



OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ALUMIINIEN LASER-, KAARI- JA HYBRIDIHITSAUS

Savonia-ammattikorkeakoulu

TEKIJÄ: Joni Andersin

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Joni Andersin	
Työn nimi Alumiinien laser-, kaari- ja hybridihitsaus	
Päiväys	7.6.2016
Sivumäärä/Liitteet	27/11
Ohjaaja(t) lehtori Mika Mäkinen, projekti-insinööri Kari Solehmainen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Savonia-ammattikorkeakoulu	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän työn aiheena oli alumiinien laser-, kaari- ja hybridihitsaus.</p> <p>Olennaista tässä työssä oli perehtyä laser- ja hybridihitsaukseen sekä nähdä, olisiko edellä mainituilla menetelmillä hitsatuilla alumiinirakenteilla potentiaalia käytettäväksi teollisuudessa myös arktisilla alueilla.</p> <p>Työn tavoitteena oli tutkia ISO-standardien mukaisilla menetelmäkokeilla laser-, hybridi- ja kaarihitsausmenetelmien liitoskestävyyttä EN AW-6005A -alumiinilla arktista lämpötilaa vastaavissa olosuhteissa. Työ toteutettiin Savonia-ammattikorkeakoulun HybWeld-tutkimushankkeessa.</p> <p>Projektissa haasteena oli uuden laserhitsaussolun opiskelu, ennen kuin parametrejä päästiin testaamaan kunnolla, sillä solu oli vielä kokeiluasteella projektin alussa. Tuloksina saatiin onnistuneiden ja epäonnistuneiden hitsausliitoksien lisäksi kattavaa tietoa laser- ja hybridihitsauksesta ja alumiinin hitsattavuudesta sekä materiaalin ominaisuuksista ja käyttäytymisestä.</p> <p>Työn on tarkoitus tukea myös HybWeld-hankkeen tavoitetta saada uutta julkaistavaa tietoa laser- ja hybridihitsauksesta yleiseen käyttöön.</p>	
Avainsanat laser, hybridi, hitsaus, alumiini, arktis	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author Joni Andersin			
Title of Thesis Aluminum welding with laser, arc and laser-arc hybrid methods			
Date	7 June 2016	Pages/Appendices	27/11
Supervisor(s) Mr Mika Mäkinen, Lecturer and Mr Kari Solehmainen, Project Engineer			
Client Organisation /Partners Savonia UAS			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to study and compare the durability of EN AW-6005A aluminum alloy joints joined using arc, laser and hybrid laser-arc welding (HLAW) methods. One of the comparison joints was done between arctic (-40°C) and room temperatures. The thesis was commissioned by Savonia UAS and it was carried out under the HybWeld funded by Tekes.</p> <p>In the project, it was essential to become familiar with laser and HLAW processes and to see if there would be potential to use aluminum structures in arctic areas welded by such methods. The materials for the project were supplied by Transtech Oy.</p> <p>As a result, a lot of information was gained not only from HLAW and laser welding, but also of the weldability, behavior and features of AlMgSi-alloy. In addition, this thesis can be used to support one of the goals of HybWeld-project where some material about laser and hybrid welding is to be published for common use.</p>			
<p>Keywords Laser, hybrid, welding, aluminum, arctic</p>			

ESIPUHE

Kiitän ohjaajiani lehtori Mika Mäkistä ja projekti-insinööri Kari Solehmaista sekä koko HitSavonian henkilökuntaa ja laboratorioteknikko Reijo Keinästä tuesta ja avusta opinnäytetyöni aikana. Kiitän myös hitsausinsinööri Aki Väinölää ja Transtech Oy:tä hyvästä yhteistyöstä.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	ARKTISTEN OLOSUHTEIDEN VAIKUTUS RAKENTAMISEEN	8
2.1	Arktis	8
2.2	Teollisuus arktisilla alueilla	9
3	MATERIAALIT	10
3.1	Alumiini	10
3.2	Alumiinien luokittelu	10
3.3	Hitsattavuus.....	11
4	HITSAUSPROSESSIT	14
4.1	Kaarihitsaus	14
4.2	Laserhitsaus.....	14
4.3	Hybridihitsaus	14
5	TYÖN TOTEUTUS	16
5.1	Laserliitos	17
5.2	Hybridiliitos.....	17
6	MENETELMÄKOKEET	18
6.1	Standardit ja viranomaismääräykset.....	18
6.2	Staattiset kuormituskokeet	19
6.2.1	Vetokoe	21
6.2.2	Taivutuskoe.....	21
6.3	Mikrohie	21
6.4	Kovuuskoe.....	22
6.5	Tulosten arviointi.....	23
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	25
	LÄHTEET	26
	LIITE 1: HYBRIDIPÄITTÄISLIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.....	28
	LIITE 2: HYBRIDIPÄITTÄISLIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.....	29
	LIITE 3: HYBRIDILIMILIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.....	30
	LIITE 4: HYBRIDILIMILIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.....	31
	LIITE 5: LASERLIMILIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.....	32

LIITE 6: LASERLIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.	33
LIITE 7: MIG-LIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.	34
LIITE 8: MIG-LIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.	35
LIITE 9: HYBRIDIPÄITÄISLIITOKSEN VETOKOE HUONEENLÄMPÖTILASSA.	36
LIITE 10. LASERLIITOKSEN VETOKOE HUONEENLÄMPÖTILASSA	37
LIITE 11: MIG-LIITOKSEN VETOKOE HUONEENLÄMPÖTILASSA	38

1 JOHDANTO

Tämä työ on toteutettu osana Tekesin rahoittamaa HybWeld-hanketta. HybWeldissä tavoitteena on tutkia laser-, hybridi- ja kaarihitsattujen materiaalien liitoskestävyyttä arktisia olosuhteita vastaavissa lämpötiloissa. Samalla hankkeessa halutaan tuoda julkisuuteen tietoa laser- ja hybridihitsauksesta. Tämän työn tavoite puolestaan oli saada uutta tietoa laser- ja hybridihitsauksesta, alumiinin hitsattavuudesta ja kyseisen materiaalin liitoskestävyyksistä -40 °C:ssa.

Arktiset alueet ovat saaneet viime aikoina suurta huomiota, kun ilmaston lämpeneminen on kutistanut jääpeitettä ja mahdollistanut alueella piilevien luonnonvarojen etsintöjen entistä laajemmin. Tämä seikka tuo myös paljon uusia haasteita teollisuudelle, sillä arktiset lämpötilat vaurioittavat monia materiaaleja ennen aikaisesti. (Saavalainen 2014; Dutta 1988.)

Laser- ja hybridihitsausmenetelmiä halutaan tutkia tässä tapauksessa eritoten niillä saavutettujen etujen, kuten suurien hitsausnopeuksien, syvän tunkeuman ja pienen lämmöntuonnin vuoksi. Käytännössä suuremmat hitsausnopeudet tarkoittavat parempaa tuottavuutta ja syvä tunkeuma laajempia mahdollisuuksia suunnitella hitsattavia tuotteita. (Kah 2011.)

Liitosten kestävyttä mittaaviksi menetelmiksi valikoituivat vain staattiset kuormituskokeet, sillä työssä käytetty materiaali ei haurastu lainkaan lämpötilan laskiessa, kuten monet rautametallit. Dynaamiset kuormituskokeet, jotka mittaavat kappaleen iskusitkeyttä, ovat puolestaan teräksille ensisijainen menetelmä kylmissä olosuhteissa tehtäviä kokeita ajatellen. (Väinölä 2016.)

Kuopion Opistotien kampuksella sijaitseva HitSavonia on Savonia-ammattikorkeakoulun tutkimus- ja kehitystyöhön tarkoitettu tila, joka tarjoaa asiantuntevaa palvelua hitsaustuotannon tehostamisprojekteihin. HitSavoniolla järjestetään myös opetusta ja projektitoimintaa opiskelijoille. HitSavonian tilat ja laitteisto tarjoavat myös monille yrityksille mahdollisuuden tutkia uusia, tuottavampia hitsausmenetelmiä.

2 ARKTISTEN OLOSUHTEIDEN VAIKUTUS RAKENTAMISEEN

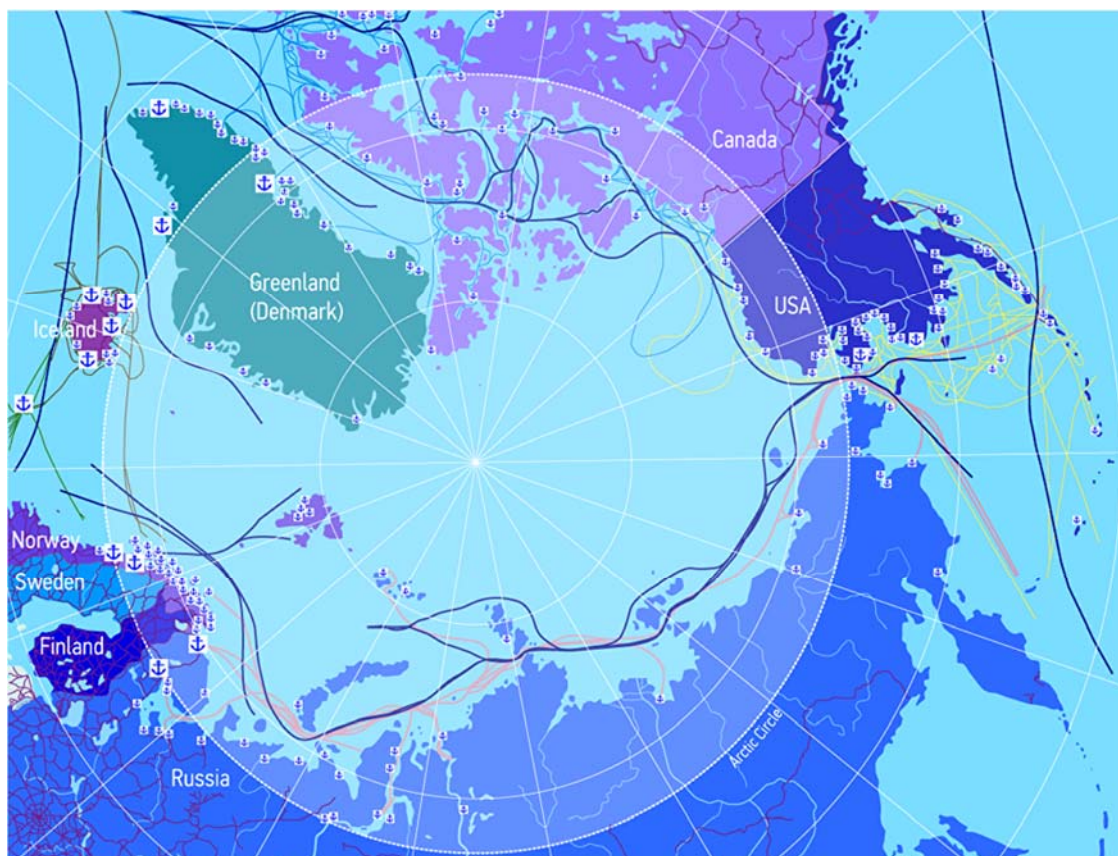
Arktis on monella tapaa haastava mutta samalla hyvin kiinnostava alue. Alueen kylmyys, lumi- ja jääpeite, kova tuuli sekä pitkät pimeät kaudet ovat kova haaste siellä työskenteleville ihmisille ja käytettäville koneille.

Arktikselle viedään kuitenkin teollisuutta niin energiavarojen porausta varten kuin myös alueen tutkimushankkeiden vuoksi. Koneiden ja niiden materiaalien on kestettävä niille suunnitellun käyttökohteen ja ympäristön vaikutukset, siten arktinen ympäristö asettaa tiettyjä haasteita eritoten materiaalivalinnalle ja valmistustekniikoille. (Konttinen 2013.)

2.1 Arktis

Arktiksella tarkoitetaan Maan pohjoisnavan ympäröimää aluetta, jossa vallitsee kylmä ilmasto ja puuton ikirouta. Alueen sisälle ulottuu osia Suomesta, Ruotsista, Norjasta, Venäjältä, USA:n Alaskasta, Grönlannista, Kanadasta ja Islannista. (Kuva 1.) (Bunaziv 2013.)

Arktisen alueen on arvioitu sisältävän jopa reilun viidesosan (22 %) löytämättömistä fossiilisista energiavaroista, mikä tarkoittaa 13 % maailman öljyvarannoista ja 30 % maakaasuvarannoista. Näihin lähteisiin on ollut helpompi päästä käsiksi nykyään, kun jääpeite on ilmaston lämpenemisen seurauksena alkanut heikkenemään. (Bunaziv 2013; eia 2009.)



KUVA 1. Arktinen alue (The Arctic 2016.)

2.2 Teollisuus arktisilla alueilla

Vaatimukset napapiirialueilla käytettäville materiaaleille ovat haastavia. Materiaalien tärkein ominaisuus on hyvä lujuus, sillä pakkanen haurastuttaa materiaaleja ja voi saada aikaan iskuista johtuvia haurasmurtumia, jotka puolestaan ovat helposti piilossa etenevinä ja näkymättöminä vaarallisia. Toiseen kova tuuli, jäälauttojen liike ja värinä aiheuttavat väsyttävää räsitusta. Tätä varten materiaalin on oltava myös sitkeää. (Mäkinen 2016.)

Arktiseen infrastruktuuriin kuuluu yleisimmin öljyä ja maakaasua kuljettavat putkilinjat, lentokentät sekä maa- ja merenkulkuvälineet. Pääasiallinen liikennöinti arktisella alueella tapahtuu meriteitse sekä raiteita pitkin. Jääpeitteen väistyminen Pohjoisella jäämerellä helpottaa laivaliikenteen kulkua ja mahdollistaa myös kansainvälisen kaupankäynnin sitä kautta. (Arctic Corridor 2016.)

3 MATERIAALIT

Kylmiin käyttöolosuhteisiin optimaalisia ovat materiaalit, jotka eivät haurastu lämpötilan laskiessa. Tämä ominaisuus on ainakin austeniittisella ruostumattomalla teräksellä sekä alumiineilla.

Alumiini on kiinnostava siitä syystä, että sitä käytetään paljon koneenrakennuksissa sekä muissa vaativissa rakenteissa, kuten lentokone- ja laivanrakennusteollisuudessa. Tähän työhön valikoitunut Pii-magnesium-seosteinen alumiini on myös hankalampaa hitsattavaa kuin austeniittinen ruostumaton teräs, joten pieni lisähaaste toi mielenkiintoa projektiin. (Dutta 1988; PSS Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus.)

3.1 Alumiini

Alumiini on monipuolinen materiaali, jota käytetään rakennusaineena esimerkiksi junavaunuissa, lentokoneissa ja juomatölkeissä. Sen perusominaisuuksiin kuuluu materiaalin pintaan ilmassa itsestään syntyvä luja oksidikerros, joka suojaa alumiinia korroosiolta ja epäpuhtauksilta. Seostamattoman alumiinin oksidikalvon sulamispiste on yli 1 400 °C suurempi kuin alumiinin (vrt. 660 °C ja 2 050 °C), joten se vaikeuttaa alumiinin hitsaamista. Myös seostettujen laatuojen tapauksessa oksidikalvo sulaa vasta yli 1 000 °C korkeammassa lämpötilassa kuin materiaali itse. Mikäli oksidikalvo rikkoutuu esim. mekaanisessa puhdistuksessa, se alkaa muodostua ilman vaikutuksesta uudelleen lähes välittömästi.

Alumiinin sähkönjohtavuus on erittäin hyvä. Seostamattomana se johtaa sähköä jopa kuusi kertaa paremmin kuin teräs mutta noin 38 % huonommin kuin kupari. Seostaminen heikentää sähkönjohtavuutta

Alumiinilla on myös hyvä lämmönjohtavuuskyky, mikä edelleen vaikuttaa sen hitsattavuuteen. Lämmönjohtuminen näkyy esimerkiksi materiaalin pehmenemisenä pitkältä matkalta hitsin ympärillä sekä laserhitsauksen pienen lämmöntonin hukkumisella materiaalin lämmönjohtavuuteen.

Tässä työssä haluttiin tutkia nimenomaan alumiiniseoksia. Tietyt seokset yltyvät lujuudeltaan rakeneteräksien tasolle ja ovat korroosionkestoltaan parempia, mutta eivät kuitenkaan haurastu kylmissä olosuhteissa, vaan kylmyys jopa lujittaa alumiinia. Alumiinin hitsattavuus laserilla oli myös mielenkiintoinen tutkimuskohde, sillä alumiinin laserhitsaus on muita menetelmiä haasteellisempi. (Azom 2016, Aluminiumdesign.net 2016.)

3.2 Alumiinien luokittelu

Alumiiniseoksia luokitellaan standardin EN 573-1 mukaan nelinumeroisella merkinnällä, kuten tässä työssä käytetty 6000-sarja, tarkemmin EN AW-6005A. Numerosarja kertoo seoksen kemiallisen koostumuksen, ja alkukirjaimet A ja W merkitsevät alumiinia (A – aluminum) ja muokattua tuotetta (W – wrought).

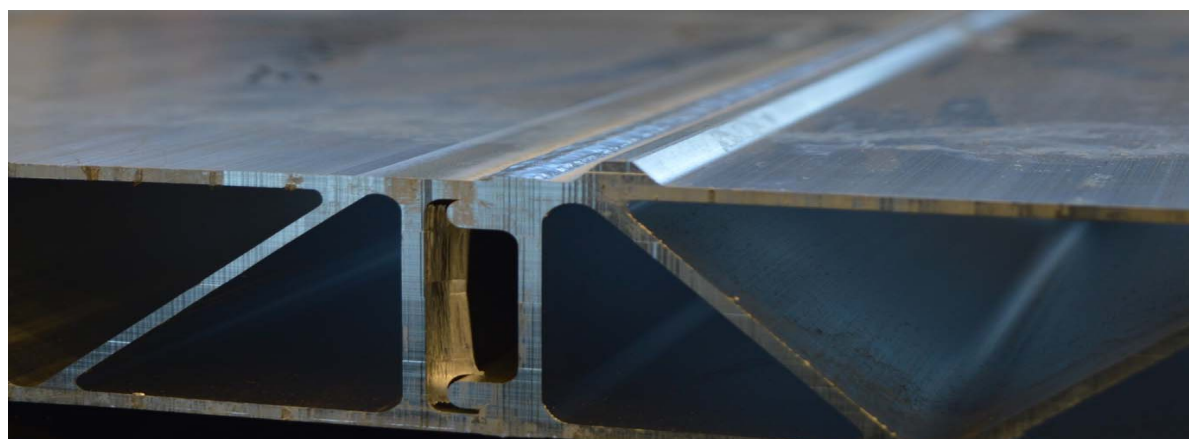
Alumiiniseokset jaotellaan karkeneviin ja karkenemattomiin seoksiin. Karkenemattomien lajien hitsattavuus on hyvä ja kestävät korroosiota hyvin, mutta niiden ominaisuudet jäävät pysyviksi valmistuksen jälkeen. Ainoastaan kylmämuokkaamisella saadaan lujitettua karkenemattomia seoksia. Näihin kuuluvat 1000-, 3000-, 4000-, 5000- ja 8000-sarjan alumiinit.

Karkenevien luokkaan kuuluvat puolestaan 2000-, 6000- ja 7000-sarjat (sekä 8000-sarja). Näistä vain 6000-sarjan seokset ovat sekä hitsattavia että anodisoitavia. 6000-sarja on seostukseltaan tarkka, sillä niukkaseosteisuus lisää kuumahalkeilualttiutta, mutta liika magnesium- ja piipitoisuus vaikeuttavat materiaalin pursotettavuutta. Taulukosta 1 voi vertailla sarjojen seostuksia.

TAULUKKO 1. Alumiiniseosten vertailu

Sarja	Pääseosaineet	Ominaisuudet
1000	Seostamaton, ns. puhdas alumiini (99 %)	Hyvä sähkönjohtavuus, korroosionkesto ja vähäinen lujuus
2000	Kupari (Cu)	Hyvä lujuus, sitkeys ja koneistettavuus
3000	Mangaani (Mn)	Hyvä lujuus ja muovattavuus
4000	Pii (Si)	Hyvä pursotettavuus
5000	Magnesium (Mg)	Hyvä lujuus ja korroosionkesto. Ns. merialumiini
6000	Magnesium ja Pii (Mg+Si)	Hyvä lujuus ja korroosionkesto
7000	Sinkki (Zn)	Suurin lujuus, huono hitsattavuus
8000	Muut seokset	-

EN AW-6005A on yleisesti käytetty pursoteseos. (Kuva 2.) Tätä seosta voi käyttää keskivaativissa rakenteissa, kuten tikapuissa, meriteollisuudessa ja junanrakennuksessa. Seos luokitellaan keskilujaksi, T6-toimitustilassa (liuotushehkutettu ja keinovanhennettu) murtoraja on jopa 270 MPa. (Nedal Aluminium 2005; Lukkari ym. 2016, 260.)



KUVA 2. MIG-hitsattua EN AW-6005A profiilia (Andersin 2016.)

3.3 Hitsattavuus

Hitsattavuudesta on olemassa monia määritelmiä. Saksalainen DIN 8528 -normi tarjoaa hitsattavuudesta kattavimman määritelmän. Kyseisessä normissa hitsattavuuteen on yhdistetty kolme ulkoista tekijää, jotka ovat perusaine (hitsauksen soveltuvuus), valmistus (hitsauksen mahdollisuus) sekä tuotteen design (hitsauksen turvallisuus).

Perusaineen hitsattavuus kyseisen normin mukaan tarkoittaa metallisen aineen soveltuvuutta hitsaukseen, kun on mahdollista luoda aineen fysikaaliset, kemialliset ja metallurgiset kriteerit täyttävä hitsausliitos. Toisin sanoen, mitä vähemmän perusaineen tuottamiin rajoituksiin tarvitsee kiinnittää huomiota, sitä paremmin aine on sovellettavissa hitsattavaksi. (LUT:n IWE/IWT-kurssimateriaali.)

Alumiinin hitsattavuus riippuu paljolti sen seostuksesta. Lähtökohtaisesti kaikkia laatuja pystyy hitsaamaan, vaikka osa seoksista onkin huonoja hitsattavuudeltaan.

Tässä työssä käytetty seos osoittautui laserin kannalta huonoksi hitsattavaksi lähinnä seosaineen puuttumisen takia. Kaari- ja hybridimenetelmillä haasteet vältettiin käyttämällä oikeaa lisäainelankaa.

Seuraavassa on lueteltuna yleisimpiä haasteita ja ratkaisuvaihtoehtoja niihin:

1. Vedyn liukeneminen

Sulaan alumiiniin pääsee herkästi liukenemaan vetyä huonosti sulavan alumiinioksidin kautta. Vety alumiinissa aiheuttaa huokosia, jotka heikentävät hitsin lujuutta merkittävästi.

Vetyä on vedessä, liuottimissa, rasvassa sekä ilmassa vesihöyryn muodossa. Liukenevista voi estää pesemällä rasvan ja epäpuhtaudet alkoholilla sekä hiomalla tai harjaamalla hitsattavista kappaleista oksidikalvon pois juuri ennen hitsaustapahtumaa. Oksidikalvo alkaa muodostua alumiinin pintaan lähes välittömästi, joten puhdistus tulisi tehdä aikaisintaan yhdestä kahteen tuntiin ennen hitsaamista.

2. Plasmopilvi

Hitsauksen aikana sulasta nouseva plasmopilvi aiheuttaa säteen absorboitumista pilveen, mikä puolestaan estää säteen suurimman potentiaalisen saavuttamisen hitsattavaan materiaaliin. Pilven voi puhaltaa säteen tieltä paineilmalla.

3. Heijastavuus

Toinen lasersädettä koskeva haaste on heijastavuus kiiltävän alumiinin pinnasta. Suoraan alumiinin tai muun kiiltävän materiaalin pintaan kohdistettaessa säde heijastuu takaisin ja suurin hyöty menetetään tai laser kytkeytyy pois päältä suojatakseen itsensä. Heijastelua voi välttää joko kääntämällä laserpäätä tai pöytää, jolloin säde osuu kappaleeseen epäsuorasti ja säteen tehoa saadaan hyödynnettyä paremmin.

4. Lämmönjohtavuus

Alumiinin hyvä lämmönjohtavuus saa aikaan myös herkästi lämpölaajenemisia ja hankaloittaa sopivan lämmöntonin tarpeen arviointia. Tämän lisäksi pelkkää lasersädettä käyttämällä säteen pieni lämmöntonni hukkuu helposti alumiinin lämmönjohtavuuteen, mikä taas heikentää sulan muodostumista. Sopivalla tehon ja nopeuden suhteella ongelma on vielä ratkaistavissa.

5. Kuumahalkeilu

Kun seosaineet jäähtyvät eri aikaan kuin itse alumiini, syntyy kuumahalkeamia, jotka aiheuttavat hitsin hylkäämisen. Tämäkin on estettävissä tietyillä lisäaineilla, jotka sisältävät samaa seosainetta kuin materiaalissa itsessään, kuten esimerkiksi magnesiumia tai piitä. (Solehmainen 2016; The Fabricator 2013; Kaipainen 2013.)

4 HITSAUSPROSESSIT

Kolme hyvin erilaista menetelmää hitsata antaa myös runsaasti vertailukohtia tarkasteluun. Nykyaikaisten laser- ja hybridiprosessien lisäksi haluttiin myös verrata perinteistä kaarimenetelmää, koska se on vielä yleisimmin käytössä ja siitä on olemassa niin paljon tuloksia ja aineistoa antamaan erinomaisen vertailupohjan.

4.1 Kaarihitsaus

Kaarihitsauksella tarkoitetaan liitosmenetelmää, jossa työkappaleiden ja elektrodin välille muodostuu valokaari, joka sulattaa kappaleet ja osan lisäainetta muodostaen pysyvän liitoksen. Kaarihitsauksesta käytetään yleensä nimitystä MIG- tai MAG-hitsaus, suojakaasun mukaan: MIG, eli Metal Inert-Gas (inerttikaasu) ja MAG, eli Metal Active-Gas (aktiivikaasu). (Outokumpu Welding Handbook 2010, 22.)

Inerttikaasuilla tarkoitetaan hitsisulan tai elektrodin kanssa reagoimattomia kaasuja, joita ovat muun muassa Argon ja Helium. Näitä käytetään esimerkiksi alumiinin hitsauksessa. Aktiivikaasun tarkoitus taas on reagoida sulan metallin aineiden kanssa parantaen hitsattavuutta. Yleensä käytetään joko Argonia ja Heliumia sisältäviä seoskaasuja tai puhdasta hiilidioksidia. (AGA 2016.)

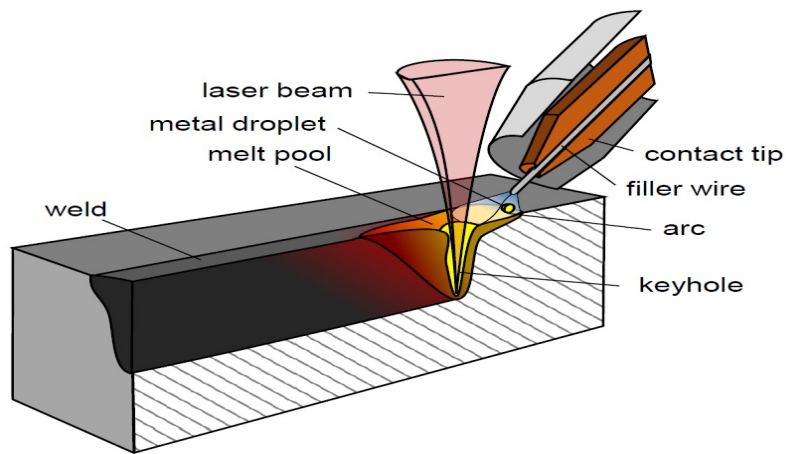
4.2 Laserhitsaus

Laserhitsauksen periaate on kohdistaa säde niin pieneen pisteeseen, että se kykenee sulattamaan ja höyrystämään metallia. Varsinkin suurteholaserhitsauksessa menetelmänä on niin kutsuttu avaimenreikähitsaus (keyhole welding), jossa säde sulattaa ja höyrystää materiaalia ja aiheuttaa sulan väistymisen höyryn paineen vaikutuksesta. Tällöin liitoksesta tulee syvä ja kapea. (AGA 2016.)

Laserhitsauksen etuina perinteisiin menetelmiin verrattuna ovat suuri hitsausnopeus, vähäiset lämpömuodonmuutokset, useat käyttökohteet ja kustannustehokkuus. Olemassa olevia lasertyyppisiä ovat CO₂-hiilidioksidilaser, Nd:YAG-kuituoptiikkalaser sekä nykyisin yleistyvät suurkirkkauksiset levy- ja kuitulaserit, jotka ovat sittemmin alkaneet syrjäyttää CO₂ ja Nd:YAG-lasereita. (Outokumpu Welding Handbook 2010, 32.)

4.3 Hybridihitsaus

Laser-kaari-hybridihitsaus yhdistää kummankin liitosmenetelmän hyvät puolet, jolloin saadaan aikaan tuloksia, joihin ei pääsisi kummallakaan menetelmällä erikseen. Periaatteena on yhdistää laserin hyvä tunkeuma sekä MAG:n liitoksen täyttävä vaikutus. (Kuva 3.) Näin saadaan hitsaustyövaiheeseen lisää tuottavuutta ja parannetaan hitsien laatua. (Kah 2011.)



KUVA 3. Laser-kaari hybridihitsaus (Ionix 2015.)

Alumiinin kannalta olennaisinta hybridihitsauksessa on riittävä lämmöntuonti verrattuna laseriin, jossa hitsaustapahtuman lämpövaikutus hukkuu alumiinin lämmönjohtavuuteen. Myös mahdollisuus käyttää sopivaa lisäainelankaa helpottaa hitsaamista huomattavasti. (Kuva 4.) (Kah 2011.)



KUVA 4. Hybridi- ja kaariliitos (Andersin 2016.)

5 TYÖN TOTEUTUS

Suunnitelmien ja materiaalivalintojen jälkeen varsinaisen työn toteutus alkoi hitsausparametrien hakuprosessilla. Kohtuullisen näköisen hitsin onnistuttua kappaleesta tuli irrottaa murtosauva, jota taivuttamalla saa suuntaa antavaa tietoa hitsin onnistumisesta. Murtosauva paljastaa käsivoimin mitattuna suuntaa hitsin sitkeydestä ja murrettuna voi silmämääräisesti tarkastella, onko liitos hitsautunut kunnolla.

Onnistuneiden liitosten jälkeen kappaleet leikattiin sirkkeliä, kulmahiomakonetta ja puukkosahaa käyttäen 50 x 300 mm levyiksi, joista osa koneistettiin vetosauvoiksi, osa jätettiin taivutussauvoiksi ja osasta leikattiin mikrohiettä varten pienet palaset.

Laser- ja hybridihitsauslaitteistona käytettiin Pemamekin toimittamaa Yaskawa Motoman –hitsausrobottia, johon kuuluu erilliset laser- ja hybridihitsauspää sekä laserleikkauspää. (Kuva 5.) Hitsausrobotti on 6-akselinen nivelrobotti, jonka kuormankantokyky on 80 kg ja soluun kuuluu myös erillinen kappaleenkäsittelyrobotti, jonka kapasiteetti on 500 kg. Laitteiston tyyppi on 8 kW kuitulaser, jonka hitsausnopeus on maksimissaan 6 000 mm/min. MIG-hitsatut kappaleet toimitti Otanmäessä toimiva kiskoliikennekalustoa valmistava Transtech Oy, jolta saatiin myös hybridillä ja laserilla hitsattavaa materiaalia.



KUVA 5. Laserhitsaussolu (Andersin 2016.)

Robotilla hitsattaessa prosessia varten täytyy luoda ohjelma, jossa robotille määritellään liikerata sekä hitsien aloitus- ja lopetuspisteet sekä hitsausparametrit. Ohjelmointi on mahdollista toteuttaa joko etänä omalta työpisteeltä Windows-pohjaisella etäohjelmointityökalulla tai kuten tässä tapauksessa robotin vieressä käsiohjaimella.

5.1 Laserliitos

Säteellä hitsattaessa railon ilmaraon täytyy aina olla mahdollisimman pieni, mielellään nolla, muuten kappaleet eivät hitsaudu. Nyrkkisääntönä pidetään maksimissaan 10 % ohuimmasta ainevahvuudesta. (Medical device and diagnostics industry 2006.)

Tässä tapauksessa kappaleet puristettiin tiukasti yhteen mahdollisimman varman tuloksen varmistamiseksi. Kappaleet puhdistettiin ensin hankaamalla oksidikalvo pois rst-harjalla ja poistamalla rasva denaturoidulla etanolilla. Säteen kulma oli 10° työntävä, jotta vastaheijastelu saatiin minimoitua. Hitsauksen aikana käytössä oli myös plasmapuhallus.

5.2 Hybridiliitos

Hybridillä hitsattaessa lisäaineena käytettiin Elgan Alumig Si5 –alumiinihitsauslankaa, joka sisältää 5 % piitä. Parametrit löytyivät jopa yllättävän nopeasti siihen nähden, kuinka paljon eri mahdollisuuksia tällä menetelmällä on. Säde oli asetettu 10° työntävään kulmaan ja MIG-pilli 35° kulmaan säteen perään. MIG-lanka seurasi sädettä 2 mm etäisyydellä ja plasmapuhallusta käytettiin myös hybridillä hitsattaessa. Kappaleiden puhdistettiin samalla tavoin kuin laserhitsauksessa.

Taulukosta 2 voi verrata hitsausnopeuksien eroja. MIG-hitsauksessa kuljetusnopeuden raja alkaa tulla vastaan jo alle 100 cm/min -nopeudella, mutta laserilla ja hybridillä nopeutta ja tehoa jää vielä paljon reserviin.

TAULUKKO 2. Hitsausparametrit

Liitosmenetelmä	Liitosmuoto	Säteen teho	Kuljetusnopeus	Langansyöttö	Jännite	Virta
MIG	Päittäisliitos	-	60 cm/min	5,2 m/min	22 V	200 A
Laser	Limiliitos	3,4 kW	100 cm/min	-	-	-
Hybridi	Päittäisliitos	3,2 kW	150 cm/min	7,2 m/min	22 V	162 A

6 MENETELMÄKOKEET

Hitsien (ja materiaalien) ominaisuuksia voi tutkia karkeasti jaoteltuna kahdella tapaa, rikkovilla (DT – destructive testing) ja rikkomattomilla (NDT – Non destructive testing) koetuskokeilla. Rikkomattomia aineenkoetuksia ovat mm. silmämääräinen tarkastus, radiografia tai ultraäänitarkastus sekä tunkeumanestetarkastus. Rikkoviin menetelmiin taas kuuluu veto-, taivutus- ja murtokokeet sekä mikro- ja makrohietutkimukset. Kokeissa noudatettiin ISO-standardeja (Taulukot 3 ja 4.)

TAULUKKO 3. Standardin ISO 15614-2 taulukko 1.

Koekappale	Testaus	Testauksen laajuus	Alahuomautus
Läpihitsattu päittäisliitos Kuvat 1 ja 2	Silmämääräinen tarkastus Radiografia tai ultraäänitarkastus Tunkeumanestetarkastus Poikittainen vetokoe Poikittainen taivutuskoe tai murtokoe valuille tai muokattu/valuyhdistelmille Makrohietutkimus Mikrohietutkimus	100 % 100 % 100 % 2 koesauvaa 2 juuri- ja 2 pintataivutussauvaa 1 hie 1 hie	— — — — a — b
Läpihitsattu T-liitos Kuva 3 Läpihitsattu putken haaraliitos ^c Kuva 4	Silmämääräinen tarkastus Tunkeumanestetarkastus Makrohietutkimus Mikrohietutkimus	100 % 100 % 4 hiettä 1 hie	— — d b
Pienahitsit ^c Kuva 3 ja kuva 4	Silmämääräinen tarkastus Tunkeumanestetarkastus Makrohietutkimus Mikrohietutkimus	100 % 100 % 2 hiettä 1 hie	— — — b
^a 2 juuri- ja 2 pintataivutussauvan sijasta suositellaan 4 sivutaivutuskoesauvaa, kun $t \geq 12$ mm. ^b Ainoastaan perusaineryhmälle 23 ja kaikille valuseoksille. ^c Määritetyt testit eivät anna tietoa hitsausliitoksen mekaanisista ominaisuuksista. Kun tällaiset ominaisuudet ovat oleellisia sovellutuksen kannalta, tehdään lisäkokeita, esim. päittäishitseille. ^d Kuvan 3 koekappaleille vain 2 makrohietettä.			

Tässä työssä ei käsitelty muita NDT-kokeita kuin silmämääräistä tarkastelua eikä myöskään makrohietettä, sillä oppilaitoksella ei ole kaikkia standardin vaatimia laitteita tai pätevyyskiä.

6.1 Standardit ja viranomaismääräykset

Kaarella hitsattujen liitosten tarkastelu suoritetaan standardin ISO 15614-2 mukaisesti. Standardi vaatii läpihitsatulle päittäisliitokselle useita testejä sekä rikkovia että rikkomattomia aineenkoetuksia. Laserhitsatut liitokset kuuluvat standardin ISO 15614-11 piiriin, joka määrittelee hitsin tarkastelun laajuuden omassa taulukossaan. Laserhitsattujen liitosten tarkastus on hieman laajempi verrattuna kaarihitsaukseen.

Taulukko 4. EN ISO 15614-11:2002 taulukko 1.

Test piece	Type of examination and test	Extent of examination and test	See table footnote
Butt weld Figures 1, 2 a) and 2 b)	- Visual examination	100 %	-
	- Radiographic examination	100 %	a
	- Ultrasonic examination	100 %	a
	- Surface crack detection	100 %	b
	- Metallographic examination	1 section minimum	c
	- Hardness test	if required	d
	- Transverse bend test	if required : 2 root bend specimens and 2 face bend specimens	e
	- Longitudinal bend test	if required : 1 root bend specimen and 1 face bend specimen	f
	- Transverse tensile test	2 specimens	g
- Toughness test	1 set of specimens	h	
T-joint Figure 3 ⁱ	- Visual examination	100 %	-
	- Surface crack detection	100 %	b
	- Ultrasonic examination	100 %	j
	- Hardness test	if required	-
	- Metallographic examination	2 sections	c
	- Other tests	if required	-
Lap weld Figure 4	- Visual examination	100 %	-
	- Metallographic examination	2 sections	c
	- other tests (e.g. hardness, leak test, peel test, ...)	if required	-
<p>a Radiographic and/or ultrasonic examination.</p> <p>b Penetrant testing or magnetic particle examination. For non-magnetic materials, penetrant testing.</p> <p>c One section required for a butt weld in plate ; three sections required for a butt weld in pipe (see Figure 0) ; for each standard welding position in accordance with EN ISO 6947. These sections shall be subjected to macroscopic and microscopic examinations.</p> <p>d Hardness tests are required depending on base and filler material.</p> <p>e The two root and two face bend test specimens should be preferably replaced by four side bend test specimens when $t \geq 20$ mm.</p> <p>f Longitudinal bend tests may be used in the case of flat heterogeneous assemblies and replace transverse bend tests.</p> <p>g For butt welds according to Figure 2 b) transverse tensile tests are not appropriate.</p> <p>h Depending on the material and the thicknesses and except for butt weld according to Figure 2 b) one or more sets can be taken from the weld metal and from the HAZ. These tests are relevant when the parent metal has a specified toughness or when prescribed by the application standard. If no testing temperature is specified, the test shall be carried out at room temperature. See also 7.4.3. In case of use of any kind of filler material, additional toughness test specimens shall be taken from the top and the root area.</p> <p>i When the WPS has not been qualified by other means, additional tests permitting the verification of the mechanical properties of the assembly shall be considered.</p> <p>j Unless ultrasonic beam attenuation or material thickness causes ultrasonic examination to be impracticable.</p>			

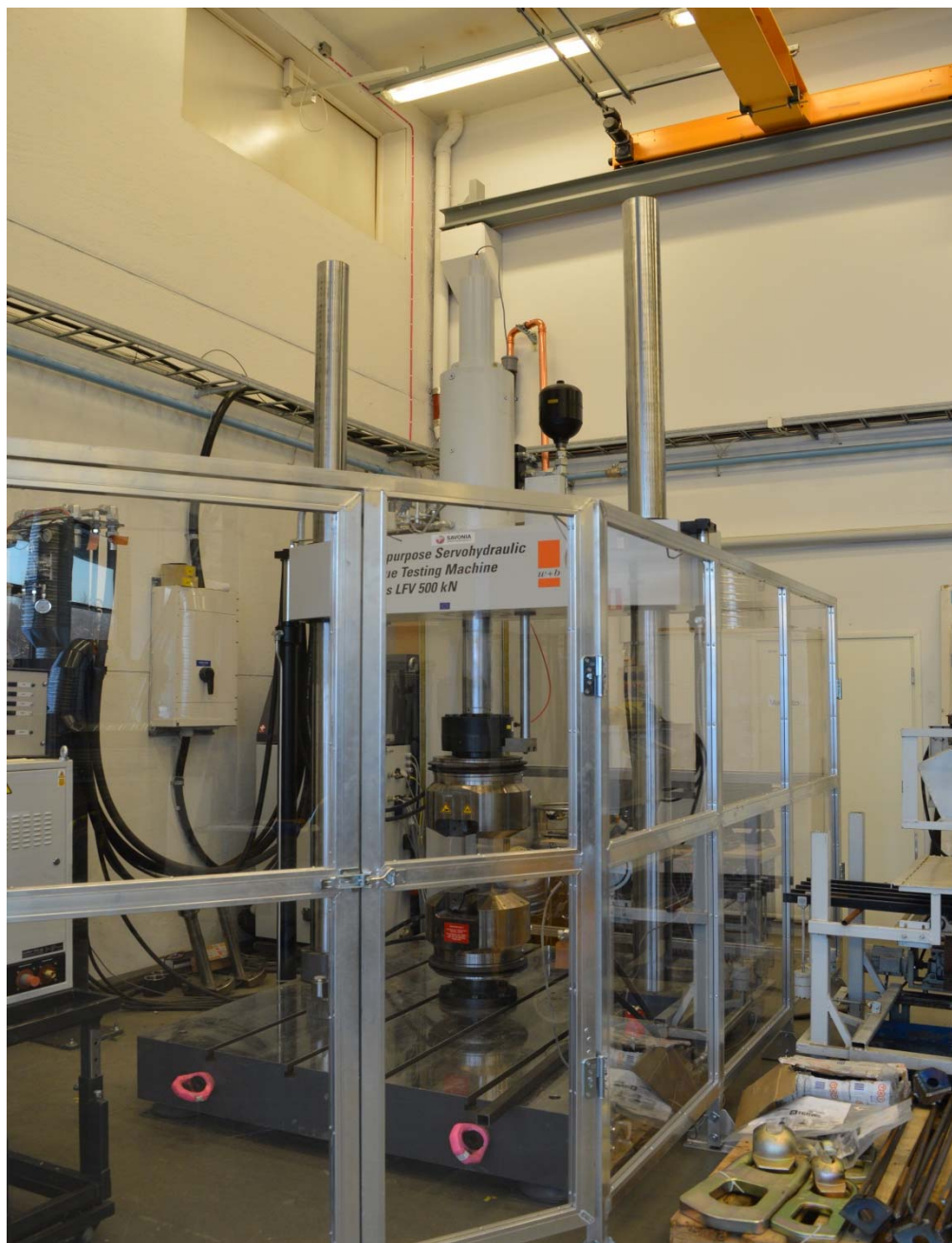
Samoissa standardeissa määritellään myös mitat ja leikkaustavat koesauvoille, kullekin hitsaustavalle erikseen.

Hybridihitsausta koskevia standardeja on hyvin puutteellisesti saatavilla, ilmeisesti menetelmän vielä toistaiseksi vähäisen käytön vuoksi. SFS-EN ISO 15614-14 määrittelee hybridihitsattujen kappaleiden tarkasteluohjeet, mutta vain teräksille ja nikkeliseoksille. Tästä syystä päädyttiin soveltamaan olemassa olevia vastaavia standardeja alumiinien koetuksiin.

6.2 Staattiset kuormituskokeet

Staattisella kuormituksella tarkoitetaan jatkuvasti samaan suuntaan tapahtuvaa rasiutusta, kokeissa aina aineen rikkoutumiseen saakka. Kuormitus voi olla joko vetävää tai taivuttavaa. Tässä työssä käsitellään molempia metodeja.

Staattisten kuormituskokeiden tarkoituksena on selvittää materiaalin tai hitsin myötö- ja murtorajat, kappaleen venymä sekä saada visuaalisia tuloksia liitoksen käytöksestä materiaalin sisällä.



KUVA 6. Kuormituskehä (Andersin 2016.)

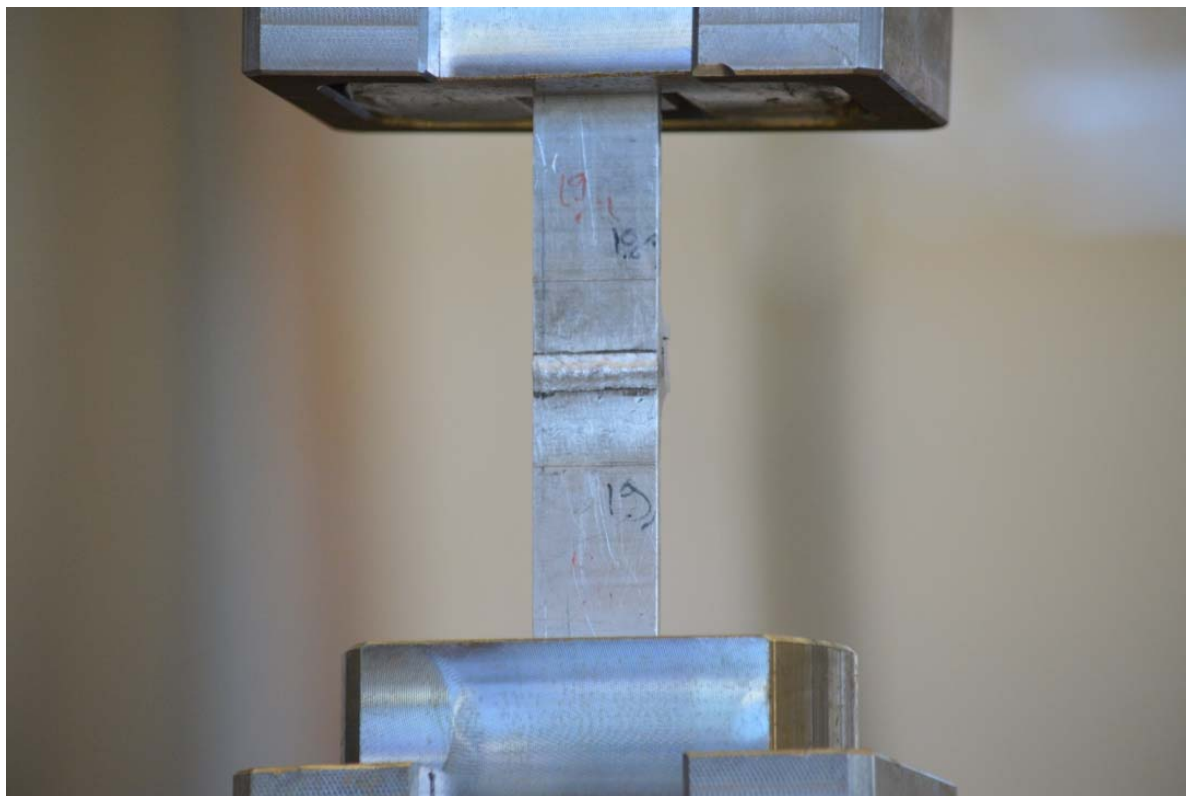
Kappaleet jäähdytettiin asettamalla ne laboratoriopakastimeen, jonka lämpötilaksi oli asetettu -57°C . Pakastimen lämpötila tarkastettiin kahdella elohopeamittarilla, jotka olivat pakastimen pohjalla ja ylemmällä tasolla sekä kappaleiden lämpötila erikseen infrapunalämpömittarilla ja kosketusanturilla.

Työssä oli tarkoitus käyttää vetokoneen (kuva 6) ympärille sopivaa olosuhdekaappia, jonka voi jäähdyttää nestemäisellä typellä jopa -190°C :seen, mutta säiliön täytössä tuli vastaan byrokraattisia ongelmia. Säiliöstä puuttui eräs direktiivimerkintä eikä täyttöä olisi voinut tilata ongelmien välttämiseksi liian aikaisin, sillä nestetyppi haihtuu suljetusta säiliöstäkin itseksensä kuukauden sisällä.

Haluttuun testauslämpötilaan pyrittiin ylijäähdyttämällä testikappaleet sekä vetokoneen pitimet ja ruuvit lämmönjohtumisen minimoimiseksi.

6.2.1 Vetokoe

Vetokokeet aloitettiin kylmillä kappaleilla, kun vetimet ja vetimen ruuvit olivat olleet pakastimessa odottamassa vetokoesauvojen valmistumista. Vedinten ja leukojen väliin jätettiin kuplamuovia eristeeksi, jotta lämmönjohtuminen vetimiin ja sitä kautta kappaleeseen saatiin minimoitua. (Kuva 7.)



Kuva 7. Hybridikoesauva vetokoneessa (Andersin 2016.)

6.2.2 Taivutuskoe

Taivutuskokeita varten piti valmistaa erillinen standardin ISO 5173 kuvan 15 mukainen rullain, sillä kolmipistetaivutusta ei voitu liitoksen pehmeiden vuoksi käyttää. Mikäli liitos on paljon muuta perusainetta pehmeämpi, se pääsee murtumaan ennenaikaisesti ja testitulos hylätään. (Väinölä 2016.)

Standardin ISO 5173 mukaisesti rullaimella tasaista nopeutta käyttäen kappaletta taivutettiin 180°, minkä jälkeen koesauvan ulko- ja sivupinnat tutkittiin. Hitsi on hyväksytty, mikäli kappale kestää taivutuksen loppuun asti repeämättä tai halkeamatta.

6.3 Mikrohie

Mikrohie tarkoittaa hitsistä leikattua näytepalaa, joka sulatetaan muovinappiin ja josta hiotaan pinta kiiltäväksi, jolloin hieestä voi tarkastella liitosta mikroskoopin avulla. Näytepala on otettu samasta hitsiliitoksesta kuin muihin menetelmäkokeisiin leikatut koesauvat. (Kuva 8.)

Mikroskoopilla tarkasteltaessa hieestä paljastuu hitsin käytös materiaalin sisällä, kuten muutosvyöhykkeet, lämpövaikutusalue (HAZ), mikrorakenteet ja niiden muutokset sekä pienimmät huokokset joita välttämättä ei paljaalla silmällä näe.



KUVA 8. Hienappeja. Vasemmalta oikealle: laser ja hybridi (Andersin 2016.)

6.4 Kovuuskoe

Hienapista voi myös mitata kappaleen ja hitsin sekä niiden välisen muutosvyöhykkeen kovuus. Tässä työssä käytettiin Vickersin kovuuskoetta, jossa kappaletta painetaan kuution muotoisella timanttipainokärjellä, jolloin tuloksen saa laskemalla painetun alueen pinta-ala.

Kovuuden arvoja tarkastelemalla voi myös arvioida liitoksen kestävyyttä, sillä liian kova materiaali on haurasta, mutta kestää kulutusta, eikä liian pehmeäkään ole liiemmin luja tai varsinkaan kulutusta kestävä. Kyseisessä projektissa liitokselta haettiin eritoten hyviä lujuusarvoja lopputuotteen käyttökohteen kannalta parasta ajatellen.

Taulukossa 5 on eriteltyä perusmateriaalin, muutosvyöhykkeen sekä hitsin kovuudet HV5-asteikolla, jossa HV tarkoittaa Vickersin kovuuden tunnusta ja perässä oleva numero (5) likimääräistä koevoiman suuruutta kilogrammoina (kgf). Taulukossa mittaustulokset ovat perusaineella ja muutosvyöhykkeellä kyseisen alueen äärimmäisestä vasemmasta sekä oikeasta laidasta ja hitsin kohdalla laidoilta ja keskeltä, hitsin leveyden mukaan. Mittapisteitä otettiin kahdessa rivissä aina vasemmalta oikealle vähintään kahden millimetrin välein, ylempi rivi 2 mm etäisyydellä hitsin pinnasta sekä alempi rivi 2 mm hitsin juuresta.

TAULUKKO 5. Vickersin kovuusmittaustulokset. vasen/oikea (V/O) -tulokset mittausten ääripäistä. Perusaineen äärimmäinen arvo vähintään 5 mm etäisyydellä muutosvyöhykkeestä.

Paikka	Hybridi HV5	Kaari HV5	Laser HV5
Perusaine (pinta): V/O	61,8 / 62,1	69,7 / 74,1	102
Muutosvyöhyke (pinta): V/O	54,4 / 54,3	64 / 59,3	37,7 / 50,9
Hitsin pinta	49,5...50,9...50,5	53,8...51,5...53	43,9...44,2...41,2
Perusaine (juuri): V/O	62,1 / 58,1	70,7 / 70,5	104 / 99,8
Muutosvyöhyke (juuri): V/O	58,4 / 52,6	61,3 / 63	41,5 / 62,1
Hitsin juuri	51,4...51,3	54,6...51...52,6	36,8

Taulukosta 5 ilmenee, että materiaali ja hitsi pysyvät melko pehmeinä, kun taas esimerkiksi terästä laserilla hitsattaessa liitos useimmiten kovettuu jopa yli perusmateriaalin arvon. Toimitustilalla T6 on pyritty lujittamaan materiaalia mm. keinovanhentamalla. Hitsaaminen puolestaan lämmöntuonnillaan ylivanhentaa materiaalia, jolloin kovuutta ja lujuutta menetetään. Tästä syystä kovuuden arvot ovat perusainetta paljon alhaisemmat. (Mäkinen, 2016.)

Kaarella ja hybridillä hitsattujen kappaleiden hieen leveys ei riittänyt siihen, että perusaineen normaalia kovuuden arvoa (102 HV5) olisi saavutettu.

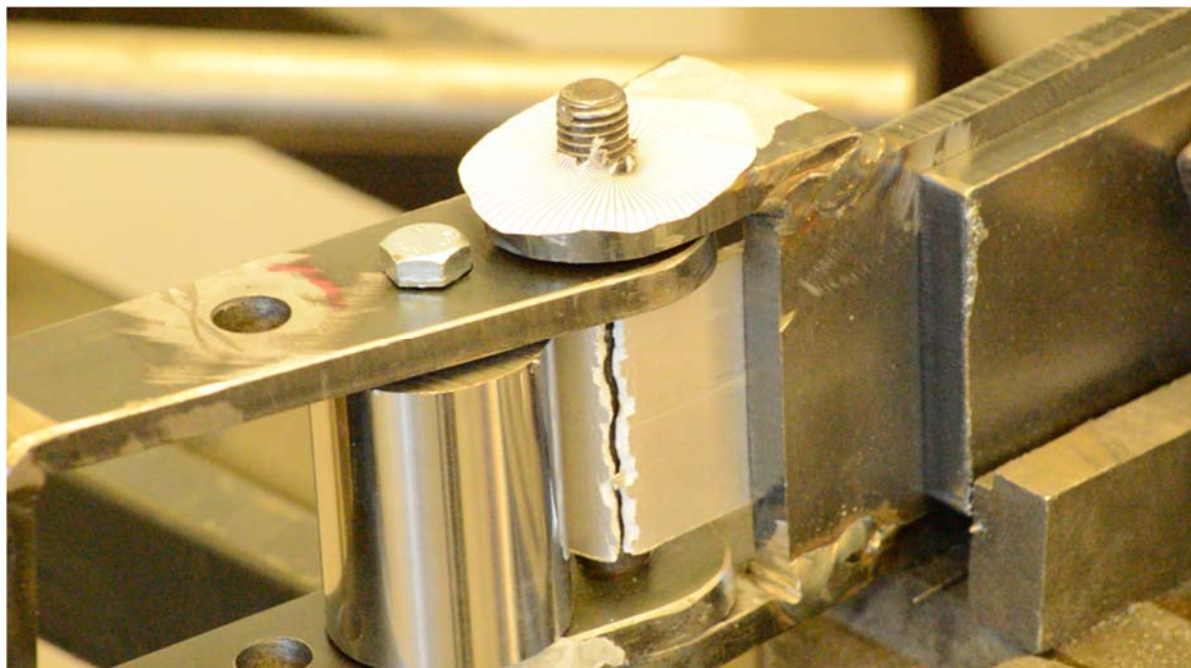
6.5 Tulosten arviointi

Laserliitoksen epäonnistuminen oli odotettavissa, sillä ilman lisäainetta kyseistä materiaalia ei voi hitsata onnistuneesti. Kylmän lisäainelangan syöttäminen on optiona työssä käytetyssä robotissa, mutta sille olisi pitänyt valmistaa erillinen langanohjain säteen läheisyyteen, mikä olisi aikataulun vuoksi ollut mahdotonta. Tämän lisäksi puhtaalle laserliitokselle liitosmuodon olisi tullut olla mieluiten limiliitos, jossa hitsattava pinta-ala olisi ollut riittävän suuri, jotta epävarmuutta ja epäonnistumisen mahdollisuutta olisi saanut karsittua. Nyt säteen tuli osua maksimissaan 3 mm levyiselle alueelle, joka on tarkka jopa noin hienolle säteelle, jonka halkaisija on vain 0,6 mm.

Vetokokeissa säteellä hitsatut kappaleet kestivät vain 100 - 150 Mpa ja ratkesivat suoraan hitsin kohdalta. Taivutuksessa tulokset eivät olleet sen parempia: vain 90° riitti repimään kappaleet irti toisistaan keskeltä hitsiä.

Hybridiliitos oli puolestaan toivotunlaisesti onnistunut lukuun ottamatta huokosia pitkältä matkalta liitosta. Vetokokeet osoittivat materiaalin murtuvan ennen hitsiä, joten varmuutta liitoksen kestävydestä ei ole, mutta se on tarpeeksi, jos hitsi kestää sen minkä materiaali itse. Materiaalintoimittajan luettelossa materiaalin murtoraja oli parhaimmillaan 291 MPa ja yhtä 469 MPa hyppäystä lukuun ottamatta tulokset vastasivat materiaalin arvoja. Kokeeksi hitsattu limiliitos hybridillä sen sijaan ei ollut odotetusti onnistunut se kesti vain noin 130 MPa vetoa. Esimerkkinä tälle materiaalille annetaan hitsattuna murtorajavaatimukseksi T6-tilassa vähintään 165 Mpa. (Lukkari ym. Hitsauksen materiaalioppi 2016, 277.)

Vasta taivutuskokeissa (kuva 9) hybridiliitoksesta paljastui huokosia, joiden vuoksi jokainen taivutuskoe hylättiin, kun osa liitoksista kesti juuri ja juuri 90° taivutuksen ja paras vain 165° hienoisella halkeamalla. Kokeessa huokokset olisi voitu todennäköisesti välttää puhdistamalla kappaleet paremmin, esimerkiksi koneellisesti.



KUVA 9. Perusmateriaali taivutuskoneessa (Andersin 2016.)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Varsinkin HybWeld-hankkeen kannalta tärkein huomio oli hybridiliitosten erinomainen onnistuminen. Vertailukohteeseen eli kaarihitsattuun liitokseen verrattuna tulokset puhuivat hyvinkin hybridihitsauksen puolesta, vaikka liitoksessa huokosia olikin. Huokokset ovat hallittavissa oleva hitsausvirhe ja tässä tapauksessa todennäköisimmin aiheutuneet puutteellisesta puhdistuksesta. Mikäli liitos olisi ollut virheetön, se olisi mitä todennäköisimmin kestänyt myös taivutuskokeen loppuun saakka, kuten yksi kappale lähestulkoon kestäikin.

Tuloksien perusteella hybridihitsauslaitteisto voisi olla potentiaalinen korvaaja perinteisille hitsausmenetelmille, sillä MIG-hitsattuun liitokseen verrattuna jopa paremmat tulokset tulivat suuremmalla hitsausnopeudella yksinkertaisempaan liitosmuotoon (ilman juuritukea) sekä ohuempaan ainevahvuuteen. Muita etuja ovat pienempi lämmöntuonti sekä kapeampi hitsi. Investointina hybridilaitteisto on toki kallis ja vaatii suljetun solun, mutta käyttökohteiden mukaan laitteiston ominaisuuksia voi räätälöidä esimerkiksi pienempitehoisella laserilla, jolloin hankintakustannukset laskisivat.

Arktisiin käyttöolosuhteisiin alumiini vaikuttaisi todellakin olevan pätevä materiaali, sillä lämpötilan laskiessa materiaalin mekaaniset ominaisuudet heikkenemisen sijasta pysyvät samoina tai jopa paranevat. Lujittumista oli havaittavissa vetokokeissa, joissa materiaali petti ennen hitsiä, kun vetokoetuloksen arvot ylittivät reilusti materiaalin ilmoitetut arvot.

LÄHTEET

- AGA 2016a. Laserhitsaus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-04-25.] Saatavissa: http://www.aga.fi/fi/processes_ren/welding/laser_welding/index.html
- AGA 2016b. MIG/MAG-hitsaus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-04-25.] Saatavissa: http://www.aga.fi/fi/processes_ren/welding/mig_mag_welding/index.html
- ALUMINIUMDESIGN.NET 2016. Properties of aluminium. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-04-19]. Saatavissa: <http://www.aluminiumdesign.net/why-aluminium/properties-of-aluminium/>
- ARCTIC CORRIDOR 2016. Transport & logistics. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-02-01.] Saatavissa: <http://www.arcticcorridor.fi>
- U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION 2009. Arctic oil and gas potential. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-03-02.] Saatavissa: <http://www.eia.gov/oiaf/analysispaper/arctic/>
- ASNT 2016. Introduction to nondestructive testing. [verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-04-20.] Saatavissa: <https://www.asnt.org/MinorSiteSections/AboutASNT/Intro-to-NDT>
- BUNAZIV, Ivan 2013. Optimization of parameters for fiber laser-MAG hybrid welding in shipbuilding applications. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-04-20.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201402061385>
- DUTTA, Piyush. 1988. Behavior of materials at cold regions temperatures. [Viitattu 2016-04-21.] Saatavissa: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a199566.pdf>
- ERIKSSON I., POWELL J., KAPLAN A. 2013. Guidelines in the choice of parameters for hybrid laser arc welding with fiber lasers. [Viitattu 2016-04-18.] Saatavissa: <http://www.sciencedirect.com>
- KAH, Paul 2011. Usability of laser-arc hybrid welding processes in industrial applications. Väitöskirja. [Viitattu 2016-04-26.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-265-100-6>
- KAIPAINEN, Iikka 2013. Alumiinin monipalkohitsaus. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-04-26.] Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201310076510>
- KONTTINEN, Jussi 2013. Jäämeren porauksissa muhii valtavia riskejä. Helsingin Sanomat. [Viitattu 2016-02-02.] Saatavissa: <http://www.hs.fi/sunnuntai/a1382163286228>
- LUKKARI, KYRÖLÄINEN, KAUPPI 2016. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2: Metallit ja niiden hitsattavuus. Julkaisija: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. Helsinki.

MEDICAL DEVICE AND DIAGNOSTIC INDUSTRY 2006. Resistance and laser welding for medical devices. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-04-19.] Saatavissa: <http://www.mddionline.com/article/resistance-and-laser-welding-medical-devices>

MÄKINEN, Mika 2016. [Haastattelu.] Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

NEDAL ALUMINIUM 2005. Alloy data sheet EN AW-6005A. [Viitattu 2016-04-19.] Saatavissa: http://www.nedalextrusion.com/files/2013/0678/5546/Data_6005A.pdf

OUTOKUMPU OYJ 2010. Welding Handbook. Julkaisija: Outokumpu Oyj. Espoo.

PSS RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET JA NIIDEN HITS AUS. [Viitattu: 2016-19-04.] Saatavissa: <http://mandata.pp.fi/Hitsaus/Artikkelit/PSS.pdf>

SAAVALAINEN, Heli 2014. Jää sulaa – arktinen alue muuttuu. Helsingin sanomat. [Viitattu 2016-04-18.] Saatavissa: <http://www.hs.fi/kotimaa/a1415340126993>

SOLEHMAINEN, Kari 2016. [Haastattelu.] Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

VÄINÖLÄ, Aki 2016. [Haastattelu.] Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

LIITE 1: HYBRIDIPÄITÄISLIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.



SAVONIA
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Test Report

Order Number:

Operator: op

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info:

Batch Number:

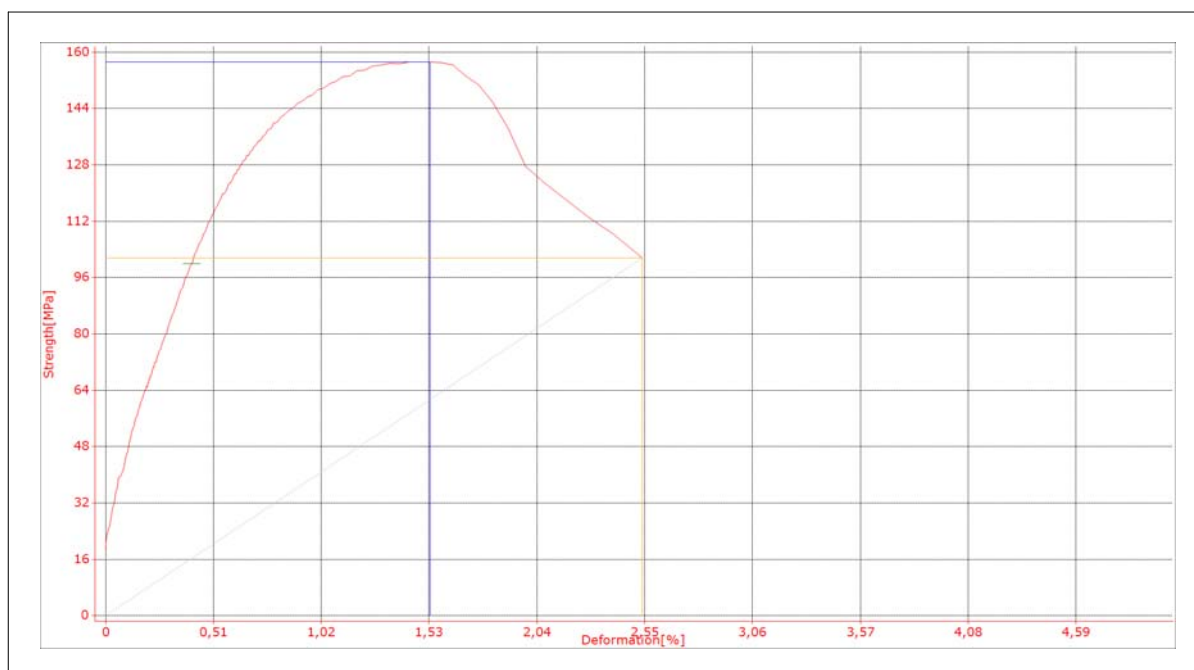
Date of Test: 29.10.2013

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B Hybridi - 1 / 944

Remarks:

Description		Result
Diameter	d_0	8,00 mm
Start Section	S_0	50,265 mm ²
Modulus of Elasticity	E	40 GPa
Upper yield strenght	R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength	R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension	R_p	281 / 358 MPa
Tensile Strength	R_m	469 MPa
Percentage Total Extension at Fracture	A	4,10 %
Percentage Reduction of Area	Z	100,00 %
Maximum Force	F _m	23,58 kN



LIITE 2: HYBRIDIPÄITÄISLIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

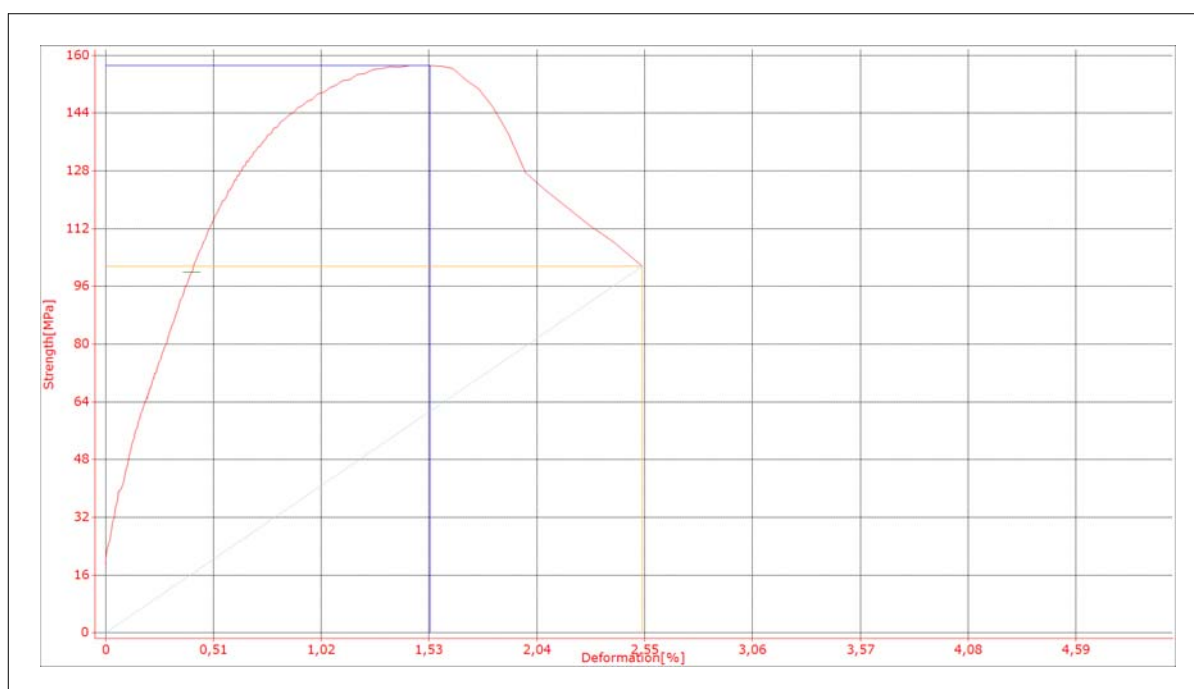
Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B Hybridi - 2 / 945

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	7 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	287 / 293 MPa
Tensile Strength R_m	305 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	6,67 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	22,87 kN



LIITE 3: HYBRIDILIMILIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

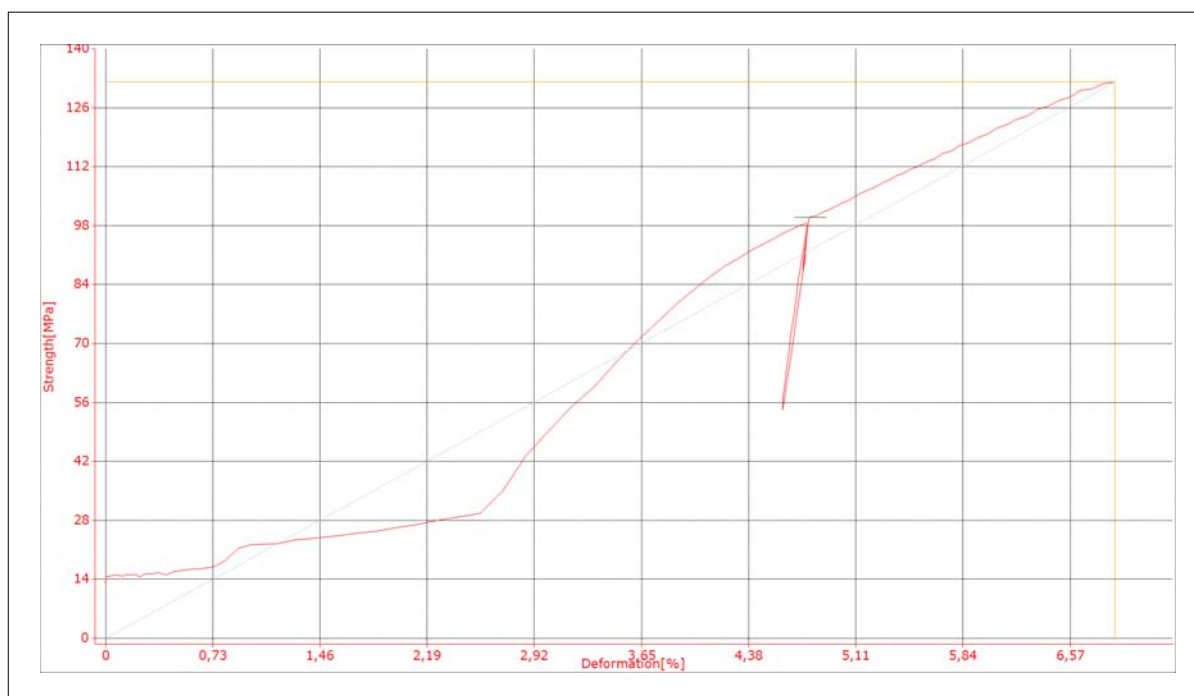
Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B hybridi2 Series - 1 / 953

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strenght R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	132 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	6,87 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	9,91 kN



LIITE 4: HYBRIDILIMILIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

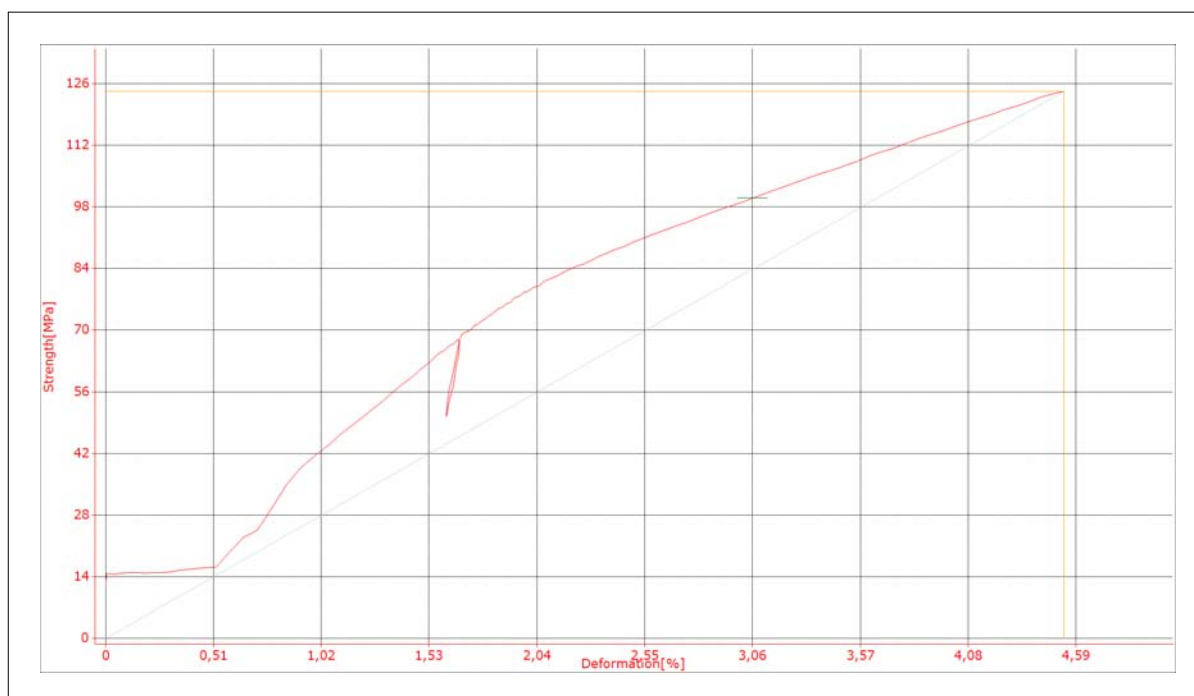
Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B hybridi2 Series - 2 / 954

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	124 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	4,53 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	9,31 kN



LIITE 5: LASERLIMIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.



Test Report

Order Number:

Operator: op

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info:

Batch Number:

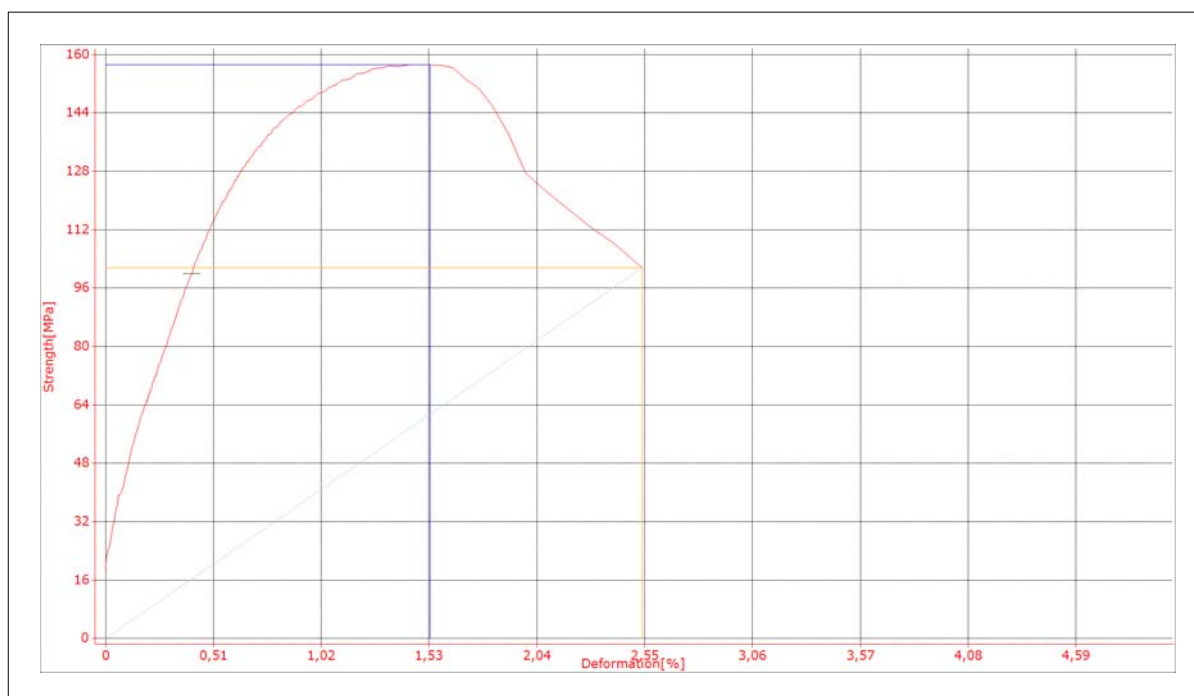
Date of Test: 29.10.2013

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B Laser - 1 / 947

Remarks:

Description		Result
Diameter	d_0	8,00 mm
Start Section	S_0	50,265 mm ²
Modulus of Elasticity	E	0 GPa
Upper yield strength	R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength	R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension	R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength	R_m	157 MPa
Percentage Total Extension at Fracture	A	2,54 %
Percentage Reduction of Area	Z	100,00 %
Maximum Force	F_m	7,90 kN



LIITE 6: LASERLIMILIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

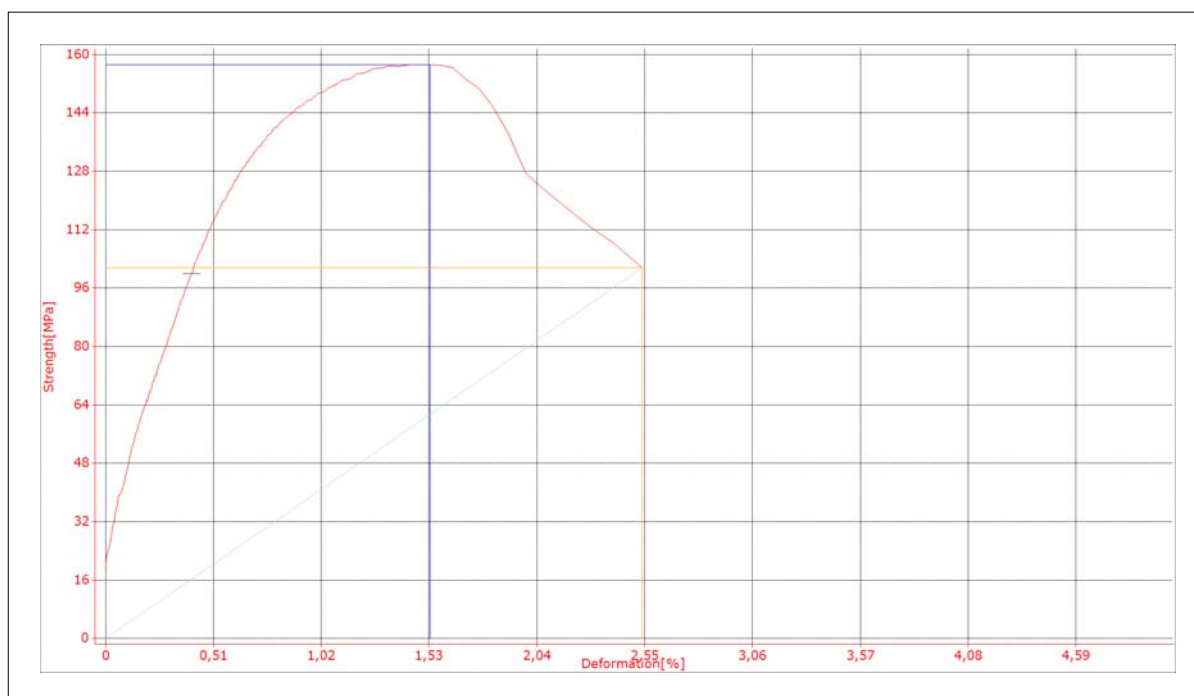
Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B Laser - 2 / 948

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	97 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	5,07 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	7,24 kN



LIITE 7: MIG-LIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 1.



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

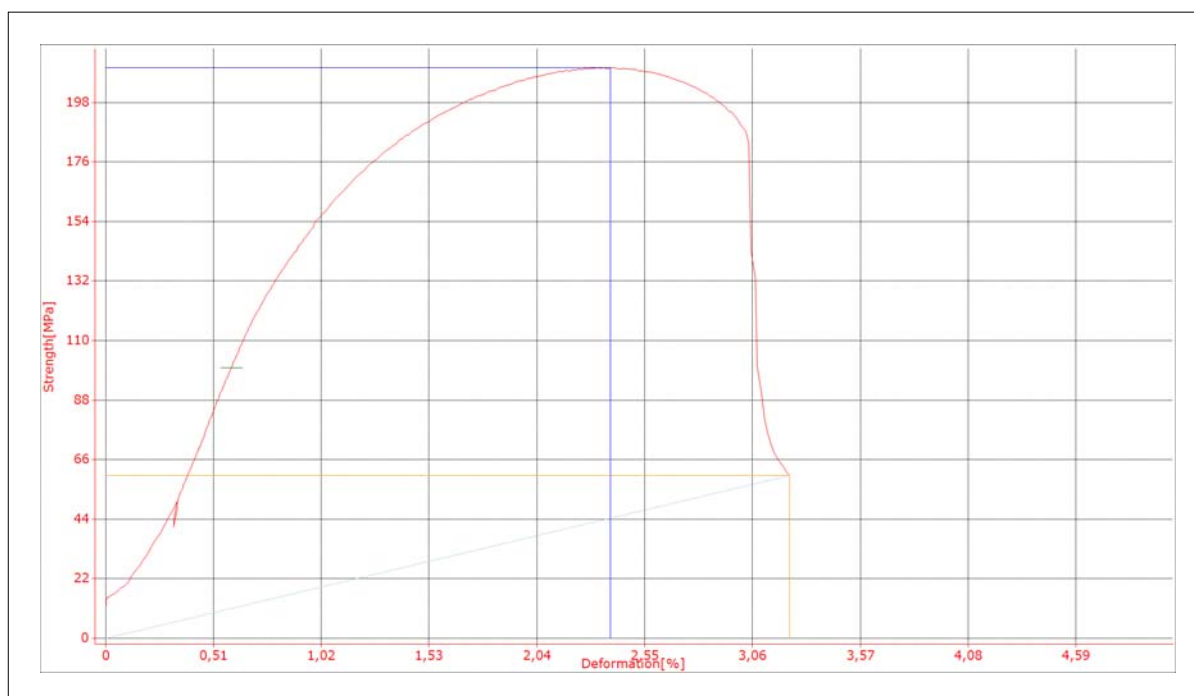
Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B MIG Series - 1 / 950

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	211 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	3,24 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	15,82 kN



LIITE 8: MIG-LIITOKSEN KYLMÄVETOKOE 2.



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

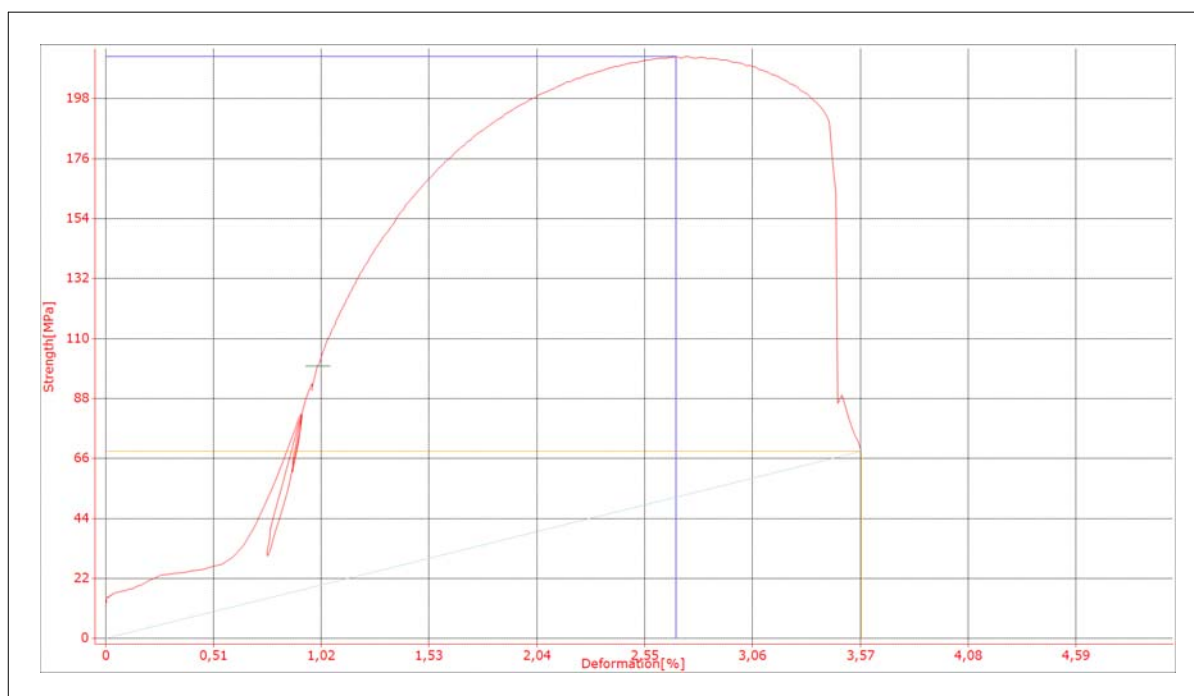
Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B MIG Series - 2 / 951

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	213 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	3,57 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	16,00 kN



LIITE 9: HYBRIDIPÄITTÄISLIITOKSEN VETOKOE HUONEENLÄMPÖTILASSA.

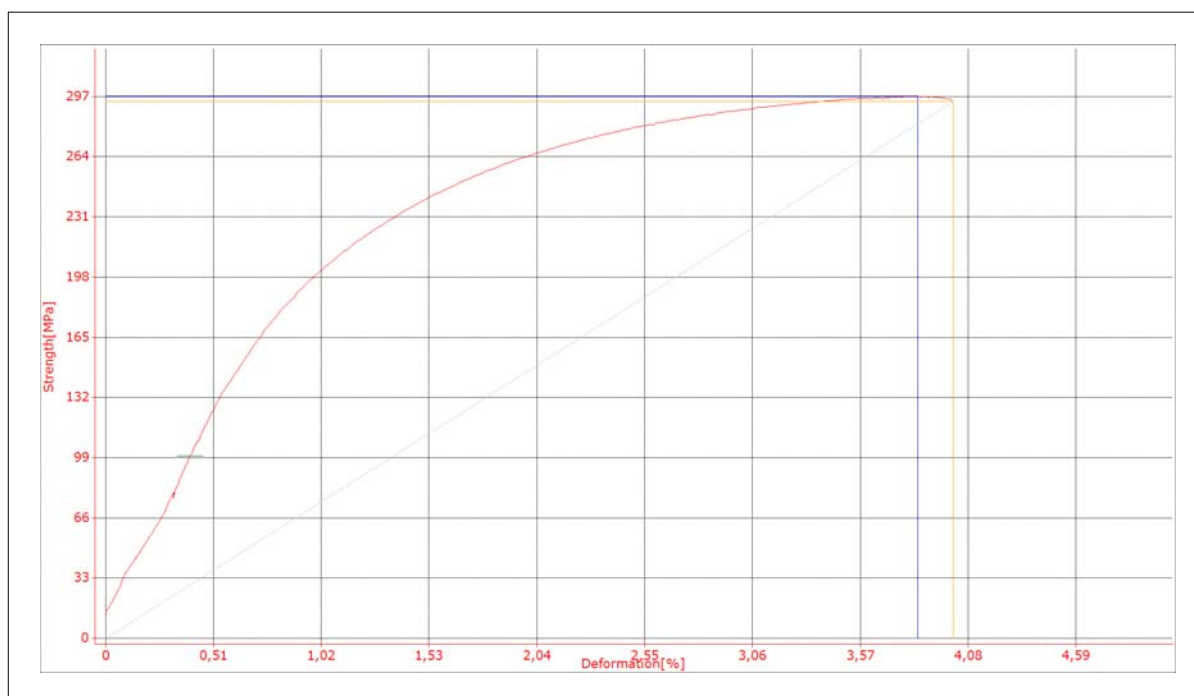


Test Report

Order Number:		Material Info:	alumiini
Operator:	LA	Batch Number:	
Customer:		Date of Test:	14.04.2016
Supplier:		Sample Group:	
Welder:		ID:	SFS-ISO EN 6892-1 B Hybridi-20c / 955

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	297 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	4,01 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	22,29 kN



LIITE 10. LASERLIITOKSEN VETOKOE HUONEENLÄMPÖTILASSA



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

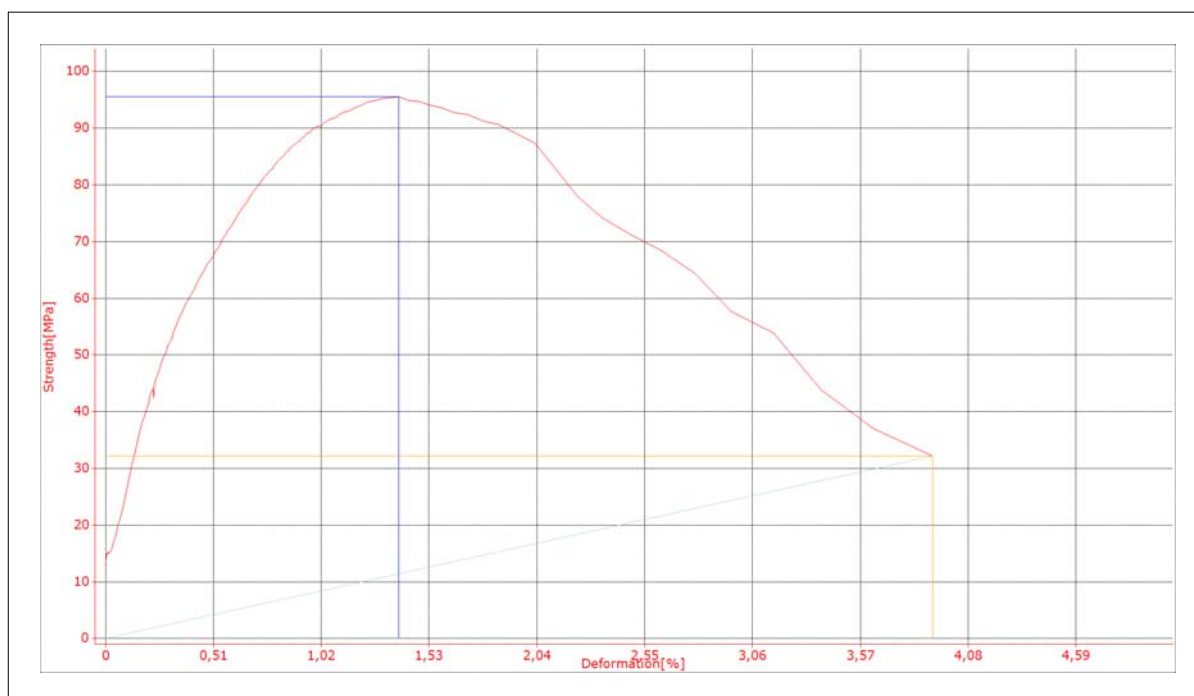
Date of Test: 14.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B Laser Series-20c / 956

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strenght R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	95 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	3,91 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	7,16 kN



LIITE 11: MIG-LIITOKSEN VETOKOE HUONEENLÄMPÖTILASSA



Test Report

Order Number:

Operator: LA

Customer:

Supplier:

Welder:

Material Info: alumiini

Batch Number:

Date of Test: 13.04.2016

Sample Group:

ID: SFS-ISO EN 6892-1 B MIG-20c / 957

Remarks:

Description	Result
Thickness x Width $a_0 \times b_0$	3,000 x 25,000 mm
Start Section S_0	75,000 mm ²
Modulus of Elasticity E	0 GPa
Upper yield strength R_{eH}	--- MPa
Lower yield strength R_{eL}	--- MPa
0,020%/0,200% Proof Strength, Plastic Extension R_P	0 / 0 MPa
Tensile Strength R_m	207 MPa
Percentage Total Extension at Fracture A	3,76 %
Percentage Reduction of Area Z	100,00 %
Maximum Force F_m	15,52 kN

