitysalueella. Komposiitin ollessa kyseessä kimmomoduli vaihtelee kuitukulman myötä. Komposiitti vastustaa parhaiten muodonmuutosta kuitukulmalla 0° ja huonoiten kuitukulmalla 90° . Kimmomoduli vaihtelee merkittävästi näiden kulmien välillä /5, s. 29/. Yleensä vahvemman suunnan kimmomodulista käytetään symbolia E_1 ja heikomman suunnan kimmomodulista symbolia E_2 . Vaihtelu on esitetty seuraavassa kuvassa 15.



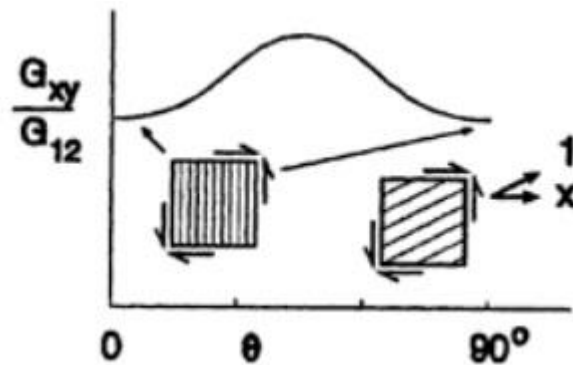
Kuva 15. Kimmomodulin vaihtelu off-axis- kulman myötä. /5, s. 146./

Myös komposiitin liukumoduuli vaihtelee kuitukulman muutoksen seurauksena. Hooken lain mukaisesti liukumoduuli lausutaan seuraavasti:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (10)$$

jossa τ on leikkausjännitys ja γ on leikkausmuodonmuutos eli liukuma. Liukumoduuli saavuttaa maksimiarvonsa off-axis- kulmalla 45° . Toisin sanoen leikkausjännityksen

suhde leikkausmuodonmuutokseen on kyseisessä kulmassa suurimmillaan. Tämä johtuu siitä, että leikkausvoima kuormittaa kuituja sekä vedolla että puristuksella. Kuvassa 16 on esitetty liukumoduulin ja off-axis- kulman välinen relaatio. /5, s. 29- 30./



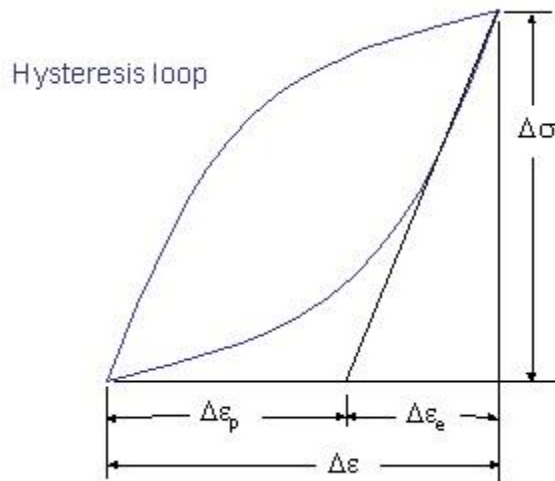
Kuva 16. Liukumoduuli off-axis -kulman funktiona. /5, s. 30./

5.2 Taajuuden vaikutus

Taajuudella tarkoitetaan jonkin tietyn tapahtuman esiintymistiheyttä. Väsyttävässä kuormituksessa tämä tapahtuma on kuormanvaihto. Taajuuden suure hertsi (Hz) kuvastaa sitä, kuinka monta kertaa kyseinen tapahtuma tapahtuu yhdessä sekunnissa. Yksiköinä tämä ilmoitetaan perussuureiden avulla $\frac{1}{s}$.

Väsytestauksessa taajuus tulisi valita siten, että materiaalissa tapahtuva hystereesistä aiheutuva lämpeneminen saadaan minimoitua. Hystereesillä tarkoitetaan ominaisuutta, joka estää esimerkiksi materiaalia palaamasta alkuperäiseen tilaansa. Tässä tapauksessa hystereesi johtuu energian häviämisestä. Energian häviäminen ilmenee täten materiaalin lämpenemisenä. Komposiitilla lämpeneminen voi johtua hystereesistä matriisissa tai hystereesistä kuidun ja matriisin rajapinnalla. Hystereesi vaikuttaa komposiitin kykyyn vastustaa väsymismurtuman etenemistä. /24, s. 92./

Erityisesti väsytestauksessa hystereesin minimoiminen on tärkeää. Mikäli lämpenemistä testauksen aikana ilmaantuu paljon, ei kyseessä enää välttämättä ole väsyminen vaan terminen pehmeneminen. Hystereesiä kuvataan usein niin sanotulla hystereesililmukalla, jossa muuttujina toimivat jännitys (σ) ja venymä (ϵ). Kuvassa 17 myös venymän elastinen ja plastinen alue on eritelty.



Kuva 17. Hystereesisilmukka. Jännityksen muutoksen suhde venymän muutokseen, venymän elastinen ja plastinen alue on eroteltu. /25./

Kuvassa hystereesisilmukan sisään jäävä pinta-ala kuvastaa energian häviötä (häviömoduuli). Silmukan alapuolella oleva pinta-ala on materiaalin varastomoduli. Häviömoduulin tulisi olla mahdollisimman pieni, jotta energiahäviö ja sitä kautta lämpeneminen vaikuttaisi mahdollisimman vähän testin tuloksiin.

Matriisimateriaalin, tässä tapauksessa epoksin, viskoelastinen käyttäytyminen aiheuttaa hystereesilämpenemistä. Yleisesti ottaen voimakkaasti kuitupitoista komposiittia testatessa esiintyy vain vähän hystereesilämpenemistä. Tällöin testauksen taajuus voi olla 10 hertsiä tai ylikin. Voimakkaasti matriisipitoisessa komposiitissa taas esiintyy merkittävää hystereesilämpenemistä. Tämänkaltaisen komposiitin testaamiseen suositellaan maksimissaan 5:n hertsin testaustaajuutta. Hystereesilämpenemisen ehkäisemiseksi voidaan siis käyttää matalia taajuuksia. Myös koekappaleen pinta/tilavuussuhteen kasvattaminen (toisin sanoen leveyden suhde paksuuteen) ehkäisee hystereesilämpenemistä. /20, s. 262; 24, s. 92./

Lasikuitulujitetussa komposiitissa on testissä käytettävällä taajuudella merkittävä vaikutus komposiitin ominaisuuksiin. Mitä suuremmalla taajuudella testaus suoritetaan, sitä pienemmäksi komposiitin lujuus putoaa. Erityisesti testattaessa komposiittia, jolla ei ole kuituja testaussuunnassa ja jossa matriisi käyttäytyy viskoelastisesti, on vaikutus merkittävä. Väsytestausta tehdessä suositellaan käytettäväksi vakiotajuutta. Matalalla kuormalla taajuuden tulisi olla suhteellisen korkea, kun taas korkealla kuormalla taajuuden tulisi olla suhteellisen matala. /20, s. 262./

5.3 Kuormitustason vaikutus

Väsyttävässä kuormituksessa jännitysamplitudi σ_a on jännityksen dynaamisen osuuden maksimiarvo kaavan 1 mukaisesti.

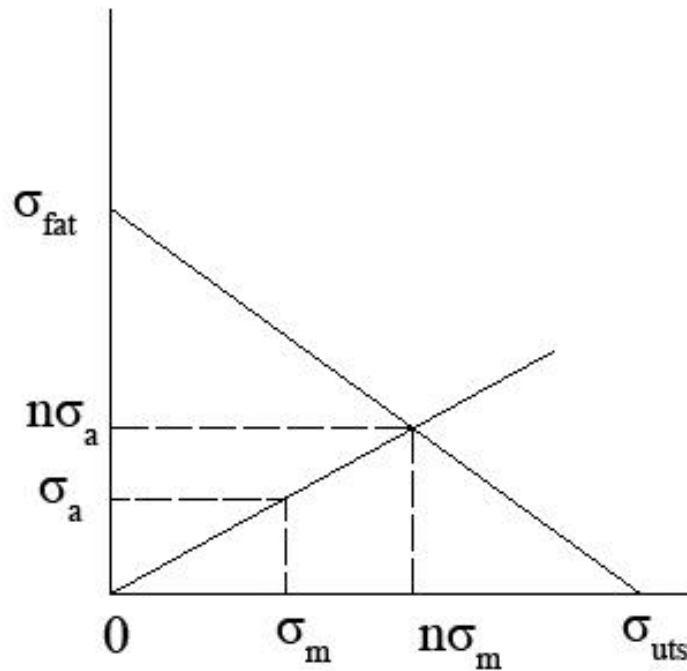
$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{max} - \sigma_{min}) \quad (11)$$

jossa σ_{max} on jännityksen maksimiarvo ja σ_{min} on jännityksen minimiarvo /18, s. 371/. Väsytyستیä voidaan yrittää nopeuttaa nostamalla jännitysamplitudia. Amplitudin nostaminen kuitenkin vaikuttaa useimmiten R-arvon suuruuteen ja tätä myötä myös testin tulosten analysoinnissa käytettävään S-N- käyrään. Tässä työssä staattisista testeistä saaduista murtolujuuksista voidaan jo päätellä jännitysamplitudin suuruutta väsytystestauksessa. Matalasyklisessä (syklejä 10^4 tai alle) väsytystestauksessa vaihtokuormituksella jännitysamplitudin maksimiarvo on noin 85 % murtolujuudesta, mutta korkeasyklisessä testauksessa (syklejä yli 10^4) jännitysamplitudin tulee olla huomattavasti pienempi, jotta koekappale ei murru heti ja riittävä määrä väsytyssyklejä saadaan suoritettua.

Yksi materiaalin väsymistä kuvaava malli on Goodmanin relaatio. Se kuvaa vuorovaiikutusta keskijännityksen ja jännitysamplitudin välillä. Goodmanin relaation mukaan jännitysamplitudi voidaan lausua kaavan 12 mukaisesti:

$$\sigma_a = \sigma_{fat} * \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{uts}}\right) \quad (12)$$

jossa σ_{fat} on materiaalin väsymisraja ja σ_{uts} on materiaalin vetomurtolujuus. Tällöin keskijännitys ja jännitysamplitudi voitaisiin määrittää alla olevan kuvan mukaisesti siten, että viivan alapuolelle sijoittuvalla parametripaarilla materiaali tulee kestäämään murtumatta. Kuvassa 18 on havainnollistettu Goodmanin relaatio.



Kuva 18. Goodmanin relaatio.

Mahdollisuutta määrittää testausparametreja eli keskijännitystä ja jännitysamplitudia etukäteen Goodmanin relaation avulla tutkittiin. Ongelmaksi muodostui komposiitin väsymisrajan määrittäminen. Komposiitilla ei usein ole selkeää väsymisrajaa ja se siis tulee määrittää nimenomaan väsytestauksen kautta. Kirjallisuuslähteiden mukaan Goodmanin relaatio olisi myös voimassa vain silloin, kun keskijännitys on 0 ja R-arvo -1. Kyseessä olisi täten vaihtokuormitus. /26, s. 131-132./ Koska käytettävä R-arvo on 0,1, ei Goodmanin relaatiota nähty tarpeelliseksi käyttää.

5.4 R-arvon vaikutus

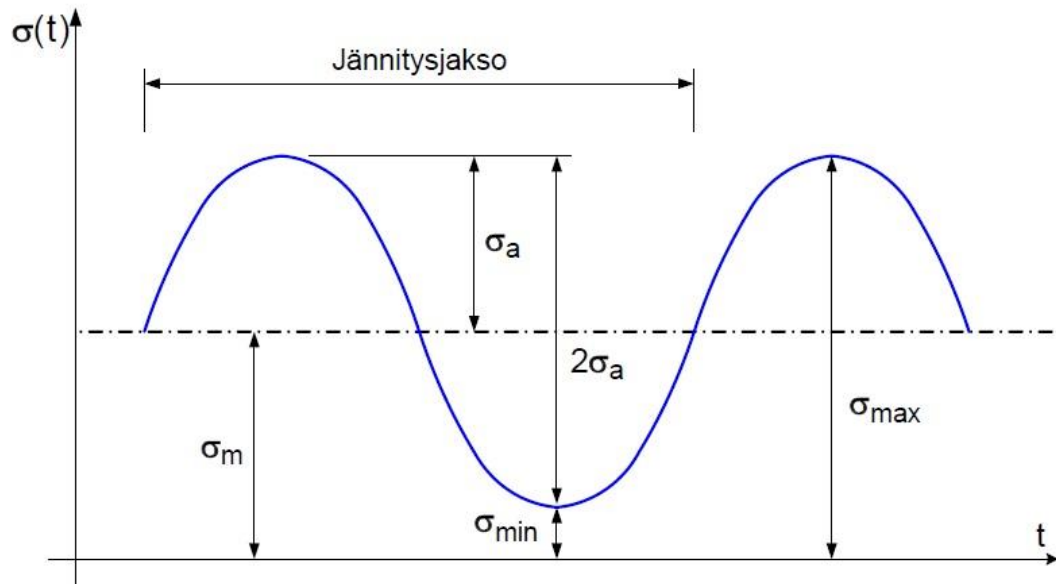
R-arvo tarkoittaa alemman ja ylemmän rajajännityksen suhdetta väsyttävässä kuormituksessa kaavan 13 mukaisesti. R-arvo vaikuttaa S-N- käyrän muotoon, joten S-N- käyrät ovat keskenään vertailukelpoisia vain, jos ne on määritelty samalla R-arvolla.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (13)$$

jossa σ_{min} on alempi rajajännitys ja σ_{max} on ylempi rajajännitys /18, s. 371/. Tällöin jännitysten etumerkit otetaan huomioon. Keskijännitys σ_m kuvaa jännityksen staattista osuutta kaavan 14 mukaisesti.

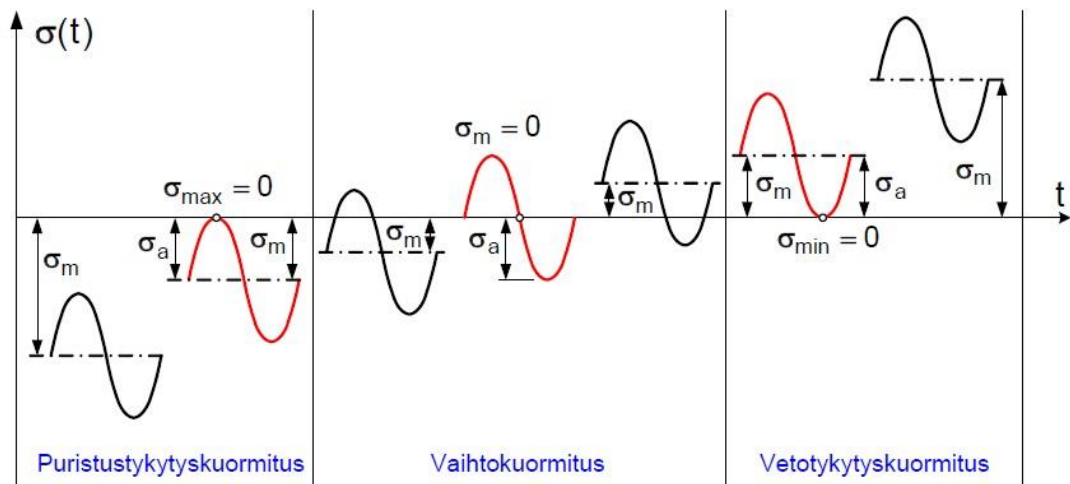
$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{max} + \sigma_{min}) \quad (14)$$

Oheisessa kuvassa 19 on havainnollistettu väsytestauksessa käytettävä sinikäyrä ja keskijännitys, jännitysamplitudi sekä minimi- ja maksimijännitykset.



Kuva 19. Sinikäyrä väsytestauksessa. /27, s. 2./

Väsyttävässä kuormituksessa jännitysvaihtelutyyppinä on kolme erilaista: puristustykytyskuormitus, vaihtokuormitus ja vetotykytyskuormitus. Opinnäytetyössämme tehtävänä oli tutkia R-arvojen 0.1, -1 ja 10 vaikutusta komposiitin väsymiseen. R-arvon ollessa 0.1 on kyseessä vetotykytyskuormitus, ja pääpaino työssämme oli väsymisen tutkiminen juuri tällä arvolla. Tässä tapauksessa ylempi rajajännitys on kymmenen kertaa suurempi kuin alempi rajajännitys. R-arvon ollessa -1 on kyseessä vaihtokuormitus ja R-arvon ollessa 10 on kyseessä puristustykytyskuormitus. Lujitemuovien väsytestauksessa käytetään yleisimmin vetotykytyskuormitusta ($0 < R < 1$), koska vaihtokuormituksessa ja puristustykytyskuormituksessa ohuet laminaatit nurjahtavat herkästi /20, s. 250/. Kuva 20 havainnollistaa eri jännitysvaihtelutyyppit. /20, s. 250/

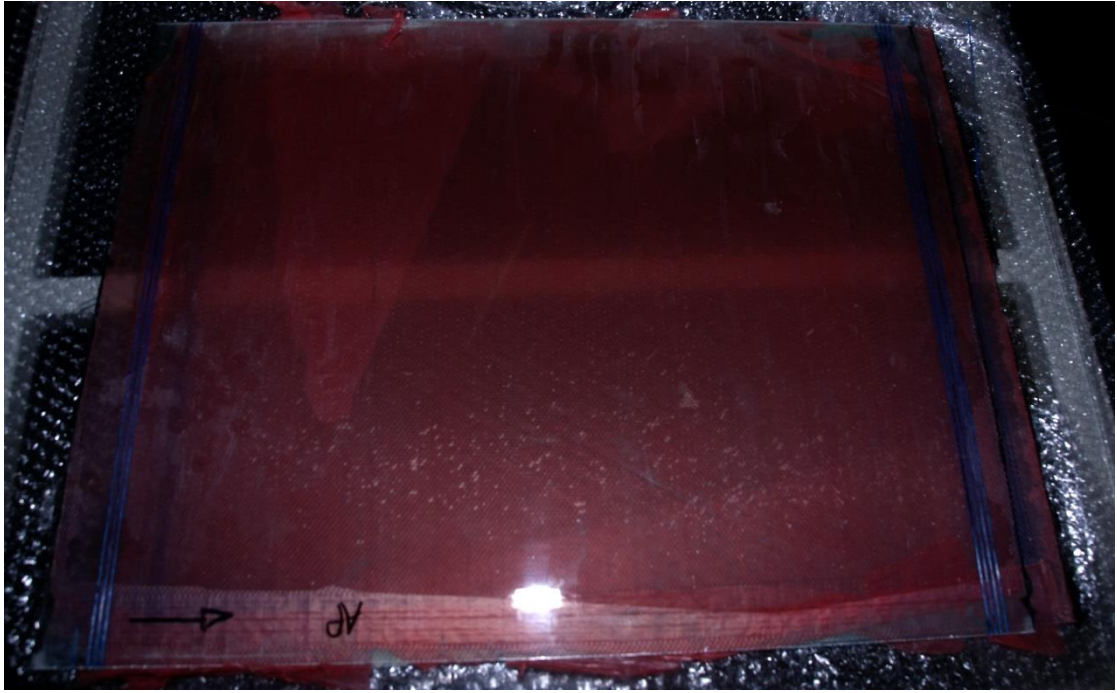


Kuva 20. Jännitysvaihtelutyypit. /27, s. 3./

Väsyttävässä testauksessa jännitysamplitudi, keskijännitys (jotka vaikuttavat suoraan R-arvoon) ja komposiitin off-axis- kulma vaikuttavat komposiitin elinikään. Testejä tehdään usein näiden tekijöiden eri variaatioilla. Esimerkiksi suurempi off-axis- kulma tai suurempi jännitysamplitudin arvo tarkoittavat lyhyempää elinikää /26, s. 131/. Lisäksi vetotykytyskuormituksen ollessa kyseessä pienempi R-arvo taas tarkoittaa lyhyempää elinikää keskijännityksen pysyessä samana. Jos R-arvo olisi esimerkiksi 0.5, tarkoittaisi tämä sitä, että jännityksen minimi- ja maksimiarvot olisivat lähempänä toisiaan kuin arvolla 0.1. Tällöin jännityksen dynaaminen osuus on pienempi ja väsyminen hitaampaa.

6. KOEKAPPALEIDEN VALMISTUS

Valmistaja toimitti aluksi kaksi kappaletta kuusilamellisia UD-laminaatteja (kuva 21). Tämän ensimmäisen koe-erän laminaateissa oli käytetty korkean lujuuden omaavaa S-lasikuitua, ja koe-erä nimettiin kirjaimella O. Koekappaleiden valmistusta varten laminaatteihin tuli työstää NC-työstökoneella urat, joita pitkin kappaleet voidaan lopulta sirkkelillä sahata irti. NC-työstöön tuli optimoida työstöradat järkevästi, jotta laminaatin hukkaprosentista saataisiin mahdollisimman pieni.



Kuva 21. 1-O – laminaatti. Kelaussuunta kuvassa ylhäältä alaspäin, vasemmalta oikealle. Siniset viivat ilmaisevat kuitusuunnan ja toimivat referenssisuorina.

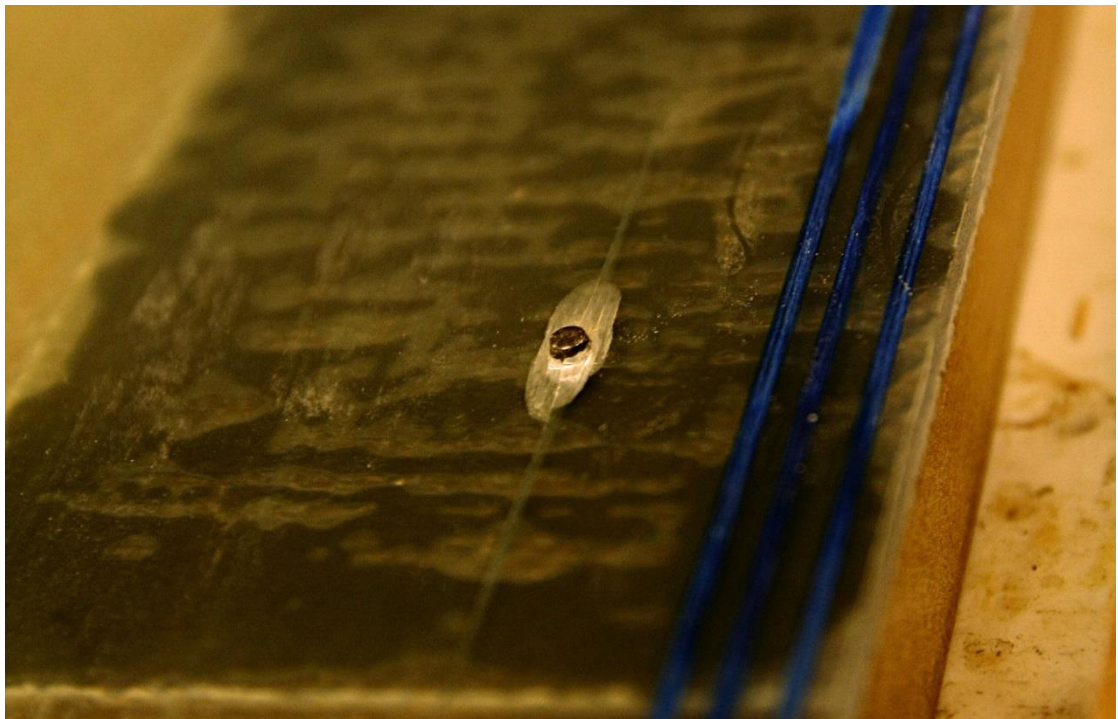
Laminaateille täytyi aluksi suorittaa jälkikövetus. Jälkikövetuksen avulla epoksihartsiin ja tätä myötä koko laminaattiin saadaan paremmat mekaaniset ominaisuudet, iskutikeus ja lämmönkestävyys /28/. Jälkikövetus suoritettiin uunissa 80 °C lämpötilassa, ja kovetuksen kesto oli kymmenen tuntia. Jälkikövetusta varten tuli varmistaa, että laminaatti säilyttää muotonsa prosessin aikana. Tätä varten viisikerroksisesta filmivanerista valmistettiin niin sanottu ”sandwich”, jossa laminaatit asetettiin kolmen vanerilevyn väliin. Ilman vanerilevyjä laminaatilla olisi jälkikövetuksen aikana ollut suuri riski lommahtaa. Lopuksi paketti ruuvattiin kiinni.

6.1 Liimaus

Yrityksestä toimitettiin end tab- materiaaliksi noin kahden millimetrin paksuista nelikerroksista biakksiaalista komposiittia, jossa kuidut olivat kulmissa +45° ja -45° ristikkäin. Päätettiin, että end tab- materiaali liimataan laminaatin päälle oikeisiin kohtiin liuskoina. Liimauksen helpottamiseksi laminaattiin porattiin halkaisijaltaan 3 mm paksut reiät, joihin saatiin asetettua tapit ohjaamaan end tab- liuskat paikalleen ja pitämään ne paikallaan. Liiman kuivuttua ja jälkikövetusprosessin jälkeen koekappaleet voitiin sahata sirkkelillä irti.

Kahdesta ensimmäisestä laminaatista päätettiin CAD-sommittelun tuloksena leikata 30 koekappaletta: 3 kappaletta kulmassa 0°, 12 kappaletta kulmassa 10°, 6 kappaletta kulmassa 30°, 3 kappaletta kulmassa 60° ja 6 kappaletta kulmassa 90°. Samaa sommittelua käytettiin myös myöhemmissä laminaattierissä pienin muutoksin. End tab-pituuden päätettiin lopulta olevan 55 mm, jotta se toimisi paremmin vetokoneessa. Piirustukset toimitettiin laboratorioinsinöörille, joka suunnitteli leikkausratojen työstöön NC-ohjelman. Lisäksi työstössä tehtiin reiät tappeja varten, jotka ohjaavat end tab-liuskat paikalleen. End tab-liuskojen leveydeksi tuli 70 mm, jotta sahaamiseen jäisi riittävästi työvaraa.

Kun ohjaustappien reiät oli porattu laminaattiin ja end tab-liuskat sahattu, voitiin ne liimata paikalleen. Liimaukseen käytettiin Scotch-Weldin DP190-epoksiliimaa. Ohjaustappit painettiin reikiin ja liima levitettiin end tab-liuskoihin. Havaittiin, että ohjaustappien asettaminen kannattaa suorittaa varovasti painamalla, jotta laminaattiin ei pääse syntymään vaurioita (kuva 22). Sekä ohjaustappien asentamisessa että niiden poistamisessa laminaatti tuli tukea siten, että kuidut kantavat mahdollisen kuorman ja taipumat saadaan minimoitua.



Kuva 22. Laminaatin kuitusuuntainen vaurio, syynä tapin ja reiän välinen liian tiukka sovitte.

Kun end tab- liuskat oli asetettu paikoilleen, tuettiin laminaatit MDF-kuitulevyillä. Aluksi liima pyrittiin puristamaan käsipuristimia käyttäen, mutta ne todettiin riittämättömiksi. Levyt laitettiin tasopuristimeen, jotta liima levittyisi tarpeeksi tasaisesti koko end tab- liuskan alueelle. Kun liima oli kuivunut ja levyt otettu tasopuristimesta, havaittiin, että MDF-levy tarttui jonkin verran end-tab- materiaaliin puristuksen aikana. Tämän vuoksi todettiin, että seuraavat laminaatit suojataan esimerkiksi tuorekelmulla tarttumisen ehkäisemiseksi. Liimatuille laminaateille suoritettiin liiman tuotetiedoissa suositeltu jälkikövetus, jonka kesto oli 4 tuntia ja lämpötila 80°C. MDF – jäämät hiottiin hienolla hiekkapaperilla pois. Insinööri teki NC-ohjelman koekappaleiden lopullista leikkausta varten.

6.2 Työstö

NC-työstössä kohdattiin ongelmia. Ensimmäisessä laminaattierässä käytetty S-lasikuitu oli liian kovaa terälle, ja terä oli kuumentua liikaa. Lisäksi terä kului työstöpinnastaan merkittävästi. Tämän vuoksi lopulta päätettiin, että koekappaleet sahataan sirkkelillä, ja vain ohjausura ajetaan jyrsimellä, jotta kulma saadaan varmasti oikeaksi. Sahauksesta johtuen kulman virheen todennäköisyys kasvaa, joten koekappaleet päätettiin numeroida sahausjärjestyksessä, jotta tiedetään, missä kappaleessa virheen mahdollisuus on suurin.

Koska sahausjälki ei ole yhtä tasaista kuin NC-työstökoneen jälki, koekappaleet jouduttiin hiomaan tasalevyisiksi. Hiominen päätettiin suorittaa käsin käyttäen tasaiselle vanerialustalle niitattua hiomapaperia. Sauvan leveyden tarkkuudessa pyrittiin pääsemään 0,05:n millimetrin sisään, kun koekappale mitataan kolmesta kohtaa. Kun hionta oli valmis, koekappaleiden paksuudet ja leveydet mitattiin mikrometriruuvilla kolmesta eri kohdasta. Mittausten perusteella leveyksille ja paksuuksille laskettiin keskiarvot ja saadut tulokset taulukoitiin. Lopuksi koekappaleet numeroitiin koodilla, esimerkiksi 1-O-0-1, jossa ensimmäinen numero kuvaa laminaattierää, kirjain kuidun valmistajaa, toinen numero kuitukulmaa ja kolmas numero koekappaleen järjestysnumeroa.

Yrityksestä toimitettiin toinen kahden kappaleen erä laminaatteja, joiden kuidut olivat eri valmistajalta kuin ensimmäisessä erässä. Tämä koe-erä nimettiin kirjaimella J. Leikkauspiirustuksia muutettiin hieman, jotta laminaateista saataisiin enemmän koekappaleita. End-tab- liuskan pituutta pienennettiin arvoon 60 mm, koska havaittiin,

ettei työvaraa tarvita niin paljoa kuin ensimmäisessä koe-erässä. Liimaustekniikkaa yritettiin helpottaa kiskon avulla, jotta liiman levitys helpottuisi ja saataisiin aikaan tasainen levitys myös reunojen osalta. Liimaa myös levitettiin end tab - materiaalin ylijäämäosasta improvisoidulla lastalla tasaisen levityksen varmistamiseksi ja ylimääräisen liiman poistamiseksi. Tämä työvaihe todettiin toimivaksi tasaisen levityksen varmistamiseksi ja ylimääräisen liiman pursuamisen eliminoimiseksi. Lisäksi liiman puristusvaiheessa MDF-levyjen ja laminaatin väliin laitettiin helposti irtoava kalvo, jotta levystä ei tarttuisi jäämiä laminaattiin.

Kolmannen kuidunvalmistajan koe-erä nimettiin kirjaimella H. Tälle koe-erälle koekappaleiden leikkauksessa kokeiltiin sirkkelin epätarkasta sahausjäljestä johtuen vesileikkausta. 1-H-erän koekappaleet saatiin leikattua NC-koneella, kun työstöarvoja muutettiin ja leikkauksessa käytettiin hiovaa terää. Sekä hiovalla terällä leikkaus että vesileikkaus todettiin toimiviksi ratkaisuksiksi. Lopputuloksena oli käsin sahausta huomattavasti pienempi hajonta koekappaleiden leveydessä, eikä käsinhiontaa tästä johtuen tehty.

7. STAATTISET TESTIT

Koekappaleille sovittiin tehtäväksi sekä staattiset testit eli vetokokeet että dynaamiset testit eli väsytestit. Staattisten testien tarkoituksena on määrittää materiaalin ominaisuuksia eri kuitukulmilla. Staattisten testien perusteella haluttiin määrittää erityisesti materiaalin murtolujuus, murtovenymä sekä kimmokerroin. Murtolujuuden määrittämisen avulla pystyttiin myös arvioimaan laskennallisesti väsytesteissä käytettäviä testausparametreja. Staattisia testejä tehtiin kullekin kuitukulmalle kolme kappaletta. Tulokset analysoitiin taulukkolaskentaohjelman avulla laskemalla edellä mainituille ominaisuuksille keskiarvot.

7.1 Testivalmistelut

Osaan koekappaleista sovittiin liimattavaksi venymäliuskat, joiden avulla voitiin määrittää tarkasti venymiä kuormituksen suunnassa, kuormitusta vastaan kohtisuorassa suunnassa sekä 45° kulmassa kuormitukseen nähden. Venymäliuska ilmoittaa arvot suhteellisena venymänä (mm/mm). Venymäliuskan tietojen avulla haluttiin määrittää

esimerkiksi kuitukoordinaatiston mukaiset jännitykset (σ_1 , σ_2 , τ_{12}) sekä Poissonin vakio (ν). Venymäliuskoja liimattiin jokaiselle testattavalle kuitukulmalle yhteen staattiseen sekä yhteen dynaamiseen koekappaleeseen (kuva 23). Muiden koekappaleiden venymän mittaamiseen käytettiin ekstensiometriä. Ensimmäisen laminaattierän eli O-erän liuskoitetuille koekappaleille mitattiin venymän arvot sekä venymäliuskoilla että ekstensiometrillä, jotta nähtäisiin, onko näiden mittausmenetelmien ilmoittamissa tuloksissa eroja.

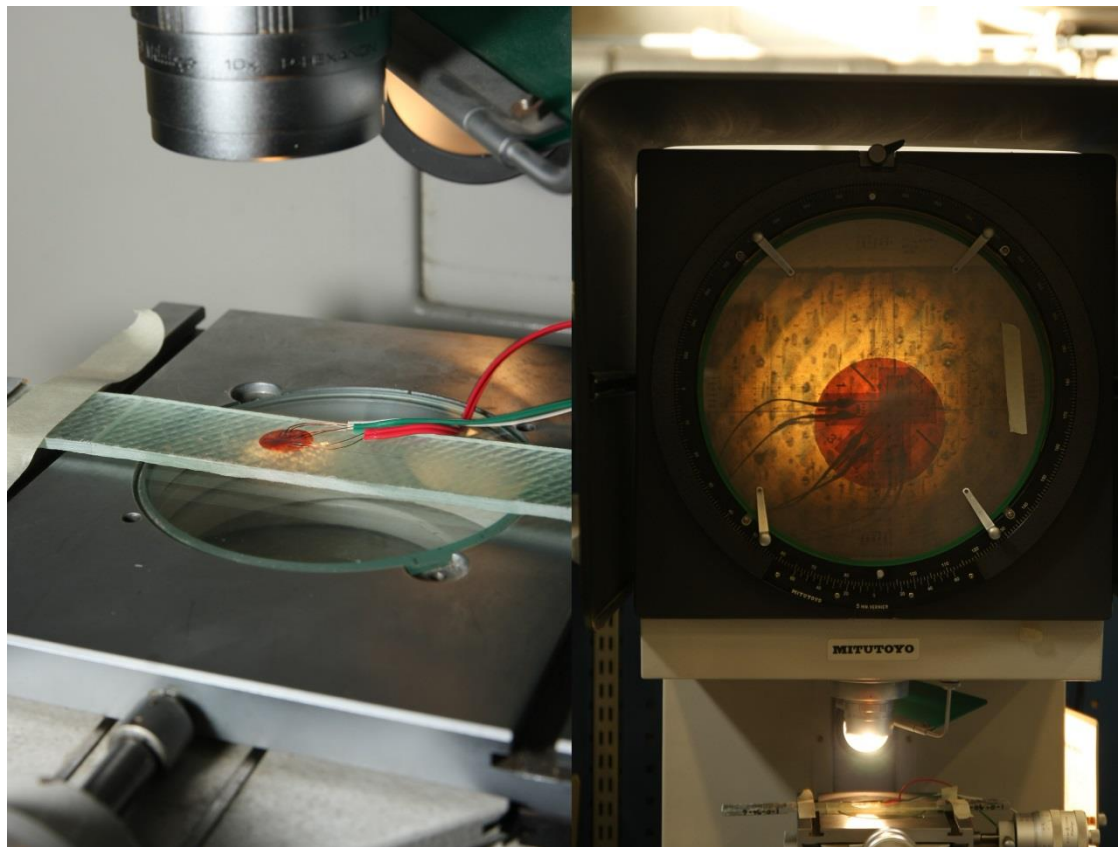


Kuva 23. Venymäliuskan liimaus.

Käytetyt venymäliuskat olivat Kyowan valmistamia KFG-5-120-D17- tyyppisiä kolmijohteisia rosetteja. Venymäliuskojen mittaussuunnat ovat 0° , 45° ja 90° . Venymäliuskat liimattiin koekappaleisiin Kyowan venymäliuskaohjekirjan liimausohjeen mukaisesti. Koekappaleen tasainen puoli puhdistettiin Industol-nimisellä etanolilla yhteen suuntaan pyyhkien. Koekappaleen leveys sekä mittapituus mitattiin ja keskikohta merkattiin kynällä mahdollisimman tarkasti. Liimana toimi Kyowan syanoakrylaatti-

pohjainen CC-33A- liima. Liima levitettiin oikeaan kohtaan keskelle koekappaletta ja venymäliuska painettiin mahdollisimman suoraan muovikalvon avulla. Myös johteiden päät liimattiin kiinni koekappaleeseen, jotta ne eivät katkeaisi herkästi. Liiman annettiin kuivua noin 5 minuuttia.

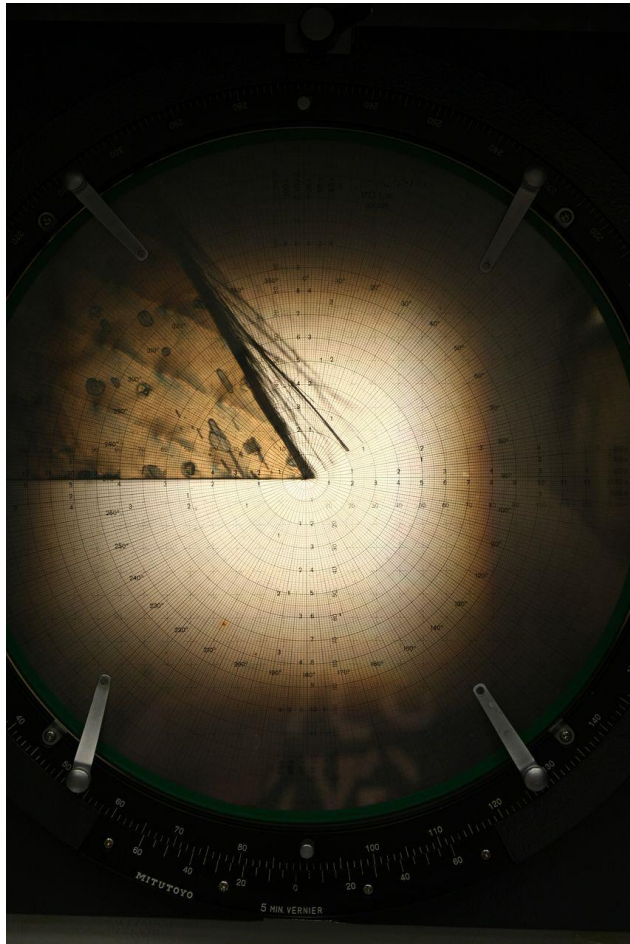
Kun venymäliuskat oli liimattu, suoritettiin kullekin liuskalle kulmakorjaus. Kulmakorjauksen tarkoituksena oli pienentää mahdollista virhettä, joka saattoi aiheutua siitä, että venymäliuskaa ei ollut liimattu aivan suoraan. Kulmakorjauksessa käytettiin apuna ääriiviivaheijastinta (kuva 24). Koekappaleesta määritettiin sekä kuitukulman virhe, joka saattoi aiheutua koekappaleiden valmistuksessa, sekä venymäliuskan virhe, joka saattoi aiheutua liimauksessa. Nämä korjaukset yhdistämällä saatiin määritettyä lopullinen kulmakorjaus. Täten venymäliuskojen ilmoittamia tuloksia ja niistä laskettuja materiaaliarvoja voitiin korjata kuitukoordinaatiston mukaiseksi.



Kuva 24. Ääriiviivaheijastin. Vasemmalla tarkasteltava kappale ja oikealla näkymä ääriiviivaheijastimesta.

Kulmakorjauksen virheeksi arvioitiin ± 2 astetta. Liuskan virhe oli yleisesti 0-2 astetta suuntaan tai toiseen, suurimmillaan 4 astetta. Kuitukulman arvioiminen todettiin jonkin verran haastavammaksi, sillä kuituja ei saatu testaamattomista koekappaleista

näkyviin, jolloin tarkastelu oli suoritettava murtopinnasta. Ylhäältä eli tason suunnasta tarkasteltuna murtopinta oli suhteellisen suuri, kuten kuvasta 25 voi havaita, eikä tarkkojen referenssipisteiden määrittäminen ollut mahdollista. Likimääräisen tarkastelun perusteella kuitukulma pysytteli +/- 2 asteen sisällä halutusta.



Kuva 25. Kuitukulman tarkastelu murtopinnasta.

7.2 Staattisten testien suorittaminen

Sekä staattiset testit että dynaamiset testit suoritettiin MTS-kuormituskehällä (Material Test System). Staattisia testejä varten kuormituskehään eli vetokoneeseen asennettiin leuat paikalleen. Myös vasteet säädettiin paikoilleen koekappaleiden mittojen mukaisesti. Venymän mittauksessa käytetty MTS:n ekstensiometri oli kalibroitu valmiiksi jo aiemmin.

Staattisia testejä varten tehtiin mittausohjelma, jolla testit voitiin suorittaa vain pieniä muutoksia tekemällä. Off-axis- kulmille käytettiin standardin mukaista vetonopeutta 1

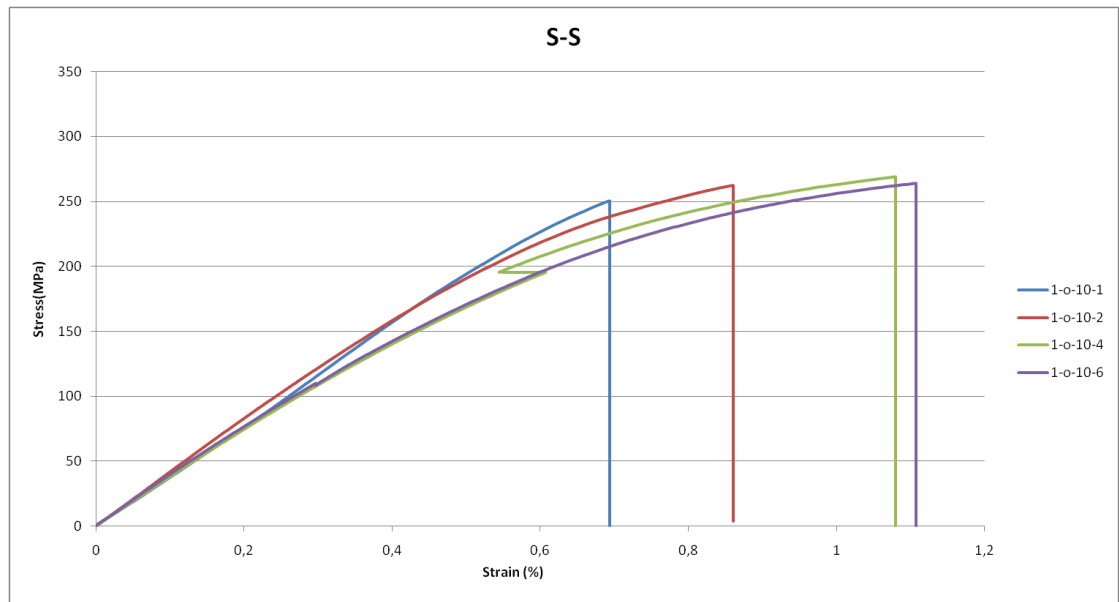
mm/min ja 0-asteen kulmalle vetonopeutta 2 mm/min. Lisäksi leukapaineita muutettiin tapauksen mukaisesti riippuen siitä, kuinka paljon voimaa koekappaleen murtoon tarvitaan. Leukapaineet laskettiin valmiin Excel-pohjan avulla. Muille kuin 0-asteisille kappaleille leukapaine oli yleisesti 5 MPa, ja nollasuuntaisille 10-15 MPa. Venymäliuskoitettujen kappaleiden testauksessa johdot kiinnitettiin rasiaan, joka oli kytketty nä tietokoneeseen. Kunkin venymäliuskasarjan kohdalla tuli ottaa huomioon liuskava-
kio, jonka perusteella kalibroitiin Excel-pohjan avulla oikeat vastukset kullekin venymäliuskalle.

Staattisia testejä suoritettiin kolme kappaletta kullekin kuitukulmalle. Mittausohjelma keräsi jokaisesta sauvasta erillisen datatiedoston. Datatiedostosta nähtiin koko vedon ajalta voima (kN), jonka perusteella voitiin laskea jännitykset, kun koekappaleen poikkipinta-ala tiedettiin. Lisäksi datatiedosto keräsi talteen venymät sekä venymäliuskoista että ekstensiometrissä. Näistä tiedoista laskettiin mm. kimmomoduulit, murtojännitykset ja murtovenymät. Lisäksi piirrettiin jännitys-venymäkäyrät. Seuraavassa taulukossa 2 ja kuvassa 26 on esitettyä koekappalesarjan 1-O-10 perusvetotiedot sekä jännitys-venymäkäyrät.

Taulukko 2. Sarjan 1-O-10 vetotiedot.

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	FM [N]	σ_M [MPa]	ϵ_M [%]	$\sigma_{\epsilon=0,2\%}$ [MPa]	$\sigma_{\epsilon=0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{\epsilon=0,25\%}$ [MPa]	Et [MPa]
1-o-10-1	2,56	24,75	63,31	15853,0	250,4	0,69	75,4	18,0	95,3	38 638
1-o-10-2	2,67	24,22	64,55	16928,1	262,2	0,86	82,7	20,3	102,3	40 958
1-o-10-4	2,58	24,92	64,38	17329,8	269,2	1,08	74,2	18,7	91,6	36 431
1-o-10-6	2,58	24,77	63,78	16854,9	264,3	1,11	76,4	19,7	93,9	37 119
Max.	2,7	24,9	64,6	17329,8	269,2	1,1	82,7	20,3	102,3	40958,3
Min.	2,6	24,2	63,3	15853,0	250,4	0,7	74,2	18,0	91,6	36430,7
Average	2,6	24,7	64,0	16741,5	261,5	0,9	77,2	19,2	95,8	38286,3
st.deviation	0,0	0,3	0,6	628,0	8,0	0,2	3,8	1,0	4,6	2 005,8
st.dev.-%	1,8	1,2	0,9	3,8	3,0	20,9	4,9	5,4	4,8	5,2



Kuva 26. Sarjan 1-O-10 jännitys-venymäkäyrät.

Koekappaleiden kimmomoduulit laskettiin standardin ISO-527 mukaan 0,05 % ja 0,25 % venymissä olleista jännityksistä kaavan 15 mukaan.

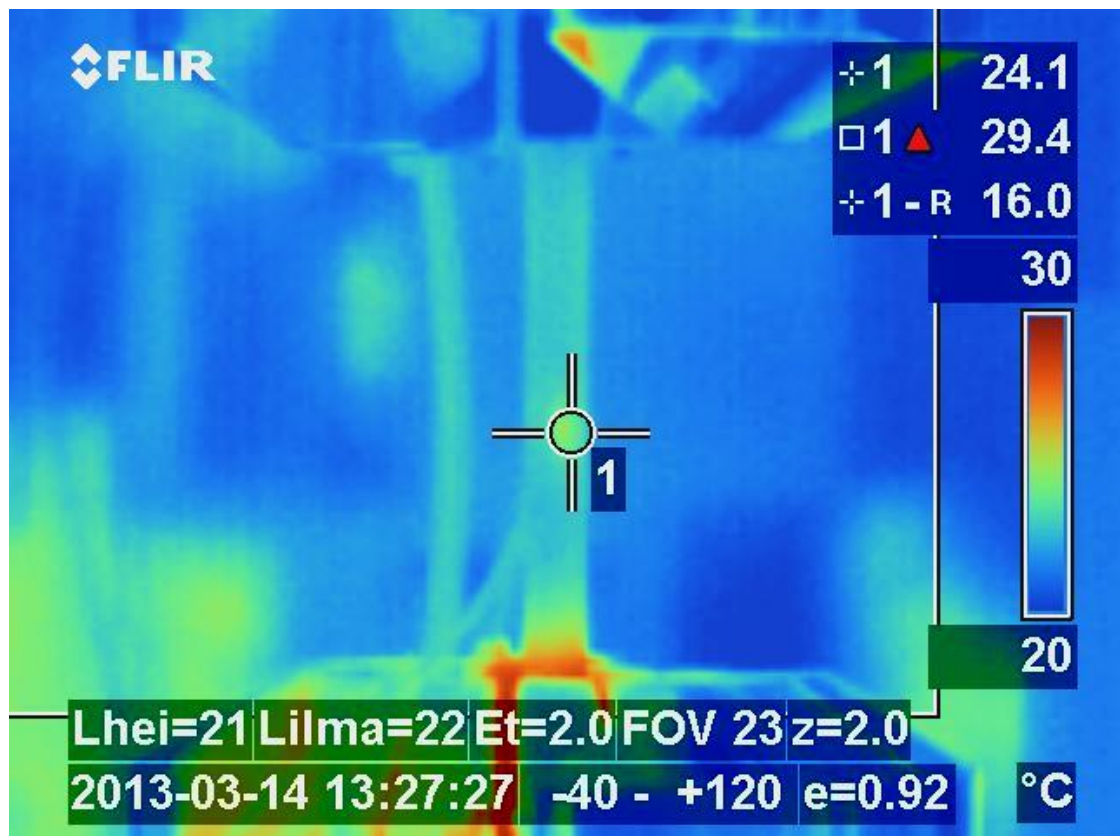
$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta l} \quad (15)$$

jossa $\Delta\sigma$ on jännityksen muutos ja Δl venymän muutos. Kimmomoduulin pieni hajonta testaussarjassa kuvastaa testattavien kappaleiden tasalaatuisuutta. Kimmomoduulia laskiessa tuli pitää huolta, että jännitykset ja venymät otetaan lineaariselta alueelta. Off-axis -kulmalla 90 astetta täytyi poiketa standardista, sillä koekappaleiden murtovenymä oli alle 0,25%. Ylemmän venymän arvo päätettiin tässä tapauksessa laskea tapauskohtaisesti joko 0,10 tai 0,15 prosenttiin.

8. VÄSYTYSTESTIT

Väsytykset suoritettiin samalla MTS:n laitteistolla kuin staattiset testit. Väsytyksille tehtiin oma väsytysohjelma, jota pieniä muutoksia tekemällä pystyttiin helposti muokkaamaan kullekin koekappaleelle sopivaksi. Myös joissakin väsytyksissä käytettiin venymäliuskoja. Liuskojen avulla pyrittiin määrittämään esimerkiksi testin aikana tapahtuvaa hystereesiä.

Väsytestejä suoritettiin jokaiselle eri kuitutyypille sekä kuitukulmalle. Testeissä käytettiin R-arvona, eli minimi- ja maksimijännityksen suhteena, arvoa 0.1. Testaus-taajuutena käytettiin arvoa 10 Hz, eli kuormituskehä suoritti kymmenen kuormanvaihtoa sekunnissa. Yleensä komposiittien väsytestauksessa suositellaan käytettävän matalampia taajuuksia (noin 1-5 Hz), mutta testien nopeuttamiseksi päädyttiin käyttämään suurempaa taajuutta. Lisäksi havaittiin, että koekappaleissa ei tapahtunut merkittävää lämpenemistä suuremmallakaan taajuudella. Oheinen lämpökameran kuva (27) osoittaa, että koekappaleen keskiosassa lämpötila on 24,1 °C, joka on termisen pehmenemisen kannalta tarkasteltuna siedettävissä rajoissa. Koska koekappaleiden mitattu kuitupitoisuus oli välillä 75,1 -77,9 painoprosenttia, ei matriisin lämpenemistä päässyt tapahtumaan. Matalamman kuitupitoisuuden komposiiteilla lämpeneminen olisi näillä parametreilla todennäköisesti suurempaa. Lämpökameran kuva on suuntaa antava, sillä koekappaleen pinnan emissiivisyys ei ole tiedossa. Korkeampaa taajuutta ei välttämättä kannata käyttää. Kuva on otettu noin 100 000:n väsytyssyklin jälkeen.



Kuva 27. Lämpökameran kuva väsytestauksessa olevasta koekappaleesta.

Testejä varten kullekin koekappaleelle laskettiin voiman arvot, joilla kuormituskehä kappaletta väsyttää. Staattisten testien tulosten perusteella tiedettiin keskimääräiset murtolujuudet kussakin materiaalissa eri kuitukulmilla, ja näiden murtolujuuksien perusteella voitiin laskea väsytyсарvot, kun otettiin huomioon kunkin kappaleen poikkipinta-ala. Pääasiassa väsytystestejä suoritettiin siten, että ensimmäiselle koekappaleelle väsytyksen maksimijännitykseksi laskettiin 60 % murtolujuudesta, seuraavalle 55 %, sitä seuraavalle 50 % ja viimeiselle 45 %. Väsytyсарvoja laskettiin joillekin koekappaleille myös venymätasojen perusteella, mutta tämä tapa hylättiin, koska venymissä hajonta oli suurempi ja väsytyсарvojen laskenta oli yksinkertaisempaa jännityksien perusteella. Koska ekstensiometri ei pystynyt mittaamaan venymää luotettavasti väsytystestin aikana, täytyi venymät mitata ennen testiä. Venymät mitattiin ohjaamalla voima yhden kerran väsytyksen maksimiarvoon. Useilla koesarjoilla viimeistään 45 %:n kuormitustasolla havaittiin, että testit kestivät todella pitkään ja koekappale olisi todennäköisesti kestänyt loputtomiin. Toisin sanoen näillä kuormitustasoilla liikuttin väsymisrajan alapuolella. Monessa tapauksessa jo 50 %:n kuormitustasolla testin jatkuttua yli miljoonan syklin keskeytettiin testaus ajan säästämiseksi.

9. TULOSTEN ANALYSOINTI

Staattisten testien ja väsytystestien pohjalta saatiin suuri määrä dataa. Tulosten tulkitsemisen helpottamiseksi data muutettiin taulukoiksi ja kuvaajiksi, kuten esimerkiksi S-N- käyriksi ja jännitys-venymäkäyriksi.

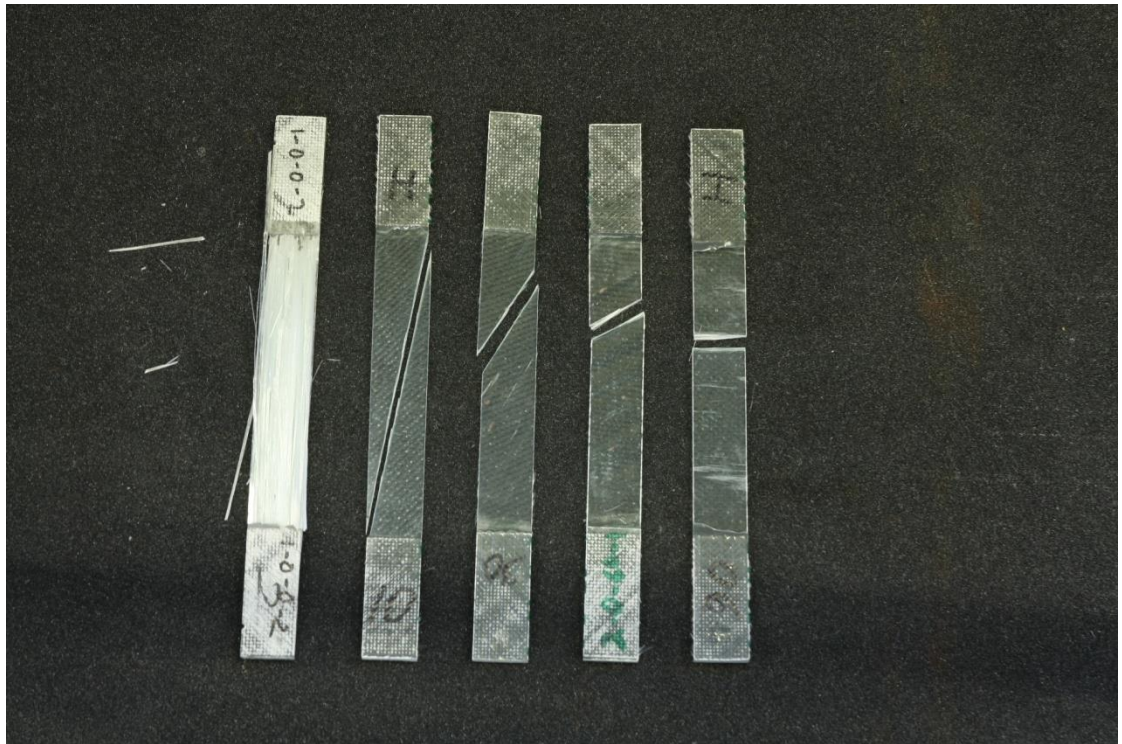
9.1 Staattiset testit

1-O sarjan staattisissa mittauksissa ilmeni, että off-axis- kulman kasvaessa murtolujuuksien hajonta kasvaa. 0-asteisella kuidulla suhteellinen keskihajonta oli 3,7 %, kun 90-asteisella hajonta kohosi peräti 16,2 prosenttiin. Tämä vaikeutti suurempien off-axis – kulmien väsytystestausta, sillä hajonnan vuoksi ei voitu tietää väsytyсарplitudin todellista suhteellista jännitystasoa.

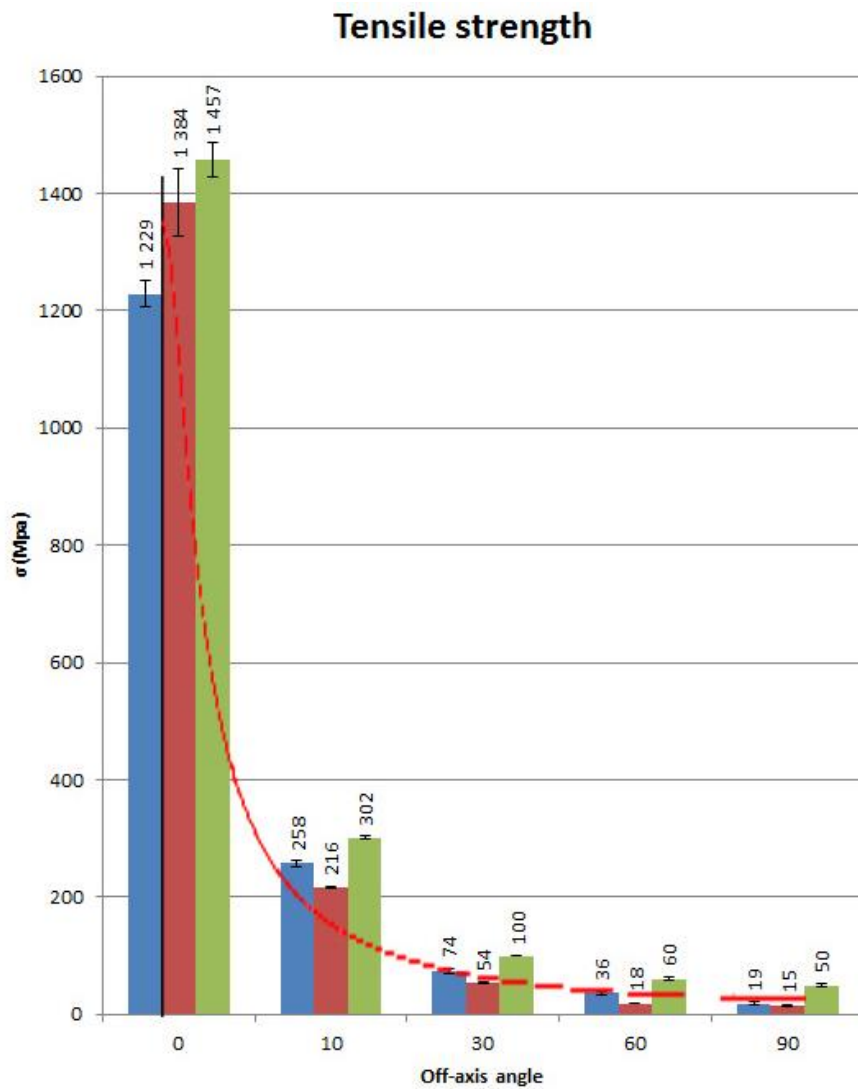
Kimmomoduulien suhteellinen keskihajonta oli O-sarjassa välillä 1,1 % -10,5 % ja H-sarjassa 2,6 % - 8,1 %. Yllättävää oli se, että O- ja H-kuitujen 90-asteisten sauvojen kimmomoduuli oli korkeampi kuin kyseisten kuitujen 60-asteisilla sauvoilla. Tämä

voi johtua 90-asteisten sauvojen suuremmasta hajonnasta. Pienimmät suhteelliset keskihajonnat olivat kulmilla 0° ja 60° . Kun tarkastellaan kimmomoduulien ja murtolujuuksien keskihajontoja kaikilla kuitukulmilla, vaikuttaa siltä, että O-laminaatti on epätasalaatuisinta. O-, J- ja H-sarjojen staattinen testausdata ja jännitys-venymäkäyrät löytyvät liitteistä 1-3.

Vetomurtolujuudet laskettiin Excelin avulla jokaiselle off-axis- kulmalle. Tuloksia verrattiin yleisesti tiedettyyn laminaatin off-axis- käyttäytymiseen sekä Tsai-Hill- vauriokriteeriin. Testien tulokset käyttäytyivät melko tarkalleen Tsai-Hill- kriteerin mukaisesti. 0-asteisten sauvojen vetomurtolujuus on noin viisinkertainen 10-asteisiin sauvoihin verrattuna. Ero 60-asteisten ja 90-asteisten sauvojen vetomurtolujuuksissa on taas melko pieni. Tarkastelun perusteella staattisten testien tuloksia voidaan pitää luotettavina. Vertailu on esitetty kuvassa 29.



Kuva 28. Vedetyt staattiset koesauvat eri kuitukulmilla: 0, 10, 30, 60 ja 90 astetta.



Kuva 29. Staattisten vetosauvojen vetomurtolujuus verrattuna Tsai-Hill- vaurio-kriteeriin. Tsai-Hill- kriteerin mukainen murtumiskäyttäytyminen on kuvattu punaisella viivalla.

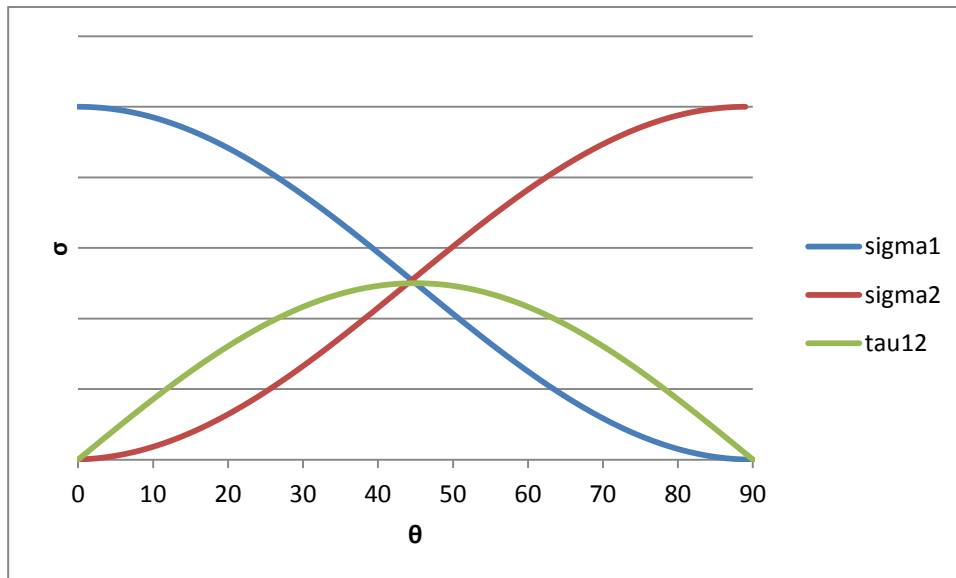
Venymäliuskoitettujen staattisten koesauvojen liuskatietojen perusteella pyrittiin laskemaan pääjännitykset (σ_1, σ_2) ja leikkausjännitys τ_{12} sekä Poissonin vakio ν . Kyseiset arvot laskettiin Kyowan venymäliuskaohjekirjan kaavojen ja Excelin avulla. Excel-ohjelma tehtiin itse, ja se määrittäi kyseisiä arvoja koko testin ajalta. Jännitysten määrittämisessä kohdattiin ongelmia. Kaavoista ei ilmennyt, laskevatko kaavat jännitykset vedon suunnassa vai kuitusuunnassa. Kyseiset jännitykset laskettiin lopulta vetomurtolujuuksien perusteella. Jännitykset kuitukoordinaatistossa saatiin seuraavien kaavojen 16-18 avulla.

$$\sigma_1 = \sigma_x \cos^2 \theta \quad (16)$$

$$\sigma_2 = \sigma_x \sin^2 \theta \quad (17)$$

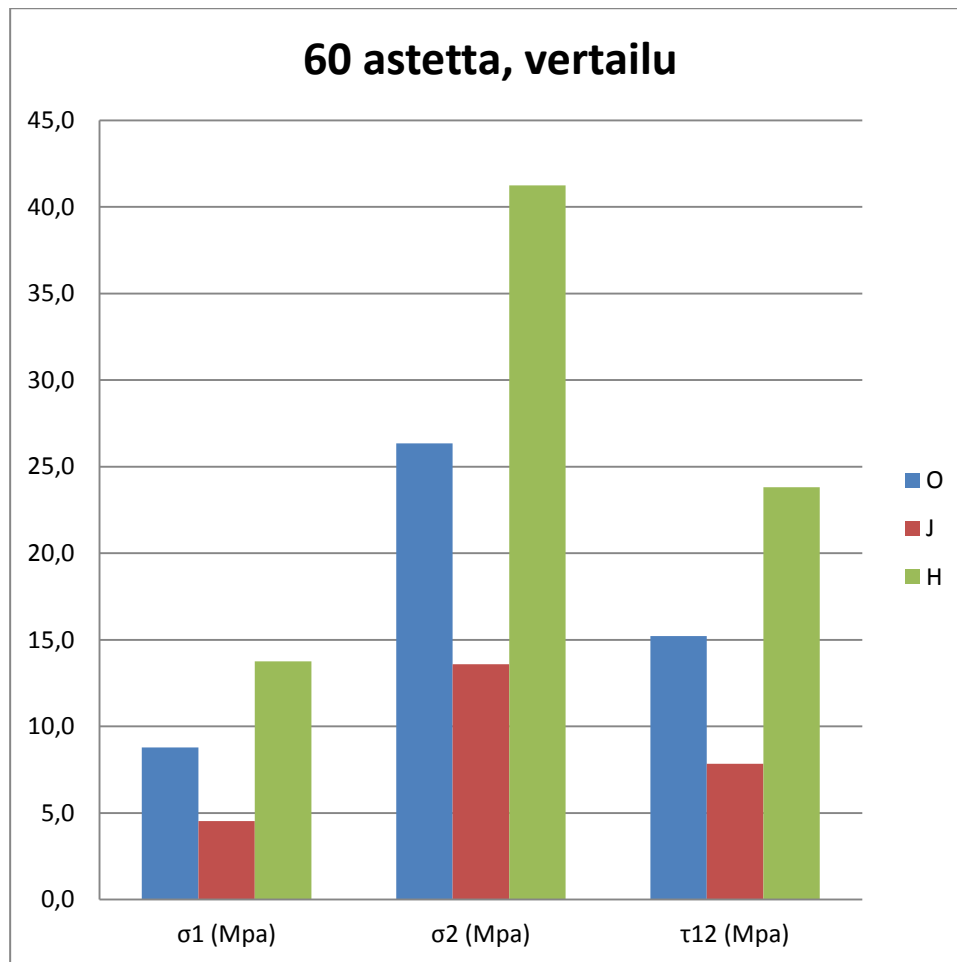
$$\tau_{12} = \frac{1}{2} \sigma_x \sin 2\theta \quad (18)$$

joissa σ_x on vetomurtolujuus ja θ on off-axis- kulma. Kuvassa 30 on esitetty laskennalliset pääjännitykset ja leikkausjännitys off-axis- kulman funktiona. /20, s. 105./



Kuva 30. Pääjännitykset ja leikkausjännitys off-axis- kulman funktiona.

Laskenta tehtiin off-axis- kulmille 10° , 30° ja 60° . Laskennan perusteella voidaan todeta, että asteluvuilla 10° ja 30° murtuman aiheuttaa leikkausjännitys τ_{12} , toisin sanoen kyseisillä kulmilla leikkausjännitys on suurempi kuin kuitua vastaan kohtisuora jännitys σ_2 . 60° asteessa taas σ_2 on suurempi kuin τ_{12} , joten σ_2 toimii murtuman aiheuttajana. Laskennallisesti murtuman aiheuttaja vaihtuu asteluvussa 45° . Vertailutaulukot eri kuitutyypeille sekä kulmakohtaiset taulukot on esitetty liitteessä 5. Kuvassa 31 on esitetty 60° -asteisten sauvojen pääjännitykset ja leikkausjännitys.



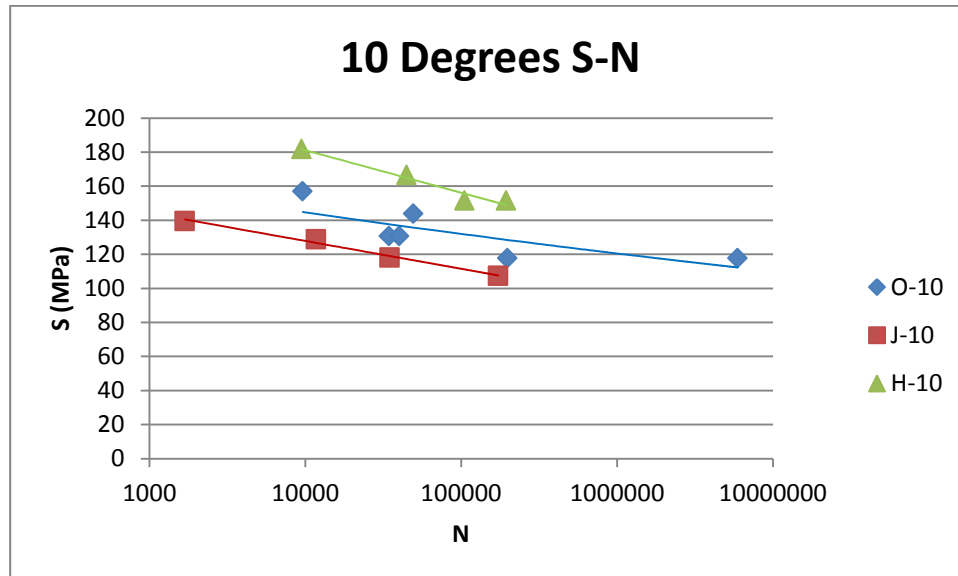
Kuva 31. Pääjännitykset ja leikkausjännitys 60-asteisissa koekappaleissa.

9.2 Väsytestit

Suoritettujen väsytestien tulosten pohjalta saatiin tehtyä S-N- käyrät jokaiselle off-axis- kulmalle. Kuitutyyppejä vertailtiin keskenään sekä kunkin kuitutyypin off-axis- kulmat asetettiin samaan taulukkoon. S-N- käyrät tehtiin sekä suhteellisilla arvoilla (maksimijännityksen % -osuus murtolujuudesta) että absoluuttisilla arvoilla. Myös ϵ -N- käyrät (venymä-elinikä) tehtiin, mutta venymien suuren hajonnan takia tämä analysointitapa todettiin epäluotettavaksi. Lisäksi venymää oli vaikea määrittää testin aikana. Väsytestiparametrien laskeminen kullekin kuitukulmalle jännityksen perusteella säilyttää tulosten keskinäisen vertailukelpoisuuden.

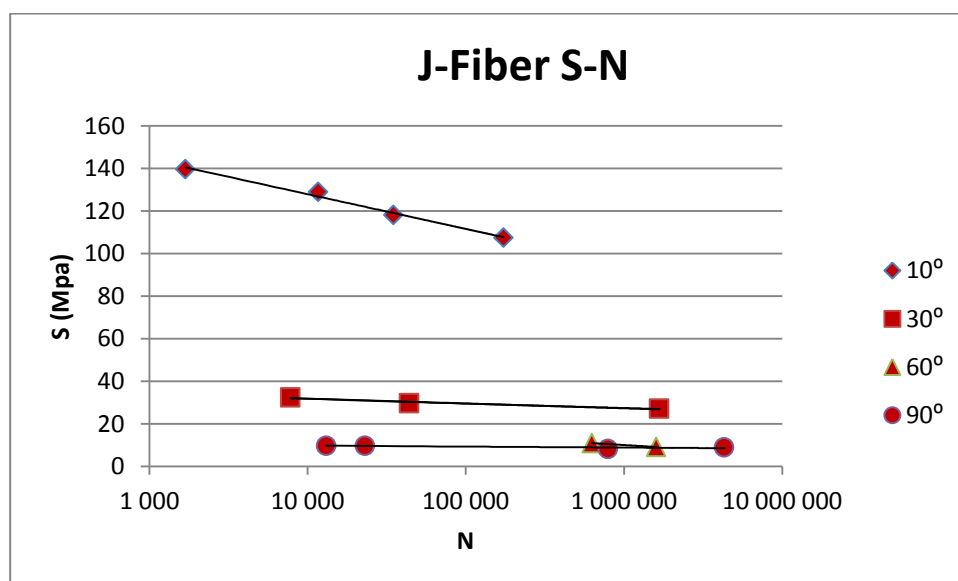
S-N- käyrien perusteella staattisten testien tulosten ja väsytestien tulosten välille löytyi korrelaatiota. Kuvassa 32 on esitettyä 10-asteisten koesauvojen S-N- käyrät. Käyristä voi päätellä, että parhaat väsymisominaisuudet on H-kuidulla (vihreä väri).

H-kuidulla oli myös paras vetomurtolujuus, kuten kuvasta 29 ilmenee, sekä paras kimmomoduuli. S-N- käyrät löytyvät liitteestä 4.



Kuva 32. 10-asteen S-N- käyrä, eri kuitutyypin vertailu

S-N- käyristä huomattiin myös, että 60- ja 90-asteisten koekappaleiden väsymiskäyttäytyminen oli jokseenkin samanlaista. S-N- käyrät kulkevat suurin piirtein samassa tasossa. Tämä voi mahdollisesti johtua siitä, että suuremmilla off-axis- kulmilla kuidun lujittava vaikutus pienenee, jolloin matriisi joutuu kantamaan suuremman osan rasituksesta. Kuvassa 33 on esitetty J-kuidun S-N- käyrät kullekin off-axis- kulmalle.



Kuva 33. J-kuidun S-N- käyrät eri off-axis- kulmilla.

10. POHDINTA

Opinnäytetyössä päästiin kohtalaisen hyvin ennalta asetettuihin tavoitteisiin. Sekä staattiset testit että väsytestit saatiin suoritettua suunnitelman mukaisesti. Työn tärkeimpään tutkimusongelmaan, eli staattisten testien tulosten ja väsytestitulosten vertailuun, saatiin tarvittava määrä tuloksia. Staattisen käyttäytymisen ja väsymiskäyttäytymisen välille löydettiin korrelaatiota. Teoriatutkimus oli myös onnistunut, koska sen pohjalta saatiin tärkeää tietoa käytännön osuuden suorittamiseksi.

Käytetty menetelmä vaikuttaa sopivan hyvin laminaatin off-axis- väsymisominaisuuksien tutkimiseen. Väsytestit vaativat kuitenkin useampia toistoja, jotta S-N- käyriä saataisiin edelleen tarkennettua. Tämä vaatisi taas enemmän aikaa. Lisäksi työssä käytettiin useampia erilaisia menetelmiä koekappaleiden valmistuksessa. Tulosten luotettavuuden kannalta koekappaleet tulisi valmistaa kustakin laminaatista samalla menetelmällä. Toisin sanoen testausmenetelmä täytyisi pyrkiä pitämään alusta loppuun mahdollisimman samanlaisena.

Tutkimus oli mielenkiintoinen ja opettavainen prosessi. Opinnäytetyön edetessä saatiin paljon tietoa tutkimustyön eri osa-alueista. Lisäksi viestintätaidot kehittyivät ja yritys elämä tuli tutummaksi. Sekä automaattinen että manuaalinen tietojenkäsittelytaito kehittyi paljon. Yhteydenpito toimeksiantajan kanssa toimi hyvin ja tiedonkulku hyödytti molempia osapuolia. Toimeksiantaja sai kaivattua tietoa off-axis- väsymisominaisuuksista. Tutkimuksessa olisi aiheutta jatkotöihin, esimerkiksi tulosten tarkentamisen osalta. Opinnäytetyössä oli todella paljon tutkittavaa kahdellekin opiskelijalle, ja moni asia tai ongelma jäi melko vähälle huomiolle. Opinnäytetyön aihealue on haastava ja laminaattien väsymistutkimuksessa riittäisi paljon tutkittavaa.

LÄHTEET

- (1) Akovali, Güneri. Handbook of Composite Fabrication. Shrewsbury, GBR: Smithers Rapra, 2001
- (2) Ahlstrom oyj. 2013. WWW-dokumentti. <http://www.ahlstrom.com/fi/ahlstrom>. Päivitystietoa ei saatavilla. Luettu 1.3.2013
- (3) George H. Staab. Laminar Composites. Woburn, MA, USA: Butterworth-Heinemann, 1999
- (4) Saarela, Olli, Airasmaa, Ilkka, Kokko, Juha. Komposiittirakenteet. Suomi; Muoviyhdistys, 2007
- (5) Powell, P.C. Engineering with Fibre-Polymer Laminates. London, UK: Chapman & Hall, 1994
- (6) Hollaway, L.C, Head, P.R. Advanced Polymer Composites and Polymers in the Civil Infrastructure. Oxford: Elsevier Ltd, 2001
- (7) Piggott, Michael R. Load Bearing Fibre Composites. Second Edition. Hingham, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 2002
- (8) Silberschmidt, Vadim V. 2006. Effect of micro-randomness on macroscopic properties and fracture of laminates. Journal of Materials Science 20, 6768-6776
- (9) Jones, Robert M. Mechanics of Composite Materials. USA: Hemisphere Publishing Corporation, 1975
- (10) Shaw, Montgomery T, MacKnight, William J. introduction to Polymer Viscoelasticity. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005
- (11) POLYKO 2010. Polymeerimateriaalien Perusteet Osa 2. Tampereen Teknillinen Yliopisto, Polymeeripohjaisten materiaalien käyttöaluekohtaisesti räätälöityjen koulutusmateriaalien tuottaminen - seminaari. PDF – dokumentti. <https://www.tut.fi/ms/muo/polyko/>. Muokattu 24.5.2010 . Luettu 8.2.2013
- (12) Lakes, Roderic. Viscoelastic Materials. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2009
- (13) Lin, Yn-Hwang. Polymer Viscoelasticity : Basics, Molecular Theories, Experiments and Simulations (2nd Edition). River Edge, NJ, USA: World Scientific Publishing Co, 2010
- (14) French, David N 1991. Creep and Creep Failures. WWW-dokumentti. <http://www.nationalboard.org/Index.aspx?pageID=181>. päivytystietoa ei saatavilla. Luettu 24.4.2013
- (15) Hayes, Brian S. Gammon, Luther M. Optical Microscopy of Fiber-Reinforced Composites. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2010
- (16) Campbell, F.C. Structural Composite Materials. Materials Park, OH, USA: ASM International, 2010
- (17) Fatemi, Ali 2011. Chapter 2 – Fatigue Desing Methods. University of Toledo. PDF-dokumentti
- (18) Outinen, Hannu, Salmi, Tapio, Vulli, Pertti. Lujuusopin perusteet. Tampere; Pressus OY, 2007

- (19) Stress-Life fatigue: An EngineersToolbox Calculation Module. WWW-dokumentti. www.fea-optimization.com/ETBX/stresslife_help.html Muokattu 10.4.2011. Luettu 12.3.2013
- (20) Hodkinson, J.M ja muut. Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites. Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2000
- (21) Shukla, Arun ja muut, Dynamic Failure of Materials and Structures. New York, USA, 2010
- (22) Dennis W. Worthem. Flat Tensile Specimen Design for Advanced Composites. NASA, 1990
- (23) Dissemination of IT for the Promotion of Materials Science (DoITPoMS). WWW – dokumentti. http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fibre_composites/index.php. Muokattu 1/2008. Luettu 25.1.2013
- (24) Moore, D.R, Pavan, A, Williams, J.G. Fracture Mechanics Testing Methods for Polymers Adhesives and Composites. Amsterdam: Elsevier Science, 2001
- (25) Efatigue.com. WWW – dokumentti. <https://www.efatigue.com/glossary/#a>. Muokattu 2013. Luettu 20.3.2013
- (26) Suresh, Subra. Fatigue of Materials. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1998
- (27) Väsyminen, Taustaa. Tampereen Ammattikorkeakoulu 2009. PDF-dokumentti
- (28) Kevra OY: tuotetiedot. WWW-dokumentti. <http://www.kevra.fi/fi/Tuotteet/Liimat/>. Muokattu 31.1.2013. Luettu 16.2.2013

O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,25%} [MPa]	E _t [MPa]
1-o-0-1 (liuska)	2,61	24,51	63,98	81887,2	1279,9	2,74	0,0	24,5	121,0	48 255
1-o-0-2	2,69	24,73	66,59	80586,9	1210,2	2,62	0,0	24,2	119,2	47 517
1-o-0-3	2,67	24,73	65,97	78907,9	1196,1	2,42	97,3	24,4	122,3	48 927
Max.	2,7	24,7	66,6	81887,2	1279,9	2,7	97,3	24,5	122,3	48927,0
Min.	2,6	24,5	64,0	78907,9	1196,1	2,4	0,0	24,2	119,2	47517,0
Average	2,7	24,7	65,5	80460,6	1228,7	2,6	32,4	24,4	120,8	48233,1
St.deviation	0,0	0,1	1,4	1 493,7	44,9	0,2	56,2	0,2	1,6	705,3
st.dev.-%	1,6	0,5	2,1	1,9	3,7	6,2	173,2	0,7	1,3	1,5

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,25%} [MPa]	E _t [MPa]
1-o-10-1	2,56	24,75	63,31	15853,0	250,4	0,69	75,4	18,0	95,3	38 638
1-o-10-2	2,67	24,22	64,55	16928,1	262,2	0,86	82,7	20,3	102,3	40 958
1-o-10-4	2,58	24,92	64,38	17329,8	269,2	1,08	74,2	18,7	91,6	36 431
1-o-10-6	2,58	24,77	63,78	16854,9	264,3	1,11	76,4	19,7	93,9	37 119
Max.	2,7	24,9	64,6	17329,8	269,2	1,1	82,7	20,3	102,3	40958,3
Min.	2,6	24,2	63,3	15853,0	250,4	0,7	74,2	18,0	91,6	36430,7
Average	2,6	24,7	64,0	16741,5	261,5	0,9	77,2	19,2	95,8	38286,3
St.deviation	0,0	0,3	0,6	628,0	8,0	0,2	3,8	1,0	4,6	2 005,8
st.dev.-%	1,8	1,2	0,9	3,8	3,0	20,9	4,9	5,4	4,8	5,2

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,25%} [MPa]	E _t [MPa]
1-o-30-3	2,69	24,69	66,47	4657,4	70,1	0,53	36,2	10,1	43,1	16 525
1-o-30-4	2,66	24,74	65,75	5256,7	79,9	0,70	37,6	10,5	44,7	17 072
1-o-30-7	2,59	24,65	63,89	5054,1	79,1	0,65	38,8	11,5	45,9	17 220
Max.	2,7	24,7	66,5	5256,7	79,9	0,7	38,8	11,5	45,9	17220,3
Min.	2,6	24,6	63,9	4657,4	70,1	0,5	36,2	10,1	43,1	16525,4
Average	2,6	24,7	65,4	4989,4	76,4	0,6	37,6	10,7	44,6	16939,4
St.deviation	0,1	0,0	1,3	304,9	5,5	0,1	1,3	0,7	1,4	366,0
st.dev.-%	1,9	0,2	2,0	6,1	7,2	13,3	3,5	6,8	3,2	2,2

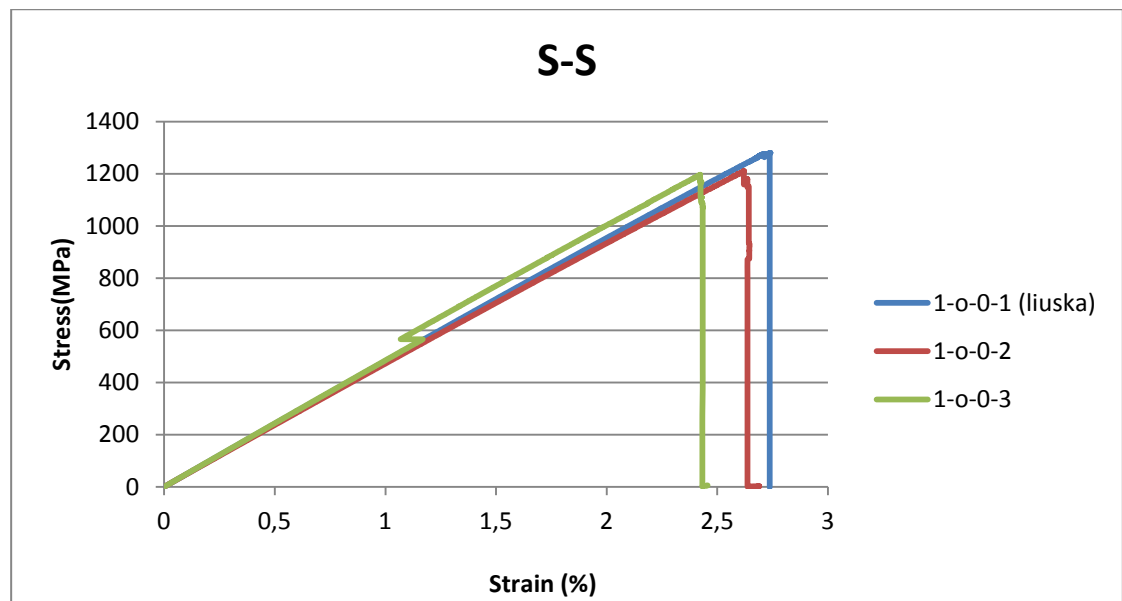
O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Test results

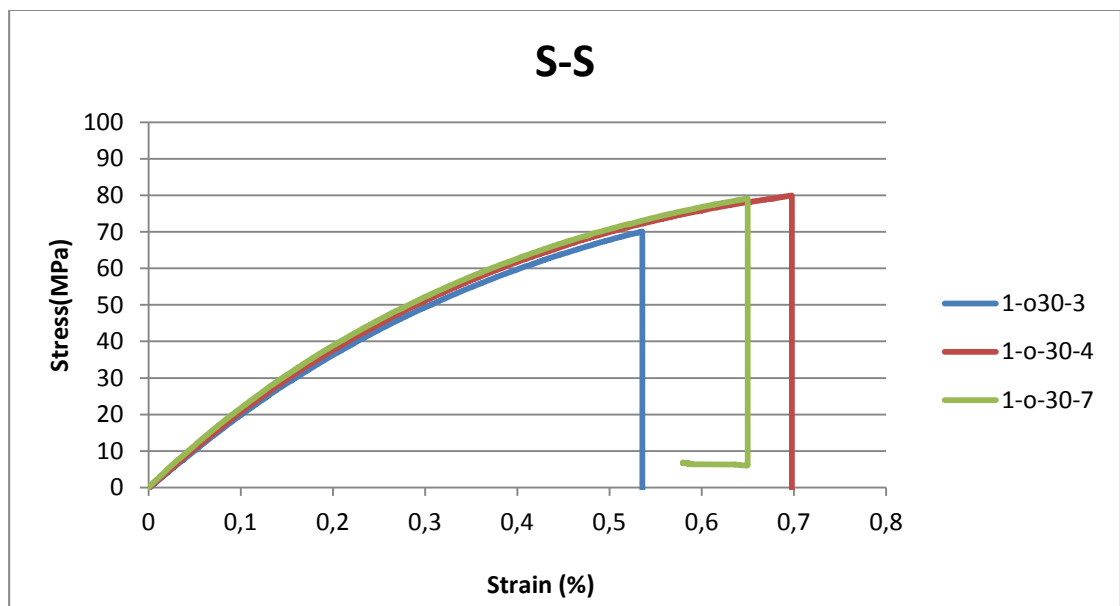
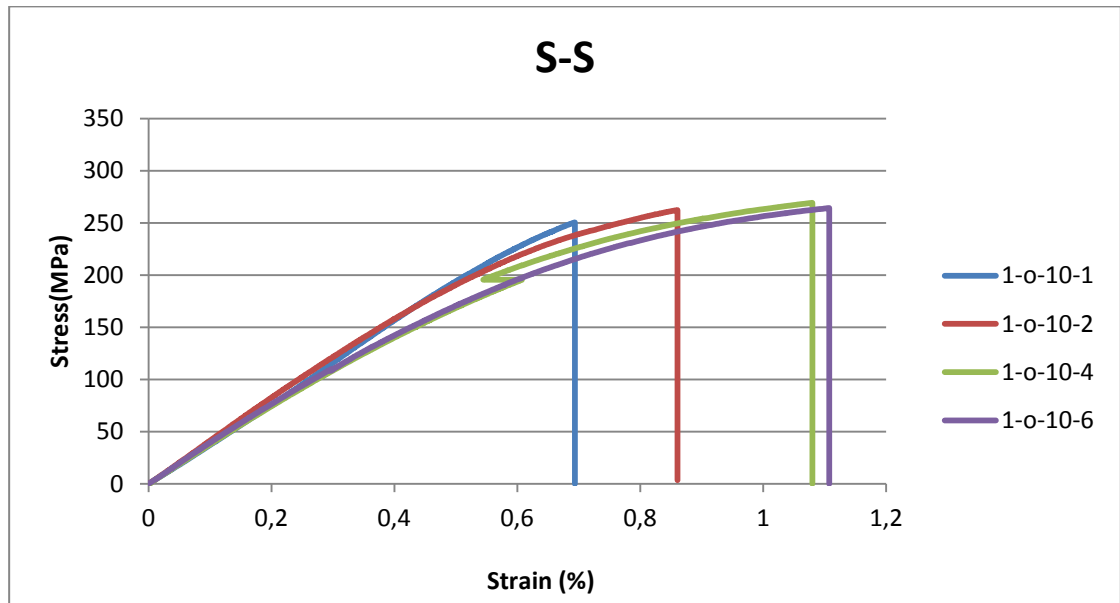
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,25%} [MPa]	E _t [MPa]
1-o-60-1	2,79	24,15	67,37	2775,5	41,2	0,43	22,4	6,1	27,1	10 488
1-o-60-2	2,76	24,37	67,21	2166,4	32,2	0,32	21,9	5,9	26,5	10 296
1-0-60-3	2,73	24,66	67,31	2150,1	31,9	0,31	22,2	5,9	27,0	10 535
Max.	2,8	24,7	67,4	2775,5	41,2	0,4	22,4	6,1	27,1	10534,6
Min.	2,7	24,1	67,2	2150,1	31,9	0,3	21,9	5,9	26,5	10295,7
Average	2,8	24,4	67,3	2364,0	35,1	0,4	22,2	6,0	26,8	10439,5
St.deviation	0,0	0,3	0,1	356,4	5,3	0,1	0,3	0,1	0,3	126,7
st.dev.-%	1,1	1,0	0,1	15,1	15,0	19,7	1,2	1,8	1,2	1,2

Test results

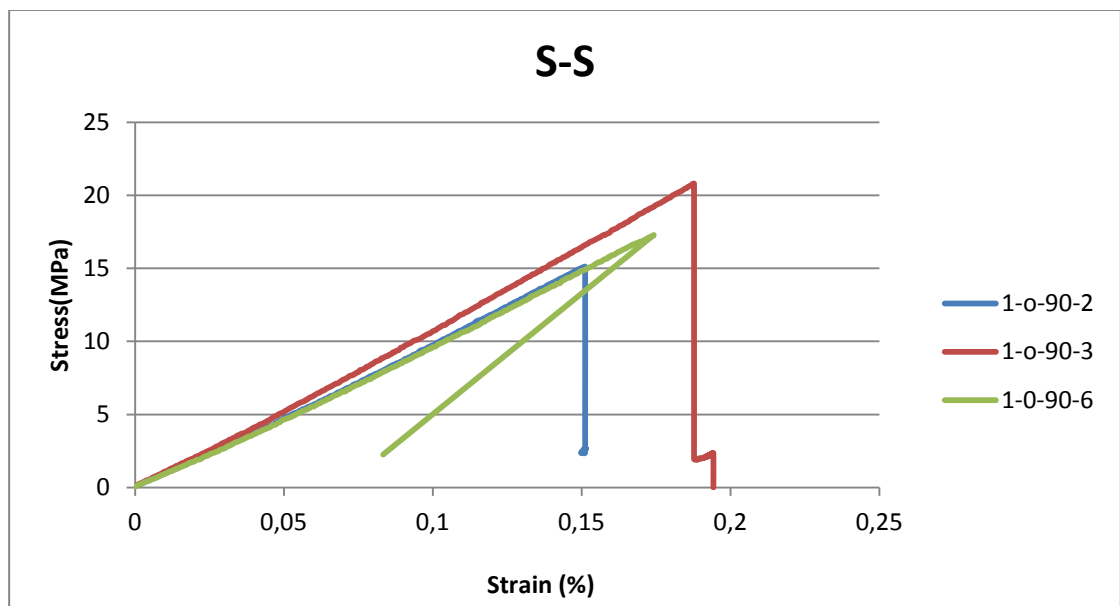
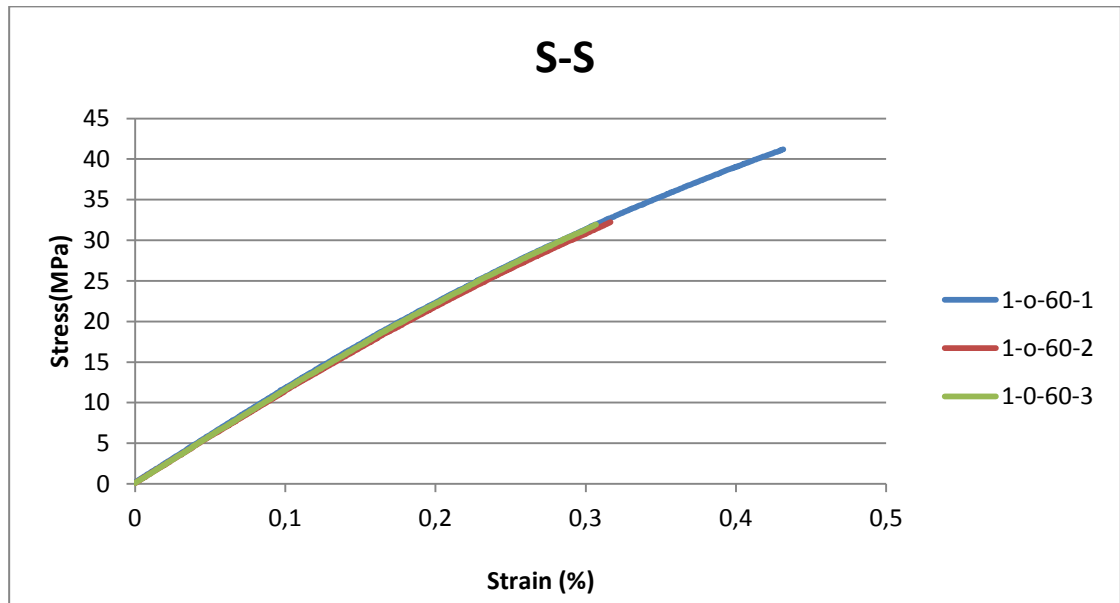
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,10%} [MPa]	E _t [MPa]
1-o-90-2	2,75	24,73	68,01	1028,5	15,1	0,15	22,4	4,8	9,7	9 880
1-o-90-3	2,67	24,61	65,59	1365,0	20,8	0,19	0,0	5,2	10,8	11 071
1-0-90-6	2,73	24,66	67,31	1163,6	17,3	0,17	0,0	4,7	9,6	9 924
Max.	2,8	24,7	68,0	1365,0	20,8	0,2	22,4	5,2	10,8	11071,2
Min.	2,7	24,6	65,6	1028,5	15,1	0,2	0,0	4,7	9,6	9880,5
Average	2,7	24,7	67,0	1185,7	17,7	0,2	7,5	4,9	10,0	10291,8
St.deviation	0,0	0,1	1,2	169,4	2,9	0,0	12,9	0,3	0,6	675,4
st.dev.-%	1,6	0,2	1,9	14,3	16,2	10,8	173,2	5,7	6,1	6,6



O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



O-Sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-o-0-1	2,53	25,09	63,35	67160,4	1060,1	2,14		29,9	131,5	50 817
2-o-0-2	2,49	25,08	62,40	63439,4	1016,7	2,04		26,8	129,6	51 390
2-o-0-3	2,42	25,09	60,64	65390,5	1078,3	1,96		28,1	135,1	53 479
Max.	2,5	25,1	63,4	67160,4	1078,3	2,1		29,9	135,1	53479,1
Min.	2,4	25,1	60,6	63439,4	1016,7	2,0		26,8	129,6	50816,9
Average	2,5	25,1	62,1	65330,1	1051,7	2,0		28,3	132,1	51895,2
St.deviation	0,1	0,0	1,4	1 861,2	31,7	0,1		1,5	2,8	1 401,2
st.dev.-%	2,2	0,0	2,2	2,8	3,0	4,5		5,4	2,1	2,7

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-o-10-1	2,41	24,98	60,27	14106,4	234,0	0,59		22,8	113,7	45 447
2-o-10-2	2,41	24,96	60,10	15656,4	260,5	0,74		23,2	113,5	45 127
2-o-10-3	2,41	24,96	60,07	15827,0	263,5	0,90		20,3	96,9	38 313
Max.	2,4	25,0	60,3	15827,0	263,5	0,9		23,2	113,7	45447,0
Min.	2,4	25,0	60,1	14106,4	234,0	0,6		20,3	96,9	38312,9
Average	2,4	25,0	60,1	15196,6	252,7	0,7		22,1	108,0	42962,3
St.deviation	0,0	0,0	0,1	948,0	16,2	0,2		1,6	9,6	4 029,7
st.dev.-%	0,1	0,0	0,2	6,2	6,4	20,6		7,2	8,9	9,4

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-o-30-1	2,50	25,19	62,98	3866,4	61,4	0,45		10,2	42,2	16 039
2-o-30-2	2,43	25,09	60,84	4933,8	81,1	0,67		10,3	43,5	16 612
2-o-30-3	2,49	25,20	62,76	4678,5	74,6	0,60		10,0	42,6	16 324
Max.	2,5	25,2	63,0	4933,8	81,1	0,7		10,3	43,5	16611,9
Min.	2,4	25,1	60,8	3866,4	61,4	0,4		10,0	42,2	16038,8
Average	2,5	25,2	62,2	4492,9	72,3	0,6		10,2	42,8	16325,0
St.deviation	0,0	0,1	1,2	557,4	10,0	0,1		0,2	0,7	286,5
st.dev.-%	1,6	0,3	1,9	12,4	13,9	20,1		1,7	1,6	1,8

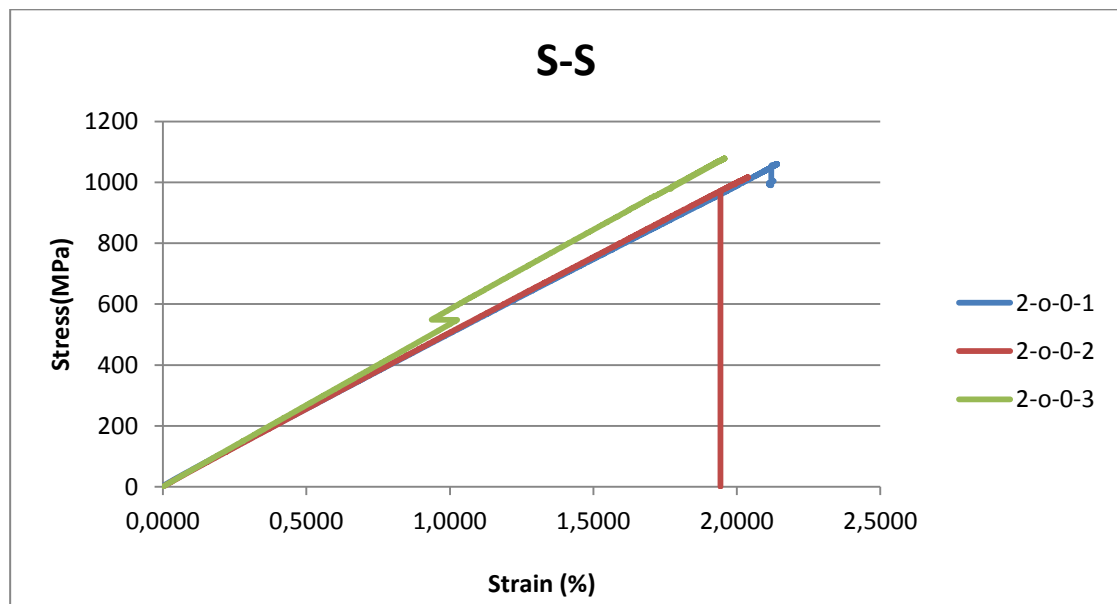
O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Test results

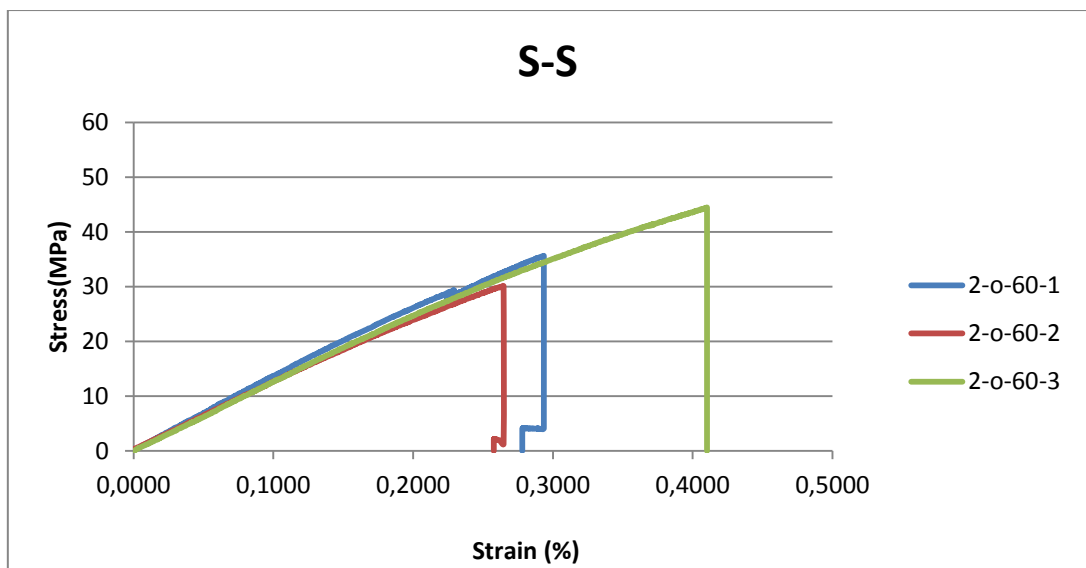
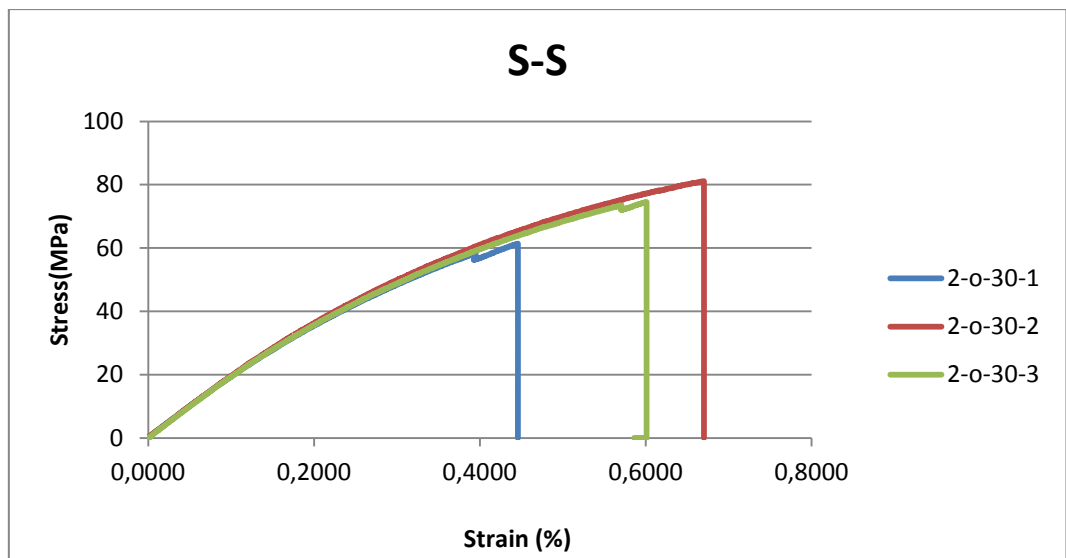
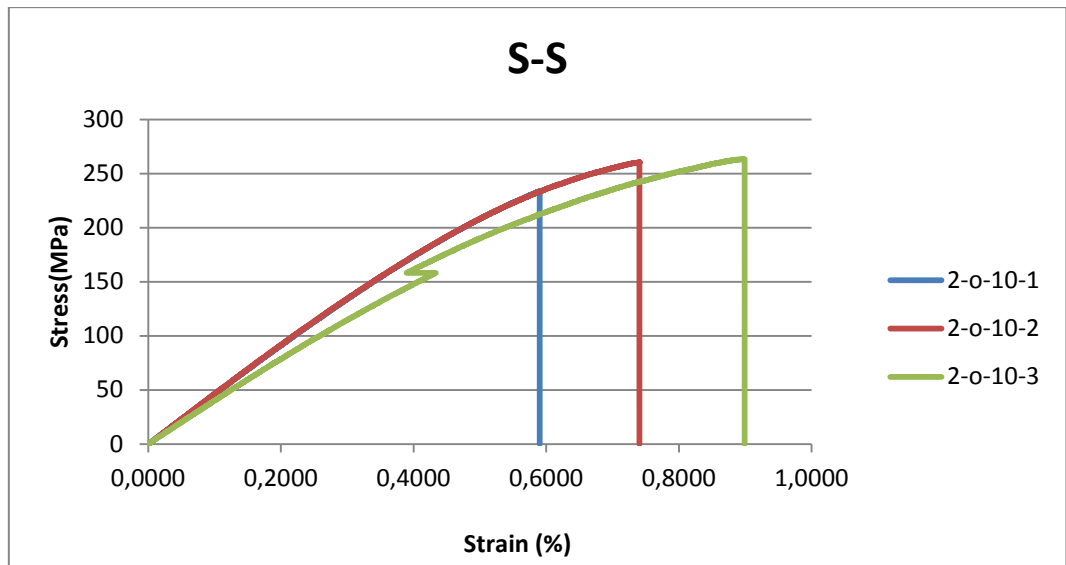
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-o-60-1	2,41	25,00	60,34	2150,0	35,6	0,29		6,9	31,0	12 039
2-o-60-2	2,57	25,00	64,28	1935,9	30,1	0,26		6,5	28,9	11 178
2-o-60-3	2,48	25,01	62,11	2761,7	44,5	0,41		6,2	30,1	11 972
Max.	2,6	25,0	64,3	2761,7	44,5	0,4		6,9	31,0	12039,1
Min.	2,4	25,0	60,3	1935,9	30,1	0,3		6,2	28,9	11178,5
Average	2,5	25,0	62,2	2282,6	36,7	0,3		6,5	30,0	11729,8
St.deviation	0,1	0,0	2,0	428,5	7,2	0,1		0,4	1,1	478,7
st.dev.-%	3,2	0,0	3,2	18,8	19,7	23,9		5,5	3,6	4,1

Test results

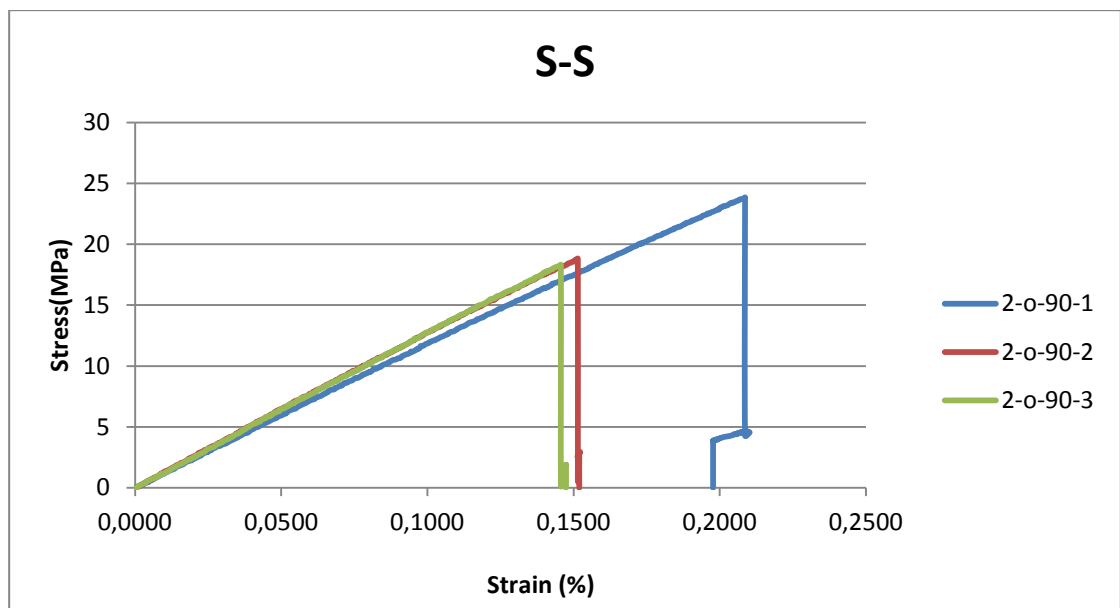
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,10 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-o-90-1	2,65	25,12	66,45	1584,9	23,9	0,21		6,0	11,9	11 834
2-o-90-2	2,54	25,19	63,86	1200,9	18,8	0,15		6,5	12,8	12 558
2-o-90-3	2,50	25,12	62,67	1146,9	18,3	0,15		6,5	12,8	12 534
Max.	2,6	25,2	66,5	1584,9	23,9	0,2		6,5	12,8	12557,8
Min.	2,5	25,1	62,7	1146,9	18,3	0,1		6,0	11,9	11834,2
Average	2,6	25,1	64,3	1310,9	20,3	0,2		6,3	12,5	12308,8
St.deviation	0,1	0,0	1,9	238,8	3,1	0,0		0,3	0,5	411,2
st.dev.-%	3,0	0,2	3,0	18,2	15,1	20,7		5,1	4,2	3,3



O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



O-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



J-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
1-j-0-1 (liuska)	2,53	24,78	62,69	82391,5	1314,3	2,77		26,4	131,3	52 421
1-j-0-2	2,52	24,78	62,32	82495,1	1323,7	2,65		26,5	128,9	51 185
1-j-0-3	2,60	24,52	63,74	96585,9	1515,2	2,82		24,7	123,4	49 372
Max.	2,6	24,8	63,7	96585,9	1515,2	2,8		26,5	131,3	52421,2
Min.	2,5	24,5	62,3	82391,5	1314,3	2,7		24,7	123,4	49372,2
Average	2,5	24,7	62,9	87157,5	1384,4	2,7		25,9	127,9	50992,9
St.deviation	0,0	0,2	0,7	8 165,4	113,4	0,1		1,1	4,0	1 533,6
st.dev.-%	1,8	0,6	1,2	9,4	8,2	3,1		4,1	3,2	3,0

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
1-j-10-1 (liuska)	2,74	24,63	67,44	14299,1	212,0	0,71		20,6	97,2	38 305
1-j-10-2	2,67	24,58	65,58	13898,0	211,9	0,76		19,1	90,4	35 609
1-j-10-3	2,53	24,43	61,67	13580,3	220,2	0,53		21,7	107,6	42 956
Max.	2,7	24,6	67,4	14299,1	220,2	0,8		21,7	107,6	42956,5
Min.	2,5	24,4	61,7	13580,3	211,9	0,5		19,1	90,4	35608,8
Average	2,6	24,5	64,9	13925,8	214,7	0,7		20,5	98,4	38956,6
St.deviation	0,1	0,1	2,9	360,2	4,7	0,1		1,3	8,7	3 717,0
st.dev.-%	4,1	0,4	4,5	2,6	2,2	18,4		6,2	8,8	9,5

Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
1-j-30-2 (liuska)	2,65	24,78	65,72	3386,3	51,5	0,35		10,0	41,1	15 570
1-j-30-3	2,62	24,26	63,51	3613,8	56,9	0,38		9,7	42,2	16 236
1-j-30-4	2,65	24,58	65,01	3488,5	53,7	0,32		10,5	45,3	17 414
0	2,77	24,54	67,92	0,0	0,0	#####		0,0	0,0	0
Max.	2,7	24,8	65,7	3613,8	56,9	0,4		10,5	45,3	17413,8
Min.	2,6	24,3	63,5	3386,3	51,5	0,3		9,7	41,1	15569,6
Average	2,6	24,5	64,7	3496,2	54,0	0,3		10,1	42,9	16406,3
St.deviation	0,0	0,3	1,1	113,9	2,7	0,0		0,4	2,2	933,9
st.dev.-%	0,7	1,1	1,7	3,3	5,0	8,7		4,0	5,1	5,7

J-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

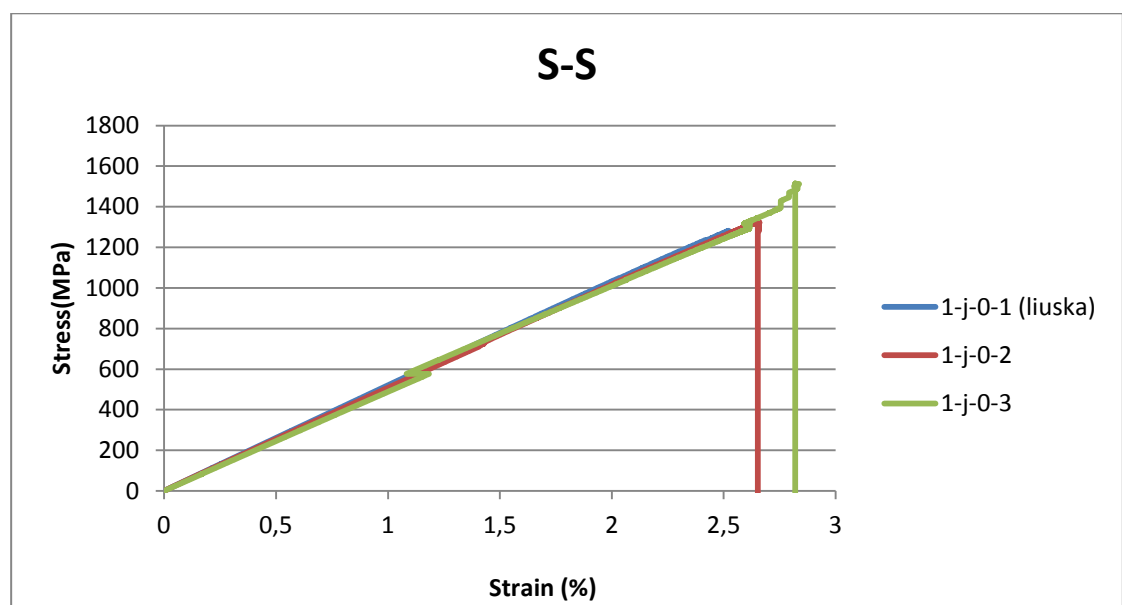
Test results

0,10%
venymä

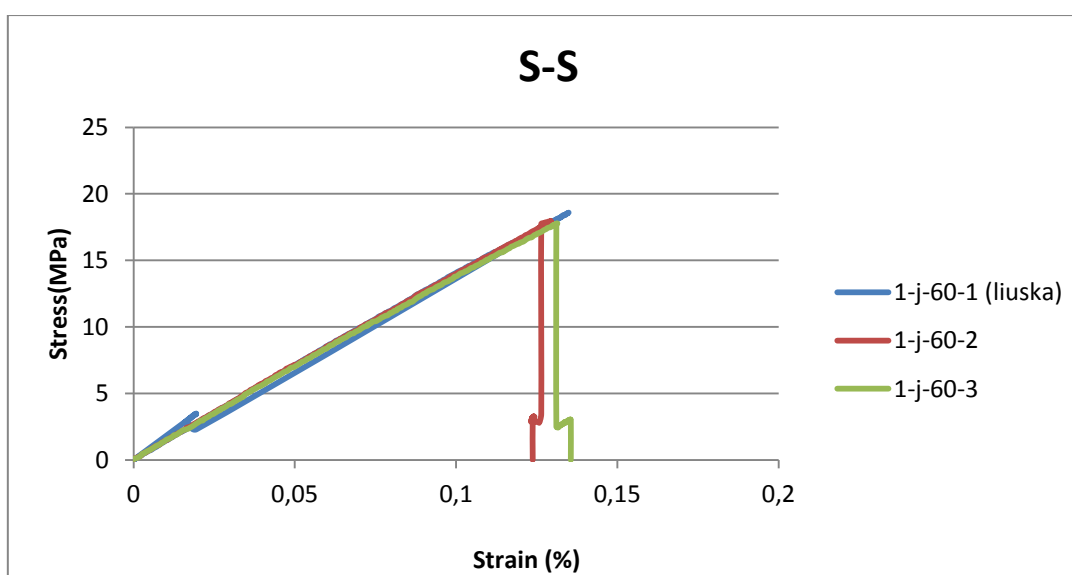
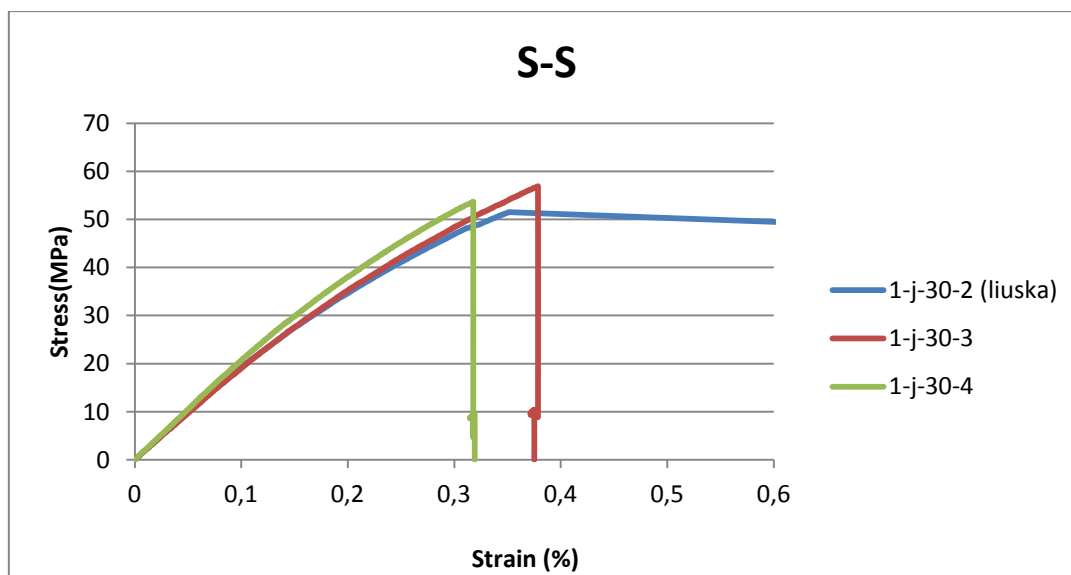
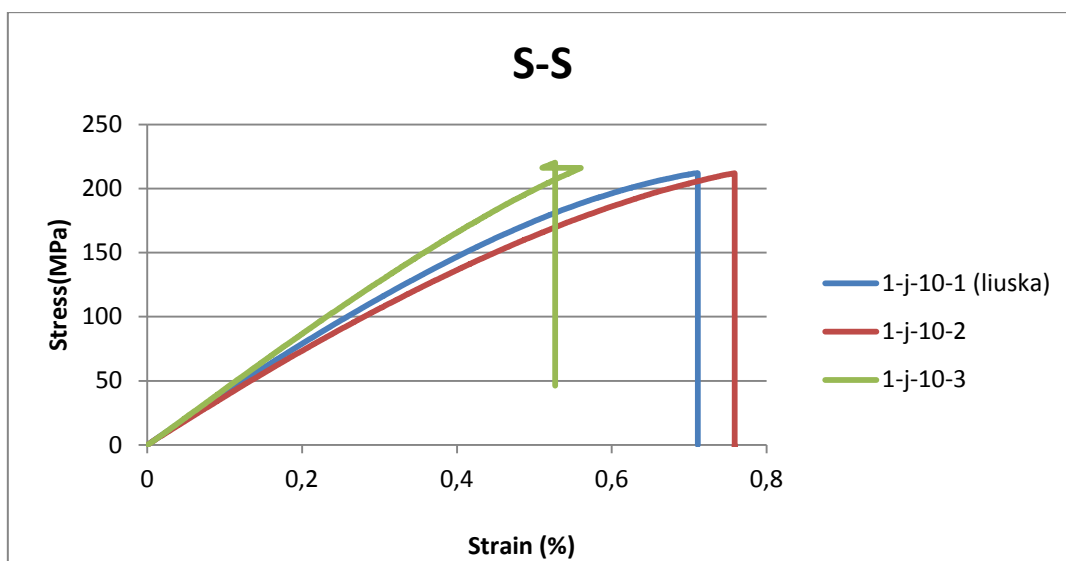
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,10%} [MPa]	E _t [MPa]
1-j-60-1 (liuska)	2,54	24,67	62,53	1162,6	18,6	0,13		7,2	14,1	13 946
1-j-60-2	2,54	24,58	62,48	1121,9	18,0	0,13		7,2	14,0	13 699
1-j-60-3	2,54	24,80	62,92	1118,9	17,8	0,13		7,1	13,8	13 565
Max.	2,5	24,8	62,9	1162,6	18,6	0,1		7,2	14,1	13945,7
Min.	2,5	24,6	62,5	1118,9	17,8	0,1		7,1	13,8	13564,7
Average	2,5	24,7	62,6	1134,4	18,1	0,1		7,1	14,0	13736,6
St.deviation	0,0	0,1	0,2	24,4	0,4	0,0		0,1	0,2	193,2
st.dev.-%	0,1	0,5	0,4	2,2	2,4	2,1		1,0	1,1	1,4

Test results

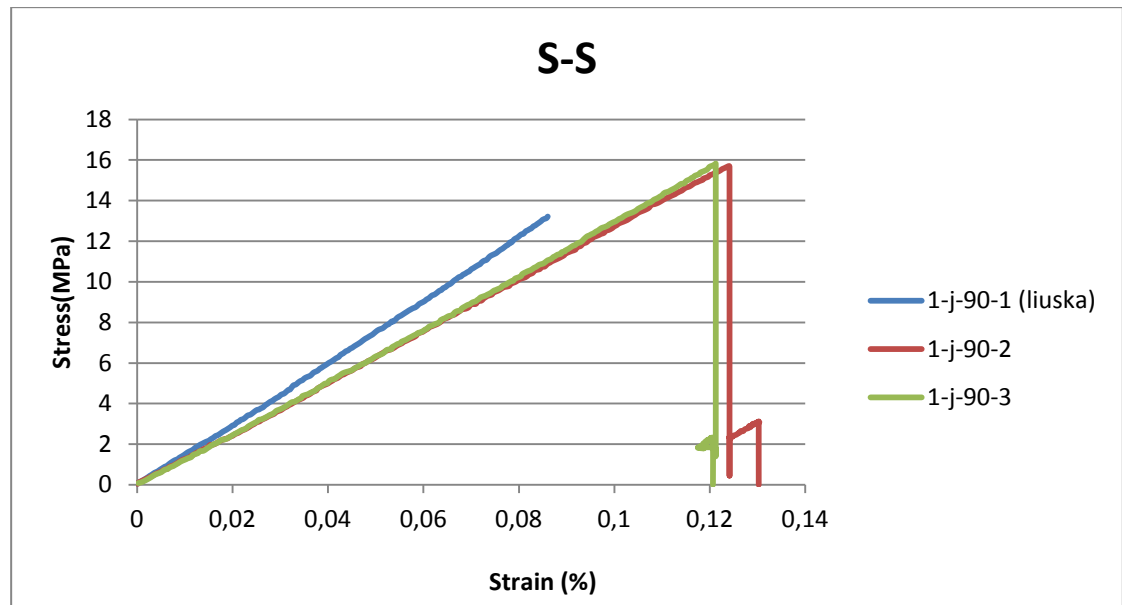
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,1%} [MPa]	E _t [MPa]
1-j-90-1 (liuska)	2,57	24,90	63,94	845,0	13,2	0,09		6,0	12,3	15 618
1-j-90-2	2,60	24,85	64,62	1015,0	15,7	0,12		6,3	12,8	12 964
1-j-90-3	2,56	24,64	63,01	997,5	15,8	0,12		6,4	13,0	13 202
Max.	2,6	24,9	64,6	1015,0	15,8	0,1		6,4	13,0	15618,4
Min.	2,6	24,6	63,0	845,0	13,2	0,1		6,0	12,3	12964,2
Average	2,6	24,8	63,9	952,5	14,9	0,1		6,2	12,7	13928,1
St.deviation	0,0	0,1	0,8	93,5	1,5	0,0		0,2	0,4	1 468,6
st.dev.-%	0,9	0,5	1,3	9,8	9,9	19,2		3,2	3,0	10,5



J-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



J-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

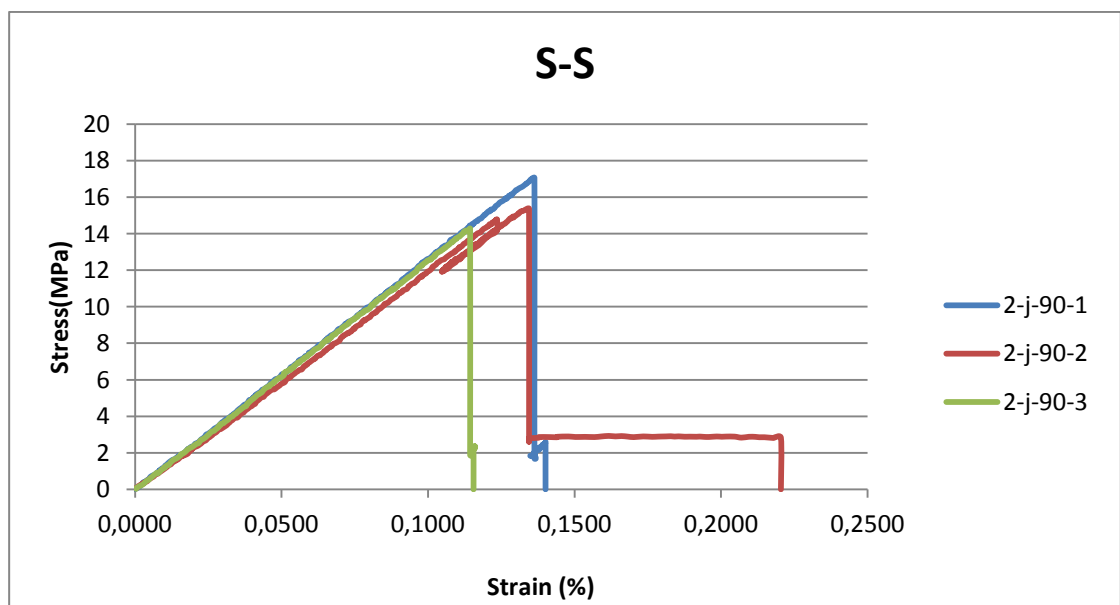
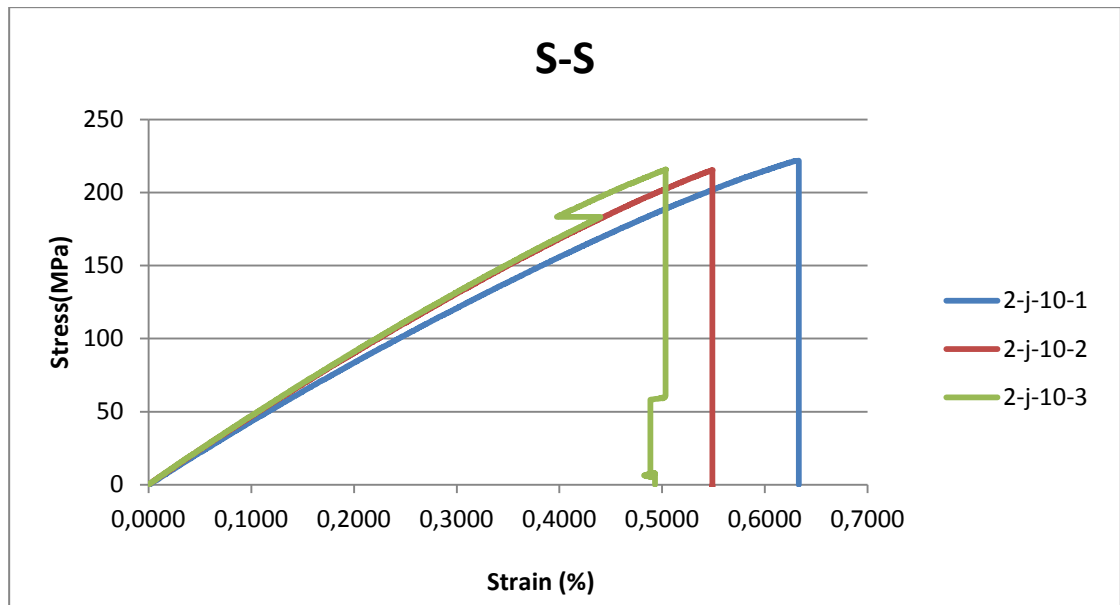


Test results

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-j-10-1	2,51	24,96	62,53	13869,7	221,8	0,63		22,2	102,7	40 240
2-j-10-2	2,47	24,95	61,49	13245,9	215,4	0,55		24,0	110,7	43 359
2-j-10-3	2,44	24,94	60,89	13141,8	215,8	0,50		24,1	111,9	43 924
Max.	2,5	25,0	62,5	13869,7	221,8	0,6		24,1	111,9	43923,7
Min.	2,4	24,9	60,9	13141,8	215,4	0,5		22,2	102,7	40240,3
Average	2,5	24,9	61,6	13419,1	217,7	0,6		23,4	108,4	42507,6
St.deviation	0,0	0,0	0,8	393,6	3,6	0,1		1,0	5,0	1 983,8
st.dev.-%	1,3	0,1	1,3	2,9	1,6	11,7		4,5	4,6	4,7

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,10 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-j-90-1	2,52	25,13	63,29	1079,4	17,1	0,14		6,3	12,6	12 674
2-j-90-2	2,52	25,10	63,30	973,5	15,4	0,13		5,8	12,0	12 363
2-j-90-3	2,54	25,13	63,90	912,3	14,3	0,11		6,3	12,6	12 633
Max.	2,5	25,1	63,9	1079,4	17,1	0,1		6,3	12,6	12673,7
Min.	2,5	25,1	63,3	912,3	14,3	0,1		5,8	12,0	12363,0
Average	2,5	25,1	63,5	988,4	15,6	0,1		6,1	12,4	12556,5
St.deviation	0,0	0,0	0,4	84,5	1,4	0,0		0,3	0,4	168,8
st.dev.-%	0,5	0,1	0,6	8,5	9,0	9,4		4,5	2,9	1,3

H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
1-H-0-1 (liuska)	2,48	25,96	64,43	98008,1	1521,2	2,75		28,2	140,4	56 120
1-H-0-2	2,56	25,86	66,14	95069,0	1437,5	2,57		27,1	135,8	54 350
1-H-0-3	2,54	25,93	65,93	93134,3	1412,7	2,60		26,9	133,5	53 320
Max.	2,6	26,0	66,1	98008,1	1521,2	2,7		28,2	140,4	56120,0
Min.	2,5	25,9	64,4	93134,3	1412,7	2,6		26,9	133,5	53319,8
Average	2,5	25,9	65,5	95403,8	1457,1	2,6		27,4	136,6	54596,7
St.deviation	0,0	0,1	0,9	2 454,1	56,9	0,1		0,7	3,5	1 416,2
st.dev.-%	1,6	0,2	1,4	2,6	3,9	3,6		2,5	2,6	2,6

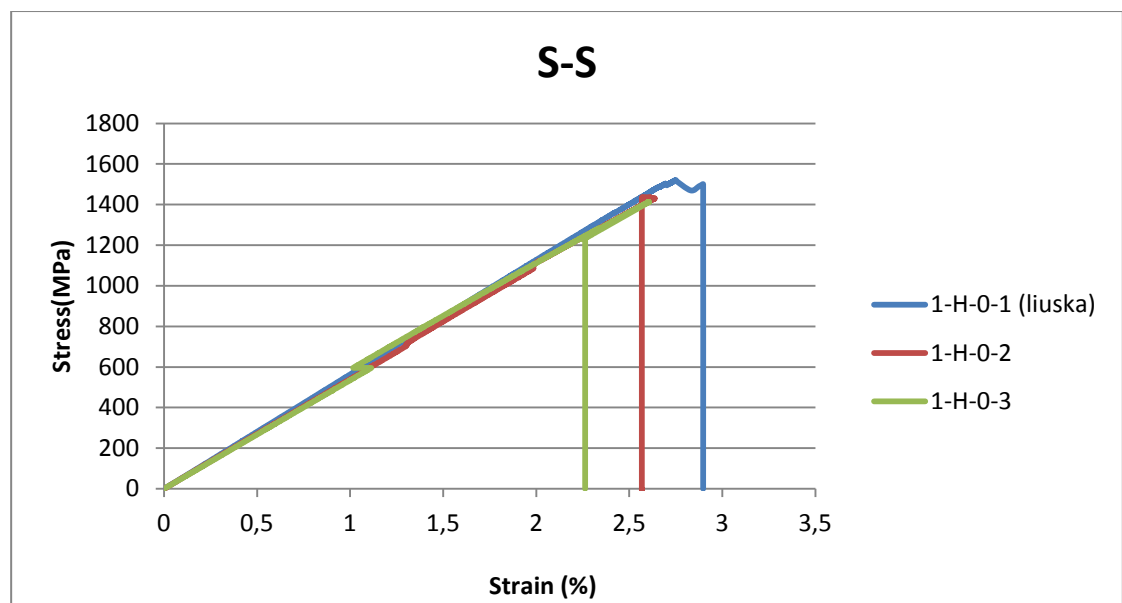
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
1-H-10-1 (liuska)	2,65	24,92	66,09	20246,8	306,4	1,88		21,2	102,0	40 397
1-H-10-2	2,66	24,91	66,32	20289,1	305,9	1,79		19,8	97,1	38 644
1-H-10-3	2,66	24,93	66,31	19656,8	296,4	1,75		19,7	96,6	38 468
Max.	2,7	24,9	66,3	20289,1	306,4	1,9		21,2	102,0	40397,5
Min.	2,7	24,9	66,1	19656,8	296,4	1,7		19,7	96,6	38468,4
Average	2,7	24,9	66,2	20064,3	302,9	1,8		20,2	98,6	39169,9
St.deviation	0,0	0,0	0,1	353,5	5,6	0,1		0,9	3,0	1 066,8
st.dev.-%	0,2	0,0	0,2	1,8	1,9	3,8		4,3	3,0	2,7

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
1-H-30-1 (liuska)	2,58	25,78	66,51	6660,2	100,1	1,19		11,8	50,2	19 176
1-H-30-2	2,57	25,98	66,71	6570,2	98,5	1,13		11,6	46,6	17 495
1-H-30-3	2,59	25,80	66,87	6724,2	100,6	1,73		10,4	43,3	16 458
Max.	2,6	26,0	66,9	6724,2	100,6	1,7		11,8	50,2	19176,3
Min.	2,6	25,8	66,5	6570,2	98,5	1,1		10,4	43,3	16457,7
Average	2,6	25,9	66,7	6651,5	99,7	1,3		11,3	46,7	17709,6
St.deviation	0,0	0,1	0,2	77,4	1,1	0,3		0,8	3,4	1 372,0
st.dev.-%	0,5	0,4	0,3	1,2	1,1	24,6		6,8	7,4	7,7

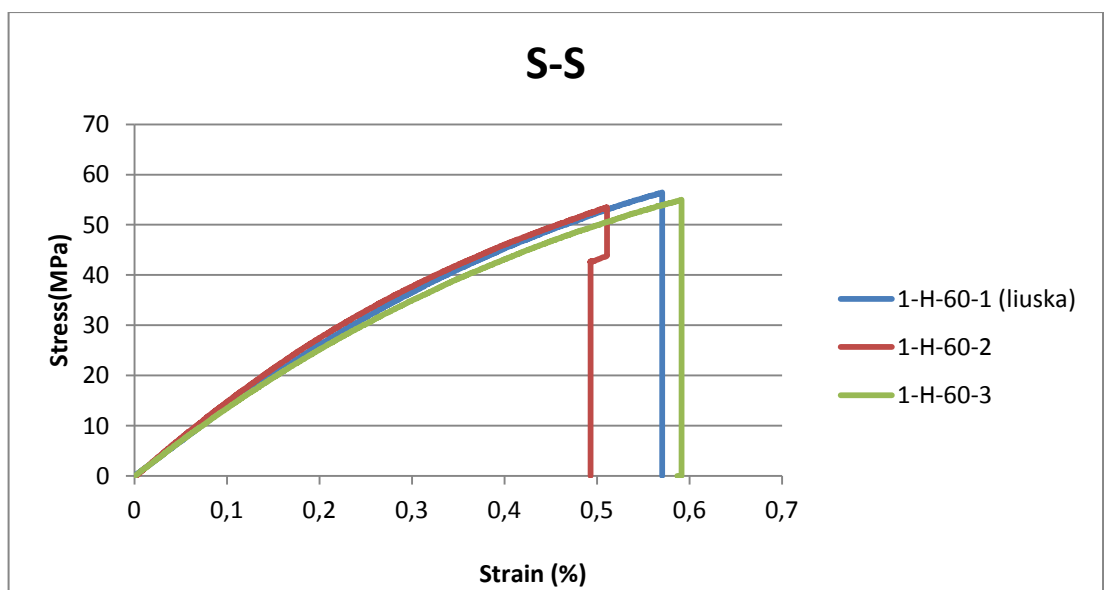
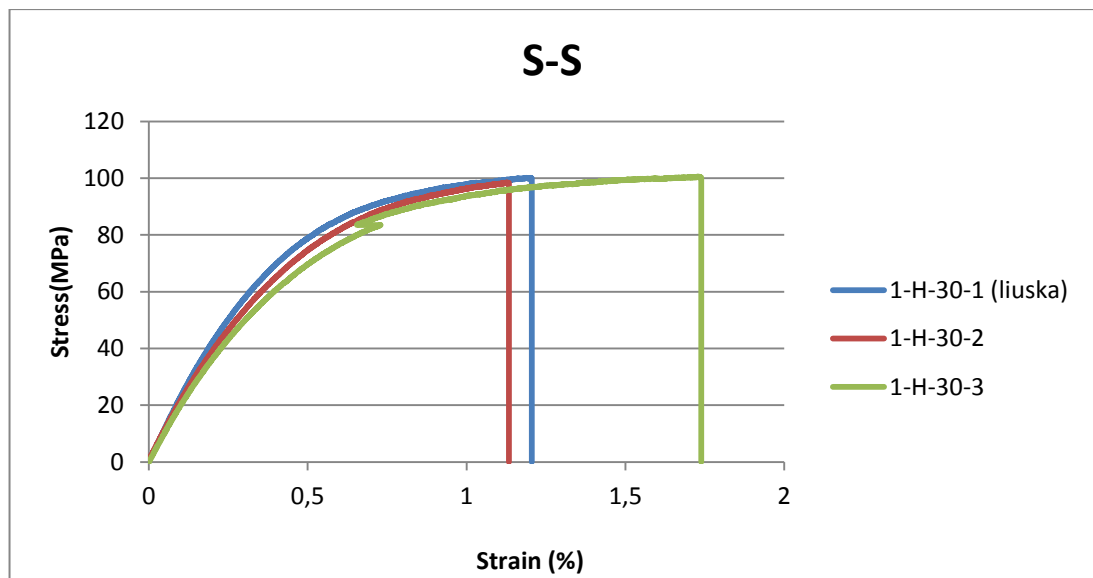
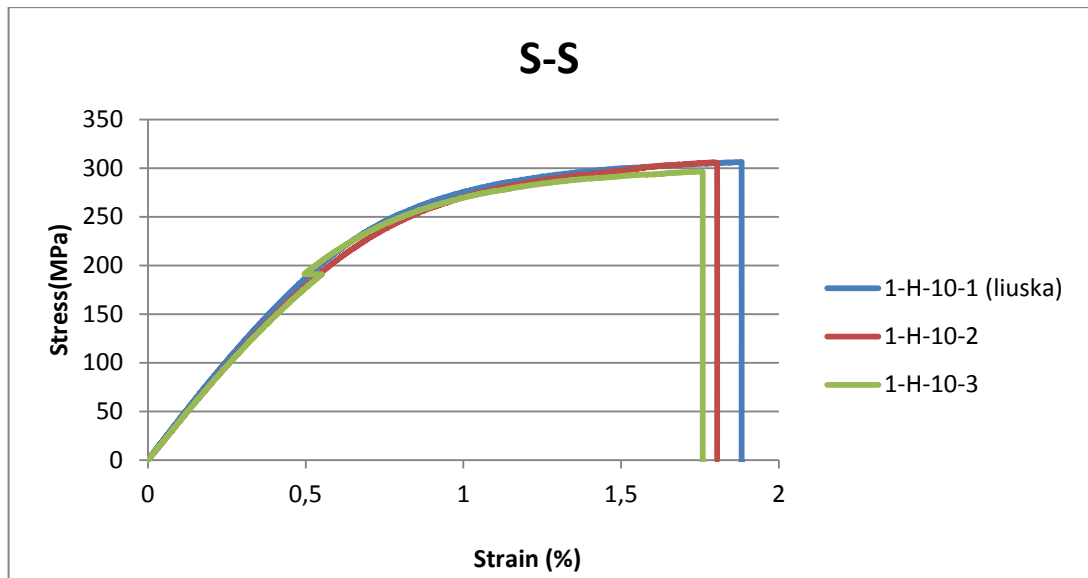
H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,25%} [MPa]	E _t [MPa]
1-H-60-1 (liuska)	2,64	26,01	68,54	3868,4	56,4	0,57		6,9	31,6	12 363
1-H-60-2	2,64	25,89	68,26	3651,6	53,5	0,51		7,6	32,9	12 650
1-H-60-3	2,66	26,01	69,06	3797,7	55,0	0,59		6,9	30,2	11 630
Max.	2,7	26,0	69,1	3868,4	56,4	0,6		7,6	32,9	12649,8
Min.	2,6	25,9	68,3	3651,6	53,5	0,5		6,9	30,2	11630,0
Average	2,6	26,0	68,6	3772,6	55,0	0,6		7,1	31,6	12214,2
St.deviation	0,0	0,1	0,4	110,6	1,5	0,0		0,4	1,3	525,9
st.dev.-%	0,4	0,3	0,6	2,9	2,7	7,5		5,2	4,2	4,3

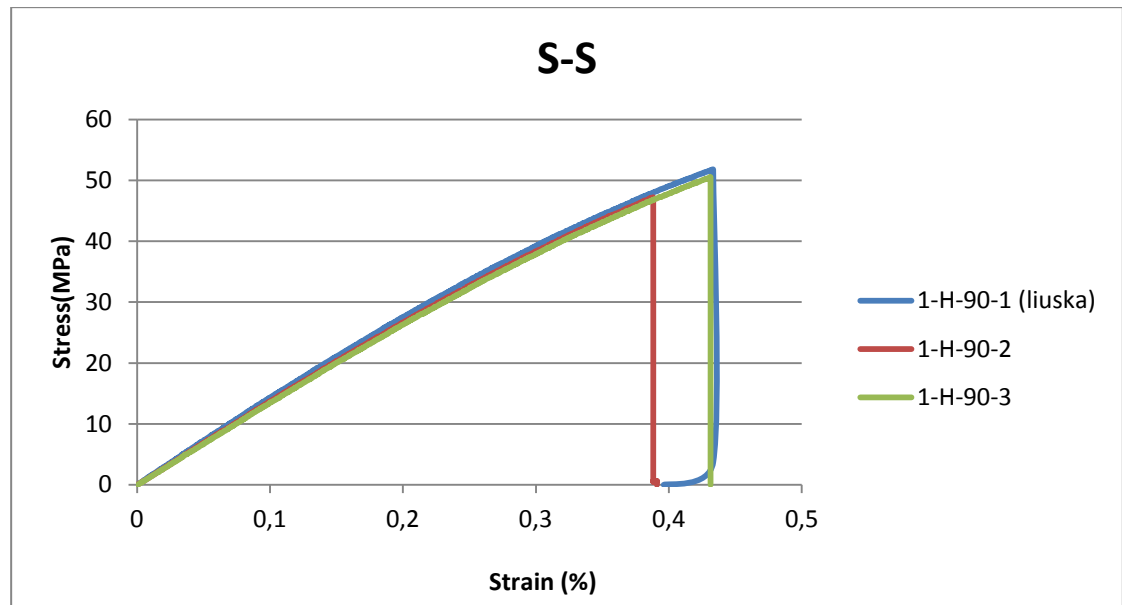
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2%} [MPa]	σ _{ε=0,05%} [MPa]	σ _{ε=0,25%} [MPa]	E _t [MPa]
1-H-90-1 (liuska)	2,62	25,04	65,69	3402,3	51,8	0,43		7,3	33,7	13 193
1-H-90-2	2,63	25,10	66,06	3119,1	47,2	0,39		7,0	32,7	12 860
1-H-90-3	2,64	25,05	66,19	3345,9	50,5	0,43		6,8	32,4	12 787
Max.	2,6	25,1	66,2	3402,3	51,8	0,4		7,3	33,7	13192,5
Min.	2,6	25,0	65,7	3119,1	47,2	0,4		6,8	32,4	12787,4
Average	2,6	25,1	66,0	3289,1	49,9	0,4		7,0	32,9	12946,5
St.deviation	0,0	0,0	0,3	149,9	2,4	0,0		0,2	0,7	216,1
st.dev.-%	0,4	0,1	0,4	4,6	4,7	6,1		3,4	2,0	1,7



H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-H-0-1 (grippiviika)	2,77	25,09	69,57	51124,1	734,8	1,52		24,0	121,4	48 671
2-H-0-2 (grippiviika)	2,63	25,11	65,91	53529,5	812,2	1,62		25,3	126,7	50 679
2-H-0-3 (grippiviika)	2,61	25,08	65,53	54698,6	834,7	1,61		24,5	126,2	50 819
Max.	2,8	25,1	69,6	54698,6	834,7	1,6		25,3	126,7	50818,5
Min.	2,6	25,1	65,5	51124,1	734,8	1,5		24,0	121,4	48671,4
Average	2,7	25,1	67,0	53117,4	793,9	1,6		24,6	124,7	50056,3
St.deviation	0,1	0,0	2,2	1 822,6	52,4	0,1		0,6	2,9	1 201,3
st.dev.-%	3,3	0,1	3,3	3,4	6,6	3,4		2,6	2,3	2,4

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2 %} [MPa]	σ _{ε=0,05 %} [MPa]	σ _{ε=0,25 %} [MPa]	E _t [MPa]
2-H-10-1	2,77	25,09	69,57	20172,0	289,9	1,00		21,7	104,0	41 114
2-H-10-2	2,63	25,11	65,91	20151,1	305,8	0,99		23,9	115,0	45 543
2-H-10-3	2,61	25,08	65,53	20078,2	306,4	1,32		18,4	90,1	35 875
Max.	2,8	25,1	69,6	20172,0	306,4	1,3		23,9	115,0	45542,6
Min.	2,6	25,1	65,5	20078,2	289,9	1,0		18,4	90,1	35875,2
Average	2,7	25,1	67,0	20133,8	300,7	1,1		21,3	103,0	40844,0
St.deviation	0,1	0,0	2,2	49,2	9,3	0,2		2,8	12,4	4 839,4
st.dev.-%	3,3	0,1	3,3	0,2	3,1	17,2		13,0	12,1	11,8

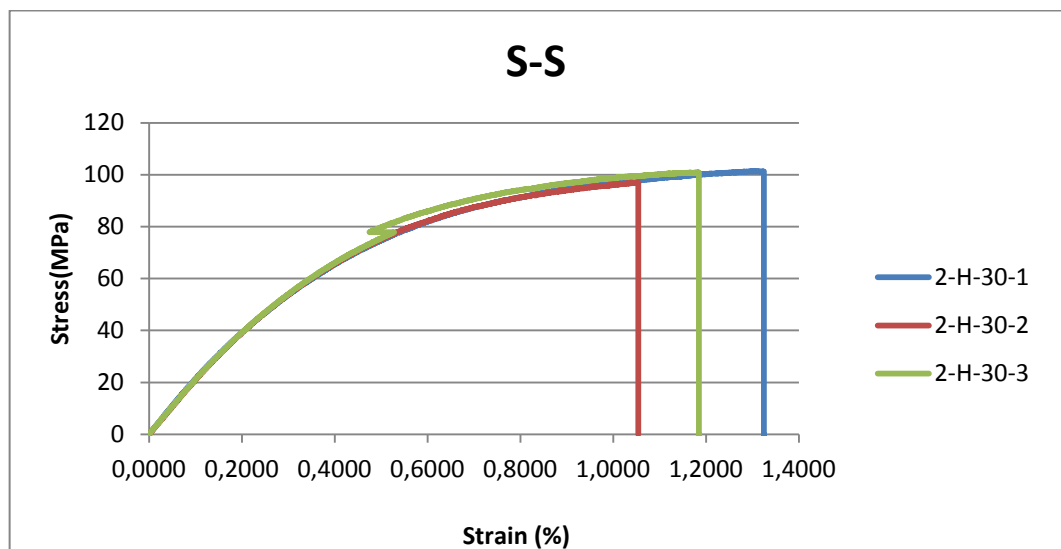
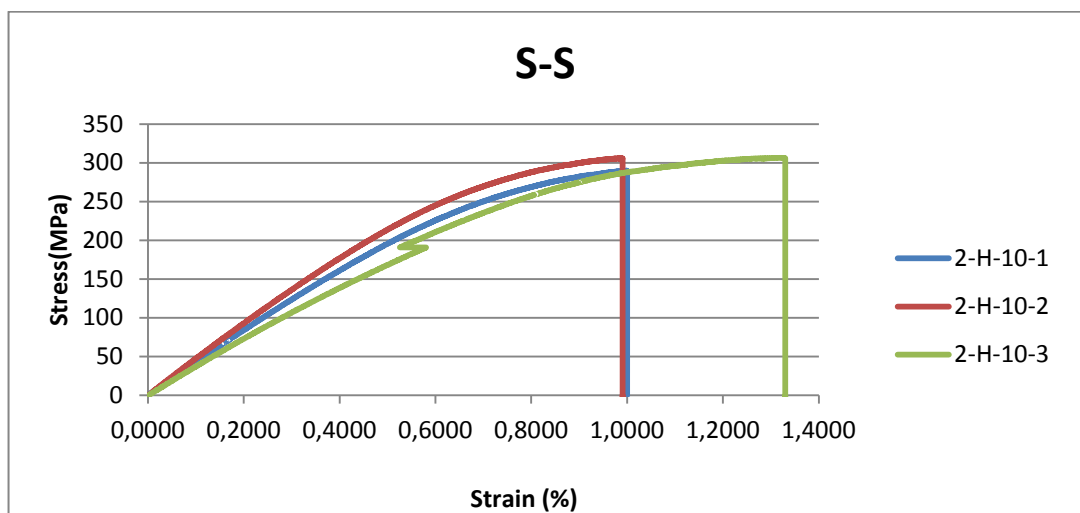
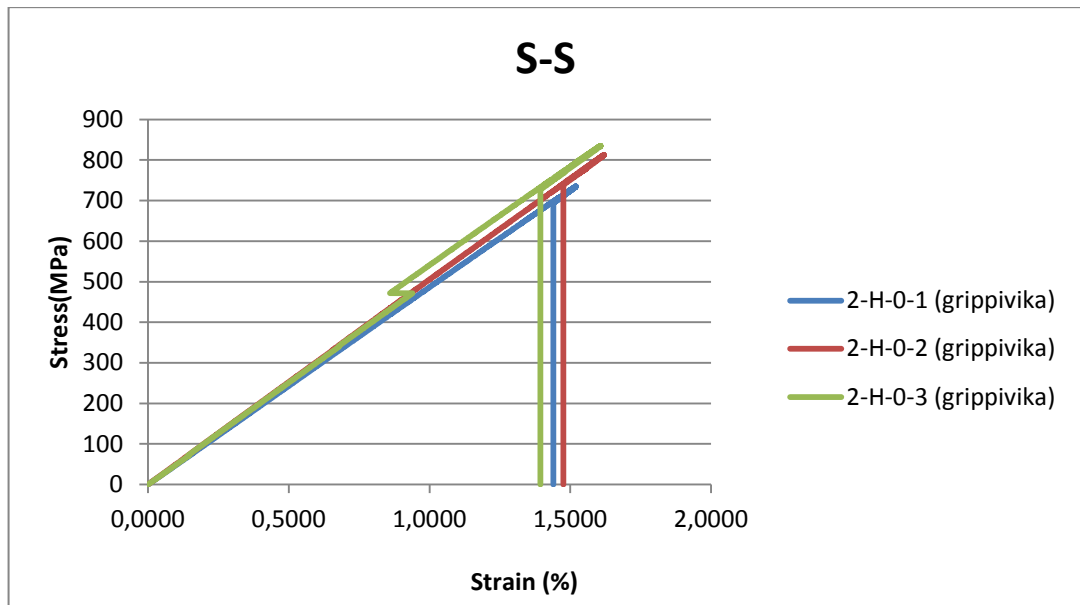
H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2} % [MPa]	σ _{ε=0,05} % [MPa]	σ _{ε=0,25} % [MPa]	E _t [MPa]
2-H-30-1	2,64	24,98	65,81	6674,3	101,4	1,31		11,1	46,8	17 865
2-H-30-2	2,63	24,97	65,66	6369,0	97,0	1,05		10,6	46,9	18 168
2-H-30-3	2,66	24,97	66,42	6703,7	100,9	1,18		10,8	47,1	18 127
Max.	2,7	25,0	66,4	6703,7	101,4	1,3		11,1	47,1	18168,0
Min.	2,6	25,0	65,7	6369,0	97,0	1,1		10,6	46,8	17865,3
Average	2,6	25,0	66,0	6582,4	99,8	1,2		10,8	46,9	18053,5
St.deviation	0,0	0,0	0,4	185,3	2,4	0,1		0,3	0,1	164,2
st.dev.-%	0,6	0,0	0,6	2,8	2,4	10,9		2,5	0,3	0,9

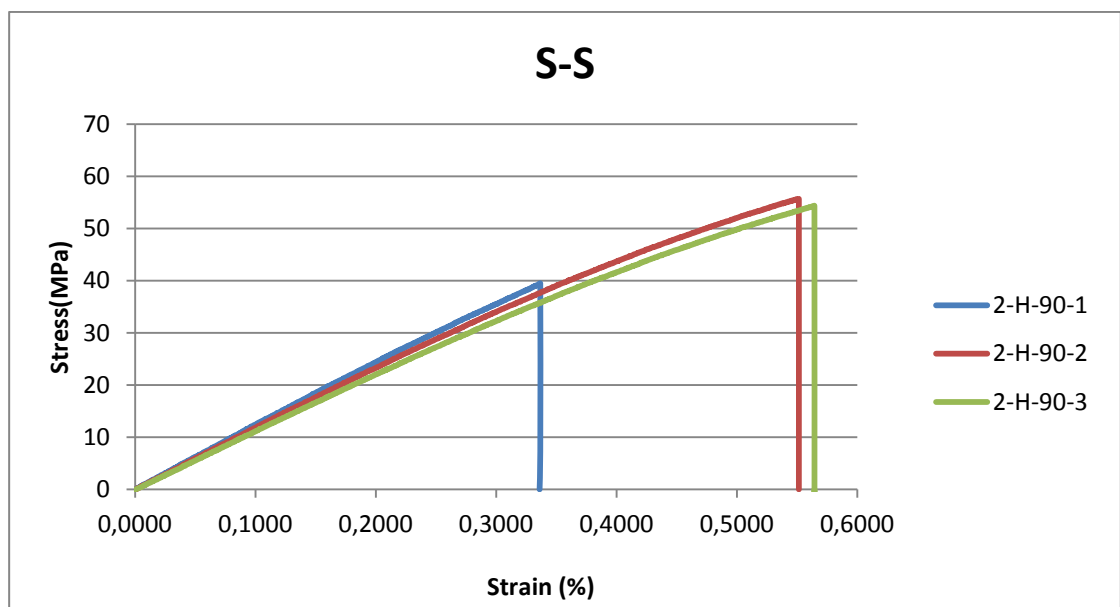
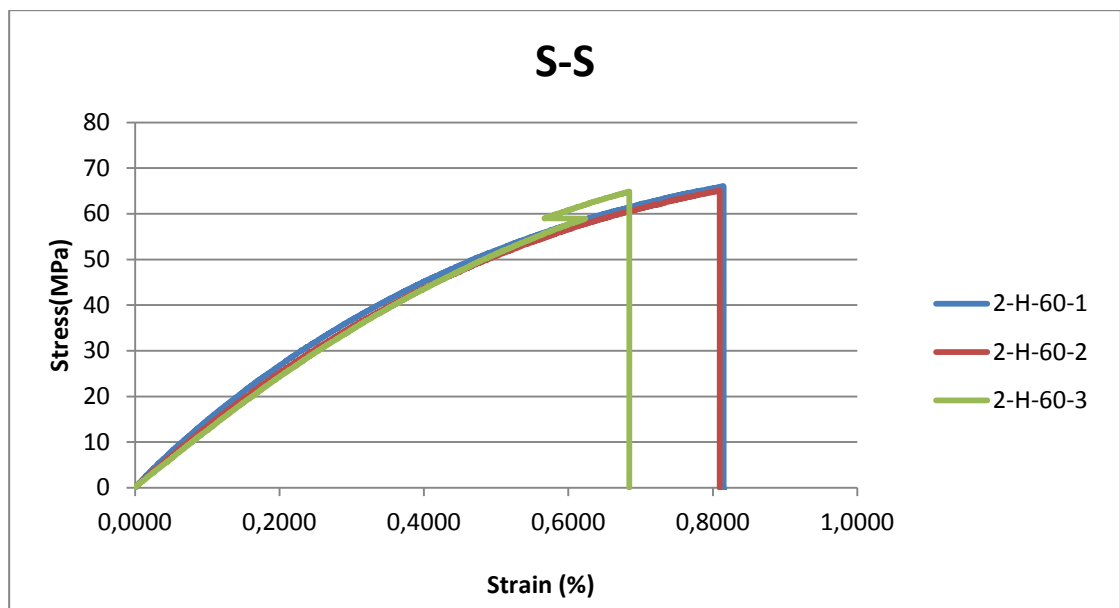
Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2} % [MPa]	σ _{ε=0,05} % [MPa]	σ _{ε=0,25} % [MPa]	E _t [MPa]
2-H-60-1	2,61	24,98	65,23	4306,3	66,0	0,81		8,0	32,0	11 995
2-H-60-2	2,65	24,99	66,14	4301,9	65,0	0,81		6,9	30,4	11 766
2-H-60-3	2,65	24,98	66,20	4295,0	64,9	0,68		6,4	29,7	11 628
Max.	2,7	25,0	66,2	4306,3	66,0	0,8		8,0	32,0	11995,4
Min.	2,6	25,0	65,2	4295,0	64,9	0,7		6,4	29,7	11628,4
Average	2,6	25,0	65,9	4301,1	65,3	0,8		7,1	30,7	11796,7
St.deviation	0,0	0,0	0,5	5,7	0,6	0,1		0,8	1,2	185,4
st.dev.-%	0,8	0,0	0,8	0,1	0,9	9,6		11,4	3,8	1,6

Specimen	Thickness [mm]	Width [mm]	Area [mm ²]	F _M [N]	σ _M [MPa]	ε _M [%]	σ _{ε=0,2} % [MPa]	σ _{ε=0,05} % [MPa]	σ _{ε=0,25} % [MPa]	E _t [MPa]
2-H-90-1	2,67	25,11	67,09	2647,6	39,5	0,34		6,3	30,0	11 879
2-H-90-2	2,71	25,08	67,85	3777,0	55,7	0,55		6,0	28,9	11 452
2-H-90-3	2,80	25,14	70,34	3823,0	54,4	0,56		5,5	27,3	10 907
Max.	2,8	25,1	70,3	3823,0	55,7	0,6		6,3	30,0	11878,6
Min.	2,7	25,1	67,1	2647,6	39,5	0,3		5,5	27,3	10906,7
Average	2,7	25,1	68,4	3415,9	49,8	0,5		5,9	28,7	11412,5
St.deviation	0,1	0,0	1,7	665,8	9,0	0,1		0,4	1,4	487,2
st.dev.-%	2,4	0,1	2,5	19,5	18,1	26,4		6,4	4,7	4,3

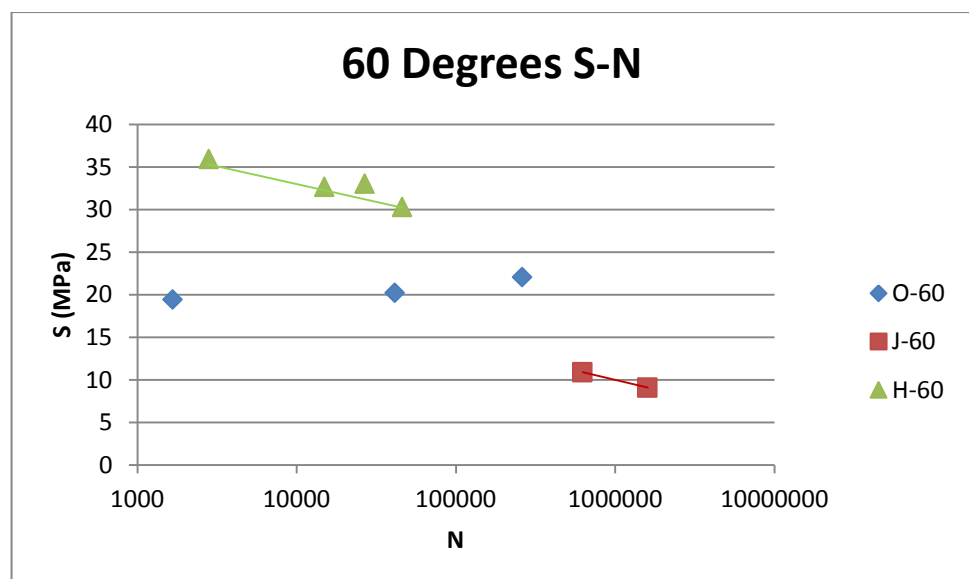
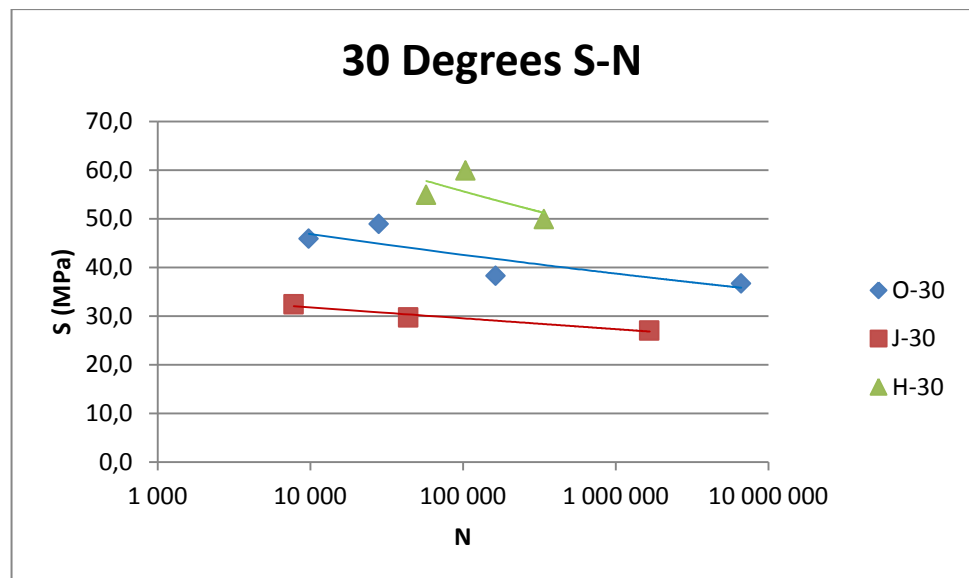
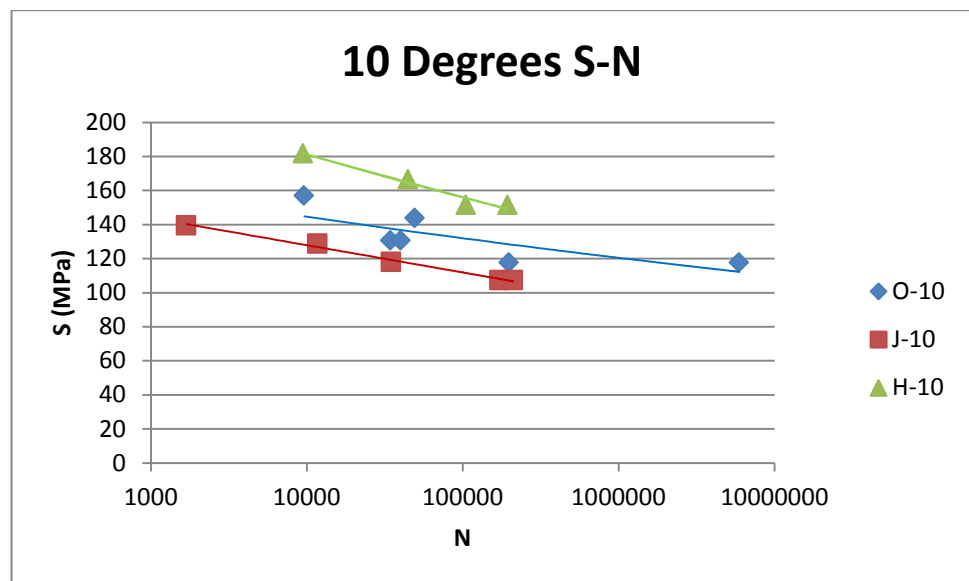
H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



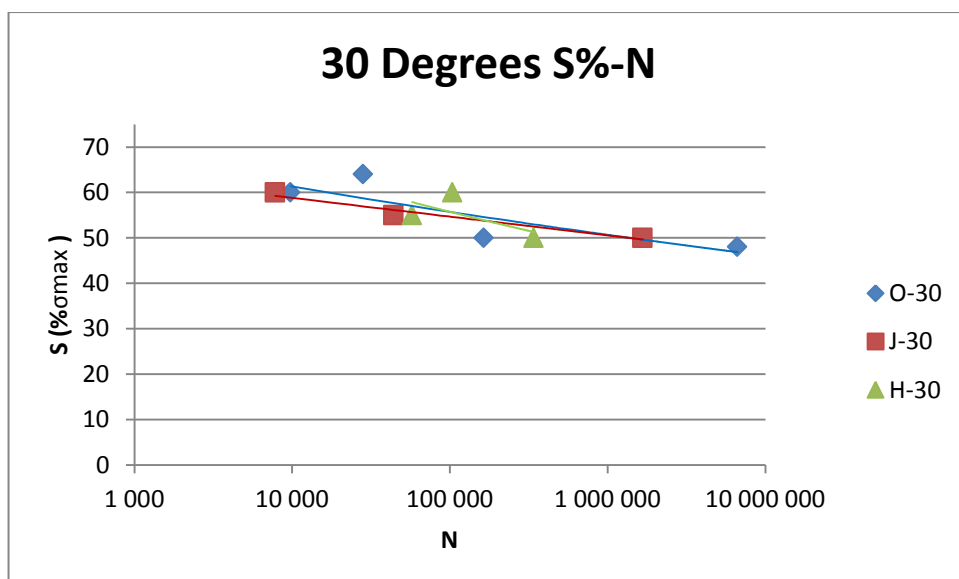
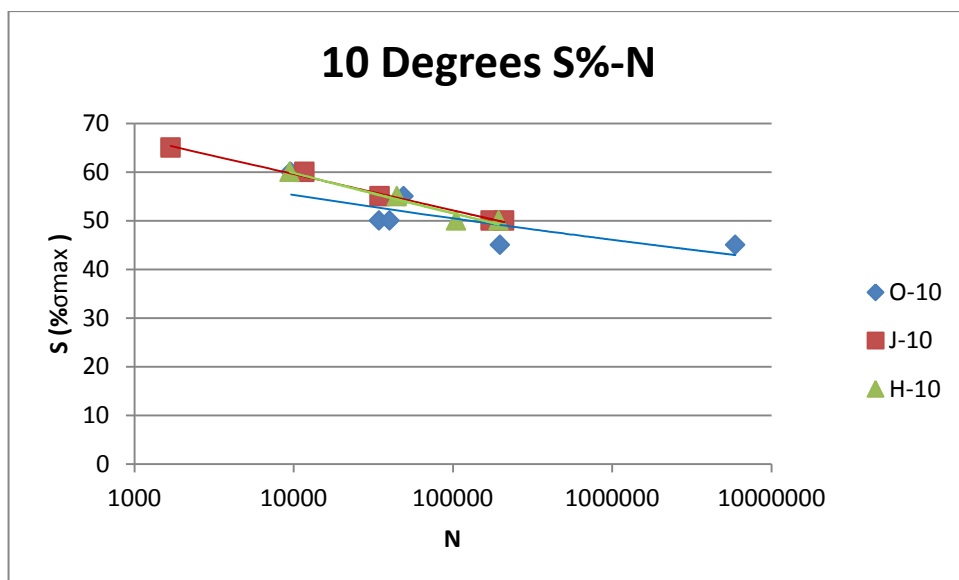
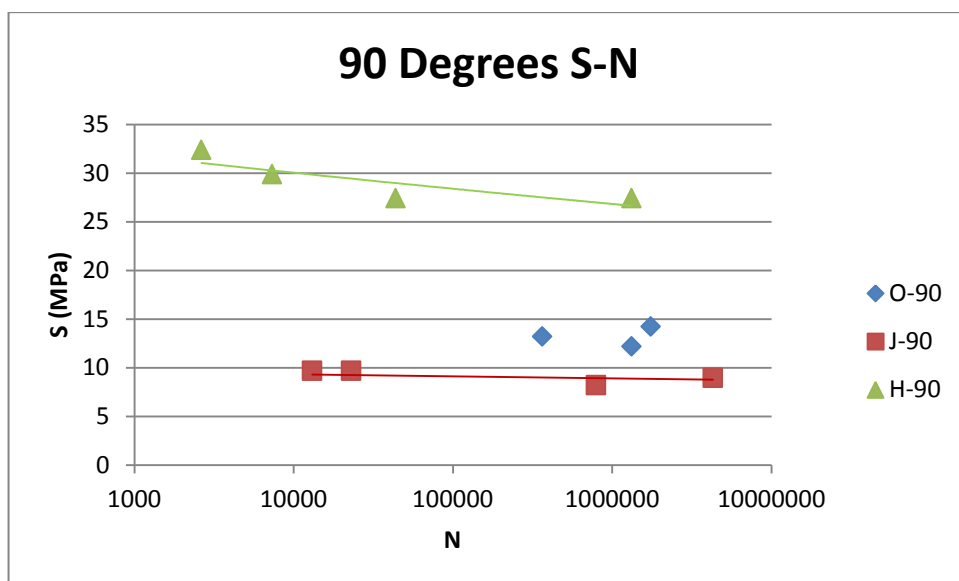
H-sarjan staattiset tulokset ja jännitys-venymä -käyrät



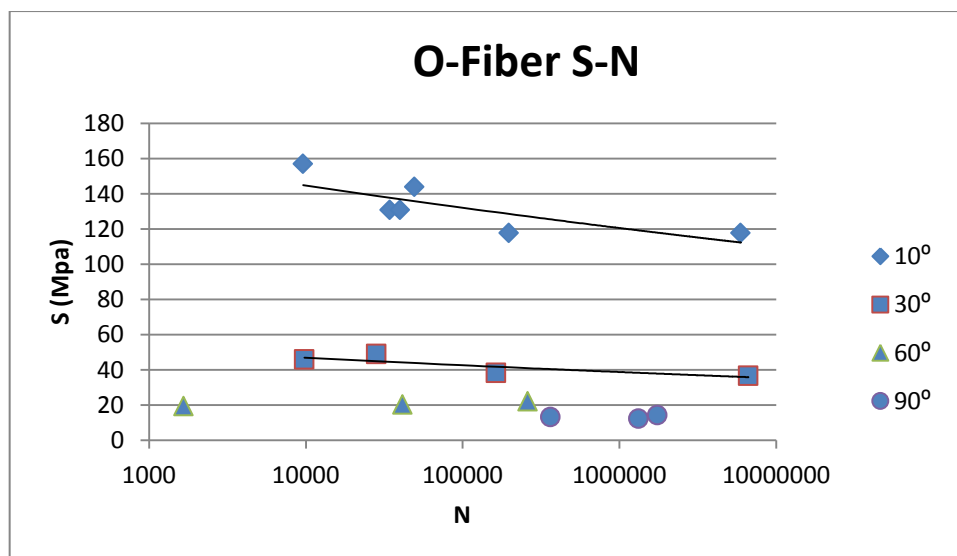
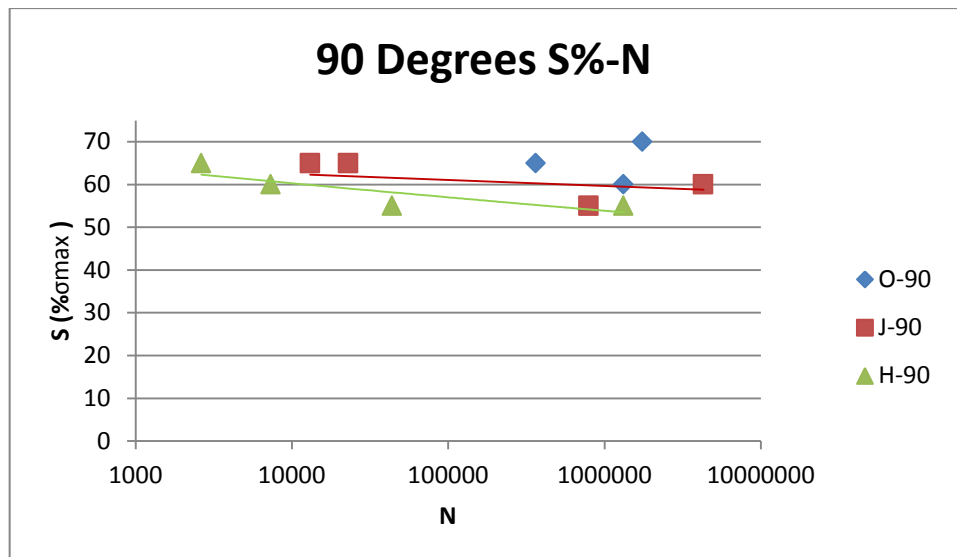
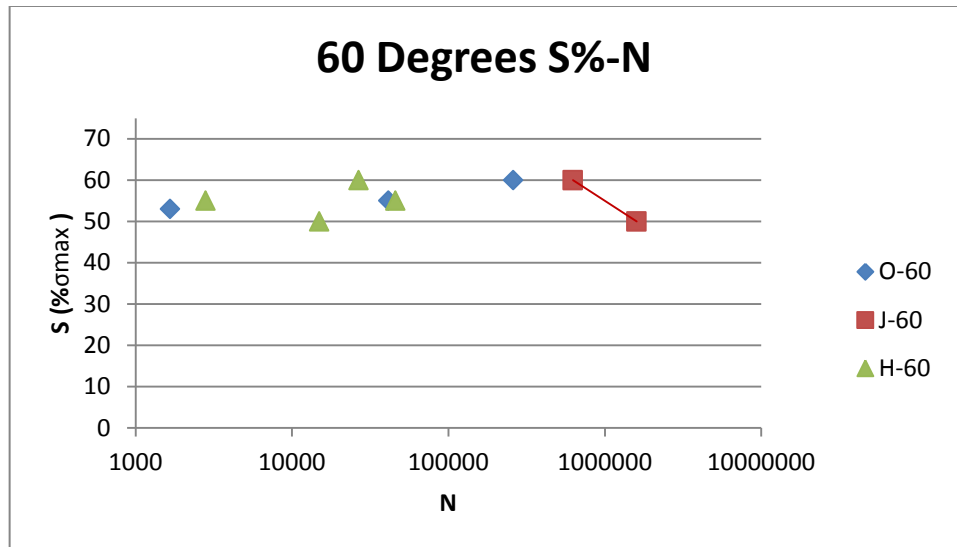
S-N – käyrät absoluuttisilla ja suhteellisilla jännitysarvoilla



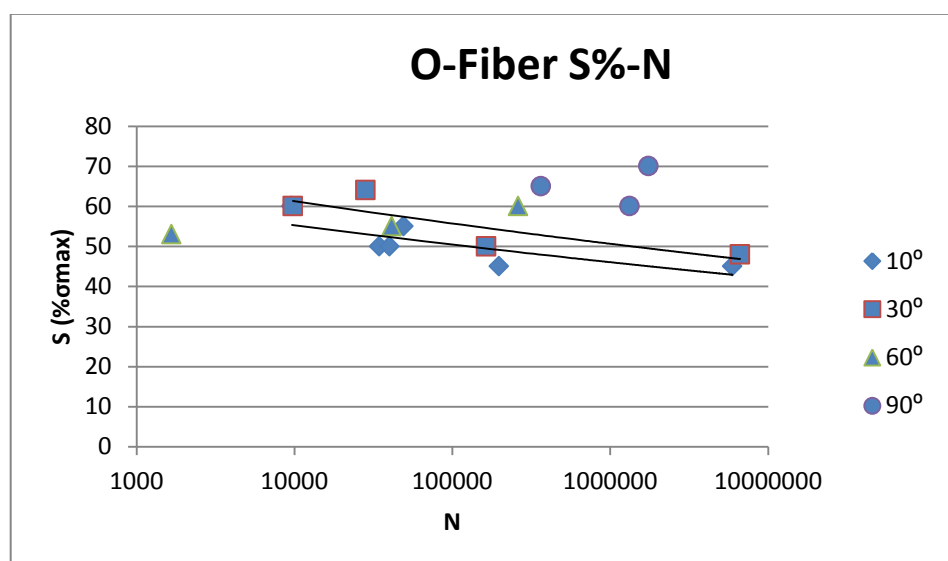
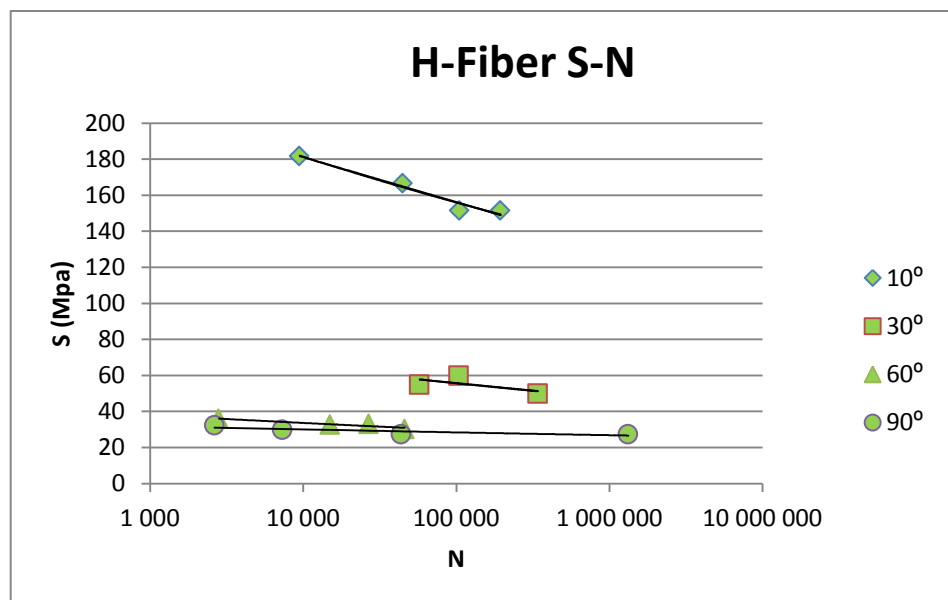
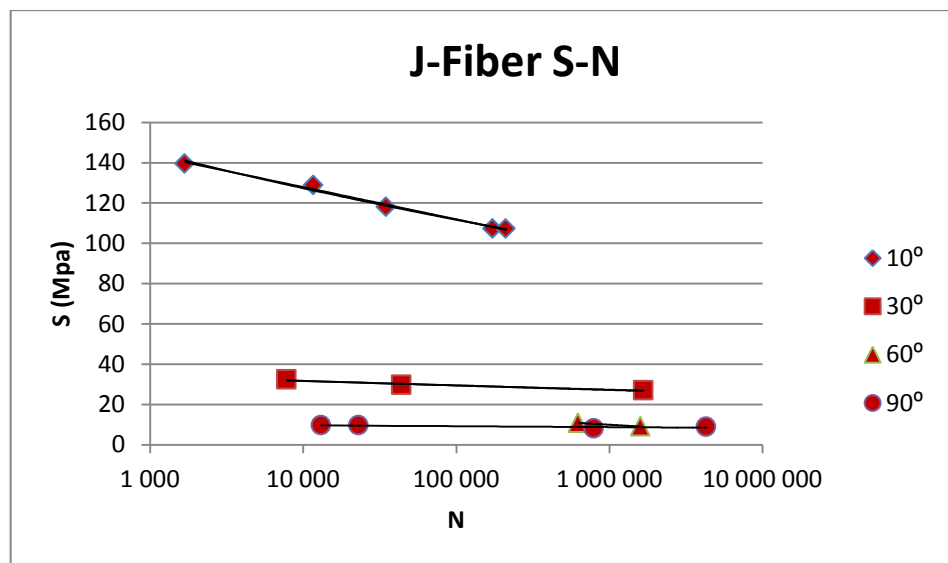
S-N – käyrät absoluuttisilla ja suhteellisilla jännitysarvoilla



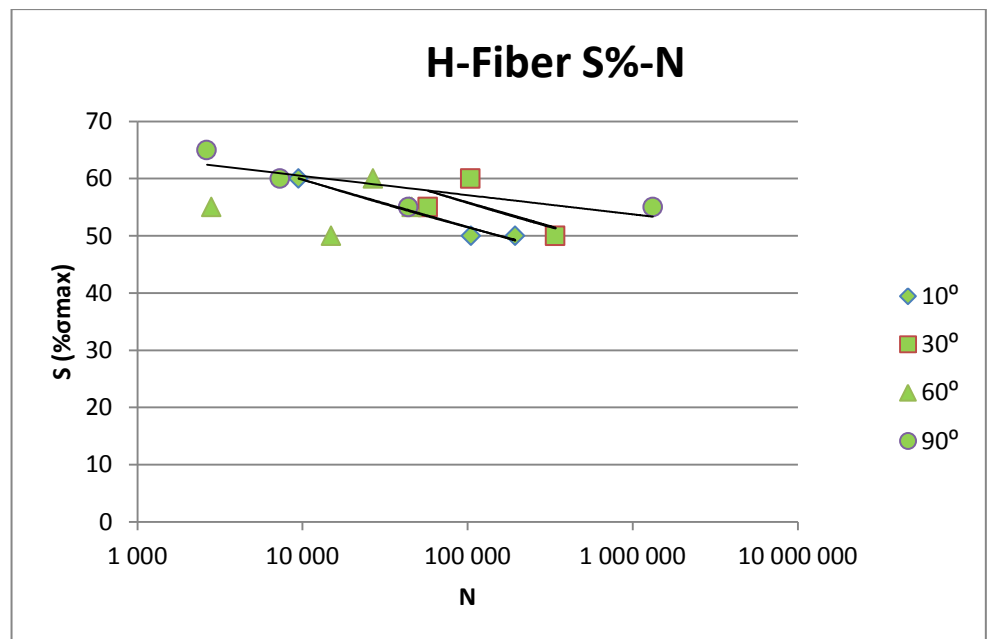
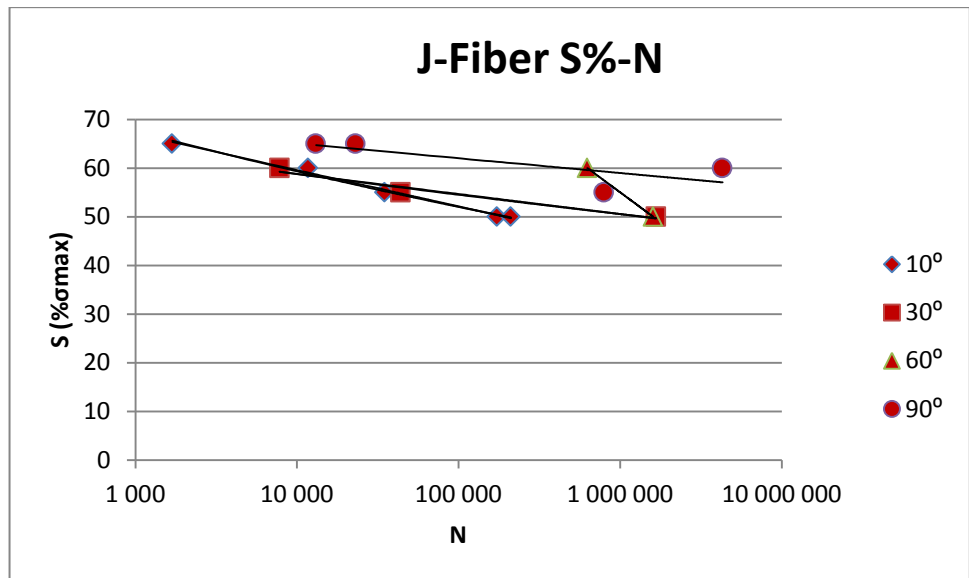
S-N – käyrät absoluuttisilla ja suhteellisilla jännitysarvoilla



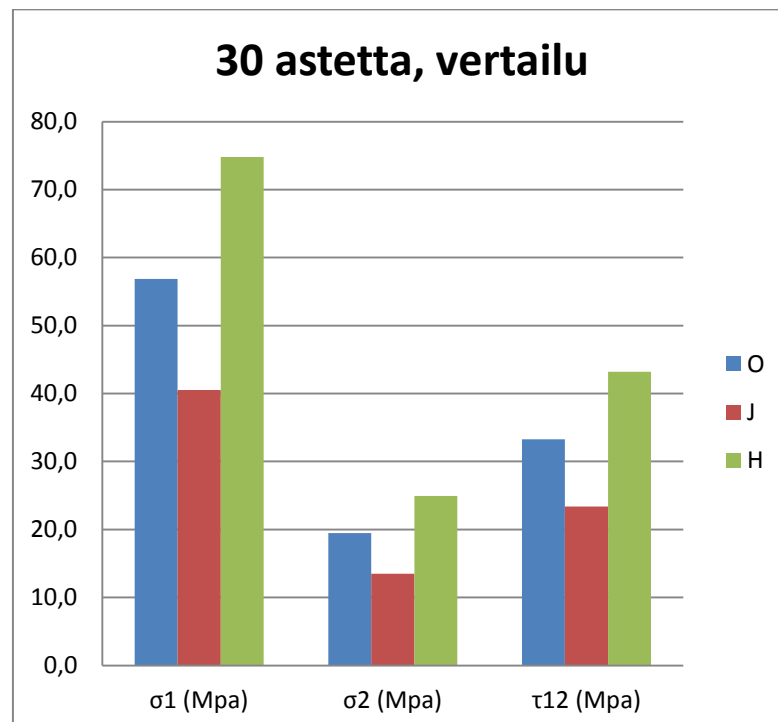
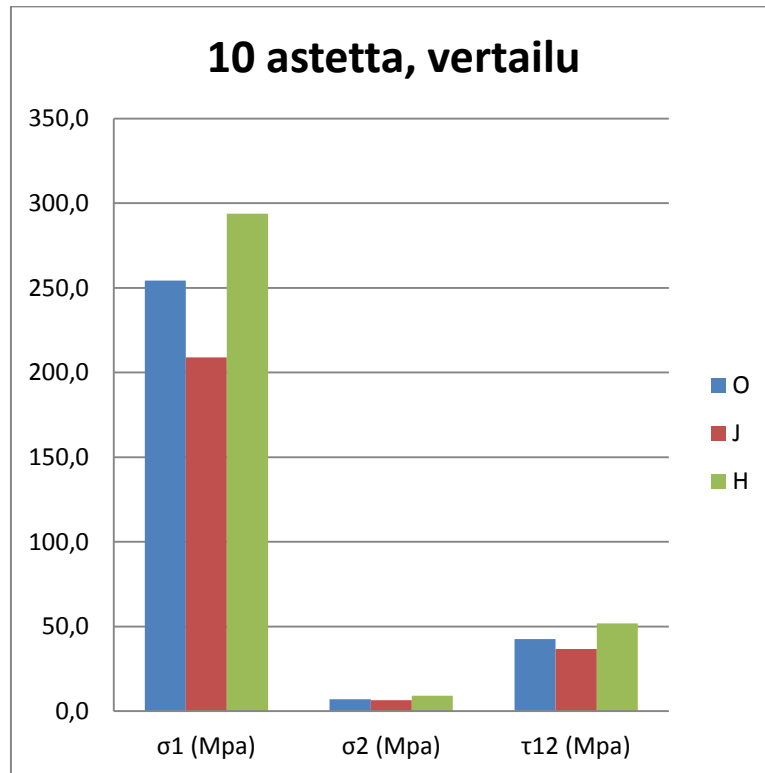
S-N – käyrät absoluuttisilla ja suhteellisilla jännitysarvoilla



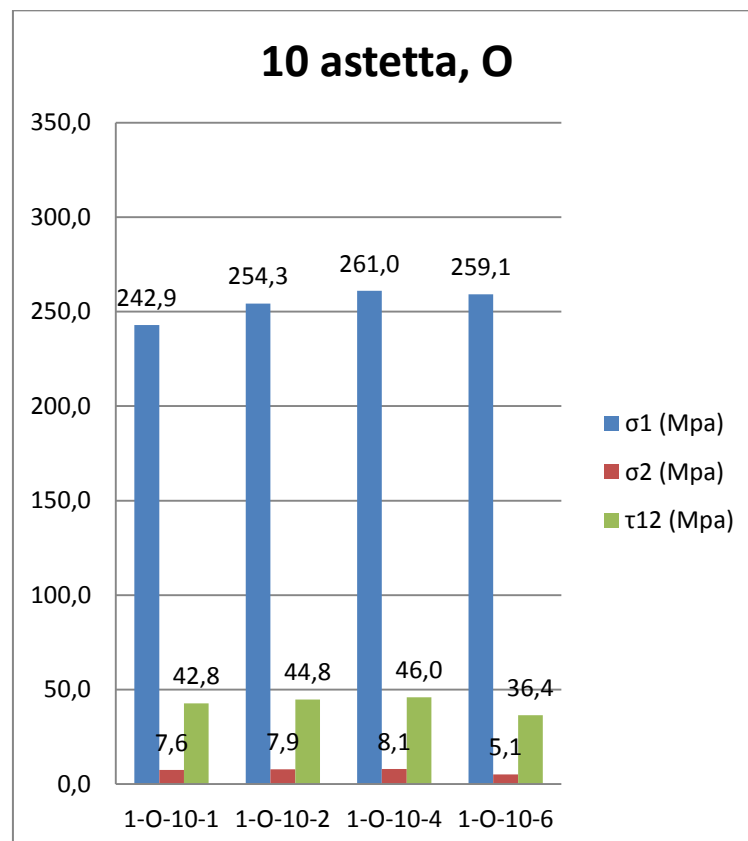
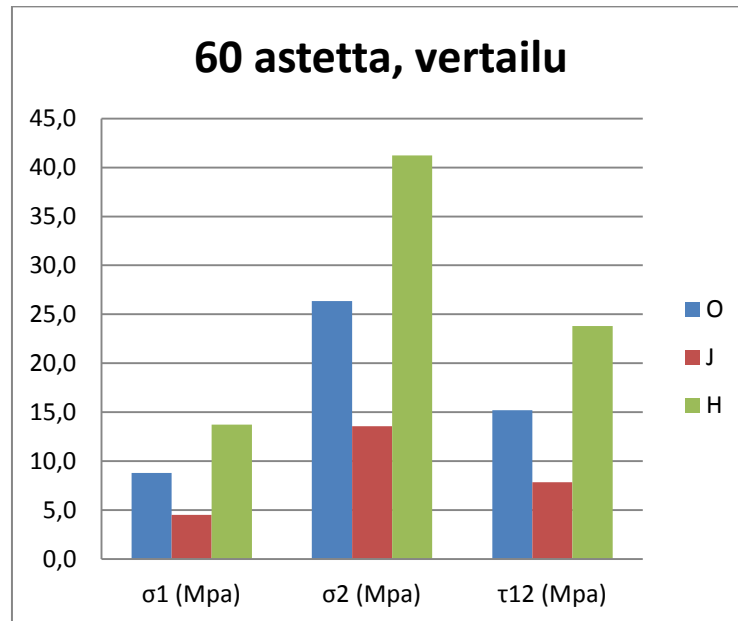
S-N – käyrät absoluuttisilla ja suhteellisilla jännitysarvoilla



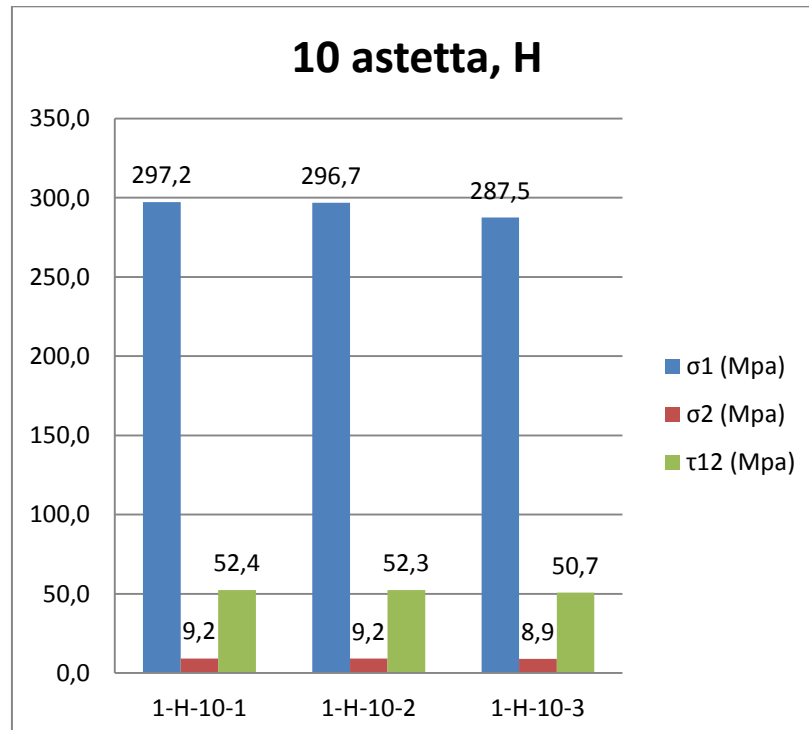
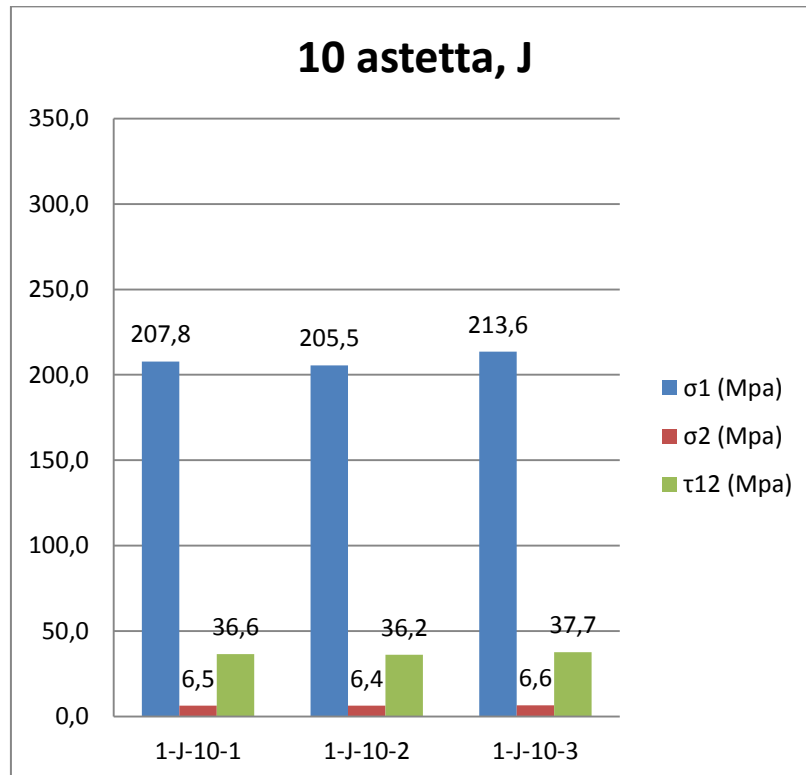
Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot



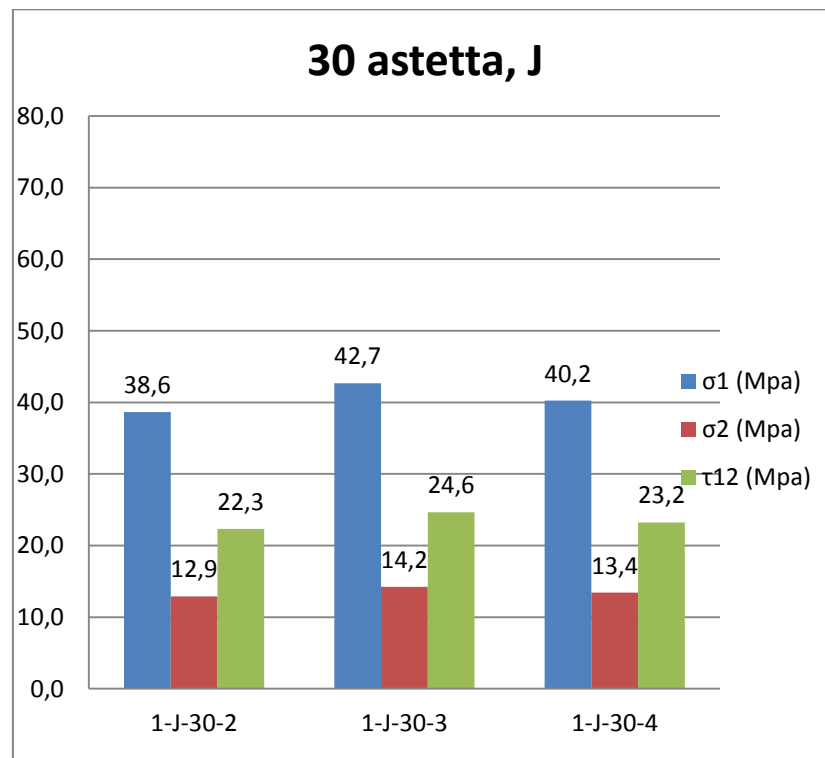
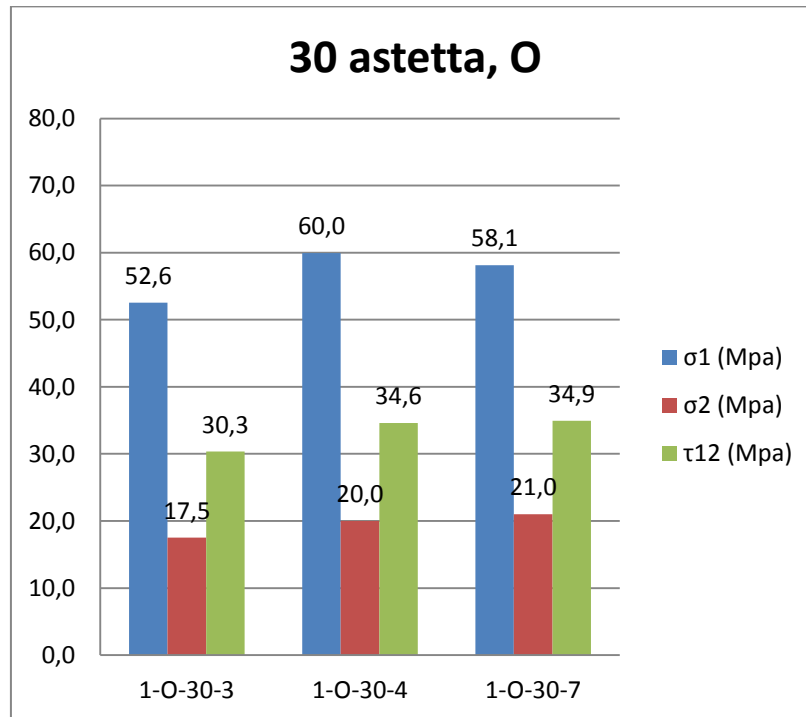
Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot



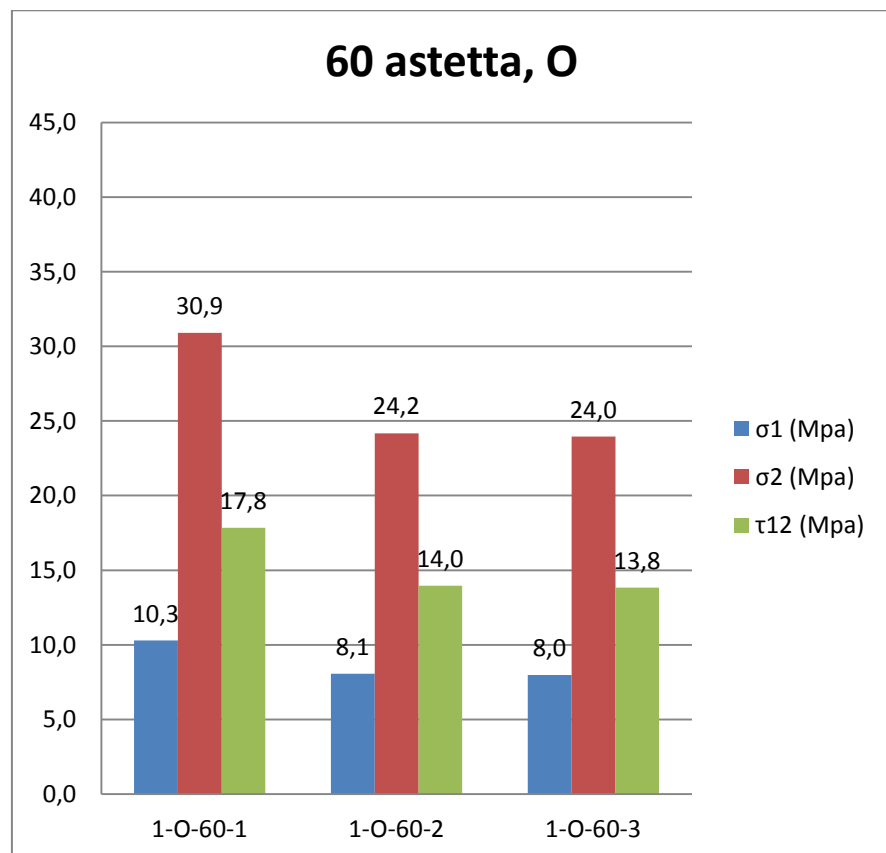
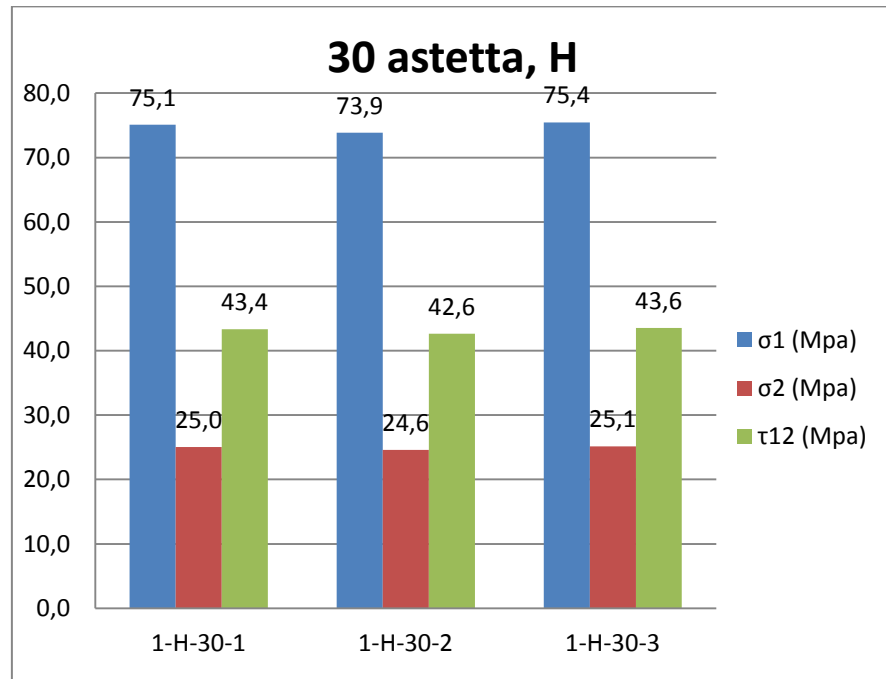
Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot



Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot



Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot



Pääjännitykset ja leikkausjännitys staattisissa testeissä, laskennalliset arvot

