

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

Joel Konturi

**TITANISTA JA RUOSTUMATTOMASTA TERÄKSESTÄ VALMISTETTUJEN
JOHDEPUTKIEN KORJAUSHITSAUS**

Työn tarkastajat:

Professori Harri Eskelinen

Insinööri (YAMK) Juha Silvola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Joel Kontturi

Titaanista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen johdeputkien korjaushitsaus

Diplomityö

2019

79 sivua, 14 kuvaa, 25 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastaja: Professori Harri Eskelinen
Insinööri (YAMK) Juha Silvola

Hakusanat: titaani, ruostumaton teräs, korjaushitsaus

Lentokoneeseen vioittuneen osan korvaamiseksi asennettavat varaosat ovat kalliita ja joskus vaikeasti saatavilla. Korjaushitsauksella voitaisiin vähentää hankintakustannuksia osan käyttöiän pidentyessä ja vähentää lentokoneen palveluksetonta aikaa uutta osaa hankittaessa.

Tässä tutkimuksessa keskitytään titaanista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen johdeputkien korjaushitsaukseen. Tavoitteena on selvittää, olisiko hitsausprosessi mahdollista toteuttaa luotettavasti ja kustannustehokkaasti omassa kunnossapitoyksikössä ja mitä tämä edellyttäisi. Erityisesti tarkastellaan materiaalien hitsaukseen liittyviä erityispiirteitä ja mitä ohjeistuksia ilmailualan hitsausta koskevat standardit antavat. Lopuksi testataan jo käytössä olleen johdeputken hitsausta ja tehdään tälle rikkomaton ja rikkova materiaalitutkimus hitsauksen laadun arvioimiseksi.

Tutkimuksessa todetaan, että materiaaleista titaani on erittäin haavoittuvainen kaikelle epäpuhtaudelle läpi koko korjausprosessiketjun ja vaatii erityisen puhtaan hitsausympäristön, joka sopii myös ruostumattomalle teräkselle. Ilmailualan ohjeistusta tutkitaan lähinnä ISO-standardien avulla. Hitsaajan pätevöittäjän löytäminen sekä korjausohjeiden saaminen todetaan hitsausprosessin puhtausvaatimusten ohella prosessin haastavimmaksi osuudeksi.

Jatkotutkimuksissa suositellaan paneuduttavan siihen, miten korjausohjeet saataisiin nopeasti valmistajalta ja kohdistettua korjauskohteeseen sekä voitaisiinko hitsaushenkilöstön pätevöinti suorittaa yhteistyössä suomalaisten koulutuskeskusten kanssa.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Joel Kontturi

Repair Welding of Titanium and Stainless Steel Conducting Pipes

Master's Thesis

2019

79 pages, 14 figures, 25 tables and 5 appendices

Examiner: Professor Harri Eskelinen
M. Eng. Juha Silvola

Keywords: Titanium, stainless steel, repair welding

Replacement spare parts for aircraft can be expensive and difficult to purchase. Initial costs could be decreased, and the service life of spare parts would be longer, if repair welding can be used. In addition, aircraft's out of service time could be shortened during the purchase process of new spare parts.

This thesis titanium and stainless-steel conduct pipes repair welding is focused on. Aim is to find out possibilities to carry out the whole repair welding process by cost efficient and reliable manner in own service department and what this would need for. Especially special characteristics about welding materials above are studied and what rules and directives are mentioned in aircraft welding standards. Finally used conduct pipe is test welded and non-destructive and destructive material testing are made for evaluating the weld quality.

It is founded that especially titanium is especially sensitive for contaminate any impurity across the whole repair process and needs special clean welding atmosphere, which suits for stainless as well. Aircraft guidelines are studied mainly by ISO-standards. To find valid quarter to give welder qualification and welding procedure specifications for repair proved to the most challenging part of the process.

In further research projects it is recommended to study how the welding procedure specifications would be easily purchased from the design engineer and would it be possible to get qualification to the welding person in some Finnish training center for example.

ALKUSANAT

Haluan kiittää Juhaa mielenkiintoisesta aiheesta ja mahdollisuudesta toteuttaa diplomityö. Haluan kiittää myös Lappeenrannan-Lahden teknillistä yliopistoa ja erityisesti Harri Eskelistä erittäin hyvin järjestetystä ohjauksesta ja opintokokonaisuudesta. Kiitos Juha Kotamiehelle ja muille tutkimuksessa avustaneille sekä Metropolia Ammattikorkeakoululle tuesta työn toteutuksessa. Viimeisenä suurin kiitos kuuluu läheisilleni, jotka ovat jaksaneet kannustaa heiltäkin aikaa vieneen opiskelun aikana.

Joel Kontturi

Joel Kontturi

Mäntsälässä 24.11.2019

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT.....	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	5
LYHENNELUETTELO.....	8
1 JOHDANTO.....	9
1.1 Tausta.....	9
1.2 Tutkimusongelma	10
1.3 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset	10
1.4 Tutkimusmenetelmät	10
1.5 Rajaukset.....	10
2 MATERIAALIT SEKÄ HITSAUS- JA KORJAUSPROSESSIT	12
2.1 Austeniittiset ruostumattomat teräkset.....	12
2.2 Alfa-titaanit	13
2.3 Hitsaus ja prosessit.....	14
2.4 Toimenpiteet ennen hitsausta.....	18
2.5 Toimenpiteet hitsauksen aikana	22
2.6 Toimenpiteet hitsauksen jälkeen.....	24
2.7 Ilmailualan omat ohjeet ruostumattoman teräksen hitsaukselle	26
2.8 Ilmailualan omat ohjeet titaanin hitsaukseen.....	28
2.9 Yhteenvedo korjaushitsausmenetelmän pohjalle.....	34
3 KORJAUSHITSAUSMENETELMÄ	35
3.1 Materiaalin tunnistaminen	35
3.2 Murtuman korjaushitsaustapa	36
3.3 Osan vaihto	37
3.4 Korjaushitsausprosessi.....	38
3.5 Korjaushitsausmenetelmä titaanille	39
3.6 Korjaushitsausmenetelmä ruostumattomalle teräkselle.....	40
3.7 Korjauksen laatu	41
3.8 Hitsaajan pätevöittäminen.....	45

3.9	Muut laatutekijät	45
3.10	Yhteenvedo korjaushitsausmenetelmistä koetta varten	45
4	PUTKISTON OSAN HITSAUSKOKEET	47
4.1	Koeputken materiaalin tunnistaminen	47
4.2	Koehitsausten suorittaminen	48
4.3	Testikappaleiden valmistus	49
4.4	Tarkastukset	50
4.5	Testit	50
5	TULOKSET	51
5.1	Alkuainetarkastus ennen hitsausta	51
5.2	Radiografinen tarkastus ennen hitsausta	51
5.3	Hitsauksen suorittaminen	53
5.4	Visuaalinen tarkastus	55
5.5	Lämpökäsittely	56
5.6	Radiografinen tarkastus hitsauksen jälkeen	57
5.7	Tunkemanestetarkastus	59
5.8	Poikittainen vetokoe	59
5.9	Kovuusmittaukset	61
5.10	Tulosten koonti	63
6	KOEHITSAUSTULOSTEN JA KUSTANNUSTEN ANALYSOINTI	64
6.1	Korjaushitsauksen kulut	64
6.2	Ainetta rikkomattomat tarkastukset	64
6.3	Ainetta rikkovat testit	65
7	POHDINTA	67
7.1	Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus	67
7.2	Keskeiset johtopäätökset	68
7.3	Tulosten uutuusarvo ja yleistettävyys	68
7.4	Jatkotutkimusaiheet	69
8	YHTEENVETO	70
	LÄHTEET	71
	LIITTEET	

LIITE I: Ruostumattoman teräksen hitsausstandardeja.

LIITE II: Titaanin hitsausstandardeja.

LIITE III: pWPS

LIITE IV: Alkuaineanalyysi

LIITE V: NDT-tarkastuspöytäkirja

LYHENNELUETTELO

<i>ASTM</i>	American Society for Testing and Materials
<i>AWS</i>	American Welding Society
<i>EASA</i>	European Aviation Safety Agency
<i>ISO</i>	International Organization for Standardization
<i>CP</i>	Commercial pure titanium – kaupallinen puhdas titaani
<i>GMAW</i>	Gas metal arc welding – kaasukaarihitsausprosessi, jossa valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä hitsauslangan ja työkappaleen välissä
<i>GTAW</i>	Gas tungsten arc welding – kaasukaarihitsaus inertillä suojakaasulla ja volframielektrodilla
<i>HAZ</i>	Heat affected zone – Hitsauksessa lämmölle altistunut alue, joka ei ole sulanut, mutta jonka mikrorakenne on muuttunut.
<i>LIBS</i>	Laser-induced breakdown spectroscopy – laserin avulla tapahtuva materiaalitunnistus
<i>MIG</i>	Kuin GMAW
<i>MOE</i>	Maintenance organisation exposition – formaalinen dokumentti, jossa on kuvattu, miten ilmailualan kunnossapitoyksikkö suoriutuu laadullisesti sille asetetuista määräyksistä
<i>OES</i>	Optical emission spectroscopy – materiaalitunnistus valokaaren ja spektrin avulla
<i>PAW</i>	Plasma arc welding – Plasmahitsaus
<i>PMI</i>	Positive material identification – ainetta rikkomaton materiaalitunnistus
<i>PWPS</i>	Preliminary welding procedure specification – alustava hitsausohje
<i>RW</i>	Resistance welding – vastushitsaus
<i>SAE</i>	Society of Automotive Engineers
<i>TIG</i>	Kuin GTAW
<i>WPS</i>	Welding procedure specification – hitsausohje
<i>WPQR</i>	Welding procedure qualification records – menetelmäkoepöytäkirja
<i>XRF</i>	X-ray fluorescence – materiaalitunnistus käyttäen hyväksi röntgensäteilyä

1 JOHDANTO

Tässä tutkimuksessa tutkitaan lentokoneen titaanista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen johdeputkien korjaushitsausta.

1.1 Tausta

Johdeputket ovat tässä tutkimuksessa pneumaattisen voiman siirtimiä, nesteputkia tai kuuman ilman johtimia, joihin muodostuu käytössä paine. Ajan kuluessa putket vaurioituvat niihin muodostuneiden murtumien takia. Murtumien syytä ei tarkkaan ottaen tiedetä. Vauriot voivat olla myös muotovirheitä liitospinnoissa, milloin niiden liittäminen muihin laitteisiin estyy. Uuden osan hankintahinta voi olla kymmeniä tuhansia euroja. Osa putkista on voitu lähettää korjaushitsattavaksi ulkomaille, mutta tämäkään ei ole edullista ja toimitusajat voivat pitkittyä.

Putket ovat konstruktioltaan ohutseinämäisiä, halkaisijaltaan noin 12–76 mm pyöröputkia, joissa on yhteitä ja taivutuksia. Seinämävahvuus on tavallisimmin alle 2 mm. Materiaali on joko titaania, alumiinia, Inconelia tai ruostumatonta terästä, joiden hitsauksessa on otettava huomioon puhtausvaatimuksia. Inconelin, ohutseinämäisen ruostumattoman teräksen tai alumiinin hitsaus perinteisellä kaasukaarihitsauksella vaativat työn suorittajalta myös tarkkuutta sulan hallinnassa. Titaanin kohdalla vaativuutta nostaa lisäksi voimakas taipumus reagoida vähäisenkin hapen, typen ja vedyn kanssa (Lepola et al. 2006, s. 214). Osa putkista on pinnoitettu lämpöä eristävällä pinnoitteella.

Lentokoneen titaanisten ilmajohdeputkin hitsaukseen liittyen on aiemmin tutkittu lentokoneen moottoreilta kuumaa ilmaa johtavien putkien hitsausta laserilla TIG-hitsauksen sijaan. Molemmilla hitsausprosesseilla saavutettiin väsymislujuudeltaan riittävän hyvät hitsit laserhitsauksen osoittauduttua kuitenkin sopivaksi kaarihitsauksen korvaajaksi (Carvalho et al. 2016, s. 47–56). Korjaushitsauskin voi olla kustannustehokas tapa pidentää osien elinikää ja välttää lentokoneen palvelusetontaa aikaa uusien varaosien odotusaikojen ollessa jopa vuoden, mikäli niitä ylipäättään on saatavilla. Korjaushitsausta tehdään lentokoneissa ilmajohdeputkista moottorin osiin (Williams, B. 2012).

1.2 Tutkimusongelma

Tutkimuksen keskeisin ongelma on, voidaanko johdeputkien vaativia korjaushitsauksia tehdä omalla korjaamolla viranomaisehdot täyttäen ja onko tämä taloudellisesti ja teknisesti järkevää? Yksittäisten osien hitsauksesta on tutkimuksia saatavilla, mutta millainen on koko korjaushitsausprosessi?

1.3 Tutkimuksen tavoite ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten korjaushitsaus on mahdollista toteuttaa luotettavasti ja kustannustehokkaasti. Mitä erityisvaatimuksia materiaaleihin liittyy hitsausta ajatellen? Mikä on kustannustehokkain ja luotettavin prosessi korjausta ajatellen? Kuinka paljon korjaustoiminnan kustannukset ovat suhteessa toisiinsa? Liittyykö itse korjaukseen tai korjattuun osaan standardeja ja muita vaatimuksia? Miten hitsauksen onnistuminen voidaan todentaa lentokonekäyttöä ajatellen?

1.4 Tutkimusmenetelmät

Tutkimusmenetelminä käytetään aluksi kirjallisuustutkimusta. Materiaalien hitsausta tutkitaan ensin yleisesti muun muassa standardeista ja tämän jälkeen ilmailualan ohjeitten näkökulmasta. Kun korjaushitsaaminen todetaan mahdolliseksi, päätetään kirjallisuustutkimuksen kautta löydetty tieto todentaa teettämällä koehitsaukset jo käytössä olleeseen, titaaniseen, halkaisijaltaan 63 mm ja seinämäpaksuudeltaan 1,6 mm pyöreään johdeputkeen. Koekappaleisiin tehdään ennen hitsausta aineenkoetus rikkomattomalla materiaalitarkastuksella virheen laajuuden kartoittamiseksi. Hitsauksen jälkeen koekappaleisiin tehdään ainetta rikkomaton ja ainetta rikkova tarkastus korjaushitsausmenetelmän toimivuuden todentamiseksi. Lopuksi kootaan tulokset taloudellisen kannattavuuden, koekappaleista tehtyjen havaintojen ja ilmailualan ohjeistuksen pohjalta sekä pohditaan, onnistuiko tutkimus ja mitä jatkokehityshaasteita nousi esiin.

1.5 Rajaukset

Koska suurin tarve on titaanista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen putkien korjaukselle, rajataan tämä tutkimus keskittymään ruostumattomasta teräksestä ja titaanista valmistettujen johdeputkien korjaushitsaukseen. Koska kyse on korjauksesta, pitää hitsauksen tutkimisen lisäksi huomioida myös hitsauksen esivalmistelujen ja hitsauksen

jälkeisten toimintojen tarkastelu. Korjattavia kohtia saatetaan joutua muun muassa hiomaan tai lämpökäsittelyyn. Korjaus pinnoitteen suhteen jätetään tämän työn ulkopuolelle, koska se muodostaisi aivan liian ison kokonaisuuden ja sen korjaus on järjestetty muuten.

2 MATERIAALIT SEKÄ HITSAUS- JA KORJAUSPROSESSIT

Tutkimus keskittyy ruostumattomasta teräksestä ja titaanista valmistettuihin johdeputkiin. Ruostumattomat teräset jaetaan metallurgisen rakenteensa mukaan austeniittisiin, ferriittisiin, austeniittis-ferriittisiin duplex-teräksiin, martensiittisiin ja erkautuskarkeneviin ruostumattomiin teräksiin (Baddoo, N., et al. 2006, s. 11). Titaanit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään joko alfa-, beta- tai alfa-beta-sekafaaseihin.

Lentokoneen johdeputkien materiaaleista löytyy niukalti viimeaikaisia tutkimuksia, mutta tutkimuksessaan TIG-hitsatun liitoksen väsymiskestävyydestä Ying Liu, Dong Jie Li ja Xiao Hong Li toteavat austeniittisen ruostumattoman teräksen 1Cr18Ni9Ti olevan yleisesti käytössä lentokoneen eri johdeputkissa, johtivat ne sitten polttoainetta, kaasua tai hydrauliiikkaa (Liu, Li, Li, 2015). Teräs 1Cr18Ni9Ti vastaa austeniittista ruostumatonta terästä AISI 321 (Kinnunen et al., 2001, s. 228). Tutkimukseen valitulle johdeputkelle tehty ainetta rikkomaton alkuaineen tunnistusmenetelmä, XRF, todisti myös putken olevan laatua AISI 321.

Adibin, Baptistan, Barbozan, Hagan ja Marquesin tekemässä tutkimuksessa todettiin lenokoneen moottoreilta kuumaa ilmaa johtavien putkien olevan laatua Ti A40, joka on yhtenevä kaupallisen puhtaan titaanin (Commercial Pure, CP), ASTM Grade 2:n kanssa (Adib, Baptista, Barboza, Haga, Marques, 2007). Myös Carvalho, Baptista ja Lima olivat päätyneet samaan materiaaliin tutkiessaan lentokoneen moottoreilta kuumaa ilmaa johtavien putkien hitsausta laserilla ja TIG:llä (Carvalho, Baptista, Lima, 2016). Tutkimukseen valitulle johdeputkelle LIBS- ja XRF-tunnistusmenetelmillä tehty alkuaineanalyysi osoitti sekin johdeputken olevan kaupallista puhdasta titaania.

2.1 Austeniittiset ruostumattomat teräset

Austeniittiset ruostumattomat teräset ovat ruostumattomista teräksistä eniten käytettyjä (Kinnunen et al. 2001, s. 227). Austeniittisiä näistä teräksistä tekee seosaineena toimiva nikkeli. Vaativimmissa korroosio-olosuhteissa teräksen kromi- ja nikkelpitoisuutta nostetaan sekä terästä seostetaan vielä molybdeenillä (Outokumpu 2018a ja Havas et al. 2011, s. 30). Lisäksi teräksiin voi olla seostettuna tyypeä lujuuden nostamiseksi. Molybdeeni auttaa parantamaan pistekorrosiokestävyyttä (Havas et al. 2011, s. 30). Austeniittiset

ruostumattomat teräkset soveltuvat lujuusominaisuuksiltaan lisäksi hyvin käytettäväksi matalissakin lämpötiloissa esimerkiksi laitteisiin, joissa käsitellään nesteytettyjä kaasuja, koska murtovenymä ja iskusitkeys säilyvät hyvinä. Jopa hitsatut rakenteet pitävät sitkeytensä. Myös korotetuissa käyttölämpötiloissa ominaisuudet pysyvät hyvinä (Kinnunen et al., 2001, s. 231–233). Austeniittisten terästen lujittuminen kylmämuovauksessa on voimakasta (Kinnunen et al., 2001, s. 268). Lisäksi austeniittiset teräkset eivät ole magneettisia, mutta muokkauksessaan niiden magneettisuus kasvaa (Kinnunen et al., 2001, s. 230–232). Toinen huomioitava ominaisuus on kiinnileikkautuminen kuormituksen alaisissa liikkuvissa pinoissa, mikä aiheutuu kitkasyöpymisestä eli pinnassa tapahtuvasta paikallisesta adheesiosta ja murtumisesta (Havas et al., 2011, s. 38). Vakiolaadut 1.4301 ja 1.4404 ovat hitsattavuudeltaan hyviä, mutta herkkiä muodonmuutoksille. Seostuksen lisääntyessä riski murtumille ja virheille kasvaa (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 192, 196). AISI 321:tä voidaan titaanilisäyksen vuoksi käyttää korotetuissa lämpötiloissa (Outokumpu 2018b), koska AISI 321 ei ole herkkä raerajakorroosiolle, vaikka se kuumennetaan karbidien erkama-alueelle 425–850 °C. AISI 321 voidaan valita kohteisiin, joissa lämpötila voi nousta 900 °C:een asti. Niinpä sitä käytetäänkin materiaalina lämmönvaihtimissa, kuumen elementin putkistoissa ja lentokoneen pakosarjoissa. AISI 321 ei ole myöskään herkkä hilseilylle (Azom 2001a) ja kestää hyvin värinöitä (Liu, Li, Li, 2015). AISI 321:n mekaanisia ja kemiallisia ominaisuuksia on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. AISI 321:n ominaisuuksia (AZOM 2001, Outokumpu 2019b).

AISI 321:ta vastaavia materiaalistandardeja: EN 14541 - S32100 - X6CrNiTi18-10										
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Muut	
Kem. koostumus	max 0,08	2,00	0,75	0,045	0,03	17,0...19,0	9,0...12,0	0,1	5xC-0.70	
Murtolujuus [Mpa] min	515									
Myötölujuus [0,2 %] min	205									
Kovuus Brinell [HB] max	217									
Venymä [% 50 millimetrillä] min	40									

2.2 Alfa-titaanit

Alfa-titaanien joukko koostuu kaupallisesti puhtaista alumiineista (CP, Commercially pure aluminium) ja alfa-seoksista. Alfa-titaanit eivät ole lämpökäsiteltävissä lujuuden nostamiseksi (Azom 2004). Hitsaus on suoraviivaista aiheuttaen vain vähän mekaanisia

muutoksia HAZ:ssa tapahtuen useimmiten hehketetussa tilassa (TWI 2019a). Lujuudet vaihtelevat alhaisesta kohtalaiseen, niillä on hyvä kestävyys lovivaikutukselle, melko hyvä sitkeys ja ovat käytettävissä myös alhaisissa lämpötiloissa. Seostetummilla alfatitaaneilla on hyvä virumislujuus vielä korkeammassakin lämpötilassa sekä puhtaita titaaneja parempi korroosiokestävyys (Azom 2004). Alfa-titaanien stabilisaattoreina käytetään alumiinia, happea, typpeä ja hiiltä. Hapen avulla voidaan luoda eri laatuja eri lujuuksin (Lütjering & Williams, 2007, s. 23, 24). Alumiini on eniten seostettu metalli, koska se kykenee nostamaan transitiolämpötilaa ja sillä on lujittava vaikutus alfatitaaneihin aina huoneenlämpötilasta korotettuun 550 °C:een lämpötilaan saakka (Azom 2001b). Alfa-seokset sisältävät kuitenkin myös pieniä määriä beta-faasia ja parempana jaotteluperusteena alfatitaaneille voidaan pitää vastetta lämpökäsittelylle (Lütjering & Williams, 2007, s. 34). Tällä perusteella parhaiten alfaseoksia kuvaa Ti-3Al-2.5V, jolla on erinomaiset kylmämuovausominaisuudet ja on hyvin paljon käytetty lentokoneteollisuudessa saumattomissa putkissa (Lütjering & Williams, 2007, s. 35). Puhtaiden titaanien korroosiokestävyys ylettyy ruostumattomia teräksiä pidemmälle. Työstettävyyden, hitsattavuuden ja korroosiokestävyyden vuoksi puhdas titaani on saanut suosiota lämmönvaihtimien ja putkistojen konstruktio materiaalina. Seostetumpaa alfatitaania, Ti-5Al-2.5Sn:ää puolestaan on käytetty avaruusalusten kryogeenisten säiliöiden ja nestemäistä vetyä polttoaineena käyttävien päämoottorien polttoainejärjestelmissä. Näissä hyvä hitsattavuus ja ominaisuudet alhaisissa lämpötiloissa korostuvat entisestään (Lütjering & Williams, 2007, s. 198–200). Kaupallisten puhtaitten titaanien kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Kaupallisen puhtaan titaatin kemiallisia ja mekaanisia ominaisuuksia. (Lütjering & Williams, 2007, s. 176).

	Happi (max)	Rauta (max)	Myötölujuus (min MPa)
CP Titanium Grade 1	0,18	0,2	170
CP Titanium Grade 2	0,25	0,3	275
CP Titanium Grade 3	0,35	0,3	380
CP Titanium Grade 4	0,40	0,5	480

2.3 Hitsaus ja prosessit

Ruostumattoman teräksen hitsausta koskevia standardeja ja vaatimuksia on esitelty tarkemmin liitteessä yksi, titaatin liitteessä kaksi. Austeniittisen ruostumattoman teräksen

lämpölaajeneminen on kolmanneksen hiiliterästä suurempaa, titaanilla vajaa kolmanneksen pienempää. Austeniittisen ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuus on neljännes hiiliteräksen lämmönjohtavuudesta ja titaanilla samaa luokkaa austeniittisen ruostumattoman teräksen kanssa (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 37). Titaani ei ole niin arka muodonmuutoksille kuin austeniittinen ruostumaton teräs, mutta sulamislämpötila on kuitenkin korkeampi, milloin hitsipalkojen välinen lämpötila saattaa nousta korkeaksi tehtäessä hitsejä useampi (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 318, 319). Ruostumattomalla teräkselläkin tulee pyrkiä maltillisempaan hitsausenergian käyttöön kuin hiiliteräksillä, jotta voidaan pienentää muodonmuutoksien aiheuttamia ongelmia (Lepola, Makkonen, 2006, s. 197–199) sekä riskiä herkistyä raerajakorroosiolle, mikäli hiilipitoisuus ylittää 0,03 % (Havas et al., 2011, s. 48, 49). Nykyään ruostumattomista teräksistä on saatavissa niukkahiilisiä versioita. Raerajakorroosion riskiä vähennetään myös titaani- tai niobi/tantaliseostuksella (SFS-EN 1011-3, s. 20). Titaanin sulahitsauksessa voidaan todeta, että mitä puhtaampaa titaani on, sitä paremmin hitsi onnistuu. Toisin päin ajateltuna voidaan sanoa, että mitä seostetumpaa titaani on, sen haasteellisemmaksi hitsaus muodostuu varsinkin kahdesta syystä. Eutektisissa seoksissa etenkin rauta ja kromi pyrkivät ajautumaan viimeisenä sulana olevaan kohtaan hitsin keskelle aiheuttaen kuumahalkeiluvaaraa. Hitsin alue eroaa seostetummilla laaduilla yhä enemmän perusaineen rakenteesta ja mekaanisista ominaisuuksista. Toisaalta lisäaineen saatavuus huononee puhtaan titaanin Grade 1:n, Grade 2:n ja Ti-3Al-2.5V:n jälkeen tulevilla seostetummilla laaduilla (Lütjering & Williams, 2007, s. 104–109).

Molempien metallien hitsaukseen sopivia sulahitsausprosesseja ovat TIG-, MIG-, plasma-, elektronisuihku- ja laserhitsaus (Lütjering & Williams, 2007, s. 104–109) (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 262–389). Myös näistä muodostuvia hybridejä, kuten TIG-laser -hybridihitsausta voidaan käyttää (Zhang, Liu, Lei, Chen, 2014). Puristushitsaussovelluksista molemmille käyvät ainakin piste-, kiekko ja tyssähitsaus (Timet, 1999, s. 32) (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 262–389) (TWI, 2019b). TIG-hitsaus sopii niin tuotantoon kuin korjaushitsaukseenkin, hitsaukseen lisäaineella tai ilman sekä käsin tai mekanisoidusti, esimerkiksi orbitaalihitsauksena (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 320). Myös liitäntä robottiin onnistuu, mitä käytettiin jo vuonna 1989 Airbusin titaanisten paneelien hitsauksessa (Metallurgia 1989). MIG/MAG-hitsaus sopii hyvin tuotantoon isommille kappaleille, varsinkin automatisoidussa hitsauksessa, eikä se ole niin tarkka railon muodosta

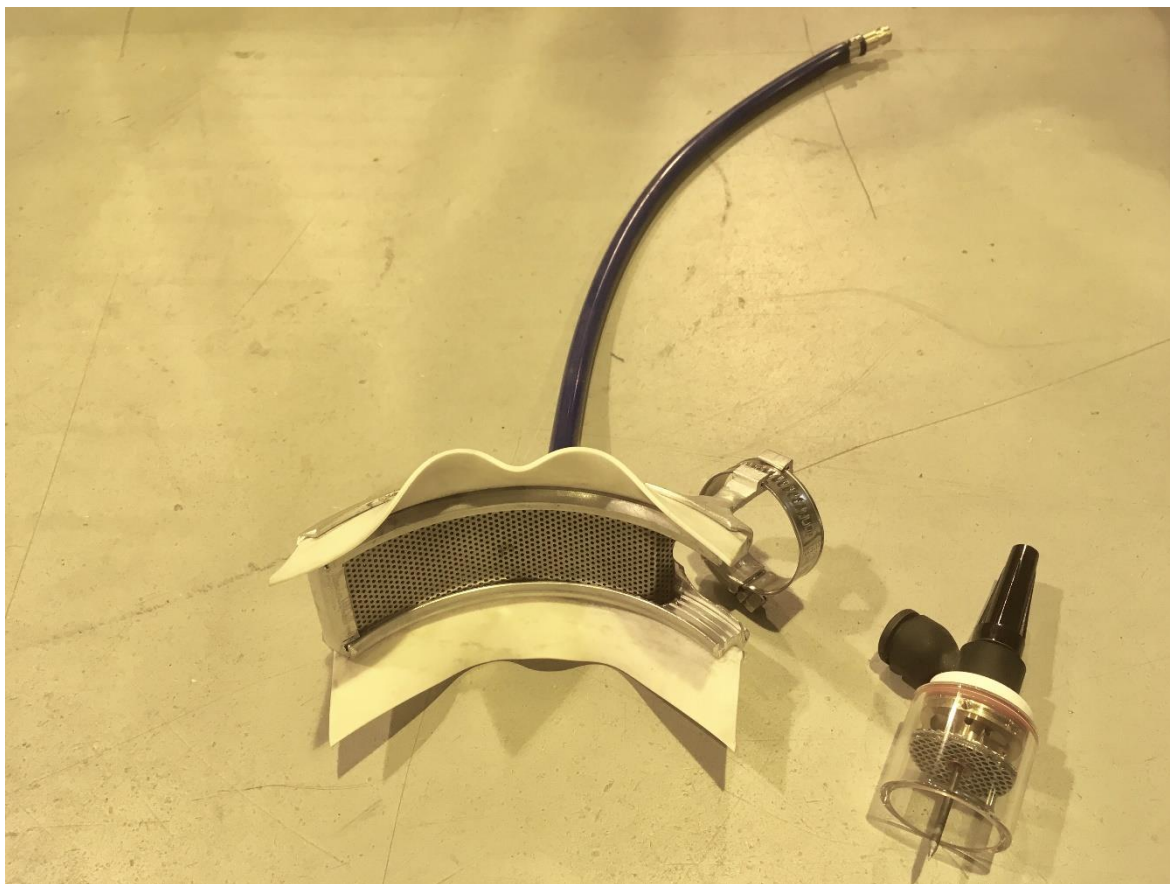
kuin TIG (Lütjering & Williams, 2007, s. 109). MIG/MAG-hitsauksessa on kuitenkin mahdollisuus muodostua roiskeita (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 318, 319). Plasmahitsaus soveltuu TIG:iä paremmin paksummille ainevahvuuksille ja on lähes aina tuotantoon sopivaa koneellisesti suoritettua hitsausta. Plasmakaari muodostaa TIG:in valokaarta suuremman sula-alueen, joka antaa hiukan anteeksi kaaren suuntauksen virheitä. Ohutlevyliitoksissa vastushitsausprosessit voivat olla hyvä vaihtoehto vähäisten muodonmuutosten ansiosta. Eletronisuihkuhitsaus sopii tyhjiöympäristössä tapahtuvan hitsauksen vuoksi hyvin titaanille. Siinä muodostuva hitsi on hyvin kapea ja syvä, joten railonvalmistus on tehtävä huolellisesti. Myös laserilla tehtävä hitsi on perinteisiä kaarihitsauksen hitsejä kapeampi ja railonvalmistus on tässäkin tehtävä huolellisesti. Laserilla ei päästä yhtä suuriin tunkemiin, kuin eletronisuihkuhitsauksella, mutta hitsaustapahtuma ei vaadi tyhjiöympäristöä. Tästä johtuen prosessi on joustavampi, vaikka vaatiikin kuitenkin inertin kaasusuojaus (Lütjering & Williams, 2007, s. 108–111). Laserhitsauksella saadaan myös perinteistä kaarihitsausta pienemmät muodonmuutokset sekä parempi tunkema. Laserhitsauksen suosio onkin viime aikoina kasvanut avaruusteollisuuden vaativimpien komponenttien hitsauksessa (Xiuyang, Hong, Jianxun, 2015). Mikäli hitsiin halutaan tuoda lisäaineen seostusta tai lisämateriaalia, voidaan harkita laserin ja MAG:n hybridihitsausprosessia. Myös laserhitsaus on mekanisoitua hitsausta (BSSA, 2018). Molemmille metalleille käytetään myös kitkahitsausta (Lütjering & Williams, 2007, s. 111–115) (Miles et al., 2017, s. 13–21).

Molemmissa perinteinen ja yleinen sulahitsausprosessi on TIG-hitsaus ja muutenkin putken- ja prosessilaitteiden hitsauksessa käytetään tavallisimmin TIG-hitsausprosessia (Lukkari 1997, s.255 ja Millerwelds 2018). Ruostumattoman teräksen hitsaukseen TIG:llä riittää kuvassa yksi oikealla osoitettu linssivarustus.



Kuva 1. Titaanin hitsauksessa kaasukupu, kuvassa vasemmalla, saa olla tavallista suurempi. Suojakaasun virtaus tällä kuvulla on noin 20–25 litraa minuutissa (Pitkänen & Laaksonen 2018). Oikealla vertailuna ruostumattoman teräksen hitsaukseen soveltuva numeron 7 kaasukupu, jota voidaan käyttää tasavirtahitsauksessa 2,4 mm elektrodin kanssa (Kemppe 2018a, s. 9). Linssivarustus parantaa kaasunvirtausta tehden siitä pitkän, suoran ja pyörteettömän (Lepola, Makkonen, 2006, s. 168).

Mikäli TIG-hitsataan titaania käsin ilmassa, järjestetään suojakaasun tuonti primäärisesti valokaaren ympärille, sekundäärisesti jäähtyvän hitsin päälle tavallisesti tarkoitusta varten tehdyllä polttimeen liitettävällä, kuvan kaksi mukaisella kaasukengällä ja kolmantena hitsin juuren puolelle. Pienemmille osille hitsaus voidaan tehdä myös huputettuna kammiossa tai teltassa (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 319, 320) (Pitkänen & Laaksonen 2018). Molemmilla metalleilla TIG-hitsaus suoritetaan tasavirtahitsauksena siten, että hitsaimen elektrodi kytketään negatiiviseksi (Timet, 1999, s. 27) (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 351).



Kuva 2. Titaanin hitsauksessa jäähtyvä hitsi tarvitsee lisäkaasusuojausta, joka voidaan hoitaa polttimeen kiinnitettävällä kaasukengällä. Materiaalin jäähtymisen ajan metallia suojataan kaasukengällä ja juuren suojaus rajaamalla kaasu kappaleen sisään tulpilla. Kaasukengän kaasuvirtaus on sama kuin hitsaimenkin (Pitkänen & Laaksonen 2018).

2.4 Toimenpiteet ennen hitsausta

Ruostumattomien terästen käsittelyssä puhtaus on tärkeää. Kaikenlainen pinnan naarmuttaminen vierailta metalleilla voi huonontaa korroosiokestävyyttä ja pilata ulkonäön. Sama voi toistua työstettäessä ruostumatonta terästä samoilla työkaluilla kuin hiiliteräksiäkin, jolloin hiiliterästä voi kulkeutua aiheuttamaan ruostumattoman teräksen pinnalle vierasruostetta (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 208). Lähtökohtaisesti paras tilanne on, että ruostumattomien terästen käsittely tehdään konepajassa omalla osastollaan (SFS-EN 1011-3, s. 8). Työkappaletta ei saa raahata vieraiden metallien päällä ja siirrot pitää tehdä nostamalla (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 208). Työpöydän päällinen olisi hyvä valmistaa ruostumattomasta teräksestä. Vieraan metallin hiontapöly ei ole tervetullutta ruostumattoman teräksen hitsauspisteelle. Myös muiden metallien hitsauslisäaineiden varastointia työpisteellä pitää miettiä tarkoin sekaantumisvaaran ehkäisemiseksi.

Korjaushitsausta ajatellen teräsharjojen tulee olla ruostumatonta terästä ja hiontatuotteiden ruostumattomalle teräkselle tarkoitettuja ja raudattomia. Välineillä ei saa olla käsitelty aikaisemmin vieraita metalleja, kuten ei titaaninkaan kohdalla, koska pinta on arka rautahiukkasille näiden aiheuttaman korroosion vuoksi (SFS-EN 1011-3, s. 12) (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 320, 321). Muutenkin puhdistuksen jälkeen on edelleen huolehdittava puhtaudesta. Muun muassa työkäsineiden ja lisäainelankojen tulee olla puhtaat. Hioessa pintaa ei pintaa saa painaa liian kovalla voimalla, jotta vältetään tarpeetonta kuumenemistä ja lämmöntuontia. Sama pätee titaaniin (Malkamäki, 1996, s. 9)(Hass, 2004). Mikäli ruostumattoman teräksen hiontajälkiä ei käsitellä, kannattaa valita karkeudeltaan mahdollisimman hieno hiontatuote, sillä pinnan karheus on verrannollinen korroosiokestävyyteen (Lepola, Makkonen, 2006, s. 199) (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 205) (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 421). Ruostumattoman teräksen hitsaajaa ajatellen kohdepoisto ja henkilökohtainen puhallusmaski suojaavat haitallisilta kuudenarvoista kromia ja nikkeliä sisältäviltä hitsaushuuruilta (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 433).

Ruostumattoman teräksen muodonmuutoksien vähentämiseksi kannattaa suosia molemmin puolin symmetrisiä railomuotoja ja mahdollisuuksien mukaan kapeaa railoa. Myös kappaleen kiinnitys ja esitaivutus hitsauksen ajaksi vähentävät muodonmuutoksia (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 260–262). Ruostumattomalla teräksellä hitsauslisäaineena käytetään yleisesti ottaen hieman perusainetta seostetumpaa lisäainetta (SFS-EN 1011-3, s. 20). Suojakaasuna TIG- ja plasmahitsausprosesseissa voidaan käyttää argonia, heliumia tai vedyllä seostettua argonia (Kinnunen et al., 2001, s. 260, 261). Vedyn pelkistävän vaikutuksen vuoksi hitsi jää vähemmän hapettuneeksi kuin puhdasta argonia käytettäessä (SFS-EN 1011-3, s. 20). TIG:ssä suojakaasuun voidaan lisätä myös typpeä, mikäli halutaan optimoida korroosionkestävyyttä tai mikrorakennetta (Kinnunen et al., 2001, s. 260). Ruostumattoman levyn tai putken hitsauksessa tulee ottaa huomioon toisen puolen hapettuminen, ja tätä varten tulee juuren puoli suojata mieluiten kaasulla, mutta myös tahnaa, teippiä tai juuritukea voidaan käyttää. Levylle parhaiten sopii juurituki (Lepola, Makkonen, 2006, s. 172, 173). Juurituki voi olla kiinteästi rakenteeseen jäävä tai väliaikainen. Kiinteää juuritukea käytettäessä tulee ottaa huomioon rakokorroosion vaara ja yhteensopivuus perusmateriaalille. Ruostumattomalle teräkselle sopiva kiinteä juurituki valmistetaan siis samasta materiaalista kuin perusmateriaali ja väliaikainen, vain hitsauksen ajan pidettävä

tuki kromilla tai nikkelillä pinnoitetusta kuparista (TWI, 2018 ja SFS-EN 1011-3, s. 10). Mikäli tyydytään pelkkään kuparitukeen, tulee varmistua, ettei hitsausalueen lämpö sulata kuparia, mikä voi aiheuttaa kuparin liukenemisen työkappaleen raerajoille (Lincoln Electric 2016, s. 14, 22, 23). Seostumista estää myös kuparitukeen tehty ura hitsausraillon kohdalla (SFS-EN 1011-3, s. 10). Juuritukea voidaan käyttää myös sitomaan hitsauksesta aiheutuvaa lämpöä, varsinkin jos tuki on jäähdytetty (TWI, 2018a). Putkia hitsatessa kaasu on kätevin ja sen kanssa kannattaa käyttää tulppasarjaa. Juurikaasuksi sopivia kaasuja ovat argon tai vedyllä seostettu argon. Vety parantaa juurensuojauksen tulosta pelkistävän vaikutuksensa vuoksi, mutta sen palava ominaisuus tulee huomioida isoissa putkistoissa. Huuhteluaika minuutteina voidaan laskea seuraavasti

$$\text{Huuhteluaika} = \frac{V \times n}{q} \quad (1)$$

Yhtälössä 1 V tarkoittaa kappaleen tilavuutta litroissa, n huuhtelukertojen määrää ja q kaasun virtausnopeutta litroina minuutissa. Sopiva virtaus juurikaasulle on noin 4–10 litraa minuutissa ja huuhtelukertojen määrä viidestä kymmeneen kertaan (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 415–418). Viimeisenä ja tärkeänä asiana on maadoittaminen. Maadoitus tulee tehdä huolellisesti ja mikäli maadoitus tehdään työpöydän kautta, tulee huolehtia, että työkappaleen ja pöydän välissä ei ole roskia, joiden vuoksi kontakti häiriintyisi. Tämä voi aiheuttaa työkappaleen ja pöydän välille kipinöintiä, mikä saattaa jättää kappaleen pintaan korroosioon johtavia sytytysjälkiä (Lepola, Makkonen, 2006, s. 199).

Hitsattaessa titaania, tulee puhtaudesta huolehtia vielä kaksinkertaisella huolellisuudella. Puhtauden lisäksi titaanin hitsauksessa pitää kiinnittää huomiota kaasusuojaukseen. Ilman kaasuilla, hapella, typellä ja vedyllä on erittäin voimakas affiniteetti varsinkin sulaan titaaniin, mutta voivat tunkeutua titaaniin myös hitsausalueella, mikäli suojakaasun suojaus on riittämätön (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 318, 319). Tämä aiheuttaa titaanin lujittumista ja sitä kautta haurastumista jo pienilläkin epäpuhtauspitoisuuksilla (Malkamäki 1996, s. 7) (Fulcer, 2008) (TWI, 2019a).

Titaaninen hitsattava kappale pitää puhdistaa ainakin kuumentuvilta pinnoiltaan epäpuhtauksista ja rasvasta. Tehtaalta tulleille pinnoille riittää tavallisesti puhdistus kloorittomalla puhdistusaineella ja huuhtelu runsaalla kuumalla vedellä sekä ilmakeiväus.

Vesijohtovettä tai metyylialkoholia ei suositella. Vaihtoehtoisesti hitsattavat alueet voidaan puhdistaa asetonilla, toluenilla tai metyylietyyliketonilla liinalla, joka ei nukkaa eikä jätä jäämiä (Timet, 1999, s. 29, AWS D17.1/D17.1 M:2017-AMD1, s. 31). Liuotinpyyhintää tulee seurata oksidikalvon poisto ruostumattomalla teräsharjalla. Tarvittaessa voidaan suorittaa vielä peittäus fluorivety-typpihappoliuoksella (5/35 til.%), jota seuraa vesihuuhtelu ensin kylmällä ja sitten lämpimällä vedellä kuivumisen nopeutumiseksi (Timet, 1999, s. 29,30). Hiontatyökalujen tulee olla hartsittomia ja kumiaineettomia, eikä niistä saa irrota epäpuhtauksia, tai alumiinioksidia titaaniin. Karbidi-pohjaiset työkalut toimivat paremmin (Malkamäki, 1996, s. 9)(Hass 2004). Hyvin valmisteltu railo pysyy ilman vaikutuksen alaisena täysin kontaminoitumattomana vain 2–3 tuntia (Malkamäki, 1996, s. 9). Hitsausrailo voidaan valmistaa lastuavan työstön sijasta hiomalla, kunhan hiontalaikat ovat hyvälaatuisia ja hiontavoimaan kiinnitetään huomiota. Hionta aiheuttaa hitsiin huokosia, mutta niiden määrän on todettu jäävän niin pieneksi, että hitsi voidaan luokitella vielä hyväksi (Aho-Mantila, Heikinheimo, Pihkakoski, Saarinen, 1989, s. 44, 45). Esikumennusta ei tarvita, ellei haluta tehdä työkappaleen pinnalta kosteudenpoistoa. Tähän riittää pintalämpötilaksi 66 °C (Timet, 1999, s. 30). Muuten esilämmitystä ei suositella (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 320, 321), ellei haluta estää kuumahalkeiluvaaraa runsaammin seostetuilla titaaneilla (Lütjering & Williams, 2007, s. 105). Railopintojen tulee puhtauden lisäksi olla vapaita murtumista ja hilseistä. Siltahitsit tehdään siten, että ne sulavat kokonaan varsinaista hitsiä hitsatessa. Saastuneet silloitushitsit pilaavat myös varsinaisen hitsin (Malkamäki, 1996, s. 9, 10)(Azom, 2002).

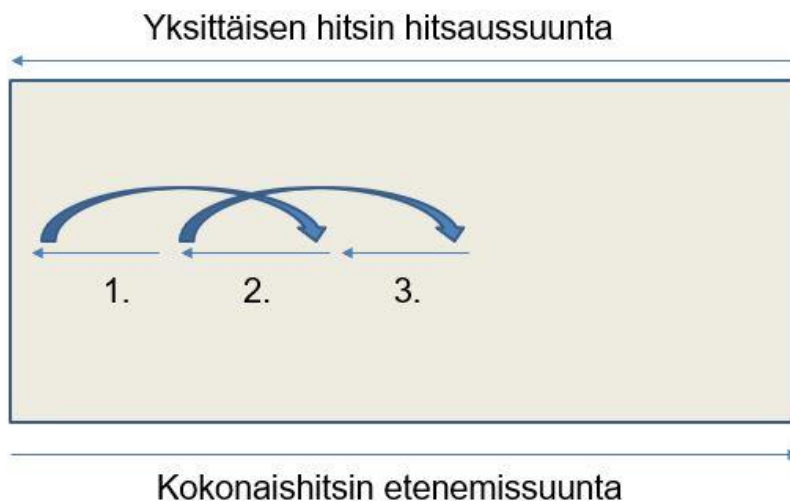
Titaanin hitsauksen aloituksessa olisi vielä hyvä varmistaa lisäaineen puhtaus vetämällä sitä vaalean käsineen läpi ja tarkastaa, jäikö likaa sekä katkaista varastoidusta lisäainelangasta kärki pois. Kaasusuojaus tulee järjestää siten, että se suojaa pinnat, jotka kuumenevat yli 300 °C:n hitsauksen aikana (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 318, 319). Mikäli työ tehdään uudella laitteistolla, on hyvä tarkastaa, että suojakaasuletkut ovat tiiviit ja siihen tarkoitettu materiaalista valmistetut. Suojakaasuksi suositellaan argonia, jonka puhtausaste on vähintään 99,996 % ja kastepiste vähintään -40 °C, mieluummin -50 °C tai vähemmän ja epäpuhtauspitoisuudet alle 50 ppm. Myös heliumia voidaan käyttää suojakaasuna, mikäli hitsi on lakiasennossa hitsaimen yläpuolella. Ilma on heliumia tiheämpää, joten helium nousee tässä tilanteessa ylöspäin suojaten hitsiä argonia paremmin (Timet, 1999, s. 28). Juuren suojauksessa ennen hitsauksen aloitusta tulee huuhtelun määrä

olla 6–10 -kertainen suojattavaan tilavuuteen nähden virtausnopeudella 9 l/min. Tämän jälkeen virtausta voidaan pienentää (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 320).

2.5 Toimenpiteet hitsauksen aikana

Jotta hitsausrailon täyttö sujuisi ongelmitta, tulee ruostumattomalle teräkselle tehdä huolellinen silloitus joko aloittaen railon keskeltä, sen jälkeen molemmat päädyt ja tämän jälkeen edeten vuorotellen molempia railon päitä kohti tai toisella tavalla aloittaen päistä, sitten hitsataan siltahitsi railon keskelle ja tämän jälkeen edeten vuorotellen molempia päitä kohti. Austeniittisella teräksellä suositellaan tiheämpää väliä siltahitseille kuin perinteisellä hiiliteräksellä (Lepola, Makkonen, 2006, s. 199 ja Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 262 ja Levi E, 2006). Mikäli mahdollista, kannattaa virtalähteestä hyödyntää silloitustoimintoa. Silloitustoiminnossa on mahdollista antaa suuri hitsausvirta hyvin lyhyen ajan kuluessa, esimerkiksi 230 A 50 mikrosekunnin aikana. Tämä mahdollistaa siistin ja hapettumattoman liitoksen mahdollisimman vähillä muodonmuutoksilla (Jarnstroem, Mosyagin, Linovskii, 2011). Koska austeniittinen ruostumaton teräs ja titaani johtavat lämpöä huonommin, pysyy hitsi kuumempana kauemmin ja suojakaasun jälkivirtausaikaa kannattaa hiukan pidentää siitä, mitä hiiliteräksillä on totuttu käyttämään (Lepola, Makkonen, 2006, s. 197) (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 319). Sopiva jälkivirtausaika riippuu aineen paksuudesta ja sitä kautta sulan koosta ja hitsausvirrasta. 50 A:n virralle austeniittisen ruostumattoman teräksen kohdalla suositellaan 8 sekuntia (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 363). Titaanilla jälkivirtausaika voi olla jopa 20 sekuntia (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 319). Ruostumattoman teräksen kohdalla hitsauksen aikainen kaasunvirtaus voidaan hyvin ohuilla seinämävahvuuksilla säätää 5–7 litraan minuutissa ja kaasukuvuksi sopii numeron 4 tai 5 kupu (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 364 ja Kemppe 2018a, s. 9). Jalkoasennossa austeniittiselle ruostumattomalle, 1 mm teräslevylle riittää hitsausvirraksi 25–60 A ja elektrodin halkaisijaksi tällä virta-alueella 1,0 mm (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 364). Elektrodi kärki tulee teroittaa lyijykynän kärjen muotoon teräväksi, jotta valoakaari on oikean muotoinen ja helpompi suunnata (Lepola, Makkonen, 2006, s. 170). Elektrodina toimii wolframelektrodi oksidilisäyksellä, väriltään esimerkiksi kultainen ja virtalajiksi valitaan tasavirta ja negatiivinen napaisuus (SFS-EN ISO 6848, 2015). Mikäli hitsauskone on varustettu virran pulssituksella, pienentää tämä lämmöntuontia ja muodonmuutoksia entisestään ja auttaa sulan hallinnassa (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 352). Sopiva lämmöntuonti voidaan helposti todeta hitsin väristä. Kirkas hitsi kertoo sopivasta

hitsausenergiasta, mutta harmaantunut hitsi antaa merkin virran pienentämisestä tai hitsausnopeuden kasvattamisesta. Käsien hitsauksessa virran laskeminen on luonnollisesti helpompaa (Miller, 2018). Valokaaren sytytyksessä sekä ruostumattoman että titaaninkin kohdalla on suositeltavaa käyttää kipinäsytytystä, sillä raapaisu- ja sytytys saattaa jättää perusaineen pintaan sytytysjälkiä johtaen mahdolliseen korroosioon (Lepola, Makkonen, 2006, s. 164, 199) (Timet, 1999, s. 28). Muodonmuutosten hallussa pitämiseksi voidaan käyttää kuvan 3 mukaista taka-askelhitsausta, milloin hitsaussuunta on pätkissä taaksepäin ja etenemissuunta kokonaisuudessaan eteenpäin (TWI 2018b). Ruostumattoman teräksen hitsauksessa ei suositella levitysliikettä (Lepola, Makkonen, 2006, s. 199). Hitsauksen lopetuksessa kannattaa käyttää loivaa virran laskua lopetuskraaterin välttämiseksi (Lepola, Makkonen, 2006, s. 165, 200). AISI 321:lle käytetään lisäaineena laatua AISI 347 tai AISI 347:ää korkeammalla piipitoisuudella (AZOM, 2001a).



Kuva 3. Taka-askelhitsauksen periaate hitsauksen muodonmuutosten vähentämiseksi.

Vaikka titaaniin TIG-hitsauksen suorittamisen kohdalla tulee lisäksi kiinnittää huomiota siihen, että lisäainelangan kuumaa päätä saa vetää pois suojakaasun alta, jotta se ei pääse kontaminoitumaan ilman kanssa. Tätä helpottaa kuvan yksi kaltainen iso kaasukupu. Mikäli hitsipalkoja tehdään useampi, tulee välipalkolämpötila pyrkiä pitämään alle 120 °C:n lämpötilassa (Malkamäki, 1996, s. 9, 10). Hitsauksen edetessä tulee seurata, että hitsi ehtii jäähtymään riittävästi kaasukengän alla (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 319). Alhainen lämmöntuonti tuottaa hyviä tuloksia titaaniin hitsauksessa (Timet, 1999, s. 30),

mutta liian pieni tai suuri hitsausnopeus aiheuttavat molemmat huokosia hitsiin (Malkamäki, 1996, s. 7).

2.6 Toimenpiteet hitsauksen jälkeen

Hitsauksen jälkeen tehtäviä toimenpiteitä ovat tavallisesti hitsien tarkastus, hitsattujen pintojen käsittely tai lämpökäsittely. Tavallinen jälkikäsittely ruostumattomalle teräkselle on hitsatun alueen korroosio-ominaisuuksien palauttaminen. Hitsaus aiheuttaa ruostumattomassa teräksessä olevan kromin nopeaa hapettumista ja hitsin alueelle syntyy kromiköyhä vyöhyke, joka ei kykene muodostamaan pinnalle tiivistä ja yhtenäistä, suojaavaa passiivikalvoa eli toisin sanottuna hitaammin syntyvää oksidikerrosta. Hitsauksesta aiheutuneen kromioksidin muodostama kalvo on enemmänkin paksumpi ja epäyhtenäisempi hilse, jolla ei ole hygieenisiä tai korroosionesto-ominaisuuksia (ESAB 2004 ja Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 204). Korroosiokesto voidaan palauttaa joko mekaanisella tai kemiallisella käsittelyllä. Mekaanisia keinoja pinnan käsittelyyn ovat harjaus, hionta ja kuulapuhallus. Kemiallisia ovat elektrolyyttinen kiillotus ja peittäus. Yhdistelemällä edellisiä saadaan parhaat tulokset pistekorroosiota vastaan. Esimerkiksi harjaus ruostumattomalla harjalla tai hionta hienolla karkeudella ja peittäus näiden jälkeen antavat lähes puhtaan levyn pintaa vastaavat korroosio-ominaisuudet. Peittäyksellä ja elektrolyyttisellä kiillotuksella voidaan päästä jopa parempiin ominaisuuksiin. Peittäus sopii hionnan ja harjauksen tapaan hyvin korjaushitsaukseen, koska se voidaan tehdä paikallisestikin. Peittäyksessä tulee muistaa huolehtia ympäristö- ja työterveysseikoista (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 419–422, 424–427). Ruostumattomalle teräkselle voidaan tehdä myös liuotuksenpoistohehkus. Se on lämpökäsittely, jonka ajatuksena on hitsauksessa syntyneiden seosainepitoisuuksien tasaaminen, vieraiden faasien liuotus tai martensiitin päästäminen. Lämpökäsittelyn aikana materiaali myös pehmenee ja jännitykset poistuvat. Jännityksenpoistohehkus voi tulla kysymykseen hitsatun rakenteen miuodonmuutosten tasaamiseksi tai jännityskorroosion estämiseksi. (Kyröläinen, Lukkari, 2002, s. 422, 423). AISI 321:lle sopivia lämpökäsittelyjä on esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3. Lämpökäsittelyohjeita AISI 321:lle (Azom 2001).

	Lämpötila °C	Pitoaika	Jäähdytys
Liutoshehkutus	950–1120	–	Nopeasti
Stabilisointi*	870–900 °C	1 h / 25 mm	Ilmaan
Jännityksenpoistohehkutus	700 °C	1–2 h	Ilmaan

*Stabilisointia suositellaan tehtäväksi useimpien yli 450 °C:n lämpötilassa tapahtuvien toimien jälkeen tai liutoshehkutuksen korkeamman pään lämpötilakäsittelyn jälkeen.

Titaanille tehtyjen hitsien kohdalla arvioidaan tyypillisesti kaasusuojaus onnistumista taulukon 4 mukaan. Värin perusteella hitsi voidaan hylätä, mutta sen laatua ei voida yksin värin perusteella arvioida. Hitsin pinnan värjäytymisestä voidaan varmasti päätellä vain kiinteän tilan kaasusaastumisesta. Koska liuenneet kaasut lujittavat hitsiä, voidaan virhettä analysoida kovuuskokeella (Malkamäki, 1996, s. 14. 15).

Taulukko 4. Titaanihitsin arvostelu värin perusteella (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 321).

Titaanin väri	Merkitys	Hitsin suojaus	Toimenpide
Hopea	Yleensä hyvä	Hyvä	Ei vaadi toimenpiteitä
Oljenkeltainen – vaalea pronssi	Hyväksyttävissä	Kohtalainen	Värittyminen poistetaan ruostumattomalla teräsharjalla ennen seuraavan palon hitsausta
Sininen tai purppura	Hitsi on huono	Huono	Hitsipalko viereisine alueineen poistettava, kaasunsuojausta parannettava.
Harmaa tai valkoinen	Hitsi on hyvin huono	Erittäin huono	Poista hitsi ja viereinen alue täydellisesti, tarkasta suojakaasujärjestelmä vuodoilta.

Mittausalueella ei saisi esiintyä yli 30 HB-yksikön tai yli 40 HV-yksikön kovuusvaihtelua (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 322)(Malkamäki 1996, s. 15). Muita mekaanisia testejä hitsin onnistumisen arvioimiseksi ovat veto-, taivutus- ja iskutkeystestit. Taivutustestillä saadaan kuvattua hitsin sitkeysominaisuuksia (Timet, 1999, s. 32). Radiografista testausta käytetään sulahitsauksen jähmettymisessä muodostuneiden puutteiden ja virheiden paljastamiseen (Lütjering & Williams, 2007, s. 131). Onnistunut hopeanvärisen hitsi ei välttämättä tarvitse jälkikäsittelyjä, mutta pinta voidaan kuulapuhaltaa tai laserkäsitellä puristusjännityksen aikaansaamiseksi. Pinta voidaan peitata hapolla kontaminoituneen osuuden poistamiseksi tai koneistaa elektromeaanisesti. Happeittauksen jälkeen olisi hyvä käyttää vielä kuulapuhallusta säröriskin poistamiseksi

(Lütjering & Williams, 2007, s. 115–124). Jännitysten poistamiseksi kappale voidaan lämpökäsitellä 500–600 °C:n lämpötilassa (Malkamäki, 1996, s. 10).

2.7 Ilmailualan omat ohjeet ruostumattoman teräksen hitsaukselle

AISI 321:lle on löydettävissä jo valmiita hitsausohjeita (NAVAIR 01-1A-34, s.005 00-18). Ennen hitsausta metalli tulee puhdistaa asetonipyyhinnällä ja ruostumattomalla teräsharjalla epäpuhtauksista. Myös leikkuureuna tulee siistiä purseista ja plasmaleikatut reunat poistaa oksidikerroksesta. Hiilikaaritaltausta ei suositella ruostumattomalle teräkselle. Kaikkien työkalujen tulee olla puhtaita hiilestä. Näihin luetaan mukaan teräsharjat, kontaminoituneet hiontarvikkeet ja hiiliteräskiinnittimet. Hiili kontaminoituu ruostumattoman teräksen pinnalle ja heikentää korroosiokestävyyttä. Tyypillisesti puhdistus etenee seuraavassa järjestyksessä (NAVAIR 01-1A-34, s.006 01-8):

- Rasvanpoisto hyväksytyllä alkaalisella puhdistusaineella
- Hiilikaarstan puhdistus upottamalla alkaaliseen hilseenpoistoaineeseen A-A-59260 tai vastaavaan
- Huuhtelu puhtaalla vedellä
- Kuivaus öljyttömällä paineilmalla

Ohuet levyt voidaan liittää I-railolla. Yli kolme millimetriä paksuilla ainepaksuuksilla on välttämätöntä viistää railon reunat läpisulamisen saavuttamiseksi. Austeniittisilla ruostumattomilla teräksillä esilämmitys ei ole tarpeen ja voi olla jopa haitallista aiheuttaen muodonmuutoksia ja karbidien erkautumista raerajoille. Titaanin tai niobin seostaminen ruostumattomaan teräkseen ehkäisee karbidien muodostumista raerajoille. Esimerkkinä titaanistabiloidusta teräksestä on AISI 321 (Outokumpu 2018b). Myös niukkahiilisyys vähentää riskiä (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 186). Hitsatessa tulee huolehtia kaaren suojauksen lisäksi hitsin juuren suojauksesta. Sopivia suojakaasuja molempiin tarkoituksiin löytyy taulukosta kuusi. Lisäaineen käyttö auttaa estämään hauraiden hitsien muodostumista. Lisäaine valitaan taulukon viisi mukaisesti. Silloitusten käyttöä suositellaan. Levitysliikkeen käyttöä ei suositella, mutta mikäli sitä käytetään, tulee levitysliikkeen olla mahdollisimman kapea ja pysähdysten reunoilla mahdollisimman lyhytaikaisia, jotta lämmöntuonti pysyy pienenä. Palkojen välinen lämpötila ei saa nousta yli 150 °C. Hitsauksen liian äkillinen lopetus saattaa aiheuttaa kuonansulkeumia tai

lopetuskraatereita ja niiden säröytymistä. Hitsatessa tai voimakkaasti pintaa hioessa muodostuu epäpuhdas oksidikerros, joka voidaan tunnistaa sinisestä väristä. Tämä kerros heikentää korroosiokestävyyttä ja tulee poistaa hienokarkeisella hiomatuotteella, harjaamalla, raepuhalluksella tai kemiallisesti. Raepuhallus ja harjaus ovat näistä vähemmän tehokkaita. Puhdistuksen jälkeen pinta voidaan passivoida kemiallisesti. Myös hitsausroiskeet ja hilse ruostumattoman teräksen pinnalla heikentävät korroosiokestävyyttä. Hitsauksen jäänteet tulee poistaa ennen pehmeäksi- tai jännityksenpoistohehkutusta. Värjäytyminen ei välttämättä ole haitallista, mutta tulee poistaa, mikäli hitsattu kappale on tarkoitettu dekoratiiviseen tarkoitukseen. Tämä voidaan tehdä käyttämällä hienoa hiovaa puhdistusainetta, kemiallisesti fosforihappopohjaisella puhdistusaineella tai elektrokemiallisesti kaupallisilla hitsien puhdistussarjoilla. Austeniittinen ruostumaton teräs ei tavallisesti tarvitse jälkilämpökäsittelyä, mutta jännityksenpoistohehkutus kylmämuovatuille osille voidaan tehdä pitämällä kappaletta puolesta tunnista kahteen tuntiin lämpötilassa 400 °C (NAVAIR 01-1A-34, s.007 02-1–8).

Taulukko 5. Hitsauslisäaineen valinta austeniittisille ruostumattomille teräksille (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 02-3, muokattu).

Perusaine		Suosittelut lisäaine	
Tyyppi	Rakenne	Tyyppi	Lanka
301 302 304 305	Austeniittinen	308	MIL-R-5031 Class 1 AWS A5.9 ER308
303 310 314	Austeniittinen	310	MIL-R-5031, Class 3 AWS A5.9 ER310 AMS 5694
316 317	Austeniittinen	316	MIL-R-5031 Class 4 AWS A5.9 ER316
321 347 348	Austeniittinen	347	MIL-R-5031, Class 5 AWS A5.9, ER347 AMS 5680 AMS 5790 (high Ferrite)

Taulukko 6. Suojakaasun valinta austeniittisille ruostumattomille teräksille (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 02-6).

Hitsausprosessi	Suojakaasu	Juurikaasu
TIG	Ar	Ar
GTAW	Ar + H ₂ (tot 20%)	N ₂
	Ar + He (tot 70%)	N ₂ + 10% H ₂
	Ar + He + H ₂	
	Ar + N ₂ (typpiseosteisille)	

2.8 Ilmailualan omat ohjeet titaanin hitsaukseen

Titaania käytetään suurta lujuutta ja alhaista massaa edellyttävissä kohteissa, mutta hitsaus on suhteellisesti kallista. Riski tulipalolle titaania työstettäessä on olemassa varsinkin paikoissa, joissa on titaanista pölyä ja lastuja. Suurin osa titaaneista voidaan hitsata ja oikein tehty hitsi on sitkeä ja korroosiokestävä. Titaania käytetään puhtaana (Commercial Pure, CP) sekä 6 % alumiini- ja 4 % vanadiumseostuksella (Ti-6Al-4V). Muitakin seoksia on saatavilla ja saattavat olla hitsattavissa, mutta näihin tulee olla suunnittelijan antamat hyväksytyt hitsausohjeet tai muu dokumentti, joka antaa yksityiskohtaiset tiedot hitsauksesta. Hitsauslaitteisto on pitkälti samanlainen kuin hitsattaessa ruostumattomia teräksiä, mutta puhdistus ja kaasusuojaus vaativat enemmän huomiota. Hitsaimessa tulee käyttää muun muassa isompaa kaasukupua. Hitsi, juuren puoli ja lämmölle altistuva vyöhyke tulee kokonaan eristää ilman vaikutuksilta (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-2). Mikäli huolellisuutta ennen hitsausta ei ole noudatettu, happi tekee hitsistä ja HAZ-vyöhykkeestä hauraan, sillä titaani pystyy nopeasti absorboimaan happea ja vetyä hitsiin sekä kuumuudelle altistuneeseen vyöhykkeeseen (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-2 & NAVAIR 01-1A-34, s. 007 00-6). HAZ-vyöhykkeellä tarkoitetaan hitsauksessa lämmölle altistunut aluetta, joka ei ole sulanut, mutta jonka mikrorakenne on muuttunut (CEN/TR 14599:2005, s 24). NAVAIR tarjoaa myös titaanille valmiita hitsausohjeita (NAVAIR 01-1A-34, s. 005 00-15, 17, 21). Titaanin hitsaukseen sopivia hitsausprosesseja ovat

- TIG (GTAW)
- MIG (GMAW)
- Plasmahitsaus (PAW)
- Vastushitsaus (RW)

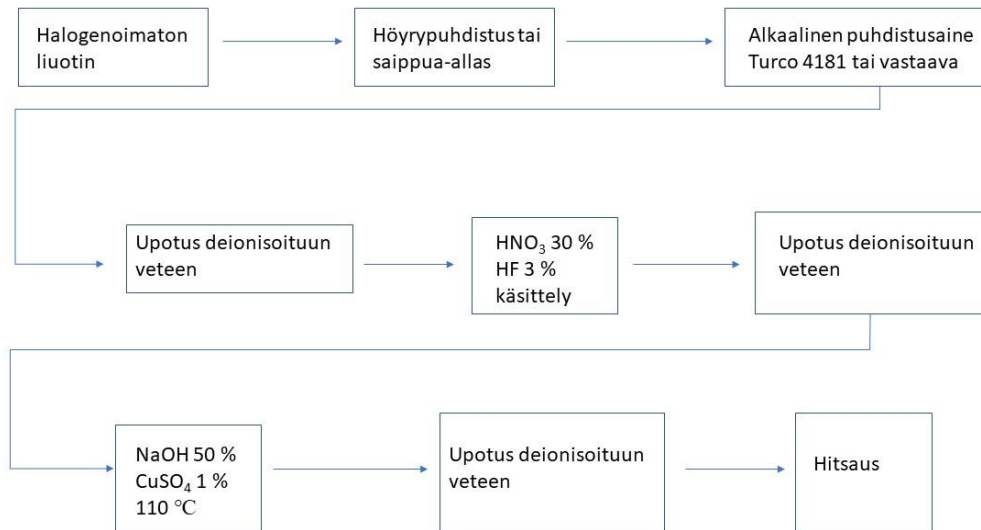
Titaanin hitsauksessa ei käytetä hitsausjauheita, koska nämä vaikuttavat haurauteen ja korroosiokestävyyteen. Eniten käytetty hitsausprosessi on TIG lukuun ottamatta paksuja kappaleita. Alle kolme millimetriä paksut kappaleet voidaan hitsata I-railolla ilman lisäainetta. Suuremmilla ainepaksuuksilla railo tulee viistää ja hitsata lisäaineen kanssa. Paksummilla ainevahvuuksilla hitsaukseen käytetään MIG:ä. Myös plasmahitsausta voidaan käyttää titaanille ja titaaniseoksille. Sillä on mahdollista hitsata I-railoon jopa 12 mm ainevahvuuksia ja on TIG:ä nopeampi. Vastushitsauksen piste- ja kiekko hitsausprosessia käytetään titaanisten ohutlevyjen hitsaukseen. Vastushitsaus toimii myös titaanin eripariliitoksissa toisiin metalleihin (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 00-6). Titaanille sopivia hitsauslisäaineita löytyy taulukosta 7.

Taulukko 7. Ohjeistusta titaanin hitsauslisäaineen valintaan (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-2)

Perusaine	Nimi	Lisäaine	Huomautukset
AMS 4941	Puhdas (275 Mpa)	AMS 4951 R50400	Voidaan hitsata hehkutetussa tai kylmämuovatussa tilassa. Hitsi kuitenkin hehkuttaa HAZ-vyöhykkeen, milloin kylmämuokkauksen lujuusominaisuudet menetetään.
AMS 4942	Puhdas (275 Mpa)	AMS 4951 R50400	Voidaan hitsata hehkutetussa, liuotushehkutetussa ja osittain vanhennetussa tilassa, kunhan vanhennus saatetaan loppuun jännityksenpoistohehkutuksessa.
AMS 4931	6Al-4V, ELI	AMS 4956 R56400	Voidaan hitsata hehkutetussa, liuotushehkutetussa ja osittain vanhennetussa tilassa, kunhan vanhennus saatetaan loppuun jännityksenpoistohehkutuksessa.
AMS 4932 AMS 4934 AMS 4935 AMS 4965 AMS 4967	6Al-4V	AMS 4954 R56400	Voidaan hitsata hehkutetussa, liuotushehkutetussa ja osittain vanhennetussa tilassa, kunhan vanhennus saatetaan loppuun jännityksenpoistohehkutuksessa.
AMS 4985 AMS 4991	6Al-4V	AMS 4954 R56410	Panosvalu, radiograafinen laatu

Kaikki pinnat tulee pyyhkiä asetonilla ennen hitsausta. Titaanin ja titaaniseosten herkkyys haurastumiselle asettaa rajoituksia käytettävissä oleville liitosprosesseille. Pienetkin määrät hiiltä, happea, typpeä tai vetyä heikentävät sitkeyttä ja lujuutta. Johdonmukaisesti tulee suosia sellaisia liitosprosesseja, jotka minimoivat kontaminaation. Lika, pöly, rasvat,

sormenjäljet ja laaja joukko muita epäpuhtauksia voivat johtaa haurauteen ja huokoisuuteen, ellei perusainetta tai lisäainetta ole huolellisesti puhdistettu ennen hitsausta. Puhdistusliinojen tulee olla nukkaamattomia. Mikäli railopinnat on valmistettu leikkaamalla, tulee ne puhdistaa mekaanisesti ennen seuraavia puhdistustoimenpiteitä. Railopintojen puhdistukseen ei saa käyttää halogenoituja puhdistusaineita eli aineita, jotka sisältävät klooria tai fluoria. Rasvanpoistoaineiden jäämät voidaan poistaa miedolla vajaan prosentin vahvuisella veden ja saippuan seoksella. Scale conditioning -käsittely voidaan tehdä upottamalla kappale alkaliseen ruosteenpoistoliuokseen (6,2–9,3 %) 10–60 minuutiksi. Huuhtelu tapahtuu deionisoidussa vedessä. Descal-käsittely tehdään upottamalla kappale typpihapon (30 %) ja fluorivetyhapon (1 %) liuokseen puolesta minuutista puoleentoista minuutin ajaksi. Tämän jälkeen huuhdellaan taas deionisoidussa vedessä. Nyt voidaan tarkastaa puhtaus ja tarvittaessa jatkaa käsittelyä upottamalla kappale kuumaan 110 °C natriumhydroxidin (50 %) ja kuparisulfaatin (1 %) seokseen puolesta tunnista tuntiin ajaksi. Tämän jälkeen huuhdellaan vielä deionisoidussa vedessä ja upotetaan kappale uudelleen typpihapon (30 %) ja fluorivetyhapon (1 %) liuokseen puolesta minuutista puoleentoista minuutin ajaksi. Tämän jälkeen huuhdellaan taas deionisoidussa vedessä. Kuva 4 havainnollistaa titaanikappaleen puhdistusta ennen hitsausta. Kaikki puhdistetut kappaleet laitetaan puhtaisiin polyetyleenipusseihin LP-378, MIL-P-22191 tai MIL-B-121 GRADE A (sulkupaperiin). Käsiteltäviä kappaleita käsitellään nukkaamattomilla valkoisilla hansikkailla, millä ei saa käsitellä muita työkaluja tai varusteita (NAVAIR 01-1A-34, s. 006 01-8–10). Lisäaineet tulisi säilyttää kosteudelta suojatuissa pakkauksissaan (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-4). Lisäaineen puhtaus voidaan varmistaa vetämällä se puhtaan nukkaamattoman liinan läpi (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-3). Mikäli siihen jää jäämiä tai lisäaine on jouduttu säilyttämään ilman pakkausta, voidaan sillekin tehdä edellä kuvatun mukainen puhdistusprosessi. Ennen kappaleiden lataamista hitsauskammioon tai ilmassa tapahtuvaan hitsaukseen, kappaleiden kosketuspinnat tulisi vielä pyyhkiä nukkaamattomaan liinaan kostutetulla isopropanolilla tai muulla vastaavalla liuottimella. Myös kappaleeseen kosketuksissa olevat työkalut tulee puhdistaa oksideista ja pyyhkiä edellä mainitulla tavalla. (NAVAIR 01-1A-34, s. 006 01-8–10).



Kuva 4. Navairin mukainen titaatin puhdistusprosessi (NAVAIR 01-1A-34, s. 006 01-9).

Työkalut, joita titaatin hitsauksessa tarvitaan, ovat paikoituskiinnittimet, hitsauskammio, joka kykenee ylläpitämään riittävän puhtaan suojakaasuatmosfäärin sekä hitsausvirtalähde, josta saadaan tasavirtaa suoralla polariteetilla suurellakin taajuudella. Muita tarvikkeita ovat puhdistusluokan A mukaiset nukkaamattomat liinat. Suositeltu suojakaasu on Argon ja voidaan käyttää yhdistettynä heliumiin vain, kun suunnittelija on niin ohjeistanut. Kammion ja kaasulinjan suojakaasun puhtautta voidaan analysoida titaatin väreistä, jotka järjestyksessä vähäisimmästä kontaminaatiosta suurempaan ovat: kirkas hopea, haalea oljen keltainen, tumma oljen keltainen, vaalean sininen, tumman sininen, harmaan sininen sekä harmaa ja valkoisena irtoava jauhe. Hitsin väreinä hyväksytään ainoastaan kirkas hopea ja haalea oljen keltainen. Hitsin värejä ja niistä johtuvia toimenpiteitä ohjeistaa taulukko 8. Argonilla 12 ppm:n happipitoisuudella on jo mahdollista saavuttaa kirkas hitsi (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-4, 5).

Taulukko 8. Titaanin hapettumisvärit ja toimenpiteet (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-4).

Hitsin väri	Seuraus ja käsittely
Hopea	Oikea suojaus, korjaavaa käsittelyä ei tarvita
Vaalea oljenkeltainen Tumma oljenkeltainen Vaalean sininen	Pinnan oxidoituminen, poista harjaamalla uudella ruostumattomalla teräsharjalla.
Tumman sininen Harmaan sininen Harmaa	Metallin kontaminoituminen. Hitsi tulee poistaa ja tehdä uudestaan, kun korjaukset kaasusuojauksessa on tehty.
Keltainen Harmaa Valkoinen (irtoavaa epäpuhtautta)	Metallin kontaminoituminen. Hitsi tulee poistaa ja tehdä uudestaan, kun korjaukset kaasusuojauksessa on tehty.

Hitsattavalla alueella ei saa olla vetoisuutta, jotta suojakaasuvirtaus ei hajoa ja vältetään hitsin kontaminoituminen. Hitsattavan kohdan tulee olla vapaa pölystä ja nukasta. Osat, joita ei hitsata kammiossa, tulee olla suojakaasulla suojattu, kunnes lämpötila tippuu alle 315 °C:een. Tämä pitää muistaa myös lisäaineen kanssa. Mikäli lisäaine kontaminoituu, katkaistaan kärki puolentoista tuuman etäisyydeltä kärjestä. Hitsisulan primäärinen suojaus saavutetaan tavanomaisella vesijähdytetyllä TIG-polttimella, joka on varustettu 19–25 mm suuruisella keraamisella kaasukuvulla ja linssillä. Suuri kaasukupu on välttämätön, jotta hitsisulalle saadaan riittävän hyvä kaasusuojaus. Kaasulinssi puolestaan takaa tasaisen ja turbulentittoman kaasuvirtauksen sekä kohdistaa ja tasapainottaa kaasujen virtauksen. Sekundäärinen kaasusuojaus tehdään tavanomaisesti kaasukengällä (kuva 2), jonka tehtävänä on suojata jähmettyvää hitsisulaa ja HAZ-vyöhykettä, kunnes lämpötila on laskenut alle 426 °C:een. Mikäli veden kosteuspitoisuus suojakaasussa on yli 10 ppm, pitää suojakaasulinjaan asentaa puhdistin tai kuivain. Elektrodi tulee teroittaa teräväksi siten, että kartion pituus on 6–8 kertaa halkaisija. Kontaminoitunut kärki tulee poistaa 6–10 mm:n matkalta (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-5, 6). Titaanien hitsauksessa tulisi käyttää suojakaasukammiota, jotta hitsattava kappale voitaisiin kokonaan ympäröidä hapen, typen ja vedyn haitallisilta vaikutuksilta. Hitsauskammion toiminta tulee testata ennen hitsausta siten, että testipalaan tehdään sula, ja jäähtyvää sulaa suojataan hitsaimen kaasuvirtauksella. Oikein toimivassa hitsauskammiossa hitsistä tulee hopean värinen (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-7).

Railopintojen valmistus on kuvattu standardissa AWS D17.1, Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications. Mikäli käytetään juuritukea, tulee se olla valmistettu

kuparista, alumiinista (deoksidoitu) tai ruostumattomasta teräksestä siten, että juurituki ei ole kosketuksissa hitsiin. Hitsattavissa kappaleissa voidaan käyttää siltahitsejä kohdistamaan osat toisiinsa, mutta myös niiden tulee olla virheettömiä (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-7). Esilämmitystä tarvitaan, mikäli kappaleiden lämpötila on alle 0°C. Esilämmitystä voidaan käyttää myös poistamaan kosteutta ja estämään muodonmuutoksia. Suositeltuja laitteita esilämmittämiseksi ovat uunit, lämpölamput, induktiolämmittimet, vastuselementit ja muut laitteet, joissa on pyrometrinen kontrollointi. Esilämmitys- ja palkojen välinen lämpötila ei saa nousta yli 120 °C:een. Happi-asetyleeni -poltinta ei saa käyttää esilämmitykseen. Palkojen välinen puhdistus tulee suorittaa visuaalisen tarkastuksen (taulukko 8) jälkeen. Lisätietoa hyväksynnöistä löydetään standardista AWS D17.1, Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications. NAVAIR huomauttaa myös, että railojen tulee olla muita metalleja paremmin valmisteltuja, jotta vähennetään ilman kontaminoitumisvaaraa liitoksessa. Railon ilmaväli ei myöskään saa olla neljännessä levyn paksuudesta tai 1,6 mm suurempi, pienempi arvo on määräävä. Liitospinnat tulee suunnitella siten, että suojakaasulla on hyvä luokse päästävyys sekä ylä-, että alapuolelle hitsiä (NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-7, 8).

Taulukossa 9 on esitetty hitsausohjeita muutamille tyypillisimmille titaanilaaduille ja virran valinnassa auttaa taulukko 10.

Taulukko 9. Hitsaus- ja lämpökäsittelyohjeita kaupallisesti puhtaalle titaanille (NAVAIR 01-1A-34, s. 6-48–6-50, s. 7-32IJ).

Materiaali	Lisäaine	Lämpökäsittely	Aika
Seostamaton puhdas titaani (CP)	Commercially Pure, AMS 4951	Jännityksenpoistoherkutus hitsauksen jälkeen 427-538 °C.	60 min, jäähditys ilmaan

Taulukko 10. Suuntaa antavia ohjeita oikeiden virtojen löytämiseen titaanilla (NAVAIR 01-1A-34, s. 006 02-5)

Materiaalipaksuus [mm]	Hitsausvirta DC [A]
0–1,1	40–50
1,1–1,6	60–70
1,6–2,3	70–95
Yli 2,3 mm	70-95
Valut	50–150

2.9 Yhteenveto korjaushitsausmenetelmän pohjalle

Taulukossa 11 on koottu tässä luvussa esitellyt keskeiset hitsaustekniset tekijät, jotka tulee ottaa seuraavassa luvussa tutkittavan korjaushitsausmenetelmän perustaksi.

Taulukko 11. Austeniittisen ruostumattoman teräksen ja titaanin keskeiset hitsaustekniset piirteet

	Austeniittinen ruostumaton teräs	Titaani
Säilytys	Erillään vierasmetalleista	
Fysikaaliset erityispiirteet	Herkkä muodonmuutoksille	Korkeampi sulamislämpötila
Esivalmistelut	Liuotinpyyhintä, mekaaninen puhdistus, huuhtelu	
Hitsausprosessit	Sulahitsaussovellukset, vastushitsaus, kitkahitsaus	
Hitsausvirta (TIG)	25-60 A / 1 mm	40-70 A / 1 mm
Virtalaji (TIG)	Tasavirta, hitsain negatiivisessa potentiaalissa	
Sulahitsauksen suojakaasu	Argon (99,990 %)	Argon (99,998%)
Erityispiirteet	Höyryt karsinogeenisiä	Kaasusaastuminen, puhtausvaatimukset
Hitsauksen jälkeen	Kromiköyhän kerroksen poisto	Ei käsittelyä
Lämpökäsittely	Tarvittaessa jännityksenpoistohehkus	

3 KORJAUSHITSAUSMENETELMÄ

Johdeputkissa olevat vauriot ovat pääasiallisesti murtumia tai valmistus- ja asennusvikoja. Murtumat voivat olla väsymisestä aiheutuneita vikoja, valmistus- ja asennusviat esimerkiksi hitsauksessa muodonmuutoksista tai väärästä asennuksesta kärsineitä liitospäitä.

3.1 Materiaalin tunnistaminen

Ilmailualalla käytetään runsaasti eri materiaaleja ja oikean hitsauslisäaineen sekä sopivan korjausosan löytämiseksi materiaalin tunnistaminen on tärkeää. Sopivalle menetelmälle asetettuja vaatimuksia ovat tarkkuus, nopeus, helppokäyttöisyys ja näytekappaleen pysyminen vaurioitumattomana. Materiaalien tunnistamiseen sopivat hyvin PMI-laitteet. PMI-lyhenne tulee sanoista Positive Material Identification mikä tarkoittaa ainetta rikkomattomasta aineenkoostumuksen määrittystä. Kätevimmät laitteet ovat kädessä pidettäviä pyssyjä, mutta myös kiinteitä laboratorioasennuksia on saatavilla. Lisäksi analyysi on nopea ja tarkka. PMI-laitteissa voidaan esitellä kolme eri tekniikka, jotka ovat XRF (X-Ray Fluorescence), LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) ja OES (Optical Emission Spectrometry). XRF:n toiminta perustuu lähteen lähettämiin röntgensäteisiin, jotka törmättyään kohteeseen saavat sen emittoimaan sekundaarista säteilyä, jonka energiasta ja intensiteetistä tunnistin päättelee alkuaineen ja sen määrän. LIBS toimii siten, että analysaattorin laserpulssit kuumentavat materiaalin pinnasta pienen alueen, mistä muodostuu plasmaa. Plasma emittoi elektronien siirtymisen vuoksi aineelle tyypillisiä aallonpituuksia, jotka kerätään takaisin analysaattorin analysoitavaksi. Laite päättelee spektrin perusteella aineen konsentraation. Samantyyppisesti toimii OES, mutta materiaalin pintaa kuumennetaan suojakaasussa näytteen ja elektrodin väliin syntyvällä valokaarella (Hitachi 2018 ja Vallinkoski 2018). Näiden kolmen laitteen ominaisuuksia on havainnollistettu taulukossa 12.

Taulukko 12. Materiaalien tunnistamiseen liittyvien sovelluksien ja suhteellisten hankintahintojen vertailua. Laitteista LIBS ja XRF ovat rakenteeltaan pistoolimaisia ja OES hiukan raskaampi, pistoolista ja salkusta koostuva laite (Vallinkoski 2018).

	XRF	LIBS	OES
Toiminta	Röntgenfluoresenssi, ainetta rikkomaton.	Laserin ja spectrin mittausta, jättää noin 1 mm ² polttojäljen.	Valokaari ja optinen emissiospektrometri, tekee pyöreän, halk. 5–8 mm polttojäljen.
Mittausalue	Mg–U, mutta ei C, N, B	Mg →, mutta ei C, N, P ja S	Kaikki yleiset seosaineet, myös C, P, S, B, N
Näytteen käsittely	Puhdas, rasvaton ja maaliton pinta	Puhdas, rasvaton ja maaliton pinta	Puhdas metallipinta, aina hiottava
Mittausaika	Metalliseokset yleensä 3–5 s. Mg, Al, Si 10–30 s.	1 s.	Hiontatyö + analyysi 10–15 s. Mittauksia yleensä 3 kappaletta, joista keskiarvo
Tarkkuus	Hyvä	Kohtalainen	Hyvä sekä pienille, että suurille pitoisuuksille
Kuluvat osat	Ikkunat, akut	Akut	Ar-kaasu, hiomapaperit, vuosihuolto n. 1000 €
Edut	Kattavat mittausohjelmat, sopii hiukan hankalemmillekin muodoille, kuten putket. Myös helppo käyttää.	Mittausnopeus, sopii Mg- ja Si-tarkkuuksien puolesta hyvin alumiiniseoksille, helppo käyttää.	Hiilen, rikin, fosforin ja boorin analysointi myös pienillä, <0,05–0,1 % pitoisuuksilla, joten myös terästen L-laadut voidaan erotella. Vaatii hyvin koulutetun käyttäjän.
Haitat	Mg, Al, Si eivät tarkkoja, jos pinnanlaatu on huono. Vaatii STUK:n luvan.	Pienet pitoisuudet <0,2 % eivät niin hyviä kuin XRF:llä. Mittaus epävarmaa huonolla tai jyrkästi kaarevalla pinnalla.	Yhden analyysin teko kestää noin 1–2 min.
Suhteellinen kustannus	312	315,5	535

Parhaiten materiaalien tunnistamiseen sopivat joko XRF tai LIBS. Ensisijaisesti voidaan suositella XRF:ää, koska laitteella on helpompi saada mittaus tehtyä, jos putkesta näkyy eristeen vuoksi vain kaareva, ohut laippapinta, putki on halkaisijaltaan pieni tai hankalan muotoinen. Laite ei myöskään jätä minkäänlaisia lämmöstä johtuvia vaurioita kappaleeseen. Mikäli lupia ei haluta hankkia tai hyvin pieni säteily koetaan ongelmaksi, voidaan vaihtoehtoksi hyvin valita LIBS. Molemmissa tarkkuus riittää riittävän hyvin korjaushitsattavan seoksen tunnistamiseen. OES:ää ei sovellu niin hyvin tutkimuksen kohteeseen kuin edelliset, koska hankalat muodot ja vaihtelevuus putkien koossa asettavat haasteita mittauspäälle. Hiilen mittaus ei myöskään tuo lisäarvoa ja XRF:n ja LIBS:n hankinta sekä ylläpito on edullisempaa. Polttojälki ei ole ongelma LIBS:ssä sen hyvin pienen koon vuoksi. OES:ssä koko on jo sitä luokkaa, että sen vaikutuksia pitää alkaa miettimään. Yksi tapa eliminoida vaikutus on sijoittaa mittauskohta korjaushitsattavalle alueelle, jolloin polttojäljen vaikutukset poistuvat railonvalmistuksen yhteydessä.

3.2 Murtuman korjaushitsaustapa

Korjattava osa puhdistetaan huolellisesti sekä päältä, että juuren puolelta. Mahdolliset rasvat tai muut epäpuhtaudet voivat aiheuttaa epäpuhtauksia hitsiin. Navair suosittelee, että hitsissä oleva virhe tarkastetaan ensin. Vian laajuus voidaan arvioida ensin silmämääräisellä tarkistuksella ja sitten radiograafisella tarkistuksella. Kaikki viat eivät näy valitettavasti

näilläkin tarkastustekniikoilla, mikäli ne ovat sopivassa kulmassa tarkastelukulmaan nähden. Tämän jälkeen virhe puhdistetaan huolellisesti ja halkeaman päät merkitään. Halkeama poistetaan kokonaan tai hiotaan osittain riippuen materiaalipaksuudesta ja siitä, ulottuuko halkeama läpi materiaalin. Reikien poraaminen halkeaman päähän on eduksi (TWI, 2019c). Navair suosittelee poistamaan myös vanhan lisäaineen ja palaneen metallin sekä mikäli hitsataan molemmilta puolilta, tasoittamaan juuren puolen (NAVAIR 01-1A-34, s. 006 02–5, Nieminen 2018). Mahdollisuuksien mukaan seinämältään alle 2 mm vahvuiset titaaniset putket tulisi hitsata ilman railoa ja lisäainetta, koska vieraat materiaalit eivät paranna hitsin laatua (Laaksonen, T. 2019). Hitsauksen jälkeen suoritetaan vaadittu lämpökäsittely, mihin ainakin titaanin kohdalla tulee kiinnittää hiukan huomiota puhtauden vuoksi eli pinnan pitää olla metallisen puhdas saapuessaan lämpökäsittelyyn. Korjattu osa vaatii myös esikäsittelyn suhteen normaalia enemmän huolellisuutta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kappaletta pitää käsitellä puhtailla käsineillä, jotta pintaan ei tule sormista rasvaa tai muita epäpuhtauksia. Ilma-atmosfäärissä titaanin pintaan tulee oksidikerros, joka pitää poistaa, mutta toisaalta se suojaa vedyn vaikutuksilta. Suojakaasu ja alipaine toimivat myös, mutta ovat kustannuksiltaan arvokkaampia (Ekberg 2019). Lopuksi korjatulle osalle tehdään ainetta rikkoman tarkastus hitsausvirheiden varalle. Joillekin osille vaaditaan painetestausta tai muita testejä valmistajan ohjeiden mukaisesti (Silvola, 2019).

3.3 Osan vaihto

Tässäkin tapauksessa korjattava osa puhdistetaan huolellisesti sekä päältä, että juuren puolelta lian aiheuttamien virheiden poissulkemiseksi. Tämän jälkeen tutkitaan hitsissä olevan vian laajuus silmämääräisellä tarkistuksella ja sitten radiograafisella tarkastuksella, jotta uuden hitsin alle ei jäisi piileviä virheitä. Komponentin vaihto korjattavaan putkeen aloitetaan vaurioituneen osan poistamisella ja tämän jälkeen uuden osan ja korjattavan putken liitospintojen valmistelulla. Liitos kannattaa koettaa tehdä kuten alkuperäinenkin ja asennuksessa tulee huomioida oikea asento. Mikäli hitsissä on jokin vika, voi olla eduksi valmistaa varaosa siten, että se jatkuu vanhan hitsikohdan yli ja hitsaus voidaan suorittaa vielä hitsaamattomalle alueelle. Railo puhdistetaan vielä pölystä ja hiontajätteistä ja hitsataan. Hitsauksen jälkeen suoritetaan vaadittu lämpökäsittely ja vielä lopuksi ainetta rikkoman tarkastus hitsausvirheiden varalle (Nieminen 2018). Joillekin osille vaaditaan painetestausta tai muita testejä valmistajan ohjeiden mukaisesti (Silvola, 2019).

3.4 Korjaushitsausprosessi

Johdeputken korjaushitsausprosessiin parhaiten sopii TIG- ja mikroplasmahitsaus. TIG:in etuja ovat lisäaineen syötön hallinta, hyvänmuotoinen ja metallurgisesti puhdas hitsi sekä laitteiston alhainen hinta verrattuna muihin käytössä oleviin prosesseihin. Prosessille mielletystä hitaudesta ei ole haittaa, koska koko korjausmenetelmää ajatellen varsinaiseen hitsaukseen kuluva aika on hyvin vähäinen. Mikroplasmahitsaus on periaatteessa kuristettu TIG, jonka valokaari on TIG:ä kapeampi. Se soveltuu materiaalipaksuuksille 0,1–1 mm. Plasmahitsaus on kuitenkin TIG:ä kalliimpi. Muita prosesseja ei kannata harkita seuraavista syistä:

- MIG/MAG ei ole roiskeeton, eikä tuottavuudesta ole korjaushitsausta ajatellen hyötyä. Myös lisäaineen vaihto on TIG:ä hankalampaa
- Puikkohitsaus ei sovellu hyvin johdeputken materiaalipaksuudelle ja hitsausvirheiden määrä on todennäköisesti suurempi
- Korjaushitsaus on pienten vaurioiden ja yksilöllisten tapausten kohdalla poikkeuksetta käsinhitsausta, joten tyypillisesti mekanisoidusti suoritettavien laserjauhekaari tai plasma -hitsausten suorittaminen on vaikeaa varsinkin, jos vaurio ei ole koko matkaltaan samanmuotoinen tai -suuntainen
- Laserhitsauslaitteiston investointikustannukset ovat tyypillisesti satoja tuhansia euroja ja käyttökustannuksia voivat nostaa kalliiden komponenttien rikkoontumiset ja huoltokustannukset
- Kitkahitsausprosessit eivät tule kysymykseen kappaleiden monimutkaisten muotojen vuoksi, mikä vaikeuttaa muun muassa kiinnitystä.
- Korjaushitsausprosesseja on vertailtu taulukossa 13.

Taulukko 13. Hitsausprosessien vertailua ajatellen titaanin ja ruostumattoman teräksen korjaushitsausta.

Prosessi	TIG	Plasma/mikroplasma	MIG/MAG	Laser
Soveltuvuus ruostumattomalle	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Soveltuvuus titaanille	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Ohutlevyn hitsausominaisuudet	Hyvä	Kohtalainen	Kohtalainen	Hyvä
Joustavuus	Hyvä	Huono	Kohtalainen	Huono
Investointikustannukset	Alhaiset	Kohtalaiset	Alhaiset	Korkeat
Ylläpitokustannukset	Alhaiset	Kohtalaiset	Alhaiset	Korkeat

3.5 Korjaushitsausmenetelmä titaanille

Titaanisten johdeputkien korjaushitsauksen edellytykset ovat puhtaus ja tarpeeksi suuri työtila ilman turhan suuria kustannuksia. Mahdollisia vaihtoehtoja titaanin hitsauksen työtilaksi on esitelty taulukossa 14.

Taulukko 14. Titaanin hitsaukseen soveltuvien työtilojen ja suhteellisten kustannusten vertailua.

	Koko [cm]	Suhteellinen hankinta- kustannus	Suhteellinen käytön kustannus kuukaudessa
Suojakaasukenkä ja tulppasarja	Eri kokoja	16	1,4 ... 3,5
Telttatyypinen hitsauskammio	120 X 50	40,3	2,7...3,9
Kiinteä hitsauskammio	157X76X65	210,5	7,8
Kiinteä kammio esikammioilla	157X76X65	234	7,8
Kiinteä kammio puhdistimella ja esikammioilla	157X76X65	373	7,5

Taulukossa 14 ensimmäinen rivi pitää sisällään edullisimman ratkaisun pieniin korjaushitsauksiin. TIG-hitsaimen liitetään tässä jälkikaasukenkä, jonka tehtävänä on suojata vielä jäähtyvää hitsiä ilman haitallisilta vaikutuksilta. Juuren puolen suojaus tapahtuu juurikaasulla, jota ohjataan putken sisään juurikaasutulppasarjalla. Käytön kustannukset on arvioitu metrin pituisen ja halkaisijaltaan 80 millimetrin kokoisen putken kuudella huuhtelukerralla ja kahden tunnin yhtämittäisellä hitsauksella. Suojakaasun kokonaisvirtaukseksi on arvioitu 23–59 litraa minuutissa, mikä pitää sisällään hitsaimen virtauksen 7–25 litraa minuutissa, juurikaasukengän virtauksen 7–25 litraa minuutissa ja juuren puolen huuhteluvirtauksen 9 litraa minuutissa. Telttatyypisessä hitsauskammiossa osat laitetaan läpinäkyvään pussiin, johon tuodaan läpivientien kautta hitsain ja maadoitin. Kun pussi on suljettu ja läpiviennit tiivistetty, imetään ilma pois pussista ja tämän jälkeen pussiin annetaan virrata suojakaasua, kunnes pussista on muodostunut telttamainen hitsauskammio. Käytön kustannuksia on arvioitu huuhtelemalla kammio kuudella suojakaasun täyttökerralla ja kahden tunnin yhtämittäisellä hitsauksella. Suojakaasun kokonaisvirtaukseksi on tässä arvioitu 16–34 litraa minuutissa, mikä pitää sisällään hitsaimen virtauksen 7–25 litraa minuutissa ja kammion huuhteluvirtauksen 9 litraa minuutissa. Kolme viimeistä vaihtoehtoa ovat kiinteitä ratkaisuja, joissa hitsaustila on metallinen kaappi. Hitsaus tapahtuu läpinäkyvän seinän ja hansikkaiden avulla. Poltin ja maadoitin asennetaan läpivientien kautta. Näissäkin ratkaisuissa tila alipaineistetaan ensin,

minkä jälkeen kammio täytetään suojakaasulla. Toiseksi viimeisessä lisänä on esikammio, millä jo suojakaasulla täytettyyn kammioon voidaan tuoda lisää osia myös kesken hitsauksen. Tästä on etua vaikkapa lisäaineen loppuessa. Viimeisessä kohdassa tarjous pitää sisällään esikammion lisäksi myös puhdistusjärjestelmän, jossa inertin kaasu ympäristön puhtautta voidaan parantaa entisestään ja kaasun huuhtelua vaaditaan vähemmän. Kolmessa viimeiseksi esitetyssä ratkaisussa käytön kustannuksia on arvioitu tekemällä kammioon aloitushuuhtelu joka kuukausi ja kahden tunnin yhtämittaisella hitsauksella. Suojakaasun kokonaisvirtaukseksi on kahdessa ensimmäisessä arvioitu 14 litraa minuutissa ja viimeisessä 10 litraa minuutissa. Kolmessa viimeisessä ratkaisussa kaasun lisäksi kuluja tulee kaapin huoltoon ja ylläpitoon liittyvistä tarvikkeista, joilla varmistetaan laitteiston virheetön toiminta. Toisin kuin telttatyypinen ratkaisu, on kiinteä kammio pitkäikäisempi, koska esimerkiksi kuumalla lisäainelangalla on vaikeampi saada vahinkoa kammion seinämiin. Kaikissa tapauksissa arviointi pitää sisällään pienen varan kulutustarvikkeita varten. Kaasun laskennan perusteena on käytetty argon-suojakaasua, jonka puhtaus (puhtaus 99,998 %) riittää titaanin hitsaukseen. Tämän suojakaasun suhteellinen hinta muihin argonin puhtausasteisiin on nähtävissä taulukosta 15.

Taulukko 15. Hitsauksen suojakaasun suhteellisia hintoja titaanille ja ruostumattomalle teräkselle.

Tuote	Koko [litraa/bar]	Suhteellinen kustannus	Käyttökohde
Argon (puhtaus 99,998 %)	50/200	4,8	Titaani
Argon (puhtaus 99,999 %)	50/200	5,1	Titaani
Ar + 0,03 % NO	50/200	4,2	Ruostumaton teräs
Argon (puhtaus 99,990 %)	50/200	3,6	Ruostumaton teräs

3.6 Korjaushitsausmenetelmä ruostumattomalle teräkselle

Hitsausympäristönä voidaan käyttää samoja ratkaisuja, kuin titaaninkin hitsauksessakin. Mikäli kustannuksissa halutaan säästää, voidaan suojakaasuna käyttää Argonin normaalia puhtausastetta tai typpimonoksidilla seostettua argonia taulukon 15 mukaisesti. Myös kaasun virtauksissa voidaan noudattaa pienempiä virtauksia.

3.7 Korjauksen laatu

Virheetön hitsi voidaan saavuttaa ainoastaan pätevöitetyllä hitsaushenkilöstöllä ja laadunhallinnalla. Hitsauksessa EASA (European Aviation Safety Agency) viittaa käyttämään kansainvälisesti tunnustettuja teollisia standardeja kuten (EASA, 2013).

- AMS-STD-1595A ‘Qualification of Aircraft, Missile and Aerospace Fusion Welders’ SAE International (rauenut 2002)
- AWS D17.1/D17.1M:2010 AMD1 ‘Specification For Fusion Welding For Aerospace Applications’ American Welding Society
- CAAP 33-1:2011 ‘Aircraft Manual Welding - Approvals and Qualifications’ Australian Government Civil Aviation Safety Authority
- CAP 553 BCAR Section A Chapter A8-10 ‘Approval of Welders’ UK Civil Aviation Authority

Standardissa AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1 on kuvattu yleiset vaatimukset koskien ilmailu- ja avaruusliikenteen kaluston hitsausta. Standardissa on esitetty vaatimukset hitsaussuunnittelulle, -henkilöstölle, menetelmän laadullistamiseksi, tarkastukselle sekä ilmailualan, tuki- ja ei-lentävän kaluston hyväksyntäkriteereille. Tärkeimpänä kohtana tätä työtä ajatellen standardi sisältää lisätietoa jo olemassa olevan kaluston korjaushitsauksesta aivan omassa luvussaan 8 (ANSI 2019). Tässä luvussa painotetaan sitä sovellettavan ainoastaan jo palveluksessa olevan lentokaluston kunnossapitoon, eikä valmistuksessa tapahtuvaan korjaushitsaukseen. Korjaukseen käytettävien hitsausohjeiden ja komponenttien tulee vastata OEM-vaatimuksia tai tarkoituksenmukaisia korjauskäsikirjojen ohjeita. Jo aiemmin hyväksyttyä korjausohjetta voidaan jatkaa suunnittelijan suostumuksella. Korjauksen kriittisyydestä riippuen korjausalueelle tehdään rasitusanalyysi ja korjausmenetelmä sekä analyysi tulee hyväksyttäväksi ennen hitsausta. Korjauksen luokittelee suunnittelijataho määrittelemällä tarkastukset ja hyväksyntäraajat. Luokittelu ei saa olla alkuperäistä suunnittelua löyhempi. Mikäli ei-kriittisen alueen hajoaminen voi johtaa kaluston suorituskyvyttömyyteen, tulee analyysi tehdä tällaisenkin alueen korjaukselle. Korjauksen hitsausohjeet tulee laatia standardin luvun 5 mukaisesti. Luvussa 5 määritellään myös vaatimukset hitsaajan näkökyvyille ja eritellään pätevöitysvaatimukset. Hitsauslaitteiston vaatimukset määritellään luvussa 6.3. Korjattu alue tarkastetaan suunnittelijan ohjeistuksen tai luotettavien korjausoppaiden mukaisesti, mutta vähintäänkin

13 mm matkalta. Suunnittelija määrittelee myös oikean tavan maadoitukselle. Kaikki kriittiset ja semikriittiset korjaukset tulee dokumentoida standardin ohjeistuksen mukaisesti (AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1, 2017, s. 5–30, 43, 44).

Standardissa ISO 24394:2008 määritellään hitsaajien ja hitsausoperaattoreiden laadun vaatimukset ilmailualan metallisten sovellusten sulahitsauksessa. Hitsaajaksi nimitetään henkilöä, joka tekee hitsausta pitäen kädessään hitsainta. Hitsausoperaattori puolestaan operoi hitsaavaa laitetta, kuten esimerkiksi robottia tai hitsauspistoolin kuljetinta. Tarkastaja on puolestaan taho, joka vahvistaa käytetyn standardin noudattamisen. Suunnittelija on taho, jolla on vastuu rakenteellisesta eheydestä tai laitteiston ilmailukelpoisuuden ylläpidosta ja kaikkien dokumenttien yhtäpitävyydestä. Hitsauskoordinaattori on taho, joka koordinoi yrityksen hitsaukseen liittyviä asioita, muun muassa hitsaushenkilöstön pätevöintiä (SFS-EN ISO 14731, 2006, s. 18 sekä Lepola et al. 2006, s. 420). Standardissa annetaan myös ohjeet hitsaajan fyysisten ominaisuuksien arvioimiseksi ja ohjeistus vain todistuksen saaneiden hitsaajien tai operaattoreiden ovat valtuutuksesta suorittamaan hitsauksia ilmailualan sovelluksissa. Todistus on voimassa kaksi vuotta, mitä voidaan jatkaa kahdella vuodella, kun suoritetaan uudelleenpätevöitys vastaavalla prosessilla, materiaalityypillä ja tuotetyypillä tai raakatuotetyypillä ja vaatimukset ovat samat kuin alkuperäisessä kokeessa (ISO 24394, 2008, s. 2, 8, 9, 15, 16).

Lisäksi 2021 julkaistaan uusi ISO/AWI 17927 standardisarja, joka käsittelee ilmailualan metallisten komponenttien sulahitsausta. Standardisarja on osa isompaa ilmailualan hitsaustoimintaa ja tarkastuksia koskevaa standardistoa ISO/TC44/SC14. Standardisto pohjautuu pitkälti standardeihin AWS D 17.1 ja DIN 29595 (ISO 2019). Tämän tutkimuksen tekohetkellä vielä luonnosvaiheessa olleessa standardissa ISO/DIS 17927-1:2018 eritellään vaatimukset Ilmailualan sulahitsaussovelluksille. Tätä standardia sovelletaan yhdessä suunnittelijan dokumenttien kanssa ja silloin, mikäli siihen on toimitussopimuksissa viitattu tai ellei suunnittelija ole nimenomaan toisin osoittanut. Standardi käsittää happiavusteisen kaasuhitsauksen, kaasusuojatun kaarihitsauksen sulamattomalla wolframelektrodilla (TIG), plasmakaarihitsauksen, elektronisuihkuhitsauksen ja laserhitsauksen sekä materiaalityypit seuraavasti A–F seuraavasti:

- Materiaaliryhmään A kuuluvat seostamaton ja niukkaseosteinen teräs sekä runsaasti seostetut ferriittiset teräkset
- Materiaaliryhmään B kuuluvat austeniittiset, martensiittiset ja erkamakarkenevat teräkset.
- Materiaaliryhmään C kuuluvat titaani ja titaaniseokset, niobium, zirkonium ja muut reaktiiviset metallit
- Materiaaliryhmään D kuuluvat alumiini- ja magnesiumseokset
- Materiaaliryhmään E kuuluvat ne metallit, jotka eivät kuulu edellisiin ryhmiin, kuten molybdeeni, volframi ja kupari.
- Materiaaliryhmään F kuuluvat nikkeli- ja kobolttiseokset.

Standardissa käydään lisäksi läpi hitsien laatuluokat ja tarkastusten vaatimustasot riskin mukaan sekä eritellään tarkastuksissa käytettävät menetelmät. Kaiken hitsauksen tulee tapahtua WPS:n mukaisesti pätevoitetyn henkilön toimesta. Hitsauksessa tulee käyttää suunnittelijan hyväksymiä hitsausaineita, joissa on standardimerkintä siitä, mitä ne ovat. Hitsauskoneiden pitää olla ylläpidettyjä ja kykeneviä tuottamaan vaatimusten mukaisia hitsejä. Hitsausliitos tulee valmistella suunnittelijan ohjeen mukaisesti. Kaikki hitsattavat ja hitsaukseen vaikuttavat pinnat pitää puhdistaa kuonasta, oksidista, hilseestä, suoja-aineista, öljystä, rasvasta, liasta ja muista epäpuhtauksista. Mekaanisia puhdistusmenetelmiä ovat esimerkiksi harjaus, koneistus ja kaavinta. Kemiallisia menetelmiä ovat alkalinen puhdistus, liuotinpyyhintä tai peittäus. Mikäli suunnittelija ei toisin ole ohjeistanut, titaanin ja titaaniseosten puhdistukseen ei saa käyttää kloorattuja liuottimia tai metyylialkoholia. Ainakin titaanin ja ruostumattoman teräksen harjauksessa tulee käyttää austeniittisiä ruostumattomia teräsharjoja. Suositeltavaa on yksilöidä harja tietylle metallille, ainakin jos kyseessä on alumiini, titaani, nikkelseokset tai koboltti. Puhdistetut pinnat tulee suojata kontaminaatiolta. Silloitushitsauksessa tulee käyttää samoja lisäaineita kuin myöhemmässäkin hitsauksessa ja silloitushitsien tulee täysin sulaa tai poistaa ennen myöhempää hitsausta, ellei suunnittelija muuta ole ohjeistanut. Materiaali tulee hitsin ja lämmölle altistuneen alueen osalta suojata ilmakehän kaasujen kontaminaatiolta. Valokaarta ei saa sytyttää kappaleen muissa osin kuin liitettävillä pinnoilla. Jokainen hitsi tulee olla jäljitettävissä hitsaajaan. Korjauksena pidetään kaikkea suunnittelijan johtamaa osan korjaustoimintaa, joten korjausten tulee olla myös tämän hyväksymiä. Korjausohjeiden tulee olla yksityiskohtaisia ja sisältää ainakin tiedot korjauksen aikana suoritettavien hitsien

enimmäismäärästä, vaadittavasta dokumentoinnista ja ohjeista liittyen jokaiseen korjausoperaatioon niihin kuuluvine tarkastuksineen. Hitsauspöytäkirjoissa tulee olla merkinnät ainakin hitsausaineista, kalibroinneista, prosessinaikaisista korjauksista, uudelleentyöstöstä ja korjauksista niin kuin suunnittelija on vaatinut. Pöytäkirjoja tulee säilyttää ainakin suunnittelijan määrittelemä aika ja kirjoitettuihin dokumentteihin tulee olla suunnittelijalla pääsy sitä pyydettyä (ISO/DIS 17927-1 2018, s. 1–15).

Standardissa ISO/DIS 17927-2 käsitellään hitsien hyväksyntäraajat tässä tutkimuksessa käsitellyille materiaaleille ja hitsausprosesseille ja sitä sovelletaan, mikäli suunnittelija on niin hyväksynyt. Suunnittelijan ohjeistus on ensisijainen. Standardissa käsitellään kolme laatuluokkaa A:sta C:hen, joista A on vaativin. Ohjeet annetaan muun muassa halkeamien, huokosten, muotovirheiden ja liitosvirheiden sallituille kokoluokille. Titaanille on esitetty sallitut värinsä, mitä on verrattu taulukossa 16 jo aiemmin esitettyihin taulukoihin 4 ja 8. Ruostumattoman teräksen tapauksessa kaikki muut värit sallitaan, paitsi musta (ISO/DIS 17927-2 2019, s. 1–8).

Taulukko 16. Titaanin hapettumisvärien vertailua eri ohjeiden välillä. Taulukossa H tarkoittaa hyväksyttyä ja X hylättyä (ISO/DIS 17927-2 2019, s. 8, AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1, 2017, s. 39, NAVAIR 01-1A-34, s. 007 06-4, Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 321).

ISO 17927, AWS D17.1				NAVAIR	Hitsauksen materiaalioppi
Hitsin väri	A	B	C	Seuraus ja käsittely	Seuraus ja käsittely
Hopea	H	H	H	Oikea suojaus, ei korjattavaa	Ei vaadi toimenpiteitä
Vaalea oljenkelt.				Pinnan oxidoituminen, poista harjaamalla uudella ruostumattomalla teräsharjalla.	Värjäytyminen poistetaan ruostumattomalla teräsharjalla ennen seuraavan palon hitsausta
Tumma oljenkelt.	H	H	H		
Pronssi	H	H	H	-	-
Ruskea	H	H	H	-	-
Violetti	X	H	H	-	Hitsialueen poisto, kaasusuojausten parannus
Vihreä	X	H	H	-	-
Sininen	X	X	X	Metallin kontaminoituminen. Hitsin poisto ja uudellenhitsaus, kun kaasusuojaus korjattu.	Hitsipalko viereisine alueineen poistettava, kaasunsuojausta parannettava.
Harmaan sininen	X	X	X		
Harmaa					
Keltainen	-	-	-	Metallin kontaminoituminen.	-
Harmaa	X	X	X	Hitsi tulee poistaa ja tehdä uudestaan, kun korjaukset kaasusuojauksessa on tehty.	Poista hitsi ja viereinen alue täydellisesti, tarkasta suojakaasujärjestelmä vuodoilta.
Valkoinen	X	X	X		

3.8 Hitsaajan pätevöittäminen

Hitsaajan pätevöittäminen kulurakenteen arviointi osoittautui odotettua hankalammaksi. Kolmea taho haastateltiin saamatta toivottua tulosta. BCAR:n (British Civil Airworthiness Requirements) mukainen pätevöittäminen on mahdollista hankkia palveluna. Toinen taho käytti tässäkin työssä läpi käytyä ISO 24394 -standardia, mutta hekin pätevöittävät hitsarinsa itse, koska koulutusta ei tarjoa kukaan. Kolmas taho suositteli käyttämään pätevöittämiseen ISO 24394 -standardia ja pätevöitys voisi mahdollisesti onnistua heilläkin.

3.9 Muut laatutekijät

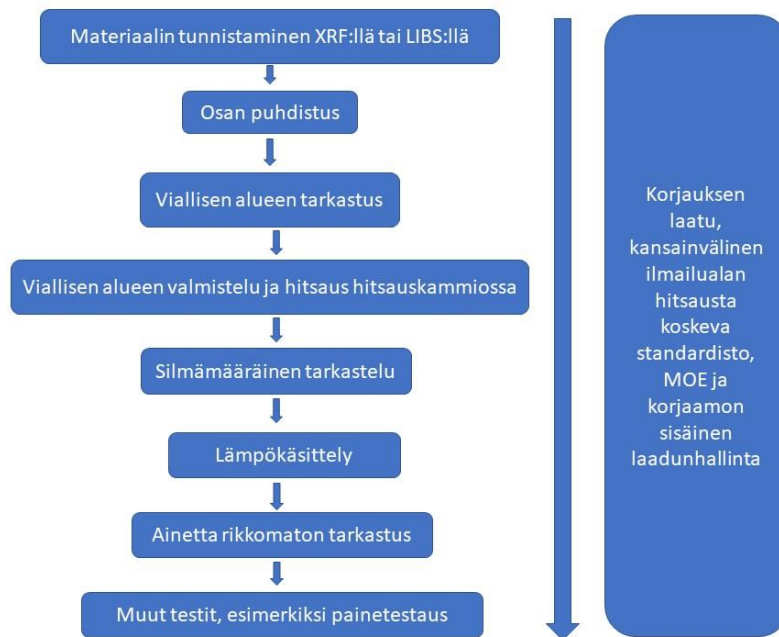
Hitsaus tarkastuksineen tulee kuvata ilmailualan yrityksen MOE:ssa (Maintenance Organisation Exposition) kohdassa 3.11. MOE on formaalinen dokumentti, jossa on kuvattu, miten ilmailualan kunnossapitoyksikkö suoriutuu laadullisesti sille asetetuista määräyksistä (Finnish Military Aviation Authority, 2007).

Hitsauksen laadunhallintaan yrityksen sisällä oiva työkalu on Weldeye-ohjelmisto, joka on universaali ratkaisu hitsauksen hallintaan. Se on suunniteltu tekemään jokapäiväiset hitsauksen, laadun ja valmistuksen tehtävät helpommiksi. Se tarjoaa työkaluja WPS:ssien, WPQR:ssien, hitsaushenkilöstön ja heidän pätevyksiensä sekä dokumentoinnin hallintaan, hitsausparametrien seuraamiseen ja lämmöntunnin verifiointiin (Kemppe 2018b).

Kansainvälisen hitsausinsinöörin suorittanut henkilö voi toimia yrityksen hitsauskoordinaattorina ja ohjata hitsauksen laadukasta suorittamista. Hänen tehtäviinsä kuuluu muun muassa hitsausohjeiden laadinta ja hitsausaineista huolehtiminen sekä hitsaushenkilöstön pätevyyksistä huolehtiminen. Hitsauskoordinaattorin tehtävät on tarkemmin ohjeistettu standardissa SFS-EN ISO 14731. Hitsausinsinöörin (IWE) koulutus koulutus kestää tyypillisesti noin vuoden.

3.10 Yhteenveto korjaushitsausmenetelmistä koetta varten

Kuvassa viisi on käyty tässä luvussa käsitelty korjaushitsausmenetelmä kootusti läpi kaavion muodossa. Korjaushitsausmenetelmä todennetaan seuraavassa luvussa esiteltävällä kokeella.



Kuva 5. Havainnekuva korjaushitsauksen kulusta.

4 PUTKISTON OSAN HITSAUSKOKEET

Edellä mainittuja ohjeita päätettiin tutkia käytännössä niiden toimivuuden testaamiseksi. Hitsauskokeet päätettiin tehdä materiaaleista kriittisemmälle eli titaanille. Erilaisia testauksia käsitellään ainakin standardeissa

- SFS-EN ISO 15614-5: Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Menetelmäkokeet. Osa 5: Titaanin ja sirkoniumin sekä niiden seosten kaarihitsaus
- ISO/DIS 17927-1: Welding for Aerospace Applications – Fusion Welding of Metallic Components
- ISO 24394:2008: Welding for aerospace applications — Qualification test for welders and welding operators — Fusion welding of metallic components

Hitsaukset ovat ilmailualalla tarkkaan ohjeistettuja prosesseja ja niiden laadusta huolehditaan hitsaajan pätevöityksillä ja materiaalitarkastuksin. Hitsien tekeminen uusiin, prosessoimattomiin materiaaleihin ei anna oikeaa kuvaa korjaushitsausten onnistumisesta, sillä ajan kuluessa käytöstä koituneet vaikutukset jäisivät huomioimatta. Tällaisia ovat muun muassa materiaaliin kontaminoitunut epäpuhtaus ja mahdolliset jännitysvaihtelujen aiheuttamat muutokset. Korjaustilanteessa hitsi voidaan joutua tekemään myös vanhan hitsin päälle, mikä on eri asia, kuin tuotantohitsaus neitseelliseen valmisteltuun osaan. Yksi tärkeä tekijä on myös todeta railonvalmistuksen onnistuminen esimerkiksi siitä jääneiden epäpuhtauksien suhteen. Niinpä hitsaustestit päätettiin tehdä käytettyyn, titaanista valmistettuun johdeputkeen.

4.1 Koeputken materiaalin tunnistaminen

Hitsausta on mahdotonta suorittaa onnistuneesti, mikäli putken materiaalia ei voida tarkasti tunnistaa. Jos hitsaus tehdään vanhan hitsin päälle, olisi hyvä saada tietoa myös hitsauksessa käytetystä lisäaineesta. Mikäli putkimateriaaliin on liitetty lastuamalla valmistettu osa, saattaa tämä hyvinkin olla eri seosta, joten senkin materiaalista tarvittaisiin analyysi. Hitsauskohteeksi valittiin kuvan 6 mukainen, ulkohalkaisijaltaan 63,6 mm johdeputki, jonka aiemmasta käytöstä ei ole tietoa. Hylkäyksen peruste on ollut muotovirhe putken liitospäässä. Putki testataan LIBS-menetelmällä, koska uusi tämän tekniikan laite on mahdollista saada testauskäyttöön työtä varten.



Kuva 6. Koehitsaukseen valittu titaaninen johdeputki.

4.2 Koehitsausten suorittaminen

Koska työn tilaajalla ei vielä tässä vaiheessa ole käytössään titaanille sopivaa hitsausympäristöä, vaan sitä vasta tutkitaan, päätettiin koehitsaukset tehdä alihankkijalla vastaavassa ympäristössä — suojakaasu-ympäristöllisessä hitsauskaapissa.

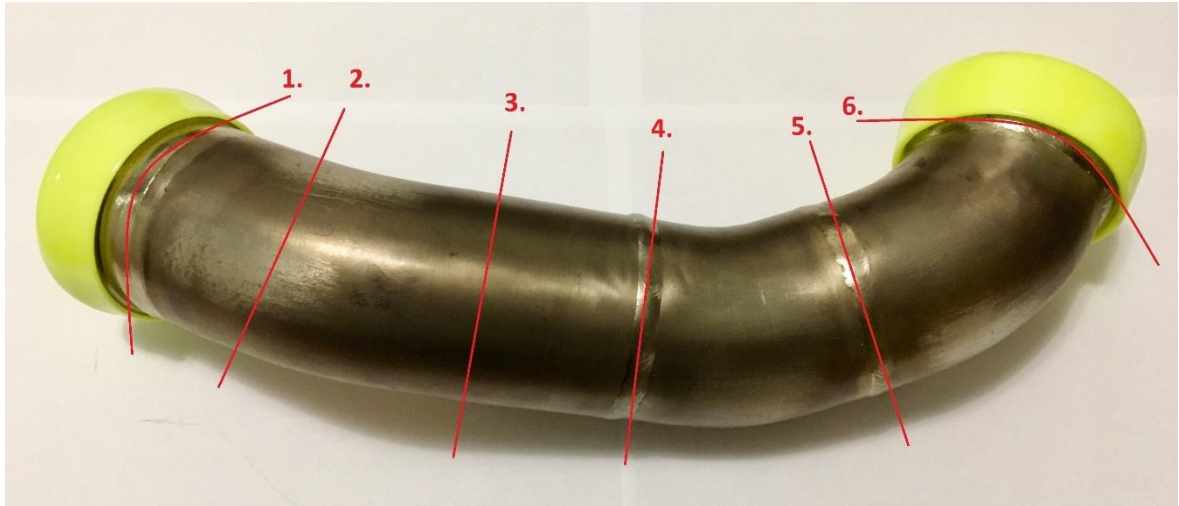
Putkelle päätettiin tehdä kolme erityyppistä hitsaustestiä:

1. Päittäisliitos hitsaamattomaan kohtaan
2. Päittäisliitos hitsattuun kohtaan
3. Päittäisliitos laipan asentamiseksi

Näistä ensimmäisen ja toisen tarkoituksena on testata aiemman hitsin vaikutusta uuden hitsin laatuun. Päittäisliitos hitsaamattomaan kohtaan edustaa tietysti parempaa lähtökohtaa. Päittäisliitos liitospään asentamiseksi havainnollistaa lastutun osan metallurgista vaikutusta hitsiin. Koska putken määrä on rajallinen, tehdään kutakin hitsiä kaksi kappaletta jalkoasennossa. Hitsausprosessina käytetään TIG:ä. Hitsaus ohjeistetaan liitteenä III olevalla pWPS:llä.

4.3 Testikappaleiden valmistus

Testikappaleet valmistetaan putkesta sahaamalla kuvan 7 mukaisesti.



Kuva 7. Viivajaotukset yhdestä kuuteen edustavat sahauskohtia sekä myöhemmin liitoskohtia. Päittäisliitoksia hitsaamattomaan kohtaan edustavat sektiot 2 ja 3, päittäisliitosta hitsattuun kohtaan sektiot 4 ja 5 sekä päittäisliitosta laipan asentamiseksi osiot 1 ja 6. Viimeksi mainituissa kohdissa tulee vanha hitsi poistaa täydellisesti niin liitospäästä kuin putkestakin. Kohdissa 4 ja 5 näin ei tarvitse tehdä, sillä ajatuksena oli nimenomaan tutkia vanhan hitsin vaikutusta.

Sahauspinta viilataan tasaiseksi siten, että sahausuomiin ei jää piileviä epäpuhtauksia. Samalla viilauksella poistetaan sahauspurseet ja terävät reunat. Viilan tulee olla puhdas vierasmetalleista. Mahdolliset tummumat, pinnalla oleva lika ja oksidikalvo poistetaan vielä vierasmetalleista vapaalla ruostumattomalla teräsharjalla. Tämän jälkeen hitsattavat pinnat puhdistetaan mahdollisuuksien mukaan ilmailualan hyväksymällä puhdistusprosessilla kuvan 4 mukaan, mutta ainakin tehdään puhdistus erityispuhtaalla asetonilla ja puhtaalla, deionisoidulla vedellä. Tarvittaessa voidaan pinta lisäksi peitata (2-4%) fluorivetyhappo - (30-40 %) typpihappo -liuoksella, minkä jälkeen huuhtelu puhtaalla deionisoidulla vedellä. Pinta voidaan kuivata kuumailmapuhaltimella, mutta liikaa kuumennusta tulee varoa. Tämän jälkeen voidaan suorittaa hitsaus liitteenä olevan pWPS:n mukaisilla hitsausarvoilla suojakaasukammiossa. Päittäisliitoksissa liitospään asentamiseksi tulee vanha hitsi poistaa täydellisesti niin liitospäästä kuin putkestakin.

4.4 Tarkastukset

Jo aiemmin hitsattuihin kohtiin tehdään radiograafinen tarkastus ennen putkien sahausta. Hitsauksen jälkeen tehdään silmämääräinen tarkastus kaasusaastumisen toteamiseksi ja hitsin mahdollisten pinnallisten virheiden havaitsemiseksi. Lisäksi lämpökäsittelyn jälkeen tehdään tunkemanestetarkastus pintaan asti ulottuvien virheiden ja huokosten toteamiseksi. Tämän jälkeen suoritetaan radiografinen tarkastus hitsin sisäisten virheiden havaitsemiseksi (Nieminen & Kotamies).

4.5 Testit

Hitseistä tehdään hiet ja tutkitaan kovuudet perusaineen, muutosvyöhykkeen ja hitsiaineen alueelta. Myös tämä kertoo kaasusaastumisesta, sillä suojakaasuun sekoittunut ilma kovettaa hitsiä (Aho-Mantila, Heikinheimo, Pihkakoski, Saarinen, 1989, s. 20, 21). Johtuen koepalojen pienestä koosta, ei kovuusmittauksen lisäksi juuri muita mekaanisia ominaisuuksia testaavia kokeita voida tehdä. Kuitenkin päittäisliitoksesta kolmannen sahauskohdan kohdilta yritetään toteuttaa poikittaisia vetokoesauvoja kaksi kappaletta, jotta saadaan näkökulmaa hitsausliitoksen lujuuteen (Aho-Mantila, Heikinheimo, Pihkakoski, Saarinen, 1989, s. 19).

5 TULOKSET

Koehitsaukset alkoivat materiaalin tunnistuksella edeten siitä tarkastusten kautta hitsaukseen ja siitä edelleen tarkastuksiin ja lämpökäsittelyyn. Viimeisenä seurasi rikkova aineenkoetus. Koehitsauksissa edettiin oikeita hitsausparametreja kohden säätämällä hitsauksen lämmöntuontiin liittyviä tekijöitä ja muuttamalla kuljetustekniikkaa koko hitsauksen ajan.

5.1 Alkuainetarkastus ennen hitsausta

Putkelle tehtiin LIBS-menetelmällä alkuaineanalyysi, jonka tulokset on esitetty taulukossa 17, tarkempi mittauspöytäkirja liitetty liitteeksi 4. Titaanin suuren pitoisuuden vuoksi ja muiden seosaineiden vähyyden vuoksi putki ja sen osat sopivat lähinnä kaupalliseksi puhtaaksi titaaniksi, jota itse laitekin ehdotti.

Taulukko 17. Koeputkelle tehty alkuaineanalyysi LIBS-analyysillä ja vertailu vastaaviin kaupallisiin puhtaisiin titaanilaatuihin. (Fort Wayne Metals 2019).

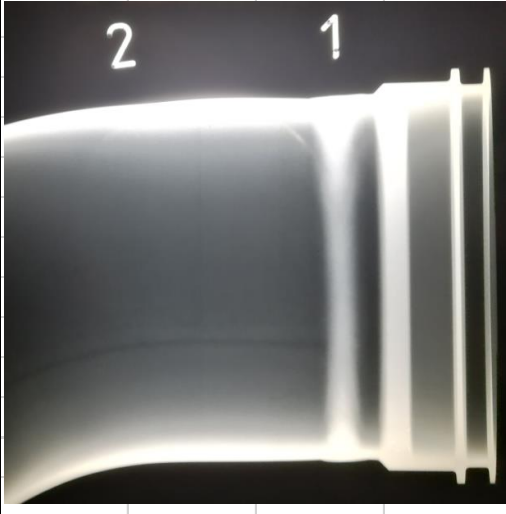
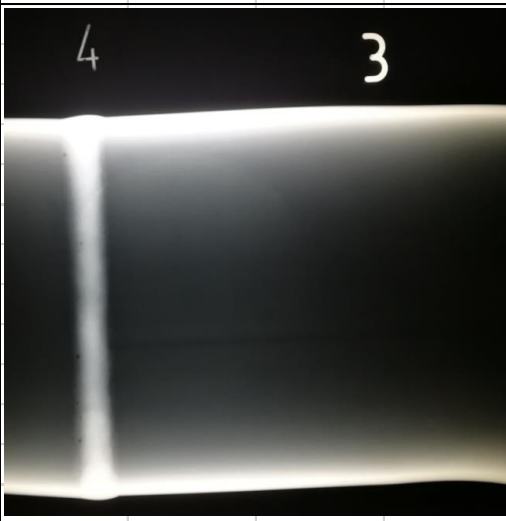
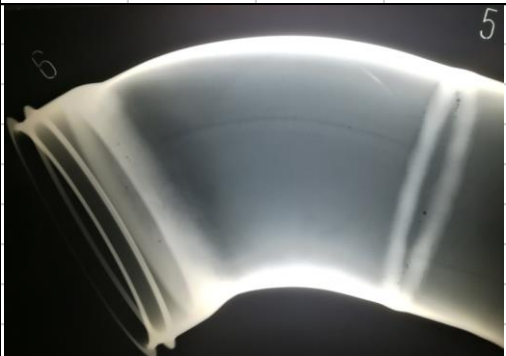
		Ti	Sn	Fe			
Laippapinta	Keskiarvo	99,77	0,08	0,12			
	Keskihajonta	0,05	0,05	0,01			
Putki	Keskiarvo	99,10	0,16	0,15			
	Keskihajonta	1,75	0,24	0,07			
Hitsi	Keskiarvo	99,78	0,03	0,14			
	Keskihajonta	0,06	0,03	0,01			
		Ti min. [bal.]	N (max)	Fe (max)	C (max)	H (max)	O (max)
CP titanium	Grade 1	99,495	0,03	0,2	0,08	0,015	0,18
	Grade 2	99,325	0,03	0,3	0,08	0,015	0,25
	Grade 3	99,205	0,05	0,3	0,08	0,015	0,35
	Grade 4	98,955	0,05	0,5	0,08	0,015	0,4

5.2 Radiografinen tarkastus ennen hitsausta

Kaikkiin kuuteen hitsattavaan kohtaan tehtiin radiografinen tarkastus ennen hitsausta SFS-EN 13480-5:sen mukaan. Koska putki ei enää mene lentokonekäyttöön, päätettiin kuvaus tehdä vain yhdestä suunnasta. Muutoin kuvaus tehtäisiin kahdesta suunnasta, jotta säteilyn suunnassa liian paksuksi muodostuvat seinämätkin saataisiin kuvattua tarkasti. Pientä

huokoisuutta lukuun ottamatta putken jo hitsatut kohdat olivat kunnossa ja vielä hitsaamattomat kohdat täysin puhtaat. Tarkastetut kohdat on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Koeputken kuuteen kohtaan tehtyt radiograafiset kuvat ennen katkaisua ja hitsausta.

	<p>Ennen katkaisua kohdassa 1 ei virheitä.</p> <p>Ennen katkaisua kohdassa 2 ei virheitä.</p>
	<p>Ennen katkaisua kohdassa 3 ei virheitä.</p> <p>Ennen katkaisua kohdassa 4 yksittäisiä huokosia.</p>
	<p>Ennen katkaisua kohdassa 5 huokoisuutta ja huokosjonoa.</p> <p>Ennen katkaisua kohdassa 6 yksittäisiä huokosia.</p>

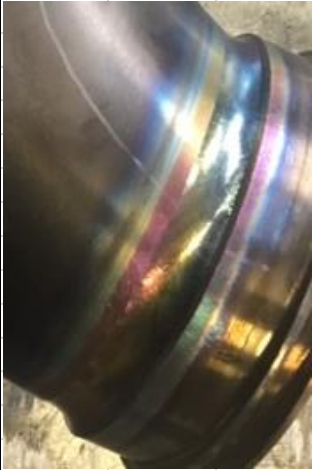
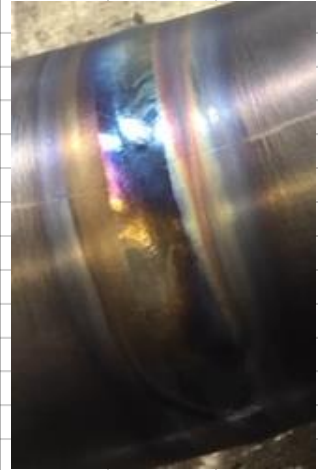




5.3 Hitsauksen suorittaminen

Hitsausten suorituspaikan löytäminen oli erittäin ongelmallista, koska titaanin työstäminen ei ole Suomessa yhtä tavallista, kuin terästen tai alumiinin. Valtaosa löydetyistä yrityksistäkin hitsaa titaanit käyttäen kaasukenkää ja juurikaasua. Sopiva hitsaaja ja putken kipinätyöstöleikkaaja löytyivät kuitenkin viimeinkin pääkaupunkiseudun läheltä. Hitsaukset suoritettiin ilman lisäainelankaa mekanisoidusti pyörityslaitteella pienessä kaapissa, joka pystyttiin täyttämään suojakaasulla (kuva 8). Alipainetta kaappiin ei pystytty imemään ennen suojakaasutäyttöä eikä hapen määrää kaapissa myöskään pystytty tarkasti kontrolloimaan. Alustavan hitsausohjeen korjatut arvot näkyvät taulukossa 20 ja kuvat hitseistä sekä niihin liittyvät oleelliset tiedot taulukossa 19. Oleellinen syy muutokseen oli putken seinämän varmistuminen 1,6 mm paksuksi.



Kuva 8. Koehitsauksiin käytetty hitsauskaappi.

Taulukko 19. Koehitsaukset ja niissä hitsausarvoihin tehdyt korjaukset.

	<p>1. hitsi Laipan vaihto (6.)</p> <p>Hitsausarvot taulukon 15 mukaan</p>		<p>2. hitsi Hitsaus vanhan hit- sin päälle (5.)</p> <p>Lisäkaasusuutin lisätty.</p> <p>Arvot muuten samat.</p>
	<p>3. hitsi Laipan vaihto (1.)</p> <p>Hitsi hitsattu seit- semässä osassa välillä jäähdyttäen.</p>		<p>4. hitsi Hitsaus uuteen kohtaan (2.)</p> <p>Kaasulinssi vaih- dettu numeroon 7.</p>
	<p>5. hitsi Hitsaus uuteen kohtaan (3.)</p> <p>Hitsausvirta pienen- netty 90 A:iin.</p> <p>Juurivirheen vuoksi hitsattu kahteen kertaan.</p>		<p>6. hitsi Hitsaus vanhan hit- sin päälle (4.)</p> <p>Virta nostettu taka- isin 95 A:iin.</p>

Taulukko 20. Koehitsaukseen pWPS:n pohjalta muuttuneet hitsausarvot.

Elektrodi:	Migatronic Super Blue
Elektrodin halkaisija:	1,6 mm
Teroituskulma:	30 astetta
Kaasukupu:	No 5, linssi
Suojakaasun virtaus:	22 l/min
Juurikaasun virtaus:	22 l/min
Etukaasun aika:	0,2 s
Aloitusvirta:	25 % / 95 A
Virran nousuaika:	0,2 s
Hitsausvirta:	95 A
Pulssitussuhde ajallisesti (alavirta/ylävirta):	0,1 s / 0,1 s
Alavirta:	11% / 95 A
Lopetusvirta:	6 % /95 A
Virran laskuaika:	6 s
Jälkikaasun aika:	10 s
Kuljetusnopeus:	92 mm/min

5.4 Visuaalinen tarkastus

Hitseissä yksi ja kaksi havaittiin kuvan 9 mukaisesti selkeitä kaasusaastumisen vaikutuksia, jotka voidaan havaita sinisen ja violetin väristä. Hitseissä neljä ja kuusi kaasusaastumista ei juuri enää silmämääräisesti havaittu. Hitsissä numero 5 kaasusaastumista oli hiukan muutosvyöhykkeen reunoilla. Hitsit olivat pääsääntöisesti muuten onnistuneita lukuun ottamatta kuvassa 10 havaittavia vajaata juuren sulamista hitsin 1 kohdalla ja hitsin vajonnutta kupua hitsin neljä kohdalla.



Kuva 9. Koehitsausten kaasusaastuneita kohtia.



Kuva 10. Visuaalisessa tarkastuksessa vasemmalla kuvassa yksi havaittu vajaa juuri ja oikealla vajaa kupu.

5.5 Lämpökäsittely

Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa tarvittut lämpökäsittelyt toteutettiin jännityksenpoistohehkuksena. Lämpökäsittely aloitettiin tarkastelemalla uunin lämpömittarin näyttämää vertaamalla sitä infrapunalämpömittarilla sattumanvaraisesti uunin sisältä otettuihin pistemittauksiin. Pistemittauksissa saatu suurin lukema oli 341 °C mittarin näyttäessä 350 °C. Uunin näyttämä säädettiin 550 °C:een ja putki asetettiin tähän lämpötilaan tunniksi ja 15 minuutiksi. Lämpötila on Navairin suosituksen ylärajoilla (taulukko 9), mutta titaaneja jännityksenpoistohehkutetaan myös 700 °C:ssa, viimeisteltyjä pintoja harvoin kuitenkin kuumemmassa kuin 550 °C:ssa. Uunissa ei ollut mahdollista käyttää suojakaasua tai tyhjiötä. Lämpökäsitelty putki kuitenkin reagoi ilman kanssa kuvan 11 mukaisesti. Erityisesti värimuutosta havaittiin hitseissä. Myös tussin merkinnät ovat saattaneet aiheuttaa kontaminaatiota.

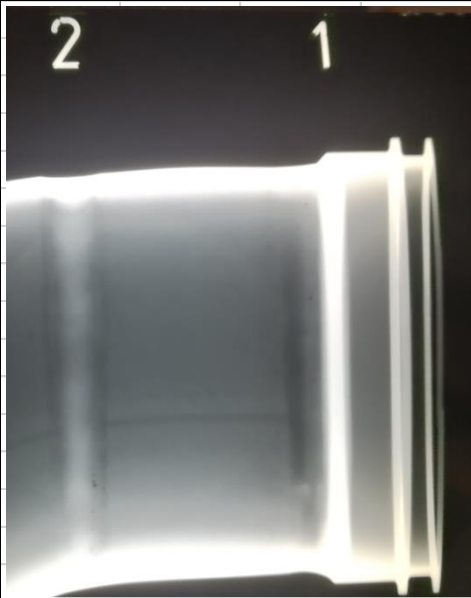




Kuva 11. Koehitsattu putki lämpökäsittelyn jälkeen

5.6 Radiografinen tarkastus hitsauksen jälkeen

Myös kaikki kuusi jo hitsattua kohtaa tarkastettiin radiografisesti SFS-EN 13480-5:sen mukaan. Kuvaukset tehtiin edelleenkin vain yhdestä ja samasta suunnasta kuin ennen hitsausiakin. Radiografiset kuvat ja lausunnot voidaan havaita taulukosta 21 ja koko mittauspöytäkirja on liitetty liitteeksi viisi.

Taulukko 21. Koeputken kuuteen kohtaan tehdyt radiograafiset kuvat katkaisun ja hitsauksen jälkeen.

	<p>Kohta 1 - hitsi 3 Kohta 2 - hitsi 4</p> <p>Kohdassa yksi havaittu hitsauksen jälkeen vajaata juurikupua ja yksittäisiä huokosia.</p> <p>Kohdassa kaksi havaittu hitsauksen jälkeen huokoisuutta ja vajaata kupua.</p>
	<p>Kohta 3 - hitsi 5 Kohta 4 - hitsi 6</p> <p>Kohdassa kolme hitsauksen jälkeen havaittu yksittäisiä huokosia ja huokosryhmiä.</p> <p>Kohdassa neljä uudelleen-hitsauksen jälkeen huokoisuus lisääntynyt entisestään.</p>
	<p>Kohta 5 - hitsi 2 Kohta 6 - hitsi 1</p> <p>Kohdassa 5 havaittu hitsauksen jälkeen liitosvirhe ja huokoisuus on lisääntynyt.</p> <p>Kohdassa kuusi hitsauksen jälkeen havaittu vajaa hitsautumissyvyys ja yksittäisiä huokosia.</p>

5.7 Tunkemanestetarkastus

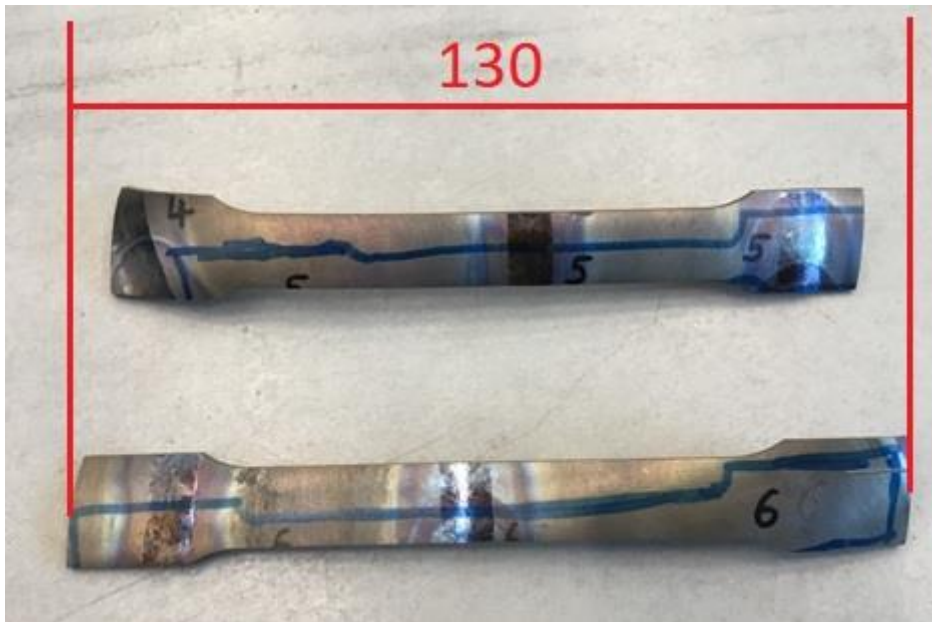
Tunkemanestetarkastus kaikkiin kuuteen hitsattuun kohtaan tehtiin SFS-EN 13480-5:sen mukaan. Tunkemanestetarkastuksessa ei kuvan 12 mukaisesti havaittu näyttämiä.



Kuva 12. Tunkemanestetarkastus koehitsattuun putkeen

5.8 Poikittainen vetokoe

Vetokoesauvat leikattiin hitsatusta putkesta kipinätyöstönä lankasahaamalla. Putken muodosta johtuen standardin SFS 3475 -mukaisia litteitä kiilaistukkasauvoja ei voitu toteuttaa, mutta sauvoihin saatiin kuitenkin uuman muoto, uuman alueelle tasainen 12-12,2 millimetrin leveys sekä hitsit viisi (kohta 3) ja kuusi (kohta 4) uuman kohdalle kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13. Koehitsatusta putkesta lankasahaamalla valmistetut vetokoesauvat.

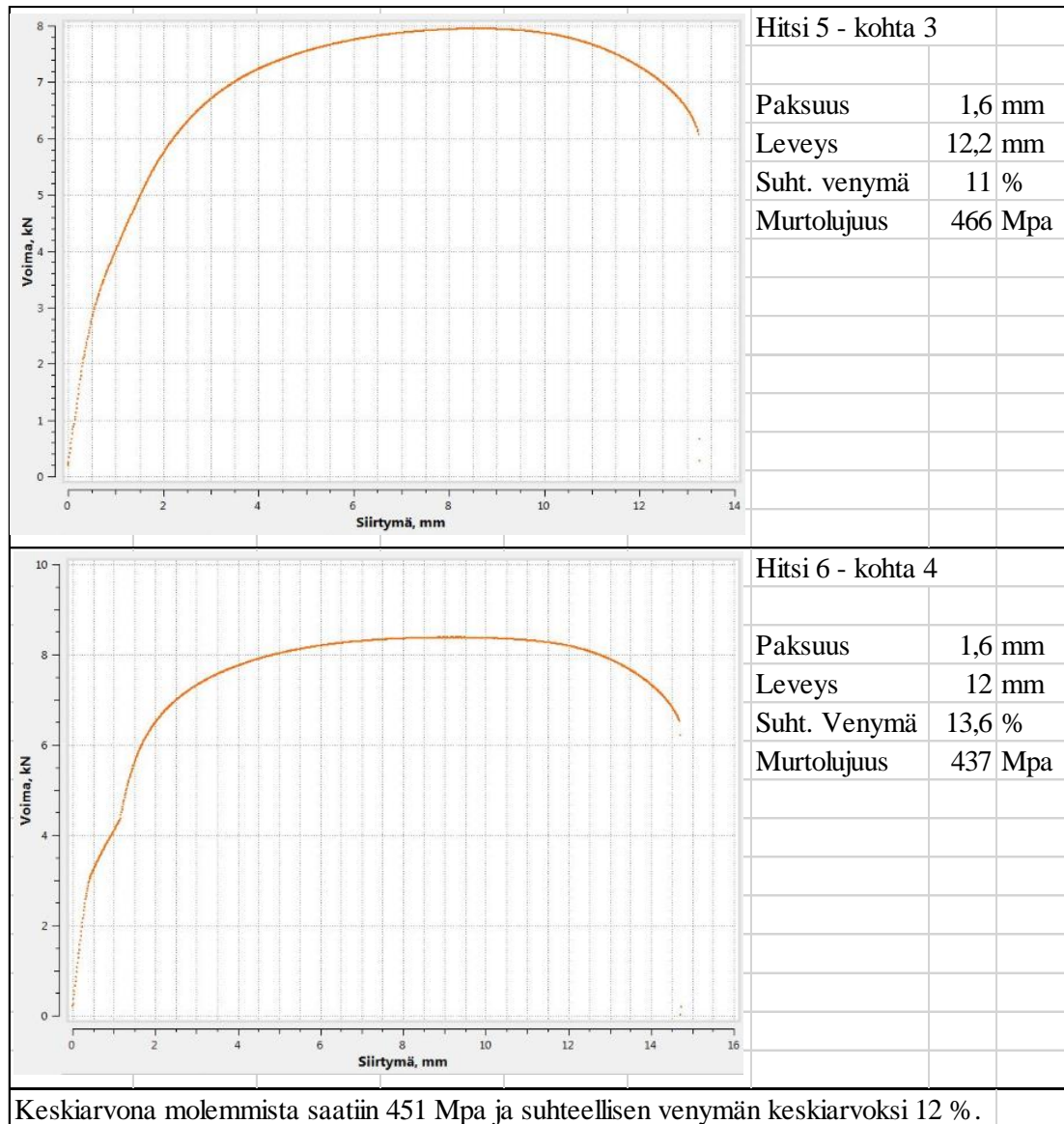
Molemmissa kokeissa sauvat murtuivat muusta kuin hitsin kohdasta tai aivan sen vierestä (kuva 14).



Kuva 14. Vetokoesauvojen murtumakohdat.

Vetokoesauvojen perusteella saatiin taulukon 22 mukaiset jännitys-venymäkäyrät. Koska hitsiä kuusi edustavan sauvan käyrässä havaittiin siirtymä, päätettiin suhteelliset venymät laskea manuaalisesti mittaamalla uuman pituus ennen ja jälkeen. Siirtymä saattaa johtua sauvan luiskahtamisesta leukojen välissä.

Taulukko 22. Vetokokeiden perusteella saadut laskennalliset tulokset.

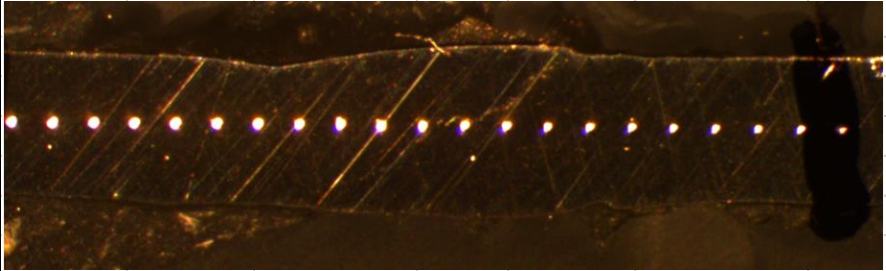
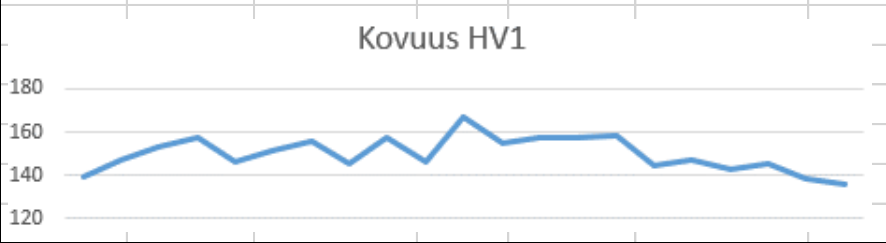
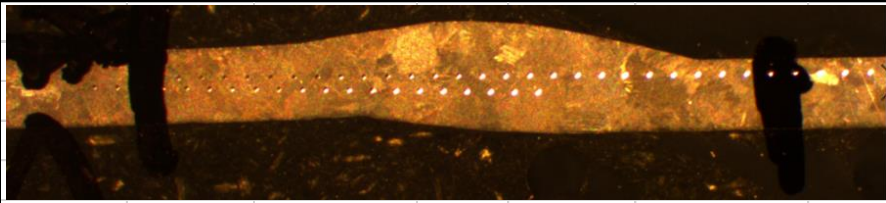
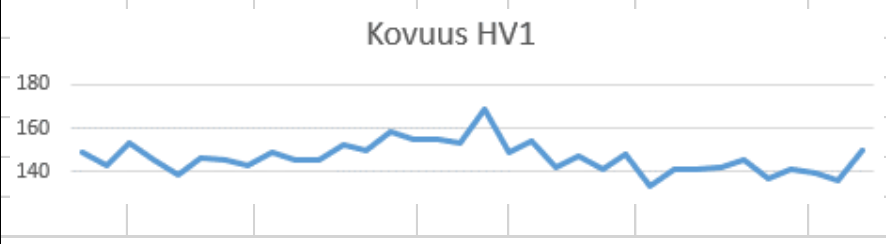


5.9 Kovuusmittaukset

Hitseistä viisi ja kuusi leikattiin sopivan kokoiset palat ja niistä tehtiin kovuuden mittausta varten hiepalat. Ongelmaksi muodostui titaanin syövyttämiseen tarvittavan Keller's agentin valmistus, koska siinä tarvittava ainesosa, fluorivetyhappo, on erityisen vaarallinen myrkyllisyytensä vuoksi (Carlroth 2016). Kovuusmittaukset tehtiin Vicker'sin

kovuuskokeena tasolla HV1. Hitsille viisi tehtiin poikittaissuunnassa 21 mittausta ja hitsille kuusi 36 mittausta, joista kaksi poistettiin virhepoikkeaman vuoksi. Poikkeama saattoi johtua huokoseen osumisesta. Näistä saadut tulokset voidaan lukea taulukosta 23.

Taulukko 23. Kovuusmittaukset hitseistä 5 ja 6.

	Hitsi 5 (kohta 3), HV1	
 <p style="text-align: center;">Kovuus HV1</p>	Max 167	
	Min 136	
	Vaihteluväli 31	
	Keskiarvo 150	
	Keskiahajonta 8	
	Hitsi 6 (kohta 4), HV1	
 <p style="text-align: center;">Kovuus HV1</p>	Min 133	
	Max 169	
	Vaihteluväli 36	
	Keskiarvo 146	
	Keskiahajonta 7	
<p>Huom. Hitsin 6 käyrältä poistettiin kaksi mittauspistettä, joiden kovuus oli selkeästi alhaisempi luultavasti huokoseen osumisesta tai muun virheen vuoksi.</p>		

5.10 Tulosten koonti

Taulukkoon 24 on koottu edellä esitetyistä tuloksista olennaisimmat seuraavassa luvussa käytävää analysointia varten.

Taulukko 24. Olennaisten tulosten koonti.

Materiaali:	Kaupallinen puhdas titaani
Radiografinen tarkastus ennen hitsausta:	Vähäistä huokoisuutta ja huokosjonoa
Elektrodin halkaisija ja virta:	1,6 mm ja 90–95 A
Suoja- ja juurikaasun virtaus:	22 ja 22 l/min, kupu no 7
Kuljetusnopeus:	92 mm/min
Tauottaminen:	Seitsemässä osassa välillä jäähdyttäen
Visuaalinen tarkastus:	Kaasusaastumista (vähentyy viimeistä hitsiä kohden), hiukan vajautta joissakin kuvuissa ja juurissa.
Lämpökäsittely:	550 °C, 1 h ja 15 min, jäähdytys ilmaan Pinnan hapettumista
Radiografinen tarkastus hitsauksen jälkeen:	Huokoisuus lisääntynyt
Tunkemanestetarkastus:	Ei näyttämiä
Rikkova aineenkoetus:	Murtolujuus 451 Mpa Suhteellinen venymä 12 % Kovuus (HV1) enintään 169 Kovuuden vaihtelu enintään 36 yksikköä

6 KOEHITSAUSTULOSTEN JA KUSTANNUSTEN ANALYSOINTI

Tässä kappaleessa analysoidaan tuloksia kustannusten ja testien onnistumisen kautta. Lähtökohtaisesti saatujen tulosten perusteella korjaushitsaukset eivät näillä edellytyksillä onnistu ainakaan titaanille huokoisuuden, liitosvirheiden ja värivirheiden vuoksi.

6.1 Korjaushitsauksen kulut

Korjaushitsauksen suhteellisia kuluja on koottu taulukkoon 25. Hitsaustoiminnan on arvioitu olevan siinä määrin vähäistä, että hitsauskoordinoijaksi voidaan kouluttaa jo joku toimipisteessä työskentelevä esimiesasemassa oleva insinööri. Korjaushitsaustoiminnan aloittamisen suhteelliset kustannukset on arvioitu eri tarjousten perusteella olevan suhteellisesti 1126 yksikköä. Kuukaudessa korjaushitsaustoiminnan ylläpito kustantaa 70,4 yksikköä, mikäli putkia korjataan yksi kuukaudessa.

Taulukko 25. Korjaushitsauksen suhteellisia kuluja

Suhteelliset laitekustannukset		
	Materiaalianalysaattori, XRF	323
	Hitsauskammio puhdistimella ja esikammioilla	373
	Hitsauslaite (TIG) ja laadunhallintaohjelmisto	200
	Hitsaimen varustus	1,4
	Mekanisointilaitteisto pyörytykseen	30
Suhteelliset pätevöittämissä kustannukset		
	Hitsaaja (arvioitu)	75
	Hitsauskoordinaattori	124
	Suhteelliset hankintakustannukset yhteensä	1 126
Muut merkittävät kustannukset		
	Kammion käyttö kuukaudessa	7,8
	Putken lämpökäsittely	5,6
	Yhden hitsin NDT-tarkastukset ennen ja jälkeen	6
	Lisäaineet ja muu tarvike	1
	Hitsaajan palkka bruttona	50
	Yhden putken suhteelliset kuukausikustannukset yhteensä	70,4

6.2 Ainetta rikkomattomat tarkastukset

Tunkemanestetarkastus osoitti, että materiaaleista haastavampi eli titaanikin on mahdollista hitsata ilman suoritusteknisiä virheitä. Joissakin hitseissä havaitut liitosvirheet koskivat lähinnä vajaata kupua ja juurenpuolen sulamattomuutta. Tällaiset virheet on mahdollista

korjata hitsauksen parametrejä säätämällä sitä mukaa, kun hitsauskokemusta kohteesta kertyy. Tällaisia parametrejä ovat muun muassa hitsausvirta, hitsaimen asento ja etäisyys sekä lisääinetuonti.

Radiograafinen tarkastus osoitti, että materiaaleista haastavampi eli titaani on erittäin herkkä materiaali kaikelle epäpuhtaudelle. Sama ominaisuus havaittiin myös visuaalisessa tarkastuksessa, jossa hitsin pinnassa havaittiin kaasusaastumisesta kertovaa sinistä väriä. Japanilaisen standardin, WES 7102 mukaan sininen tai purppura väri ei merkittävästi vaikuta hitsin mekaanisiin ominaisuuksiin, mutta harmaa tai vaalean sininen väri johtaa ohuen levyn oleelliseen iskusitkeyden heikkenemiseen (Aho-Mantila, Heikinheimo, Pihkakoski, Saarinen, 1989, s. 44). NAVAIR:in ohjeistuksen mukaan kumpaakaan edellä mainituista värivirheistä ei sallita.

Puhtaudesta tulee huolehtia siis koko toimitusketjun, jopa lämpökäsittelyssä saakka. Mitään tussimerkintöjä tai vastaavia ei hitsatun osan pinnassa saa olla. Putkesta löytyi jo pieniä huokosia ennen korjaushitsauksia, mikä kertoo hitsauksen vaativuudesta. Korjaushitsauksen myötä huokoisuus lisääntyi. Tähän yhtenä syynä saattaa olla työskentelytilan puhtaus, käytettyjen puhdistusmenetelmien epäpuhtaus tai riittämätön kaasusuojaus, koska käytettyyn kammioon ei ollut mahdollista järjestää ensin alipainetta, mitä kautta kaapissa ollut jäännöshappi on voinut olla yhtenä syynä huokosiin (Malkamäki, 1996, s. 14, 15).

6.3 Ainetta rikkovat testit

Vetokoetesteissä saatujen tulosten perusteella hitsausta voidaan pitää onnistuneena, sillä vetokoessaija ei murtunut hitsistä tai hitsin vierestä. Tämä tosin on ymmärrettävää, sillä hitsin kohdalla materiaalivahvuutta oli molemmissa tapauksissa hiukan enemmän. Näin ollen hitsin kohdalta murtuminen olisi kertonut merkittävästä virheestä. Myös murtolujuudet viittaavat normaaleihin puhtaan titaanin arvoihin, osuen lähinnä vastaamaan Grade 3:ta. Venymä jää kuitenkin noin 30 % alemmaksi, mihin ei löydetty syytä (Lütjering & Williams, 2007, s. 186). Hitsin virheettömyyden arvioinnissa olisi voinut auttaa kupujen hionta putken pinnan tasoon, mutta tämä ei olisi kertonut todellisesta tilanteesta niin hyvin.

Kovuusmittauksissa havaittiin kovuuden kasvua hitsin kohdalla. Kummallakaan näytteellä kovuus ei kuitenkaan muuttunut yli 36 HV yksikköä, mutta tulokset kertovat kovuuksien

kuitenkin hitsien kohdalla olevan suositusten hylkäämisrajoilla (Malkamäki, 1996, s. 15) (Azom 2002). Kovuuteen on vaikuttanut myös putkelle suoritettu lämpökäsittely (Kotamies. 2019).

7 POHDINTA

Tutkimuksessa todettiin, että materiaaleista etenkin titaani on erittäin haavoittuvainen kaikelle epäpuhtaudelle läpi koko korjausprosessiketjun ja vaatii erityisen puhtaan hitsausympäristön, joka sopii myös ruostumattomalle teräkselle. Tässä tutkimuksessa tarkasteltu, tavalliseen konepajaan luotu puhdistila ei täyttänyt NAVAIR:in vaatimuksia titaanisen johdeputken hitsin virheettömyydelle (NAVAIR 01-1A-34, s. 009 00-3), mutta olisi hyvin voinut riittää ruostumattomalle teräkselle. Standardissa AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1 on annettu yksityiskohtaisesti kuvatut hyväksyntäraajat, joiden puolesta osa tässä tutkimuksessa havaituista virheistä olisi hyväksytty. Huokoisuus voidaan poistaa luomalla ympäristö, jossa happipitoisuus voidaan hallitusti säätää sallittuihin rajoihin. Tällaisen hitsausympäristön hankintaa on esitetty taulukossa 25. Aiemmin tehdyssä tutkimuksessa kaasusuojauksen ja railon esikäsittelyn vaikutuksesta titaanin hitsausliitoksen ominaisuuksiin todettiin varsinkin kaasusuojauksen osalta pienenkin happipitoisuuden aiheuttaneen hitsiin kaasusaastumisesta kertovaa sinistä väriä, mutta vaikutukset vetolujuudessa pysyivät kuitenkin standardin vaatimusten mukaisina. Tässäkään työssä ei vetokokeissa havaittu selkeitä suuria poikkeamia puhtaan titaanin vetomurtolujuuksissa (Aho-Mantila, Heikinheimo, Pihkakoski, Saarinen, 1989, s. 43). Jokseenkin on syytä mainita, ettei vertailututkimuksessa hitseihin tehty lämpökäsittelyä. Tutkimuksessa löydettyjä korjaushitsaustoimintaan liittyviä perustamis- ja käyttökuluja ei voitu verrata aiempiin tutkimuksiin, koska julkista kuluihin liittyvää tietoa ei ollut saatavilla.

7.1 Tutkimuksen luotettavuus ja objektiivisuus

Tutkimuksen voidaan nähdä olevan objektiivinen, sillä tutkimus on toteutettu täysin irrallaan tutkimuskohteesta tarkastellen sitä ulkoapäin saamatta mistään toivotusta tuloksesta rahoitusta tai muuta etua. Tutkimus aloitettiin ilman aiempaa ilmailualan tuntemusta. Tämä on ollut objektiivisen näkökulman ohella myös tutkimuksen tekoa vaikeuttavaa. Mikäli ilmailualalla toimimisen mallit korjaustoiminnan kannalta olisivat olleet tutumpia ennen tutkimusta, olisi oikean tiedon löytäminen ja toteutustavan määrittäminen ollut vaivattomampaa. Mikäli tutkimuksen laatua halutaan parantaa, olisi yksi tapa toteuttaa tutkijatriangulaation tavoin sama tutkimus uudestaan siten, että tutkimus toteutettaisiin osana yrityksen toimintaa. Tällä tavoin tässä tutkimuksessa huomaamatta jääneet tekijät voitaisiin löytää ja verifioida jo löydettyä tietoa entisestään. Tämän tutkimuksen laatu

pohjautuu aineistotriangulaatioon, jossa tutkimusongelmaa on pyritty tarkastelemaan haastatteluin, käytännön hitsaustutkimuksella ja kirjallisuustutkimuksella. Mikäli yksi tai kaksi näistä olisi puuttunut, olisi tutkimustulos ollut sama. Saaduissa tuloksissa ei havaittu merkittäviä ristiriitaisuuksia. Löydetyt ristiriitaisuudet olivat lähinnä lukujen pyöristyksiin liittyviä muutoksia. Kun titaanin hitsaus mainittiin kirjallisuudessa erityisen puhtaita olosuhteita vaativiksi prosessiksi, havaittiin tämä myös käytännössä. Kun ilmailualan hitsaajan päteväinnistä oli vaikea löytyä tarjontaa, saatiin tarjonnan vähäisyydestä vahvistus myös haastattelulla.

7.2 Keskeiset johtopäätökset

Korjaushitsaustoiminnan perustaminen nähdään taloudellisesti kannattavaksi, sillä jo kolmesta neljään hitsattua johdeputkea riittää kattamaan uusien osien hankintakulut. Laadun varmistamiseksi tulee hitsausolosuhteiden olla ensiluokkaisia, ja siksi tässä työssä suositellaan kiinteän hitsauskammion hankintaa (taulukko 25) sekä muita edellä mainittuja keinoja laadun varmistamiseksi. Näitä olivat henkilöstön pätevyitys sekä WeldEye:n kaltaiset kaupalliset ohjelmistosovellukset.

Tutkimuksessa havaittuja ongelmia korjaushitsaustoiminnan käynnistämiseksi ovat korjaushitsauksen haastavuus titaanin kohdalla, hitsaushenkilöstön päteväinnin tarjoajan puuttuminen ja korjaushitsattavan osan hitsausohjeiden saatavuus kunkin osan suunnittelijalta, sillä osasta koekappaleista oli vaikea selvittää edes materiaalia. Toisaalta korjatun putken tilanne ei ole enää sama kuin tehtaalla, jossa ohjeet todennäköisesti perustuvat käyttämättömän putken hitsaukseen. Käytetyn putken korjaushitsaukseen vaikuttavat myös käytössä kontaminoituneet epäpuhtaudet (Nieminen, 2018).

7.3 Tulosten uutuusarvo ja yleistettävyys

Tulokset titaanin tai ruostumattoman teräksen korjaushitsaukseen liittyen eivät tuoneet aiempiin tutkimuksiin nähden uutta tietoa, mutta todensivat jo löydettyä tietoa, sekä antavat lentokoneen titaanisten ja ruostumattomien osien hitsausta aloittavalle taholle koonnin olennaisista hitsausta koskevista ohjeista. Standardeja ISO 24394:2008 ja ISO/DIS 17927-1 ei ollut saatavilla tähän tutkimukseen suomen kielellä, joten tämän tutkimuksen kooste luvussa 3 on hyödyksi suomea lukevalle. Korjaushitsauksen perustamis- ja ylläpitokuluihin liittyvä tieto oli uutta ja samanlaista koontia ei ole julkisesti saatavilla.

7.4 Jatkotutkimusaiheet

Hitsausohjeiden saaminen vaatii lisätutkimuksia jokaisen korjattavan osan kohdalla. Osan tunnistamisen kautta saatavan yhteyden luominen suunnittelijatahoon vähentäisi materiaalin tunnistamisen työtä ja parantaisi kvantitatiivisesti osan laatua, koska näkemystä korjaushitsaukseen tulisi osan alun pitäen suunnitelleelta henkilöltä, että korjaajalta vaurion tunnistamisen myötä.

Mikäli korjaustoimina perustetaan, suositellaan tämän työn pohjalta toiminta vielä testaamaan ehdotetussa hitsausympäristössä (taulukko 25) tässä työssä mainittujen testien lisäksi taivutustestillä, mikä kertoo hitsin kaasusaastumisesta ja sitkeydestä (Malkamäki, 1996, s. 15), (Lukkari, Kyröläinen, Kauppi, 2016, s. 322). Tätä työtä tehdessä vielä lausuntavaiheessa olleisiin ISO/DIS 17927-1 ja 17927-2 -standardeihin ja niissä tapahtuneisiin muutoksiin sekä standardin AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1 sisältöön suositellaan syventymään korjaushitsaustoiminnan laadun varmistamiseksi.

8 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa keskityttiin tutkimaan titaanista ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen johdeputkien korjaushitsausta. Tavoitteena oli selvittää, olisiko korjaushitsausprosessi mahdollista toteuttaa luotettavasti ja kustannustehokkaasti omassa kunnossapitoyksikössä ja mitä tämä edellyttäisi. Erityisesti tarkasteltiin materiaalien hitsaukseen liittyviä erityispiirteitä ja mitä ohjeistuksia ilmailualan hitsausta koskevat ohjeistukset antavat. Lopuksi testattiin jo käytössä olleen johdeputken hitsausta ja tälle tehtiin rikkomaton ja rikkova materiaalitutkimus hitsauksen laadun arvioimiseksi. Tulokset osoittivat, että titaanille suoritettavat hitsausprosessi ja lämpökäsittelyt tulee tehdä erityisen puhtaissa olosuhteissa. Ilmailualan ohjeistusta tutkittiin lähinnä ISO-standardien avulla. Hitsaus henkilöstön pätevittäjän löytäminen sekä korjausohjeiden saaminen todettiin hitsausprosessin puhtausvaatimusten ohella prosessin haastavimmaksi osuudeksi. Jatkotutkimuksissa suositeltiin paneutumaan myös yhdysvaltalaiseen AWS D17.1 -standardiin, miten korjausohjeet saataisiin nopeasti valmistajalta ja kohdistettua korjauskohteeseen sekä voitaisiinko hitsaus henkilöstön pätevöinti suorittaa yhteistyössä suomalaisten koulutuskeskusten kanssa.

LÄHTEET

Aho-Mantila I., Heikinheimo L., Pihkakoski M., Saarinen K. 1989. Kaasusuojausten ja railon esikäsitteilyn vaikutus titaanin hitsausliitoksen ominaisuuksiin. VTT, Offsetpaino, Espoo

Adib, A.M.L., Baptista C.A.R.P., Barboza M.J.R., Haga C., Marques C.C.F. 2007. Aircraft engine bleed system tubes: Material and failure mode analysis. Teoksessa: Engineering Failure Analysis 2007, Volume 14(8). Elsevier. S.1605-1617.

ANSI (American National Standards Institute), 2019. AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1 Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications [verkkodokumentti]. Päivitetty 22.4.2019. [Viitattu 22.4.2019]. Saatavissa: <https://webstore.ansi.org/Standards/AWS/AWSD171M2017AMD1?source=blog>

AWS D17.1/D17.1M:2017-AMD1. 2017. Specification for Fusion Welding for Aerospace Applications. United States of America: American Welding Society

AZoM.com - An AZoNetwork Site. 2001a. Stainless Steel - Grade 321 (UNS S32100) [verkkodokumentti]. Päivitetty 15.5.2019. [Viitattu 15.5.2019]. Saatavissa: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=967>.

AZoM.com - An AZoNetwork Site. 2001b. Titanium Alloys Alpha, Beta and AlphaBetaAlloys [verkkodokumentti]. Päivitetty 21.4.2018. [Viitattu 21.4.2018]. Saatavissa: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=915>.

AZoM.com - An AZoNetwork Site. 2002. Titanium - Welding and Heat Treating [verkkodokumentti]. Julkaistu 13.2.2002. [Viitattu 24.11.2019]. Saatavissa: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1245>

AZoM.com - An AZoNetwork Site. 2004. Titanium Alloys - Characteristics of Alpha, Alpha Beta and Beta Titanium Alloys [verkkodokumentti]. Päivitetty 23.4.2018. [Viitattu 23.4.2018]. Saatavissa: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2591>

Baddoo, N., Barteri, M., Burgan B., Knutsson, H.B., Hamrebjörk, L., Kouhi, J., Martland, R., Mirambell, E., Olsson, A., Paylu T., Real, E., Ryan I., Stangenberg, E., Talja A. 2006. Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa [verkkodokumentti]. 124 s. Euro Inox ja The Steel Construction Institute. Kolmas painos Euro Inox:n käsikirjasta: Design Manual for Structural Stainless Steel. Saatavilla: <http://www.steel-stainless.org/media/1053/finnish.pdf>

BSSA, British Stainless Steel Association. 2018. Popular processes for welding stainless steels [verkkodokumentti]. Päivitetty 14.5.2018. [Viitattu 14.5.2018]. Saatavissa: <https://www.bssa.org.uk/topics.php?article=70>

Carl Roth GmbH + Co KG. 2019. Fluorivetyhappo ROTIPURAN® Supra-Qualität , ~ 48%. [verkkodokumentti]. Luotu 9.9.2016. [Viitattu 21.4.2018]. Saatavissa: https://www.carlroth.com/downloads/sdb/fi/H/SDB_HN54_FI_FI.pdf

Carvalho, S.M., Baptista, C.A.R.P., Lima, M.S.F. 2016. Fatigue in laser welded titanium tubes intended for use in aircraft pneumatic systems. Teoksessa: International Journal of Fatigue, Volume 90. Elsevier. S. 47-56.

CEN/TR 14599. 2005. Terms and definitions for welding purposes in relation with EN 1792. 171 s. Technical Committee CEN/TC 121. European Committee for Standardization.

DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 17927-1. Welding for aerospace applications — Fusion welding of metallic components — Part 1: Process specification. 2018. Genève: International Organization for Standardization. 31 s.

DRAFT INTERNATIONAL STANDARD ISO/DIS 17927-2. Welding for aerospace applications — Fusion welding of metallic components — Part 2: Acceptance criteria. 2019. Genève: International Organization for Standardization. 9 s.

European Aviation Safety Agency. 2013. Terms of Reference for a rulemaking task, specialized tasks [verkkodokumentti]. Päivitetty 31.1.2014. [Viitattu 4.9.2019]. Saatavissa: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/ToR%20RMT%200275%20%28MDM%20075%29.pdf>

Ekberg, J. 2019. Tekninen myynti: Bodycote Lämpökäsittely Oy. Sähköpostihaastattelu 10.4.2019. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Oy Esab. 2004. Peittausopas ruostumattomien terästen hitseille [verkkodokumentti]. Päivitetty 16.2.2015. [Viitattu 2.6.2018]. Saatavissa: https://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/peittausopas_2004.pdf

Finnish Military Aviation Authority. 2007. Maintenance Organisation Requirements [verkkodokumentti]. Luotu 14.11.2007. [Viitattu 22.4.2019]. Saatavissa: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&ved=2ahUKEwiM1Me9uuThAhUMyKQKHQBBCjYQFjAKegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.finlex.fi%2Fdata%2Fnormit%2F34322%2FSIM_To_lt_001ENGLANTI.pdf&usg=AOvVaw20nBJs57GY7LPqc2M9jzTO

Fort Wayne Metals. 2019. CP Titanium [verkkodokumentti]. Päivitetty 8.4.2019. [Viitattu 8.4.2019]. Saatavissa: <https://www.fwmetals.com/services/resource-library/unalloyed-commercially-pure-cp-titanium1/>

Fulcker., J. 2008. TIG for titanium tubing. Julkaisussa: The Tube and Pipe Journal, FMA Communications, Inc. [verkkodokumentti]. Julkaistu 28.10.2008. [Viitattu 24.11.2019]. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/tubepipejournal/article/arcwelding/tig-for-titanium-tubing>

Hass., D. 2004. Titanium—You can weld it! Julkaisussa: The Welder, FMA Communications, Inc. [verkkodokumentti]. Julkaistu 6.4.2004. [Viitattu 24.11.2019]. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/thewelder/article/arcwelding/titanium-you-can-weld-it>

Havas T., Hiitelä, E., Hultin, S., Matilainen, J., Parviainen, M. 2011. Ohutlevy tuotteiden suunnittelijan käsikirja. Helsinki: Teknologiateollisuus Ry. 389 s.

Hitachi. 2018. What is positive material identification (PMI) and why is it so important? [verkkodokumentti] Julkaistu 28.6.2018. [Viitattu 25.9.2018]. Saatavissa: [https://hha.hitachi-hightech.com/en/blogs-events/blogs/2018/06/28/what-is-positive-material-identification-\(pmi\)-and-why-is-it-so-important/](https://hha.hitachi-hightech.com/en/blogs-events/blogs/2018/06/28/what-is-positive-material-identification-(pmi)-and-why-is-it-so-important/)

ISO. 2019. ISO/AWI 17927, Welding for aerospace applications - Fusion welding of metallic components: a new series approved ! [verkkodokumentti] Julkaistu 29.9.2017. [Viitattu 5.9.2019]. Saatavissa: <https://committee.iso.org/sites/tc44/home/projects/ongoing/ongoing-1/content-left-area/ongoing/isoawi-17927-welding-for-aerospa.html>

ISO/DIS 17927-2(en). 2019. Welding for aerospace applications — Fusion welding of metallic components — Part 2: Acceptance criteria. Edition 1. ISO/TC 44/SC 14 Welding and brazing in aerospace. 9 s.

ISO 24394:2008. 2009. Welding for aerospace applications – Qualification test for welders and welding operators – Fusion welding of metallic components. Corrected version 2009-01-15. Genève: International Organization for Standardization. 38 s.

Jarnstroem, P., Mosyagin, A.S., Linovskii, S.A. 2011. MicroTack technology: revolution in tack welding of thin-walled structures. Teoksessa: Welding International 1.4.2011, Vol.25(4), s. 323-325. Taylor & Francis Group

Kemppi. 2018a. MasterTig MLS2300ACDC käyttöohje [verkkodokumentti]. Päivitetty 1.2.2018. [Viitattu 30.5.2018]. Saatavissa: <https://d3dbtvmfwwhlf2.cloudfront.net/pub/Products+and+Services/Operating+manuals/Equipment/Manual+welding/TIG/MasterTig+MLS+ACDC/MasterTig-MLS-2300ACDC-operating-manual-FI.pdf>

Kemppi. 2018b. Welding production management, Weldeye – hitsauksen hallintaohjelmisto [verkkodokumentti]. Päivitetty 17.1.2018. [Viitattu 26.5.2019]. Saatavissa: https://kemppi.studio.crasman.fi/pub/web/pdf/kemppi_welding-production-management_fi_FI.pdf

Kinnunen J., Lindfors, L., Nyman U., Piensoho A., Silvennoinen S., Tarkiainen R., Taulavuori T. 2001. Muokatut teräkset, Osa 1. Teoksessa: Eklund, P., Karppinen, A., Laakso, L., Nyman, U., Puska, M., Silvennoinen, S., Sunio, J., Taulavuori, T., Tennilä, P., Uitti, J. Raaka-ainekäsikirja -sarja. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto. 3. painos. 361 s.

Kotamies J. 2019. Lehtori: Metropolia Ammattikorkeakoulu Oy. Haastattelu 15.4.2019 Vantaa. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa

Kyröläinen, A., Lukkari, J. 2002. Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Keskusliitto, MET. 2. painos. 526 s.

Laaksonen, M. 2018. Hitsausinsinööri: Vahterus Oy. Vierailu 17.9.2018 Kalanti. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Laaksonen, T. 2019. Espoon Erikoishitsaus. Puhelinkeskustelu 18.1.2019 Vantaa. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Lepola, P., Makkonen M. 2006. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö. 1-2. painos. 429 s.

Levi E. 2006. How to perform tack welding successfully [verkkodokumentti]. Julkaistu 11.4.2006. [Viitattu 28.5.2018]. Saatavissa: <https://www.thefabricator.com/article/cuttingweldprep/how-to-perform-tack-welding-successfully>

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka, perusteet ja kaarihitsaus. Helsinki: Opetushallitus. 292 s.

Lukkari J., Kyröläinen, A., Kauppi T. 2016. Hitsauksen Materiaalioppi, Osa 2: Metallit ja niiden hitsattavuus. Teoksessa: Lukkari J., Kyröläinen, A., Kauppi T. Hitsauksen Materiaalioppi. Helsinki: Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys. 380 s.

Lütjering, G., Williams, J.C. Titanium. 2007. 2. Painos. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 442 s.

Malkamäki, Erkki. Titaanin korjaushitsaus. 1996. Teoksessa: Kunnossapitokoulu-lehden erikoisliite, nro 40, 7/1996. 15 s.

Miller Electric Mfg. LLC. 2018. Ten Common TIG Problems: A Visual Guide [verkkodokumentti]. Päivitetty 31.5.2018. [Viitattu 31.5.2018]. Saatavissa: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/ten-common-tig-problems-a-visual-guide>

Miles, M.P., Gunter, C., Liu, F., Nelson, T. W. 2017. Friction Stir Processing of 304L Stainless Steel for Crack Repair. Teoksessa: Hovanski, Y., Mishra, R., Sato, Y., Upadhyay, P., Yan, D. Friction Stir Welding and Processing IX. Springer

Miller Electric Mfg. LLC. 2018. Welding Stainless Steel Tube and Pipe: Maintaining Corrosion Resistance and Increasing Productivity [verkkodokumentti]. Päivitetty 26.5.2018. [Viitattu 26.5.2018]. Saatavissa: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/welding-stainless-steel-tube-and-pipe-maintaining-corrosion-resistance-and-increasing-productivity>

NAVAIR 01-1A-34. 2009. Aeronautical Equipment Welding. Naval Air Systems

Nascimento, M., Voorwald, H., Filho, J. 2012. Effects of several TIG weld repairs on the axial fatigue strength of AISI 4130 aeronautical steel-welded joints. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 35(3). S. 191-204.

Nieminen A. Haastattelu 4.12, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Vantaa. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Outokumpu 2018a. Supra 316L/4404 EN 1.4404, ASTM TYPE 316L / UNS S31603 [verkkodokumentti]. Päivitetty 6.5.2018. [Viitattu 6.5.2018]. Saatavissa: <http://steelfinder.outokumpu.com/Properties/GradeDetail.aspx?OKGrade=4404&Category=Supra>

Outokumpu 2018b. Core 321/4541 EN 1.4541, ASTM TYPE 321 / UNS S32100 [verkkodokumentti]. Päivitetty 13.5.2018. [Viitattu 13.5.2018]. Saatavissa: <http://steelfinder.outokumpu.com/Properties/GradeDetail.aspx?OKGrade=4541&Category=Core>

Pitkänen, P. 2018. Teknologiajohtaja: Vahterus Oy. Vierailu 17.9.2018 Kalanti. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

SFS-EN 1011-3. 2001. Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS. 45 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN ISO 6848. 2015. Kaarihitsaus ja leikkaus. Volframielektrodit. Luokittelu. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS. 28 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

SFS-EN ISO 14731. 2006. Hitsauksen koordinointi, tehtävät ja vastuut. Helsinki: suomen Standardisoimisliitto SFS. 27 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä.

Silvola, J. 2019. Tuotantoinisinööri: Finnair Technical Services Oy. Vierailu 17.9.2019 Vantaa. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Specialised Welding Robot for Titanium. 1989. Teoksessa: Metallurgia Nov. 1989, Vol.56(11). FMJ International Publications Ltd , Queensway House, 2 Queensway, Redhill, Surrey. S.468

The Lincoln Electric Company. 2014. Stainless Steel Welding Guide [verkkodokumentti]. Päivitetty 21.12.2016. [Viitattu 23.5.2018]. Saatavissa: https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_StainlessNickelAndHighAlloy-Excalibur-Excalibur316316L-17/c64000.pdf

Timet. 1999. Titanium design and fabrication handbook for industrial applications. USA. 35 s.

TWI ltd, 2019a. Welding of Titanium and It's Alloys. [verkkodokumentti]. Päivitetty 24.11.2019. [Viitattu 24.11.2019]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-titanium-and-its-alloys-part-1-109>

TWI ltd, 2019b. What Materials Can Be Flash (Butt) Welded? [verkkodokumentti]. Päivitetty 10.11.2019. [Viitattu 10.11.2019]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-materials-can-be-flash-butt-welded>

TWI ltd, 2019c. Recommended method for repairing fatigue cracking. [verkkodokumentti]. Päivitetty 24.11.2019. [Viitattu 24.11.2019]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-the-recommended-method-of-repairing-fatigue-cracking-and-how-long-will-the-repairs-last>

TWI ltd, 2018a. Design Part 4. [verkkodokumentti]. Päivitetty 23.5.2018. [Viitattu 23.5.2018]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/design-part-4-093/>

TWI ltd, 2018. Distortion Control - Prevention by fabrication techniques. [verkkodokumentti]. Päivitetty 31.5.2018. [Viitattu 31.5.2018]. Saatavissa: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/distortion-control-prevention-by-fabrication-techniques-036/>

Vallinkoski, P. 2018. Myyntipäällikkö: Finfoocus Instruments. Vierailu 6.9.2018 Pitäjänmäki. Haastattelija Joel Kontturi. Muistiinpanot haastattelijan hallussa.

Williams, B. 2012. Aircraft Welding & Repair. *Aircraft Maintenance Technology*, 23(3). S. 24-28.

Xiuyang, F., Hong, L., Jianxun Z. 2015. Reducing the underfill rate of pulsed laser welding of titanium alloy through the application of a transversal pre-extrusion load. *Teoksessa: Journal of Materials Processing Tech.* June 2015, Vol.220. ScienceDirect (Elsevier B.V.). S. 124-134.

Zhang, K., Liu, M., Lei, Z., Chen, Y. 2014. Microstructure Evolution and Tensile Properties of Laser-TIG Hybrid Welds of Ti-2AlNb-Based Titanium Aluminide. *Teoksessa: Journal of Materials Engineering and Performance* 2014, Vol.23(10). Springer Science & Business Media B.V. S. 3778-3

LIITE I

SFS-EN 1011-3

Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset. Osa 3: Ruostumattomien terästen kaarihitsaus

SFS-EN 10088-1

Ruostumattomat teräkset. Osa 1: Ruostumattomien terästen luettelo

SFS-EN 10088-2

Ruostumattomat teräkset. Osa 2: Yleiseen käyttöön tarkoitetut korroosionkestävät levyt ja nauhat. Tekniset toimitusehdot

SFS-EN 10088-3

Ruostumattomat teräkset. Osa 3: Yleiseen käyttöön tarkoitetut korroosionkestävät puolivalmisteet, tangot, valssilangat, langat, profiilit ja kirkaat tuotteet. Tekniset toimitusehdot

ANSI/AWS D10.6/D10.6: (2000)

Recommended Practices for Gas Tungsten Arc Welding of Titanium Piping and Tubing.

ANSI/AWS A5.16 (2013)

Specification for Titanium and Titanium-Alloy Welding Electrodes and Rods.

ASTM B 337

Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Pipes.

ASTM B 338

Standard Specification for Seamless and Welded Titanium and Titanium Alloy Tubes for Condensers and Heat Exchangers.

CEN ISO/TR 15608 (2013)

Hitsaus. Ohjeet metallisten materiaalien ryhmittelylle.

CEN ISO/TR 20172 (2009)

Welding. Grouping systems for materials. European materials.

SFS-EN ISO 5817

Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat

SFS-EN ISO 9606-5

Hitsaajan pätevyyskoe. Sulahitsaus. Osa 5: Titaani ja titaaniseokset, zirkonium ja zirkoniumseokset

SFS-EN ISO 15614-5

Hitsausohjeet ja niiden hyväksyntä metalleille. Menetelmäkoheet. Osa 5: Titaanin ja tsirkoniumin sekä niiden seosten kaarihitsaus

SFS-EN ISO 10675-1:2016

Hitsien rikkoman aineenkoetus. Radiograafisen kuvauksen hyväksymisrajat. Osa 1: Teräs, nikkeli, titaani ja niiden seokset

Hitsausohje pWPS

Hitsausohje: 1.1

WPQR no.: -

Asiakas: Joel Kontturi

Aineensiirtymismuoto: TIG (pulssikaari)

Liitosmuoto ja hitsilaji: BW Päittäishitsi / Butt weld

Railon yksityiskohdat: I-railo


Railonvalmistus: Katso lisätiedot

Perusaineen merkintä: Titaani Grade 2

Aineenpaksuus (mm): 2 mm

Putken ulkohalkaisija (mm): 76,2 mm

Hitsausasento: Jalko PA/1G

Liitoksen kuva	Hitsausjärjestys
	

Hitsauksen yksityiskohdat

Palko	Hitsausprosessi	Lisäaine (mm)	Hitsausvirta (A)	Hitsausjännite (V)	Virtalaji/ Napaisuus	Langan s.nopeus (cm/s)	Kuljetus-nopeus (cm/s)	Lämmön -tuonti (KJ/cm)
1	141	1,6	ala 51, ylä 133	-	DC (-)	-	-	-

Railonvalmistuksen lisätiedot: Sahauspinta viilataan tasaiseksi siten, että sahausuomiin ei jää piileviä epäpuhtauksia. Samalla viilauksella poistetaan sahauspurseet ja terävät reunat. Viilan tulee olla puhdas vierasmetalleista. Mahdolliset tummumat, pinnalla oleva lika ja oksidikalvo poistetaan vielä vierasmetalleista vapaalla ruostumattomalla teräsharjalla. Tämän jälkeen hitsattavat pinnat puhdistetaan mahdollisuuksien mukaan ilmailualan hyväksymällä puhdistusprosessilla kuvan 3 mukaan, mutta ainakin tehdään puhdistus asetonilla ja puhtaalla, deionisoidulla vedellä. Tarvittaessa voidaan pinta lisäksi peitata (2-4%) fluorivetyhappo - (30-40 %) typpihappo -liuoksella, minkä jälkeen

huuhtelu puhtaalla deionisoidulla vedellä. Pinta voidaan kuivata kuumailmapuhaltimella, mutta liikaa kuumennusta tulee varoa.

Lisäaineen luokittelumerkintä ja kaupp nimi: AWS 5.16 ERTi-2

Lisäaineen käsittely: Lisäaineen puhtaus varmistetaan vetämällä se puhtaan nukkaamattoman liinan läpi. Likaista lisäainetta ei saa käyttää tai se tulee puhdistaa.

Kaasun merkintä - suojakaasu: Argon 4.8 tai puhtaampi

- juurikaasu: -

Kaasun virtausnopeus - suojakaasu: Kupu 5 linssillä noin 9 l/min

- juurikaasu: -

Volframielektrodin tyyppi/koko (mm): Kultainen 1,6 mm

Juurituen yksityiskohdat: Voidaan käyttää ruostumattomasta teräksestä tai titaanista valmistettua edellyttäen, että se ei ole kosketuksissa hitsisulaan.

Korotettu työlämpötila: -

Välipalkolämpötila: -

Vedynpoistohehkus: -

Ylläpitolämpötila: -

Hitsauksen jälkeinen jälkilämpökäsittely tai vanheneminen: 427-583 °C, 60 min

Muut tiedot

- **Sivuttaisliike:** -
- **Kaasusuojauksen yksityiskohdat:** Hitsaus tulee suorittaa suojakaasukammiossa, jossa käytetään suojakaasuna argon 4.8:a tai puhtaampaa kaasua. Ennen suojakaasutäyttöä tulee kammioon imeä tyhjiö.
- **Vaaputus:** -
- **Pulssihitsauksen yksityiskohdat:** +60 % ylävirta alavirrasta, 1,0 Hz, yhtä pitkät jaksot, virranlaskuaika 5 s, loppukaasu 20 s, ylävirta 133 A, alavirta 51 A
- **Suutinetäisyys:** -
- **Hitsaimen kulma:** -
- **Asiakkaan yhteys:** Joel Kontturi, 0401791394, joel.kontturi@student.lut.fi

Valmistaja (nimi, allekirjoitus, pvm):

Mittapiste 2: Putki										
	Ti	Sn	Fe	Mn	Mo	Al	Nb	Zr	V	
1	94,47	0,75	0,32	0	0,72	0,21	3,2	0	0	0
2	99,6	0,22	0,12	0,03	0	0	0	0,04	0	0
3	99,8	0,05	0,12	0,03	0	0	0	0	0	0
4	99,84	0,01	0,12	0,03	0	0	0	0	0	0
5	99,8	0	0,15	0,03	0	0	0	0,01	0	0
6	99,8	0,04	0,12	0,03	0	0	0	0	0	0
7	99,59	0,23	0,13	0,03	0	0	0	0,02	0	0
8	99,87	0	0,1	0,03	0	0	0	0	0	0
9	93,54	0,9	0,4	0	0,28	0,23	3,85	0	0,59	0
10	96,49	0	0,26	0	0,59	0,27	2	0	0,17	0
Keskiarvo	99,09625	0,1625	0,1475	0,02625	0,09	0,02625	0,4	0,00875	0	0
Keskihajonta	1,751335	0,238943	0,066474	0,009922	0,238118	0,069451	1,058301	0,013636	0	0
Keskihajonta [%]	1,767307	147,0418	45,0669	37,79645	264,5751	264,5751	264,5751	155,8387	#JAKO/0!	
Vertaus kalibrintipalaan:										
		Kalibrintipala		Mitattu	Ero %					
	Si	0,35		0,38	8,571429					
	Mn	1,879		1,8	-4,20436					
	Ni	10,03		9,89	-1,39581					
	Cr	16,83		17,02	1,128936					
	Mo	2,02		2,07	2,475248					
Mittapiste 3: Hitsi										
	Ti	Sn	Fe	Mn	Mo	Al	Nb	Zr		
1	99,82	0	0,15	0,03	0	0	0	0	0	0
2	99,84	0	0,12	0,04	0	0	0	0	0	0
3	99,83	0,01	0,13	0,04	0	0	0	0	0	0
4	99,82	0	0,13	0,04	0	0	0	0,01	0	0
5	99,75	0,08	0,14	0,03	0	0	0	0	0	0
6	99,65	0,08	0,14	0,04	0	0,05	0	0,05	0	0
7	99,78	0,01	0,15	0,03	0	0	0	0,03	0	0
8	92,88	1,19	0,33	0	1,18	0,25	5	0	0	0
9	98,38	0,49	0,14	0	0,05	0,34	0,54	0	0	0
10	98,24	0,62	0,18	0	0,07	0,08	0,72	0	0	0
Keskiarvo	99,78429	0,025714	0,137143	0,035714	0	0,007143	0	0,012857	0	0
Keskihajonta	0,062073	0,034582	0,010302	0,004949	0	0,017496	0	0,018295	0	0
Keskihajonta [%]	0,062207	134,4858	7,511565	13,85641	#JAKO/0!	244,949	#JAKO/0!	142,2916		
Vertaus kalibrintipalaan:										
		Kalibrintipala		Mitattu	Ero %					
	Si	0,35		0,3	-14,2857					
	Mn	1,879		1,81	-3,67217					
	Ni	10,03		10	-0,2991					
	Cr	16,83		16,69	-0,83185					
	Mo	2,02		2	-0,9901					

DEKRA Industrial Oy

Tuupakankuja 1
01740 VANTAA
Tel. (09) 878 020 Fax (09) 878 6653

Tarkastuspöytäkirja**Inspection Report**

Tarkastuslaji Inspection method
RT, PT



Pöytäkirjan nro Report No.

Tilaja Contractor Joel Kontturi	Työnro Work No.	Asiakas Customer	Työnro Work No.
Laitos Station	-	Valmistaja, asentaja Manufacturer, Installed by	Työnro Work No.
-	-	-	-
Tarkastuskohde Inspection object Titaaniputki		Piirustus nro Drawing No.	
Tarkastuslaitteet Equipment ICM Site-XS 225 kV 3,0 mm PT160		Perusaine Base material CP Titanium	
Agfa D4 + 0,027 Pb		Pinnan laatu Surface condition	Lämpötila Temperature
Bycotest C10 batch:170807		Ei puhdistusta	22°C
Bycotest PR20 batch:180810		Valaistus Light	
Bycotest D30plus batch:180810		Kohdevalo	
Tarkastuspvm Insp. date	Tarkastuspaikka Inspection place	Muut tiedot Other information	
05.04.2019	Vantaa	-	
Tarkastusohje Inspection procedure IP-0173 (RT) / IP-0172 (PT)		Tarkastusajajuu Extent of Inspection Yksi suunta / sauma	
Laadunmääritysasiakirja Quality document SFS-EN 13480-5, taulukko 8.4.2-1			

Tulokset Results

Putkelle tehty röntgenkuvaus sekä tunkeumanestetarkastus jokaiselle kuudelle saumalle.

- Ennen katkaisua hitsissä ei virheitä.
Hitsauksen jälkeen vajaata juurikupua ja yksittäisiä huokosia.
- Katkaistu ja hitsattu takaisin kiinni.
Huokoisuutta ja vajaata kupua.
- Katkaistu ja hitsattu takaisin kiinni.
Yksittäisiä huokosia ja huokosryhmä.
- Ennen katkaisua yksittäisiä huokosia ja uudelleen hitsaamisen jälkeen huokoisuus lisääntynyt.
- Ennen korjausta hitsissä huokoisuutta ja huokosjonoa.
Korjauksen jälkeen liitosvirhe ja huokoisuus lisääntynyt.
- Ennen katkaisua saumassa yksittäisiä huokosia.
Hitsauksen jälkeen vajaa hitsautumissyvyys ja yksittäisiä huokosia.

Tunkeumaneste tarkastuksessa ei havaittu näytämiä.



Tarkastustulokset Results of Inspection Täyttävät vaatimukset Comply with the requirements Eivät täytä vaatimuksia Do not comply with the requirements

Tarkastaja Inspector

Nordtest 7684

Pvm ja allekirjoitus Date and signature
17.4.2019

Rev. 4



Pätevyys Qualification
 EN ISO 9712/Nordtest Level 2
 SNT-TC-1A Level 2
 STUK

FINAS
Finnish Accreditation Service
1005 IEN (ISO/IEC 17025)
(Tyypit A1 Type A1)

Tarkastuskohde Inspection object
Titaaniputki

Tulokset Results

