

Jussi Tikkanen

Rst-lämmönvaihtimen vaurioanalyysi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Insinöörityö

20.5.2016

Tekijä Otsikko	Jussi Tikkanen Rst-lämmönvaihtimen vaurioanalyysi
Sivumäärä Aika	36 sivua + 3 liitettä 20.5.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Energia- ja ympäristötekniikka
Ohjaaja	Lehtori Juha Kotamies
<p>Tämän insinöörityön tavoitteena oli selvittää, miksi lämmönvaihtimen ruostumattomasta teräksestä valmistettu vaippa on altistunut pistekorroosiolle, jonka seurauksena se on alkanut vuotamaan. Työn tilaajana on varustamoille laivakeittiökokonaisuuksia toimittava yritys. Höyry-vesi -periaatteella toimivaa lämmönvaihdinta on käytetty risteilijäaluksen astianpesukoneen käyttöveden lämmittämiseen. Lämmönvaihdin on alihankkijan valmistama ja toimittama.</p> <p>Työssä selvitetään ensin lämmönvaihtimen toimintaperiaate. Tämän jälkeen käsitellään ruostumatonta terästä materiaalina, sen hitsaamista sekä työn kannalta oleellisia ruostumattoman teräksen korroosionmuotoja ja niiden aiheuttajia. Tutkimustyö aloitettiin tunkeumanestetarkastuksella, jonka jälkeen lämmönvaihdin paloiteltiin sisäpuolista tarkastelua varten. Materiaaleja tutkittiin erilaisilla mikroskoopeilla, sekä niiden koostumuspuhtaus mitattiin.</p> <p>Lämmönvaihtimen valmistuksesta todettiin työvirheitä, jotka ovat edesauttaneet korroosion syntymistä. Primääri syy korrodoitumiselle oli kyseiseen käyttötarkoitukseen väärin valittu valmistusmateriaali. Lopussa suositellaan korroosion kannalta näihin olosuhteisiin paremmin soveltuvaa materiaalia, sekä ehdotetaan, kuinka kokoonpanon aikana syntyneitä valmistusvirheitä voidaan välttää jatkossa.</p>	
Avainsanat	ruostumaton teräs, korroosio, lämmönvaihdin

Author Title	Jussi Tikkanen Failure Analysis of Stainless Steel Heat Exchanger
Number of Pages Date	36 pages + 3 appendices 20 May 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Energy and Environmental Engineering
Instructor	Juha Kotamies, Senior Lecturer
<p>The objective of this Bachelor's thesis was to examine the causes of pitting corrosion in a stainless steel heat exchanger. As a result of pitting corrosion, the heat exchanger has started to leak. The thesis was commissioned by a company which supplies complete marine catering systems for passenger ships. A steam-to-water heat exchanger is used to heat up the water for a warewasher in a cruise liner. The heat exchanger has been manufactured and supplied by the subcontractor.</p> <p>Firstly, this thesis describes the working principles of heat exchangers. In addition, the thesis describes stainless steel as a material and its different corrosion types and what causes them. The research began with liquid penetrant testing. Secondly, the heat exchanger was cut into parts to investigate the inner surfaces. The materials were analyzed with different types of microscopes and their chemical compositions were measured.</p> <p>As a result, it was discovered that there were clear manufacturing flaws. However, the primary cause of the corrosion was wrongly chosen materials for this purpose. Finally, better and more appropriate materials and manufacturing solutions were suggested to avoid corrosion in the future.</p>	
Keywords	Stainless steel, corrosion, heat exchanger

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Lämmönvaihtimet	1
2.1	Toimintaperiaate	1
2.2	Käyttökohteet	2
3	Ruostumaton teräs	3
3.1	Ominaisuudet	3
3.2	Ruostumattomat teräslajit	3
4	Korroosio	5
4.1	Korroosion kemia	6
4.2	Ruostumattoman teräksen korroosio	8
4.2.1	Rakokorroosio	8
4.2.2	Yleinen korroosio	9
4.2.3	Pistekorroosio	9
5	Ruostumattoman teräksen hitsaaminen	10
5.1	Hitsin laatu	11
5.2	Hitsin suojaaminen	11
5.3	Jälkikäsittely	13
6	Rst-lämmönvaihdin	14
7	Tutkimuksen suorittaminen	17
7.1	NDT	17
7.2	Vaipan paloittelu	20
7.3	XRF- ja OES-analyysi	23
7.4	Mikroskooppitutkimus	25
8	Tulokset ja päätelmät	32
	Lähteet	35

Liitteet

Liite 1. AISI 300 -luokan terästen koostumustaulukko

Liite 2. Vaipan OES

Liite 3. Käämin OES

Lyhenteet

Cr	Kromi
EDS	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy, röntgenanalysaattori; SEMiin liitetty alkuaineiden pitoisuuksien mittaamiseen käytettävä laite
Fluidi	Virtaava väliaine, voi olla neste tai kaasu
Mo	Molybdeeni
NDT	Non-Destructive Testing, rikkomaton aineenkoetus
OES	Optical Emission Spectroscopy; optinen emissiospektroskopia, jota käytetään ainepitoisuuksien mittaamiseen
ppm	Parts Per Million; suhdeluku, joka ilmaisee jonkin aineen suhteellisen osuuden
PRE	Pitting Resistance Equivalent; suhdeluku, joka ilmaisee ruostumattoman teräksen kyvyn vastustaa pistekorroosiota
PT	Penetrant Testing, tunkeumanestetarkastus
rst	Ruostumaton teräs
SEM	Scanning Electron Microscope, pyyhkäisyelektronimikroskooppi
XRF	X-ray Fluorescence, röntgenfluoresenssispektroskopia; ainepitoisuuden mittausmenetelmä

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä tutkimuksen kohteena on risteilijäaluksen keittiössä käytetty lämmönvaihdin. Lämmönvaihdin on höyry-vesi-periaatteella toimiva, ja sitä on käytetty keittiön astianpesukoneen käyttöveden lämmittämiseen. Lämmönvaihtimen ruostumattomasta teräksestä valmistettu vaippa on alle vuoden käytössä altistunut pistekorroosiolle, josta johtuen lämmönvaihdin on alkanut vuotamaan.

Insinööriyön tarkoituksena on selvittää, mikä on aiheuttanut ruostumattoman teräksen korrodoitumisen. Jotta korroosion syntymekanismit ymmärretään, tarkastellaan insinööriyössä erilaisia ruostumattomia teräslaatuja, niiden ominaisuuksia sekä korroosiotyyppejä ja niiden aiheuttajia. Teoriaosuuden jälkeen tutkitaan tapauskohtaisesti lämmönvaihtimessa esiintynyttä korroosiota. Työssä selvitetään vaurioiden laajuus, se onko korrosio alkanut vaipan sisä- vai ulkopuolelta sekä mahdolliset korroosiolle altistaneet tekijät.

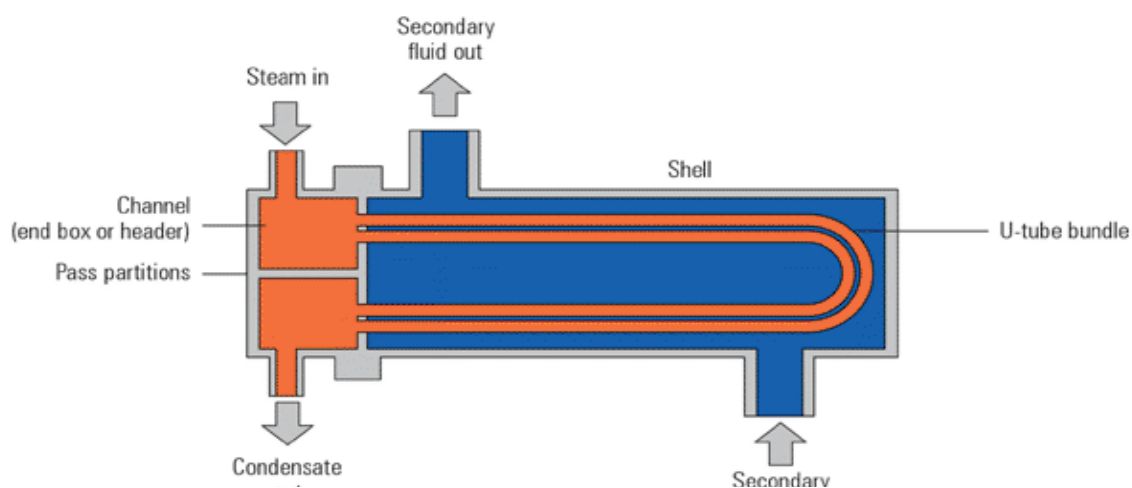
2 Lämmönvaihtimet

Lämmönvaihdin eli lämmönsiirrin on laite, jolla siirretään lämpöenergiaa eri fluidien välillä. Lämmönvaihtimista on kehitetty lukuisia erilaisia konstruktioita, mutta kaikissa tapauksissa käyttötarkoitus on sama; siirtää lämpimämmän fluidin energiaa kylmempään fluidiin. Ensiksi selvitetään lämmönvaihtimen toimintaa, minkä jälkeen esitellään muutamia esimerkkejä, joissa lämmönvaihtimia käytetään.

2.1 Toimintaperiaate

Lämmönvaihdin on laite, jonka läpi virtaa kahta tai useampaa fluidia yleensä sekoittumatta keskenään. Termodynamiikan nollannen pääsäännön mukaan eri lämpötiloissa olevat aineet pyrkivät termiseen tasapainoon lämpöenergian kulkeutuessa kuumemmasta kylmempään. Näin ollen lämmönvaihtimen läpi virtaava kuumempi fluidi siirtää lämpöenergiaa kylmempään aineeseen, jolloin lämpöerot pienenevät. Lämmönvaihtimessa virtaava fluidi voi olla kaasua tai nestettä. Tyypillisiä lämmönvaihtimissa käytettäviä nesteitä ovat vesi ja öljy sekä kaasuista ilma ja vesihöyry, joka useimmiten on tulistettu. Lämmönsiirto tapahtuu johtumalla fluidien välisen seinämän kautta. Nesteitä lämmitettäessä käytetään yleensä koteloitua lämmönvaihdinta (Shell and tube heat exchanger), jonka sisällä kulkee lämmityselementtinä toimiva putkisto (kuva 1). Putkiston läpi

virtaava kuuma neste tai kaasu luovuttaa lämpöä kotelon sisäpuolella virtaavaan kylmempään aineeseen. Lämmönsiirtoa yleensä tehostetaan tekemällä putkistosta mutkitteleva tai spiraalimainen, jolloin lämmönsiirtopinta-alaa saadaan suuremmaksi. Käytettäessä kaasuja, jotka lämpötilan laskiessa muuttuvat kylmäseiseen muotoon, on lämmönvaihtimen suunnittelussa otettava huomioon kondensoituneen nesteen poisto. [2.]



Kuva 1 Höyry-vesi-lämmönvaihtimen toimintaperiaate [1]

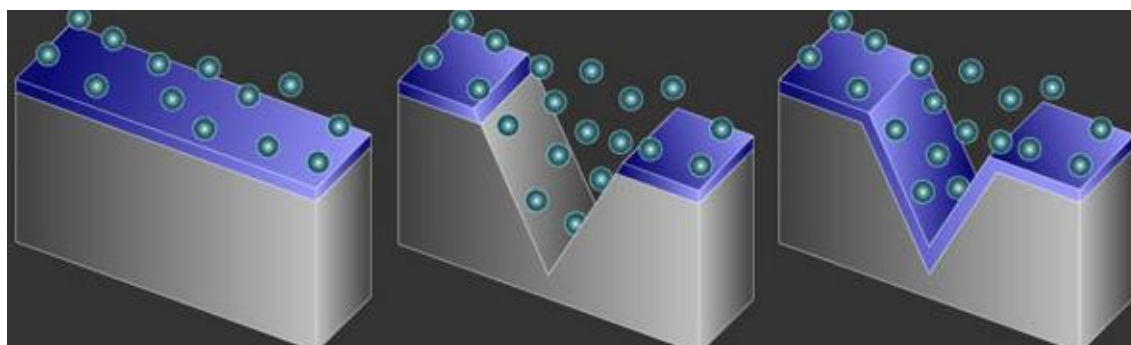
2.2 Käyttökohteet

Lämmönvaihdin on energiatekniikan komponentti, jota käytetään lukuisiin käyttötarkoituksiin. Lämpövoimalaitoksessa oleellisia lämmönvaihtimia ovat höyrystin, tulistin ja lauhdutin. Rakennusten ilmanvaihtolaitteistossa olevilla lämmönvaihtimilla saadaan poistoilman lämpöenergiaa siirrettyä tuloilmaan (tai vaihtoehtoisesti toisinpäin), jolloin energiaa säästyy. Varsinkin suurissa rakennuksissa ja teollisuudessa lämmönvaihtimilla saadaan suuria säästöjä aikaan. Arkisimpia kohteita, joissa lämmönvaihtimia käytetään, ovat jääkaapin ja ilmastointikoneen lauhdutin, auton jäähdytin, sekä kiinteistöjen lämmönjakokeskus, jossa kaukolämpövedellä lämmitetään käyttövettä.

3 Ruostumaton teräs

3.1 Ominaisuudet

Ruostumaton teräs on useasta metallista koostuva rautaseos. Rst:ssä on kromia (Cr) aina vähintään 10,5 % kokonaismassasta. Kromipitoisuus tekee siitä hyvin kestävän materiaalin korroosiota vastaan. Hyvä korroosionkestävyys perustuu teräksen pinnalla olevaan suojaavaan oksidikalvoon, joka syntyy kromin reagoidessa ympäristön hapen kanssa. Vastaavaan oksidikalvon muodostamaan suojaan perustuu myös esimerkiksi alumiinin korroosiokestävyys. Tätä kalvoa kutsutaan passiivikalvoksi. Passiivikalvo on erittäin ohut, 1 - 5 nm, mutta se riittää estämään hapen pääsyn alla olevaan metalliin. Passiivikalvon kiderakenteeseen vaikuttaa seoksen Cr-pitoisuus. Kromin määrän lisäilyessä passiivikalvon rakenne muuttuu kiteisestä amorfisemmaksi. 20 % Cr-pitoisuudessa passiivikalvo on jo täysin amorfinen. Normaalisti pinnan vaurioitua, passiivikalvo uusiutuu paljastuneissa kohdissa ilman hapettavan vaikutuksen takia (kuva 2). Koska passivoituminen vaatii happea, laskee teräksen korroosionkestävyys, mikäli sitä käytetään hapettomassa ympäristössä.



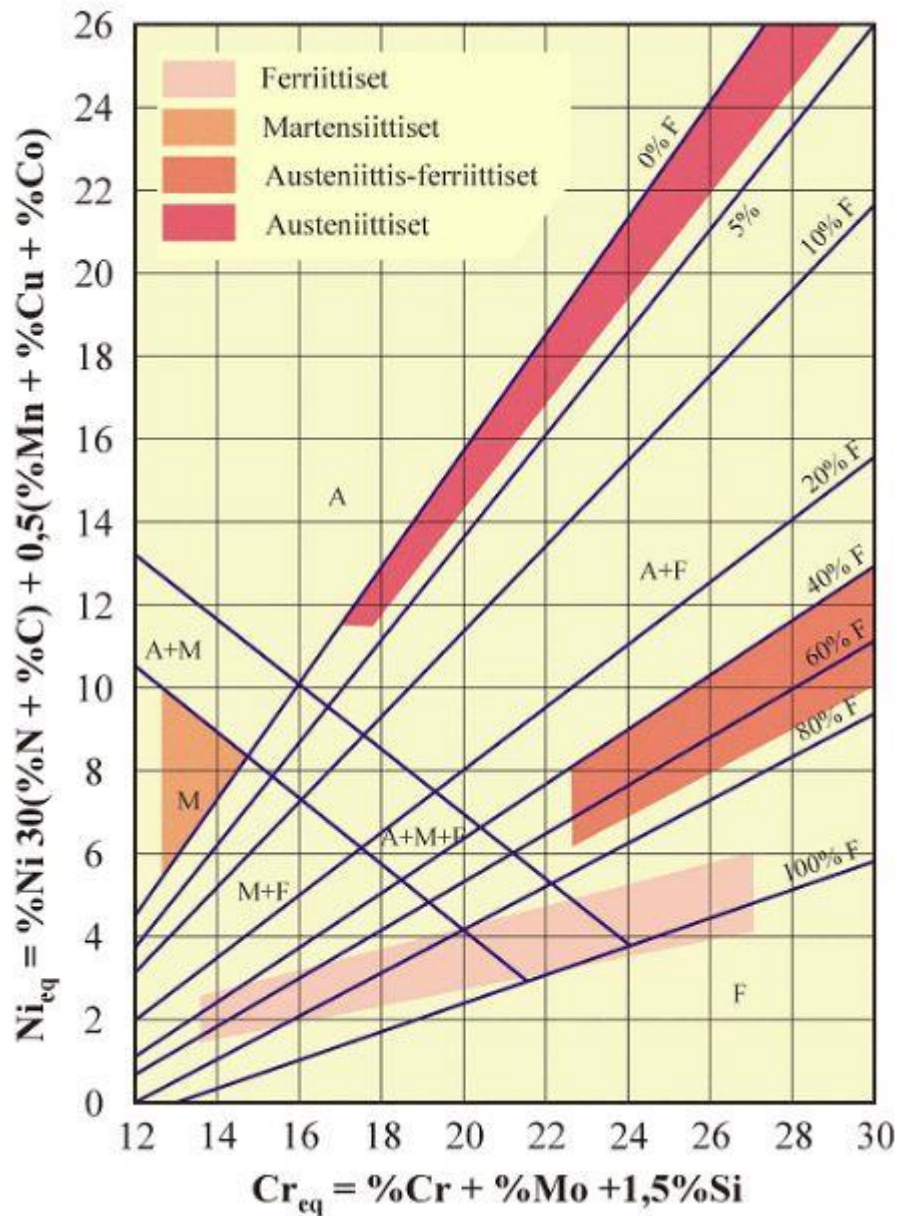
Kuva 2 Passiivikalvon muodostuminen [3]

Kromin lisäksi muita ruostumattomassa teräksessä tyypillisesti käytettyjä seosaineita ovat typpi (N), molybdeeni (Mo), nikkeli (Ni), mangaani (Mn) ja hiili (C). Seosaineilla teräksen muokattavuus- ja korroosionkestävyysominaisuuksia saadaan muokattua kuhunkin käyttötarkoitukseen halutunlaiseksi.

3.2 Ruostumattomat teräslajit

Ruostumattomia teräslaatuja on lukuisia erilaisia, ja niiden nimet vaihtelevat standardien ja valmistajien mukaan. Samalla teräslaadulla voi siis olla lukuisia eri kauppanimiä.

Ruostumattomat teräkset luokitellaan niiden kiderakenteen mukaan austeniittisiin, ferriittisiin, martensiittisiin ja austeniittis-ferriittisiin. Eri kiderakenne tekee kullekin tyypille erilaiset ominaisuudet. Eniten kiderakenteeseen vaikuttaa teräksen Cr- ja Ni-pitoisuus, muita vaikuttavia tekijöitä on teräksen valmistusvaiheessa tehty lämpökäsittelyt. Koostumuksen vaikutusta kiderakenteeseen kuvaa Schaeffler-DeLong -diagrammi (kuva 3). [6; 13.]



Kuva 3 Schaeffler-DeLong -diagrammi

Valtaosa tuotetusta ruostumattomasta teräksestä on austeniittista. Austeniittinen teräs sisältää alle 0,15 % hiiltä ja yli 16 % kromia ja 7 % nikkeliä. Nikkeli saa austeniittiselle teräkselle ominaisen kiderakenteen. Austeniittisen teräksen suosion syinä ovat sen todella laajat käyttöominaisuudet, kuten laaja käyttölämpötila-alue, lujuus ja sitkeys sekä hyvä hitsattavuus. Austeniittiset teräkset eivät ole magneettisia. Austeniittiset teräkset jaetaan niiden sisältämien seosaineiden mukaan luokkiin Cr-Ni, Cr-Mn, ja Cr-Ni-Mo. Tyyppillisin austeniittinen teräs on AISI 304 -luokan yleiskäyttöinen Cr-Ni-teräs, jonka sisältää 18 % kromia ja 8 % nikkeliä. [6.]

Ferriittiset ovat ominaisuuksiltaan ruostumattomista teräksistä lähimpänä hiiliteräksiä. Vähäisen nikkeliipitoisuuden vuoksi ne ovat edullisempia kuin austeniittiset teräslaadut. Ferriittisen ruostumattoman teräksen kromipitoisuus on 11 - 27 %. Ferriittisten terästen työstöominaisuudet ovat hyvät ja ne vastustavat hyvin jännityskorroosiota. Ferriittinen rst on magneettista. [6;13.]

Austeniittis-ferriittiset, eli Duplex-teräkset yhdistävät sekä austeniittisten, että ferriittisten hyvät ominaisuudet. Duplex-teräksillä on hyvät lujuus-, sitkeys- ja korroosiokestävyys. Duplex-teräksiä käytetään etenkin kloridipitoisissa olosuhteissa sen paremman jännityskorroosiokestävyyden vuoksi. [6;13.]

Martensiittisen teräksen korkea hiilipitoisuus (0,01 - 1 %) mahdollistaa sen karkaisemisen hiiliteräksen tavoin, jolloin materiaalin lujuus ja kovuus kasvavat. Kovien terästen tapaan martensiittiset ovat hyvin koneistettavia, mutta muovattavuus on hauraudesta johtuen hankalaa. [6;13.]

4 Korroosio

Korroosio tarkoittaa materiaalin tuhoutumista ympäristön kemiallisesta tai sähkökemiallisesta vaikutuksesta. Myös mekaaninen rasitus usein nopeuttaa korroosiota. Lähestulkoon kaikissa mahdollisissa ympäristöissä on korroosiolle altistavia tekijöitä. Näitä ovat mm. ilmassa oleva kosteus ja sen sisältämät suolat sekä teollisuuden ja liikenteen tuottamat happamat sekä emäksiset yhdisteet. Korroosiossa materiaali joko liukenee tai muuttuu muuten käyttökelvottomaan muotoon (esim. ruoste). Korroosio heikentää materiaalin rakennetta, ulkonäköä ja pinnanlaatua sekä aiheuttaa materiaalihukkaa. [3;4.]

Korroosio ja siltä suojautuminen aiheuttaa vuosittain maailmanlaajuisesti satojen miljardien eurojen kuluerän. Metallien jalostaminen kuluttaa malmivarojen lisäksi runsaasti energiaa ja kuormittaa täten ympäristöä. On arvioitu, että 25 - 30 % maailmassa vuosittain tuotetusta teräksestä tuhoutuu korroosion takia. Taloudellisesta näkökulmasta korroosio vaikuttaa käytännössä kaikkien ihmisten elämään suorasti tai epäsuorasti. Korroosiolta suojaaminen nostaa tuotteiden hintaa ja suojaamatta jättäminen taas lyhentää näiden elinikää. Julkinen infrastruktuuri, esimerkiksi vesi- ja viemäriverkosto, tiet, sillat sekä julkiset rakennukset vaativat korroosion vuoksi verovaroin maksettavia kalliita rakennustekniikoita sekä huoltoja. Arkisempia korroosion aiheuttamia ongelmia ovat esimerkiksi ulkona ruostuvat metalliesineet ja rakenteet kuten talojen peltikatteet tai autojen helmat. [3;4.]

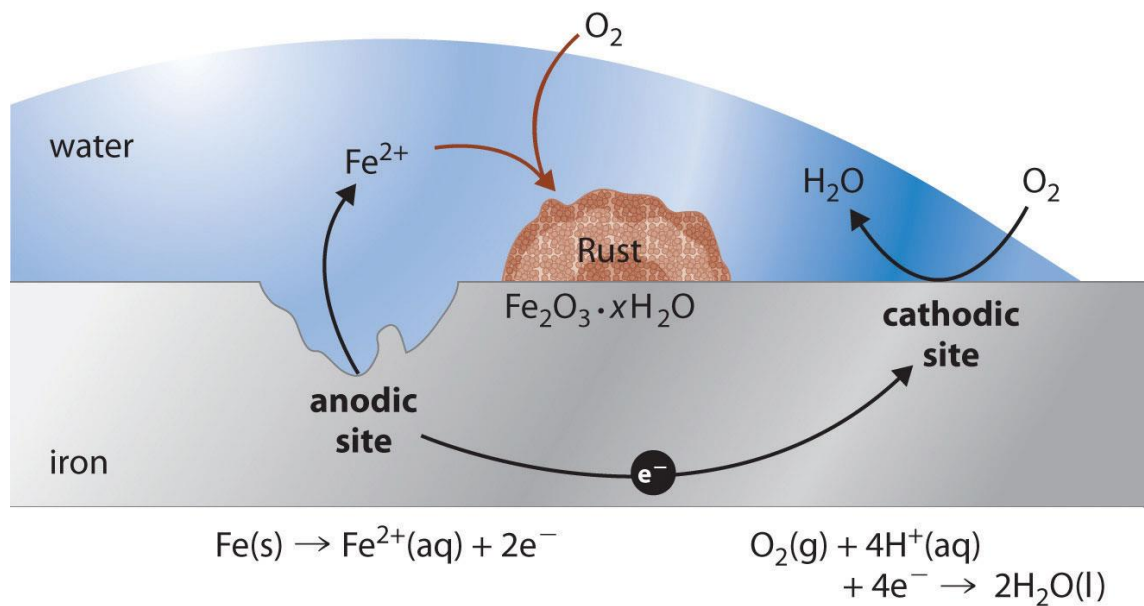
4.1 Korroosion kemia

Metallien korroosio jaetaan tyypillisesti kahteen pääryhmään:

- sähkökemiallinen korroosio
- kemiallinen korroosio

Sähkökemialliseen korroosioparin muodostukseen tarvitaan eri jalousasteen omaavat metallit sekä elektrolyytin muodostama yhteys näiden välille. Elektrolyytti on sähköä johtava aine, joka yleensä on vesi. Vesi ei puhtaana johda juurikaan sähköä, mutta siihen liuenneiden suolojen ja muiden mineraalien kanssa vesi on hyvin sähköä johtava neste. Eri jalousasteen metalleiden välillä on sähköinen potentiaaliero, joka pyrkii tasoittumaan. Potentiaalieron syntymiseen ei välttämättä tarvita kahta erilaista metallia, vaan saman metallin pinnalla eri osissa voi olla erilainen potentiaali. Materiaalin tulisi olla mahdollisimman homogeenistä, jotta potentiaalieroja ei pääsisi syntymään, ja näin korroosion kestävyys pysyisi mahdollisimman hyvänä. Jalompi metalli (katodi) muodostaa epäjalomman metallin (anodi) kanssa korroosioparin. Korroosiopari muodostaa suljetun virtapiirin, jolloin epäjalompi metalli syöpyy liueten positiivisina ioneina elektrolyyttiliuokseen (kuva 4). Samaa ilmiötä käytetään rakenteiden korroosiosuojauksessa pinnoittamalla teräsrakenteet, esim. peltikatteet ohuella sinkkikerroksella. Tällöin pinnan vaurioituessa sinkki alkaa terästä epäjalompana metallina syöpyä ensimmäisenä, jolloin alla katodina

toimiva pelti säilyy vaurioitumattomana. Korroosion nopeuteen vaikuttaa potentiaalierojen ja elektrolyytin sähkönjohtavuuden lisäksi anodin ja katodin pinta-alojen suhde. Mitä pienempi anodin pinta-ala on suhteessa katodiin, sitä suurempi korroosionopeus on. [3;4.]



Kuva 4 Sähkökemiallisen korroosion toimintaperiaate [14]

Kemiallisessa korroosiossa varsinaista elektrolyyttiä ei tarvita, vaan metalli liukenee suoraan syövyttäviin nesteisiin ja kaasuihin. Koska ympäristön lämpötilalla on suuri merkitys kemialliselle korroosiolle, sitä esiintyy etenkin kuumissa ympäristöissä, kuten erilaisissa polttokammioissa ja kuumia palokaasuja kuljettavissa putkistoissa. Tämän tyyppistä korroosimuotoa kutsutaan myös korkean lämpötilan korroosioksi. Koska tässä insinöörityössä tutkittava lämmönvaihdin ei ole sen normaalissa käyttöympäristössä altistunut kuumille ja syövyttävälle aineille, keskitetään tutkimus ruostumattoman teräksen sähkökemiallisiin korroosiotyyppeihin. [3; 4; 5.]

4.2 Ruostumattoman teräksen korroosio

Ruostumaton teräskin voi altistua korroosiolle. Tällöin jokin ympäristön aiheuttama jatkuva rasitus estää vaurioituneen passiivikalvon korjautumisen, jolloin metalli alkaa korrodoitumaan. Ruostumattoman teräksen kiderakenne ja käytetyt seosmetallit määrittelevät korroosiokestävyyden erilaisiin olosuhteisiin. Esimerkiksi molybdeenin lisäys parantaa pistekorroosiokestävyyttä happamissa ympäristöissä.

Tyypillisin ruostumattoman teräksen korroosion aiheuttaja on vesi ja siihen liuenneet aineet. Veden korrodoivuuteen vaikuttaa etenkin lämpötila ja kloridipitoisuus. Muita tekijöitä ovat esimerkiksi veden happi- ja rautapitoisuus, happamuus, mikrobieliöstö, virtausnopeus ja muut kemikaalit. Eri teräslaaduille on viitteellisiä taulukoita kriittiselle lämpötilalle niiden altistuessa erilaisille kemikaaleille. Koska korroosion aiheuttajat ovat niin moninaiset, eivät nämä taulukot ole varmoja, vaan niitä on tulkittava suuntaa antavina. [3.]

Seuraavaksi käydään läpi tässä työssä oleellisia korroosimuotoja.

4.2.1 Rakokorroosio

Rakokorroosiota (kuva 5) esiintyy nimensä mukaisesti paikoissa, joissa materiaalissa on ahtaita rakoja. Tällöin vesi tai muu elektrolyyttinä toimiva liuos ei pääse vaihtumaan nopeasti. Rakokorroosiota esiintyy hitsipinnoilla, pulttien ja laippojen liitospinnoilla sekä erilaisissa pinnan halkeamissa. Rakokorroosiota voidaan vähentää suunnittelemalla ja valmistamalla rakenteet mahdollisimman saumattomiksi ja tasaisiksi.



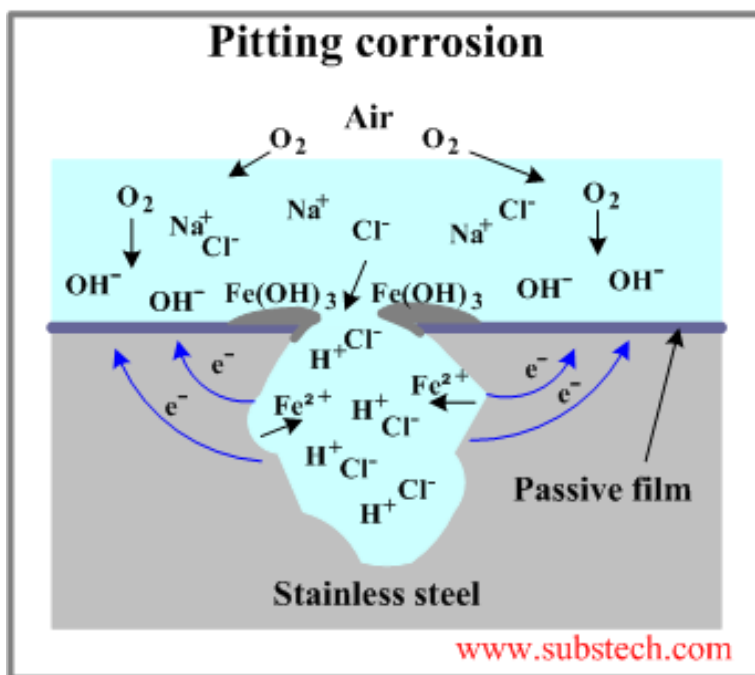
Kuva 5 Rakokorroosiota pulttiliitoksessa

4.2.2 Yleinen korroosio

Yleisessä korroosiossa ruostumattoman teräksen passiivikalvo on tuhoutunut suurelta osalta tai kokonaan. Yleisessä korroosiossa metallin anodinen ja katodinen alue vaihtaa jatkuvasti paikkaa, jolloin korroosio levittyy laajalle alueelle. Pinnat syöpyvät yleisessä korroosiossa suunnilleen samalla nopeudella joka kohdassa.

4.2.3 Pistekorroosio

Pistekorroosio on ruostumattomalle teräkselle ominaista etenkin kloridipitoisessa vedessä (kuva 6). Jo 50 ppm:n kloridipitoisuuksilla pistekorroosioalttius kasvaa nopeasti. Pistekorroosio on paikallinen korroosimuoto, jossa passiivikalvon vauriokohta alkaa korrodoitumaan. Korroosio etenee syvyyssuunnassa, ja se voi tietyn syvyyden saavutettuaan pysähtyä. Yleensä pinnalla oleva ”alkupiste” on halkaisijaltaan pienempi kuin syvälle syöpyneen alueen halkileikkaus.



Kuva 6 Pistekorroosion syntymekanismi [16]

Pistekorroosion kestävyuden määrittämiseen käytetään pistesyöpymskerrointa PRE (Pitting Resistance Equivalent), joka lasketaan kaavasta $PRE = \%Cr + 3,3x\%Mo + 16x\%N$. Kertoimella voidaan tarkastella myös yleistä korroosionkestävyyttä.

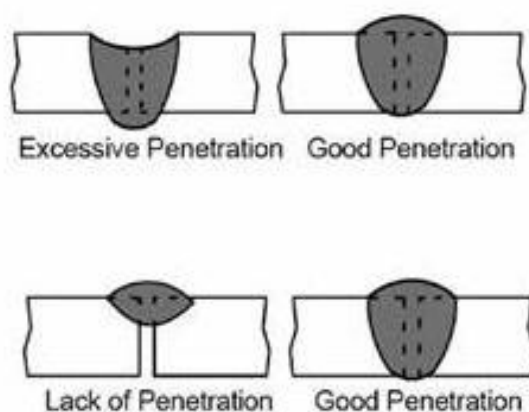
5 Ruostumattoman teräksen hitsaaminen

Hitsaus tarkoittaa kappaleiden liittämistä toisiinsa sulattamalla niiden välinen sauma yhteen. Hitsauksessa lämmönlähteinä käytetään useita erilaisia menetelmiä, kuten kaasuliekkä, laseria, sähkövirralla muodostettua valokaarta tai hankauksen aiheuttamaa kuumenemista. Tässä työssä käsitellään hitsausmenetelmien ja -tekniikoiden sijaan hitsien korroosiota ja sen ehkäisemiseen liittyviä seikkoja.

Korroosiolle alttiissa ympäristössä käytettävän ruostumattoman teräksen hitsauksessa hitsin laatuun tulee kiinnittää erityistä huomiota, sillä usein hitsi on se kohta, josta korrosio alkaa ensimmäisenä. Hitsin korroosiokestävyyteen vaikuttavat hitsaustekniikan lisäksi lisäaineen soveltuvuus, hitsin suojaaminen, jälkikäsittely ja hitsin virheettömyys. Oikein tehdyn hitsin korroosiokestävyys ei juuri eroa perusaineen kestävydestä.

5.1 Hitsin laatu

Jotta ruostumattoman teräksen hitsi olisi ruostumaton, tulee hitsin rakenteen oltava pinnaltaan virheetön. Hitsissä olevat huokokset, halkeamat ja muut muotovirheet lisäävät merkittävästi korroosioriskiä. Oikeat hitsausarvot ovat ehdottoman tärkeitä etenkin säiliörakenteita hitsattaessa, joissa juuren puolen hitsiä ei päästä mekaanisesti jälkikäsittämään. Säiliörakenteissa rakokorroosiota aiheuttaa tyypillisesti hitsisaumojen juuren vajaa tai liiallinen tunkeuma (kuva 7). [9.]

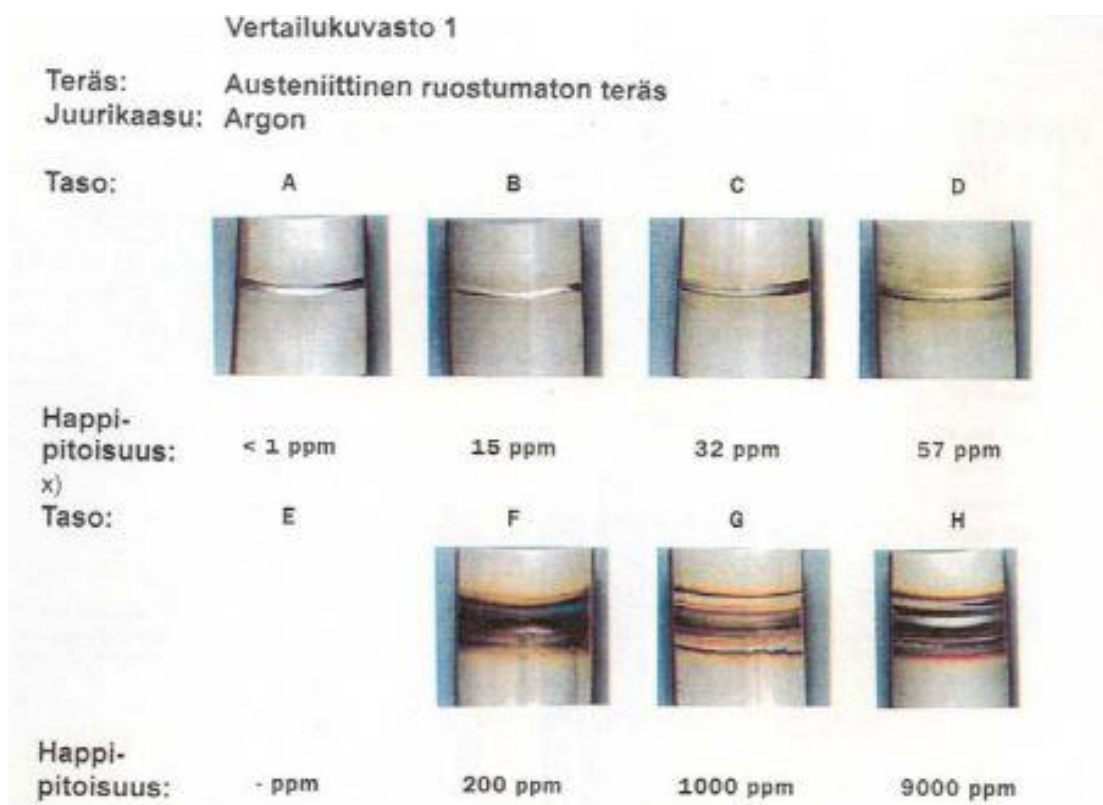


Kuva 7 Vasemmalla hitsiliitoksen virheitä [10]

5.2 Hitsin suojaaminen

Hitsattaessa liitettävät pinnat kuumenevat useaan sataan asteeseen. Sula hitsi ja sen reunamat reagoivat ilman hapen kanssa, jolloin hitsipalon pinta ja sen reunat hapettuvat (kuva 8). Hapettuminen aiheuttaa hitsin pinnan rosoisuutta, halkeilua ja huokoisuutta sekä heikentää korroosionkestävyyttä. Tätä voidaan välttää käyttämällä hitsauksen yhteydessä suojakaasua.

Suojakaasun tarkoitus on syrjäyttää hitsiä ympäröivä ilma. Suojakaasuissa pääkomponenttina käytetään pääasiassa inerttejä kaasuja kuten argonia (Ar) tai heliumia (He). Muita komponentteja ovat esimerkiksi typpi (N), vety (H), hiilidioksidi (CO₂) ja jopa happi (O₂). Erilaisilla kaasuseoksilla voidaan vaikuttaa hitsin nopeuteen, tunkeumaan, korroosiokestävyyteen, juoksevuuteen, geometriaan sekä ulkonäköön. [9; 11; 12.]



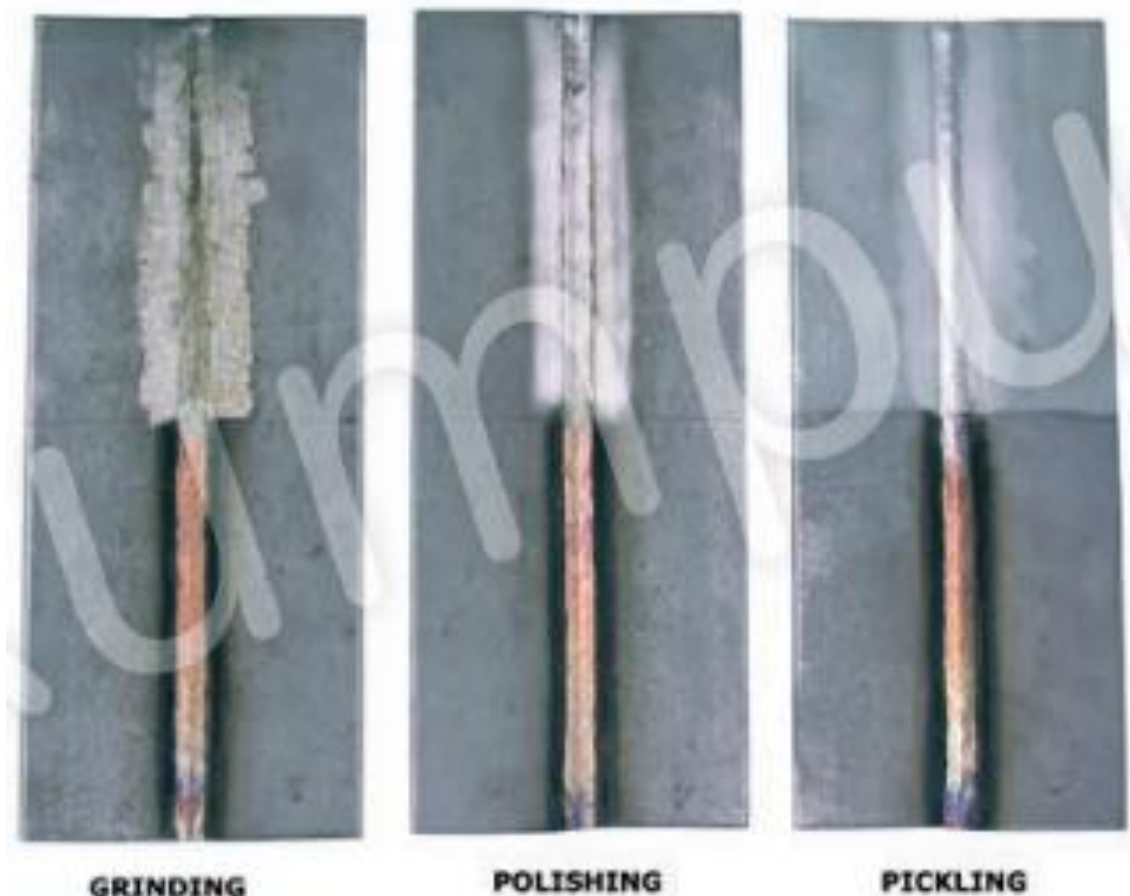
Kuva 8 Suojakaasun vaikutus hitsin hapettumiseen [11]

Hitsin hapettuminen täytyy estää myös juuren puolelta. Juuren suojaamiseen on useita erilaisia menetelmiä. Avoimia rakenteita hitsattaessa voidaan käyttää juuriteippiä tai juuritukea. Juuriteippi on kuumaa kestävää, itsekiinnittyvää nauhaa, joka tiivistää juuren puolen pinnat estäen hapen pääsyn hitsiin. Hitsaamisen jälkeen teippi poistetaan. Levyliitoksia tehdessä yleinen juurensuojaustapa on juurituen käyttäminen. Hapettumisen estämisen lisäksi juurituella voidaan vaikuttaa hitsipalon juuren puoleiseen geometriaan.

Suljettujen rakenteiden, kuten säiliöiden ja putkien hitsaamisessa ei voida edellä mainittuja suojamenetelmiä käyttää. Tällöin juuren puolelle johdetaan juurensuojakaasua, joka syrjäyttää hitsiä ympäröivän ilman. Jotta juuren suojaus onnistuisi mahdollisimman hyvin, tulisi happipitoisuuden olla enintään 25 ppm. Onnistuneesti suojattu juuripalko on väriltään hopean harmaa, lähes perusaineen väristä, eikä siinä ole tummentumia. Juurensuojakaasua käytettäessä myös juuren pinnasta tulee sileämpi ja tasalaatuisempi, jolloin sen korroosionkestävyys paranee. [11; 12.]

5.3 Jälkikäsittely

Hitsauksessa syntyneet hapettumat, kuonaroiskeet ja epätasaisuudet pyritään poistamaan hitsin jälkikäsittelyllä. Jälkikäsittelyllä poistetaan hapettunut ja kuumuuden aiheuttama kromiköyhä pintakerros, jonka alta paljastuu puhdasta metallia. Tämä mahdollistaa vaurioituneen passiivikalvon uusiutumisen, jolloin korroosionkesto paranee. Jälkikäsittely voidaan tehdä mekaanisesti hiomalla, happopeittauksella tai näiden yhdistelmällä (kuva 9). Tarvittaessa passiivikalvon muodostumista voidaan nopeuttaa passivoinnilla, jolloin alue käsitellään vielä lopuksi hapettavalla hapolla. Koska korroosio alkaa useimmiten pinnan epäjatkuoista, tulisi hitsin jälkikäsittelyssä pyrkiä mahdollisimman sileään lopputulokseen korroosiokestävyyden maksimoimiseksi. Hitsauksen kuumuus voi aiheuttaa hitsissä ja sen ympäristössä sisäisiä jännityksiä sekä kromiköyhiä vyöhykkeitä. Jännityskohdat ovat erityisen alttiita raerajakorroosiolle. Tätä voidaan välttää hitsin lämpökäsittelyllä. [11; 12.]



Kuva 9 Hitsi jälkikäsittelyinä hiomalla, kiillottamalla sekä peittämällä [13]

6 Rst-lämmönvaihdin

Tässä insinööriyössä tutkittava höyry-vesi -lämmönvaihdinta on käytetty laivakeittiön astianpesukoneen käyttöveden lämmittämiseen. Lämmönvaihtimen ruostumattomasta ohutlevystä valmistettu vaippa on yhdestä sivusta altistunut pistekorroosiolle (kuva 10), joka on syövyttänyt vaipan seinämää useita läpi meneviä reikiä. Vaippaan on liimattu joka sivulta 10 mm:n vaahtomuovieriste lämmönhukan vähentämiseksi (kuva 11).



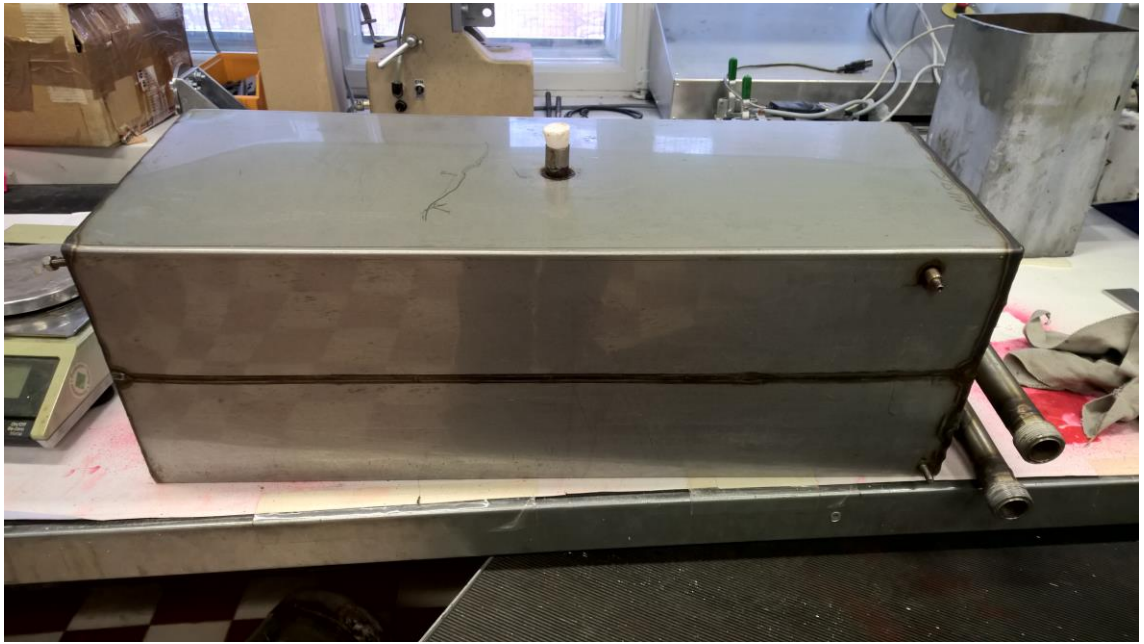
Kuva 10 Pistekorroosion syövyttämiä reikiä



Kuva 11 Lämmönvaihtimen tutkiminen aloitettiin puhdistamalla eristeet ja liimajäämät.

Lämmönvaihtimen sisällä kiertävä vesi on joko satamasta bunkrattua, eli vesisäiliöt on täytetty satamassa hanavedellä, tai evaporoitua. Evaporoinnissa suolaisesta merivedestä tuotetaan makeaa vettä tislausprosessin avulla. Jotta tislattu vesi vastaisi ominaisuuksiltaan tavallista hanavettä, se käsitellään vielä mineralisaattorilla, jossa veden normaali mineraalipitoisuus palautetaan. Veden saliniteetin voidaan siis olettaa olevan hanaveden tasoista.

Jotta lämmönvaihdinta päästiin tutkimaan, aloitettiin työ poistamalla kaikki vaahtomuovieristeet ja puhdistamalla tinnerillä kaikki liimajäämät, jolloin päästiin tarkastelemaan itse vaipan pintaa ja sen vaurioita. Visuaalisen tarkastelun perusteella korroosiota oli vain yhdellä sivulla, muiden sivujen näyttäessä muutamaa naarmua lukuun ottamatta vaurioitumattomalta (kuva 12). Huomiota sen sijaan kiinnitti putkiliitosten sekä hitsisaumojen laatu (kuvat 13 ja 14). Putkien liitoskohdassa oli silminnähden ruostetta. Hitsit sen sijaan olivat kauttaaltaan tummentuneet, mikä viittaa puutteelliseen suojakaasun käyttöön. Vaippaan kiinnitettyjen putkien liitokset olivat näkyvästi ruostuneet.



Kuva 12 Lämmönvaihdin puhdistettuna. Vastakkaisilla sivuilla ei ollut näkyvää korroosiota.



Kuva 13 Hitsit olivat kauttaaltaan tummentuneet



Kuva 14 Rakokorroosiota putkien liitoksissa

7 Tutkimuksen suorittaminen

Lämmönvaihtimen korroosion syiden selvittämisessä ensimmäinen vaihe oli tutkia, onko korroosion alkanut vaipan sisä- vai ulkopuolelta. Tutkimus päätettiin aloittaa vaipan ulkopuolen tunkeumanestetarkastuksella (PT=Penetrant Testing). Tunkeumanestetarkastuksella pystytään havaitsemaan silmälle näkymättömät vauriokohdat, jolloin pinnan laadusta saadaan todennukaisempi käsitys. Tarkastuksen jälkeen lämmönvaihdin sahattiin palasiksi, jolloin sisäosia päästiin tutkimaan. Materiaalivirheiden selvittämiseksi käytettyjen materiaalien kiderakenne sekä kemiallinen koostumus tarkistettiin, sekä korroosiopintoja tutkittiin mikroskoopilla.

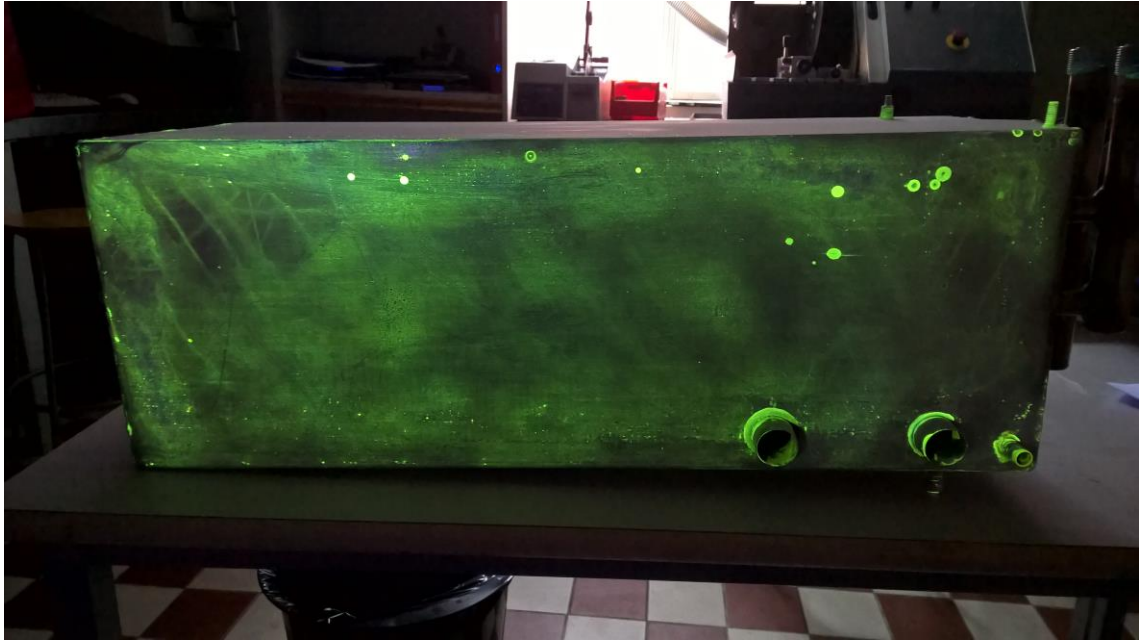
7.1 NDT

Tunkeumaneste-, eli PT-tarkastus on rikkomaton aineenkoetus menetelmä (NDT=Non-Destructive Testing), joka on erittäin nopea ja helppo toteuttaa. Tunkeumanestetarkastuksella etsitään materiaalin pinnalla olevia vaurioita, kuten säröjä, reikiä, halkeamia

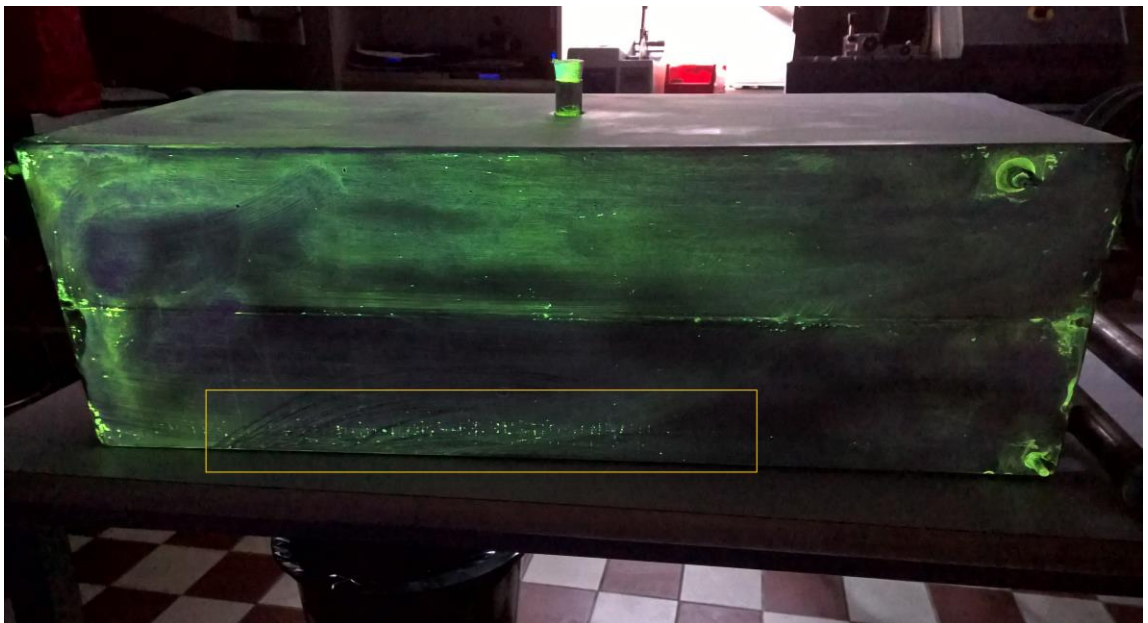
sekä huokosia. Kuten kaikilla NDT-menetelmillä, PT-tarkastuksella voidaan havaita sel-
laisia virheitä tutkittavassa kohteessa, joita paljaalla silmällä ei huomaisi. Tarkastus pe-
rustuu erittäin alhaisen pintajännityksen omaavan tunkeumanesteen kapillaariseen
imeytymiseen pinnan huokosiin. Menetelmää voidaan käyttää lähes kaikille kovalle sekä
sileille pinnoille. Koska tarkastus perustuu pintaan asti ulottuvien epäjatkuvuuksien hu-
koisuuteen, ei menetelmällä pystytä tarkastelemaan ehjän pinnan alapuolisia vauriokoh-
tia.

Tutkimus aloitettiin puhdistamalla tarkasteltavat pinnat niin puhtaaksi kuin mahdollista.
Tämän jälkeen pinnalle levitettiin fluoresoiva tunkeumaneste. Tunkeumanesteen imey-
dyttyä 5 - 10 minuuttia, ylimääräinen neste poistettiin huuhtelemalla ja liinoilla pyyhki-
mällä. Tämän jälkeen pinnalle levitettiin kehiteaine. Kehite absorboi huokosiin imeyty-
neen tunkeumanesteen, jolloin pinnan vauriot tulivat paremmin esille. Kehite on värjätty
valkoiseksi paremman kontrastin saamiseksi. Kehiteaineen levityksen jälkeen lämmön-
vaihinta tarkasteltiin UV-valolla pimeässä huoneessa.

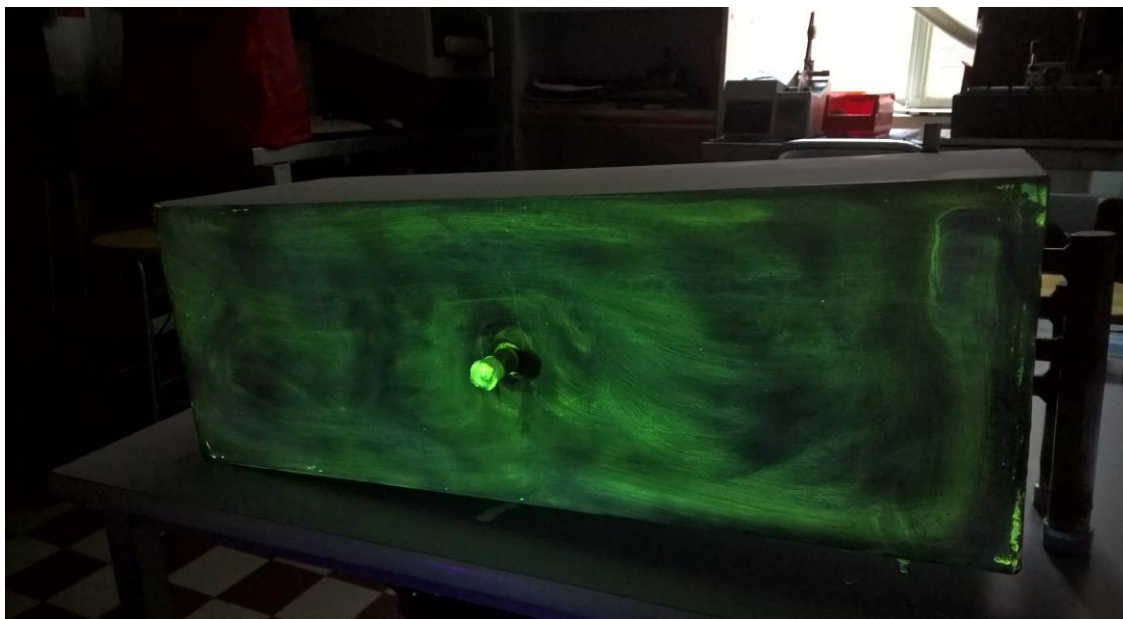
PT ei paljastanut lämmönvaihtimen pinnasta juurikaan sellaisia vaurioita, joita ei paljaalla
silmällä nähnyt. Testin tarkoituksena oli selvittää, onko pinnalla vielä huomaamattomia
alkavia korroosioalueita. Suurimmat korroosiopisteet olivat vaipan alapuoleisella sivulla
(kuva 15). Muilta sivuilta ei vaipan läpi meneviä pisteitä löytynyt. Vaipan hitsiliitoksen
puoleisella sivulta löytyi säännöllinen rivi pieniä pistemäisiä koloja (kuva 16). Kyseessä
voi olla vaipan työstämisessä käytetyn puristimen rosoisten leukojen jättämä painauma,
tai metallipölyn korrodoituminen eristeen alla. Pienet hiukkaset voisivat korrodoituessaan
vaurioittaa teräksen passiivikalvoa muodostaen tämän kaltaisia pieniä korroosiopisteitä
pinnalle. Pisteiden ei kuitenkaan katsottu olevan keskeisessä roolissa selvitettäessä
syitä vaipan puhki syövyttäneelle korroosiolle. Vaipan kaksi muuta sivua olivat ulkoisesti
hyvässä kunnossa, eikä näistä löytynyt merkkejä korroosiosta (kuva 17).



Kuva 15 Vaipan pohjan korroosiopisteitä



Kuva 16 PT:n paljastama pinnan vaurio hitsin alapuolella



Kuva 17 Muista kyljistä ei löytynyt huokosia

7.2 Vaipan paloittelu

Tunkeumanestetarkastuksen jälkeen työtä jatkettiin sahaamalla lämmönvaihtimen vaippa auki, jolloin päästiin käsiksi sisäpuolisiin pintoihin. Paloittelu tehtiin vannesahalla ja katkaisulaikalla varustetulla kulmahiomakoneella.

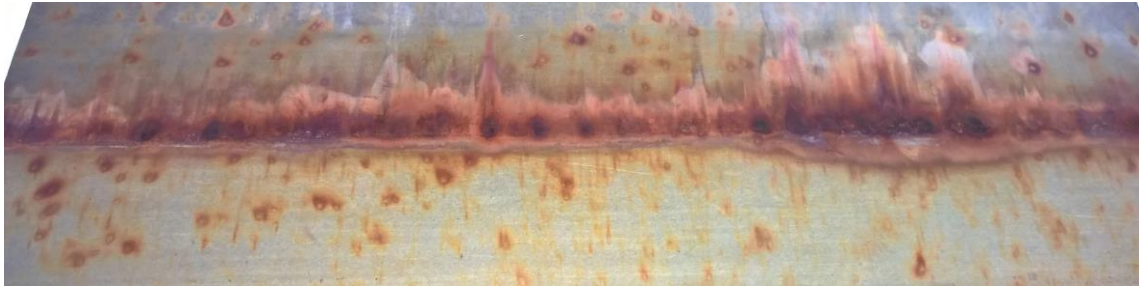
Vaipan sisältä paljastui paljon laajempi korroosioaurio, kuin ulkopuolen kunnosta pystyi olettamaan (kuva 18). Sisäseinämillä oli kauttaaltaan korrodoituneita pisteitä. Osa pisteistä oli pinnallisia värimuutoksia, eikä kaikkia pystynyt tuntemaan kynnellä kokeillessa. Paikoitellen korroosiopisteiden kohdalla oli paksu kerros ruostetta (kuva 19). Seinämillä esiintyvät korroosioalueet olivat säännönmukaisessa linjassa, mikä viittasi hitsausroiskeiden tai muun epäpuhtauden joutumiseen teräksen pinnalle. Levyt liittävät hitsit olivat sisäpuolelta kauttaaltaan korrodoituneet (kuva 20). Tutkimuksessa yllätti käämien korroosiomuoto. Seinämien sijaan käämeissä ei ollut yksittäisiä korroosiopisteitä, vaan putkien pinnat olivat lähes kauttaaltaan yleisen korroosion peitossa. Sen sijaan käämien vieressä oleva ohut putki, joka ilmeisesti oli ollut jonkinlainen lämpöanturi, oli täysin vaurioitumaton (kuva 21). Lämmönvaihtimen päädyssä oli yhdestä sivusta vaippaan kiinnitetty levy, jonka takana on veden sisääntuloreikä. Levyn tarkoituksena on ilmeisesti luoda virtaukseen turbulenssia, jolloin lämmönsiirto tehostuu. Levyn pinnalla oli voimakkaasti ruostuneita pisteitä (kuva 22).



Kuva 18 Lämmönvaihdin halkaistuna



Kuva 19 Korroosiopisteiden päälle kertynyttä ruostemateriaalia. Irtonaiset partikkelit ovat vaipan sahauksesta syntyneitä.



Kuva 20 Hitsin korroosiota



Kuva 21 Käämien korroosiota. Nuolen osoittama anturiputki oli täysin vaurioitumaton.

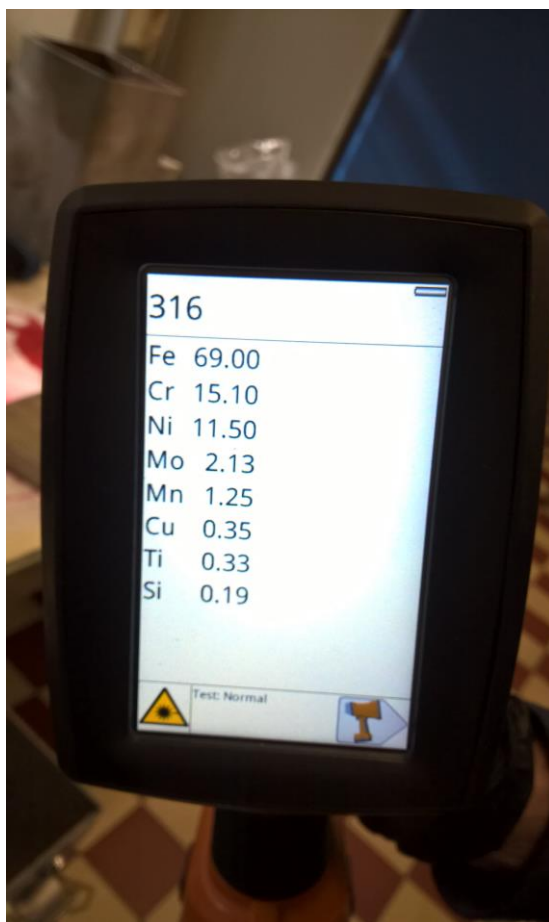


Kuva 22 Lämmönvaihtimen päädyssä oli yhdestä sivusta kiinnitetty levy, jonka takana oli veden sisääntuloaukko. Levyn tarkoitus on ilmeisesti muodostaa virtauksesta turbulenttista lämmönsiirron parantamiseksi.

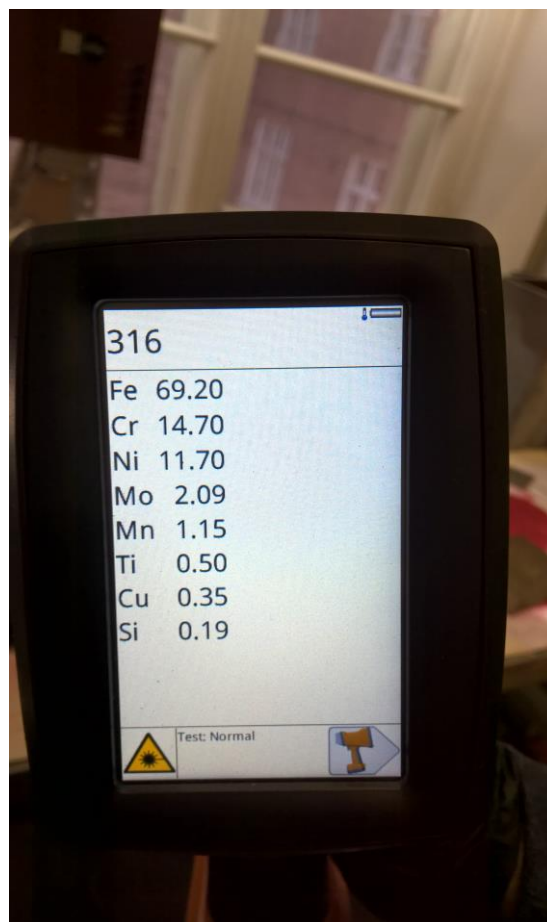
7.3 XRF- ja OES-analyysi

Paloittelun jälkeen ruvettiin tutkimaan lämmönvaihtimessa käytettyjä materiaaleja. Projektin lähtötilanteessa tiedettiin, että materiaalina on hyvin todennäköisesti käytetty AISI 304 - tai AISI 316L -luokan terästä. Koska materiaalista ei ollut täyttä varmuutta, tehtiin sekä vaipasta että käämistä otetuille näytepaloille koostumusanalyysit. Aluksi mittaukset suoritettiin kannettavalla XRF (Röntgenfluoresenssispektrometria) -analysaattorilla. XRF -mittaus perustuu laitteen lähettämään röntgensäteilyyn, joka aiheuttaa atomien elektronien liikehdintää. Elektronien liikehdintä synnyttää fluoresenssisäteilyä, jonka taajuus on kuullekin alkuaineelle ominainen. Laitteen detektori tunnistaa tämän säteilyn ja laskee alkuaineiden suhteelliset osuudet.

Lämmityskäämin sekä vaippamateriaalin alkuainepitoisuudet olivat lähellä toisiaan. XRF-analysaattorin ilmoittamat koostumustiedot olivat lähellä AISI 316 – luokan terästä. Näytteiden kromipitoisuudet olivat kuitenkin hieman liian pienet. Analyysin mukaan käämin kromipitoisuus oli 15,1 % ja vaipan 14,7 % (kuvat 23 ja 24), kun taas AISI-standardissa määritelty pitoisuus on 16 - 18 % (liite 1).



Kuva 23 Käämin XRF-analyysi



Kuva 24 Vaipan XRF-analyysi

Koska XRF ei ole standardien määrittämiseen käytetty mittausten menetelmä, ei tuloksista voitu tehdä suoria päätelmiä materiaalivirheestä. Jotta mahdollisesta liian pienestä kromipitoisuudesta saatiin varmuus, oli näytteet vielä analysoitava OES (Optinen emissiospektroskopia) -mittauksella. OES-analysaattori höyrystää näytteen pintaa valokaaren avulla, jolloin höyrystyneet atomit siirtyvät analysaattorin valokaarikanavaan. Atomit virittyvät vireystilaan, jonka purkautuessa ne emittoivat kullekin alkuaineelle ominaista ultraviolettialueen emissiota. Laite mittaa kunkin alkuaineen emission ja laskee näistä tiedoista seosaineiden suhteelliset pitoisuudet. [8.]

OES-mittaukset tehtiin Aalto-yliopiston valutekniikan laboratoriossa Otaniemessä. Molemmista näytteistä otettiin viisi erillistä mittausta, joiden tuloksista laskettiin keskiarvo. Mittauksessa käytettävä laite ilmoitti teräksen olevan 1.4571 -luokan terästä. AISI-standardissa tämä vastaa 316ti -luokkaa. 316L ja 316ti ovat koostumukseltaan lähes identtisiä keskenään. Eroina näissä kahdessa on ainoastaan niille määritetty maksimihiilipitoisuus. Liitteen 1 mukaan 316L:n hiilipitoisuuden tulee olla alle 0,03 %, kun taas 316ti:lle vastaava raja on 0,08 %. Koska käytettävissä olevalla analysaattorilla ei voitu näin tarkkoja arvoja luotettavasti mitata, ei mittauksesta voitu varmuudella todentaa, minkä tyyppistä 316-terästä lämmönvaihtimessa on käytetty. Tällä kertaa molempien näytteiden kromipitoisuudet täyttivät standardissa määritetyt rajat, pitoisuuksien ollessa rajan alapäässä (alaraja 16 %, molempien näytteiden kromipitoisuuden ollessa 16,3 %). Sen sijaan näytteiden molybdeenipitoisuudet olivat hieman määriteltujen arvojen alapuolella (liitteet 2 ja 3). Molybdeenipitoisuudet jäivät noin kymmenesosaprosentin päähän määritellystä raja-arvosta. Näin pienestä erosta ei vielä voida varmentaa korroosion johtuvan materiaaliveirheestä. Tällainen poikkeama voi johtua mittalaitteen kalibroinnista tai näytteen pinnan epätasaisuudesta.

7.4 Mikroskooppitutkimus

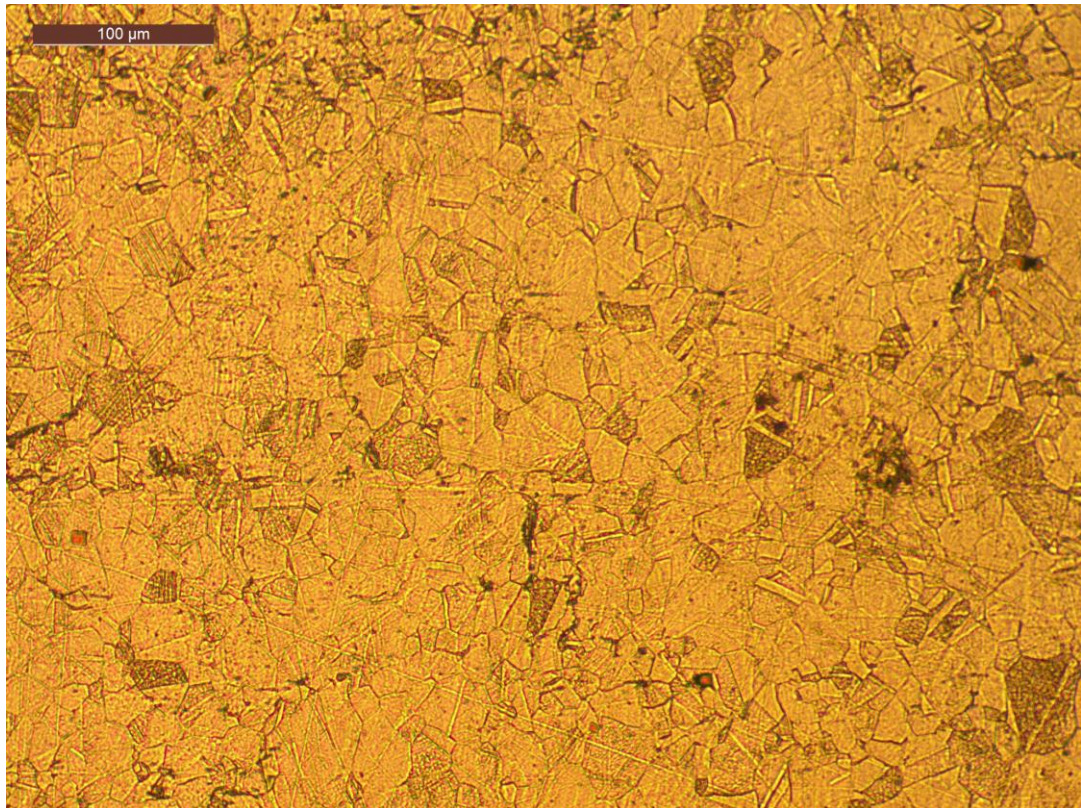
Vaikka materiaalit olivat kemiallisen koostumuksensa puolesta standardien mukaisia, voi myös vääränlainen kiderakenne aiheuttaa materiaaliveirheitä. Mikroskooppitutkimuksella varmistettiin, että käytetty teräs on austeniittista. Lämmönvaihtimesta leikattiin useita näytepaloja tutkimuksia varten. Näytteitä otettiin sekä vaipasta että lämmityskäämeistä. Tutkimuksessa käytettiin Metropolian materiaalitekniikan laboratorion optisia Leica -valomikroskooppeja. Pienemmällä suurennoksella tarkasteltiin korrodoituneita alueita ja suuremman suurennuskyvyn omaavalla mikroskoopilla tarkasteltiin materiaalien kiderakennetta. Poikkeava kiderakenne voisi jo itsessään olla selittävä tekijä korroosiolle. [3.]

Kiderakenteiden tutkiminen aloitettiin leikkaamalla lämmityskäämistä ja vaipasta palat, jotka ”napitettiin” näytepuristimella (kuva 25). Napista valmistettiin hie hiomalla ja kiillottamalla näytteen pinta täysin sileäksi. Tämän jälkeen hie peitattiin happokäsittelyllä, jotta metallin kiderakenne saataisiin paremmin näkymään.

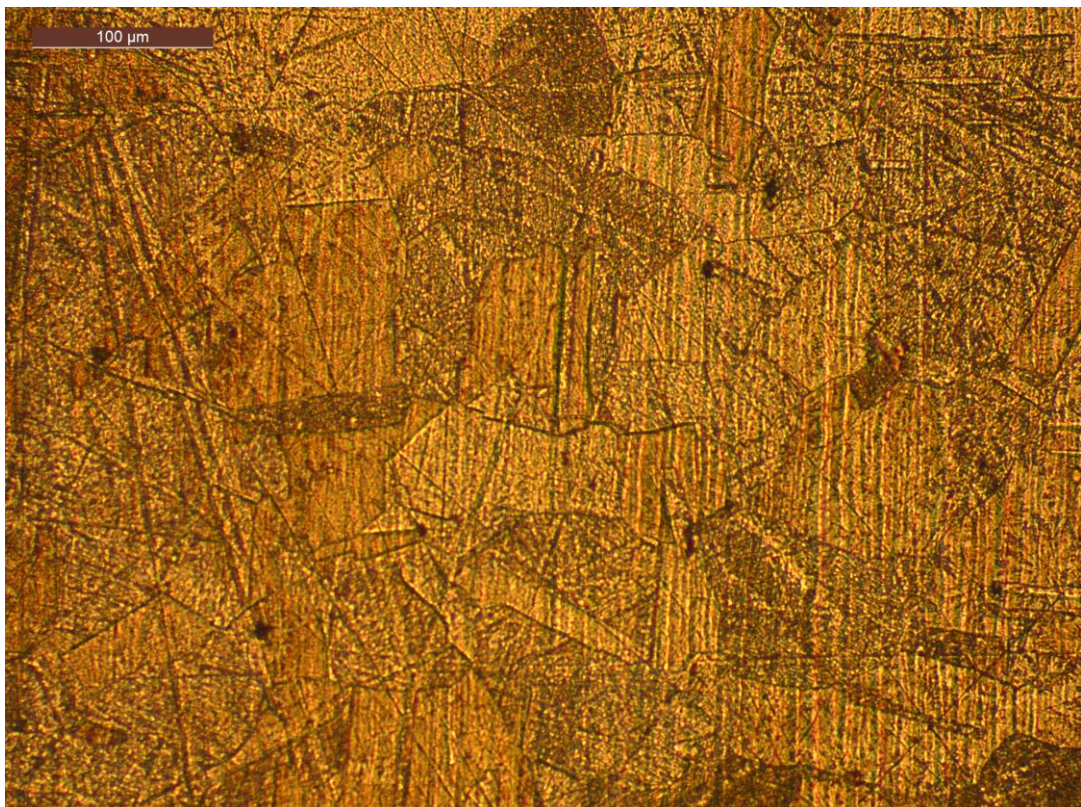


Kuva 25 Hie valmiina tutkittavaksi

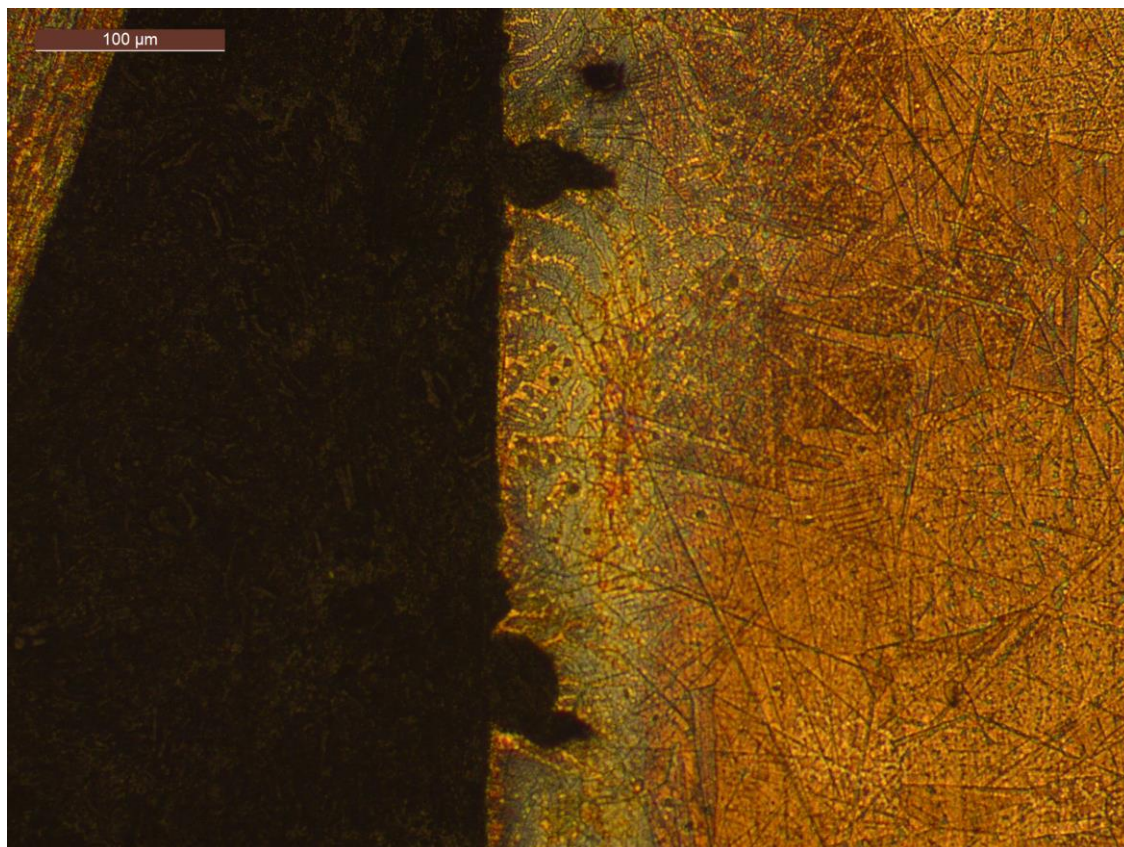
Vaipan ja käämin kiderakenteet olivat hieman erilaisia toisiinsa nähden. Molemmilla oli kuitenkin austeniittiselle teräkselle tyypillinen rakenne (kuvat 26 ja 27). Eroavaisuudet kiderakenteessa selittyvät materiaalien erilaisilla valmistusmenetelmillä. Lämmityskäämistä otetussa poikkileikkauksessa oli selvästi havaittavissa korroosion aiheuttama muutosta pinnan kiderakenteessa. Myös syvemmälle menneet korroosiopisteet näkyivät kuvissa (kuva 28). Tutkimus vahvisti sen, että materiaalissa ei ollut virheitä.



Kuva 26 Vaipan kiderakenne

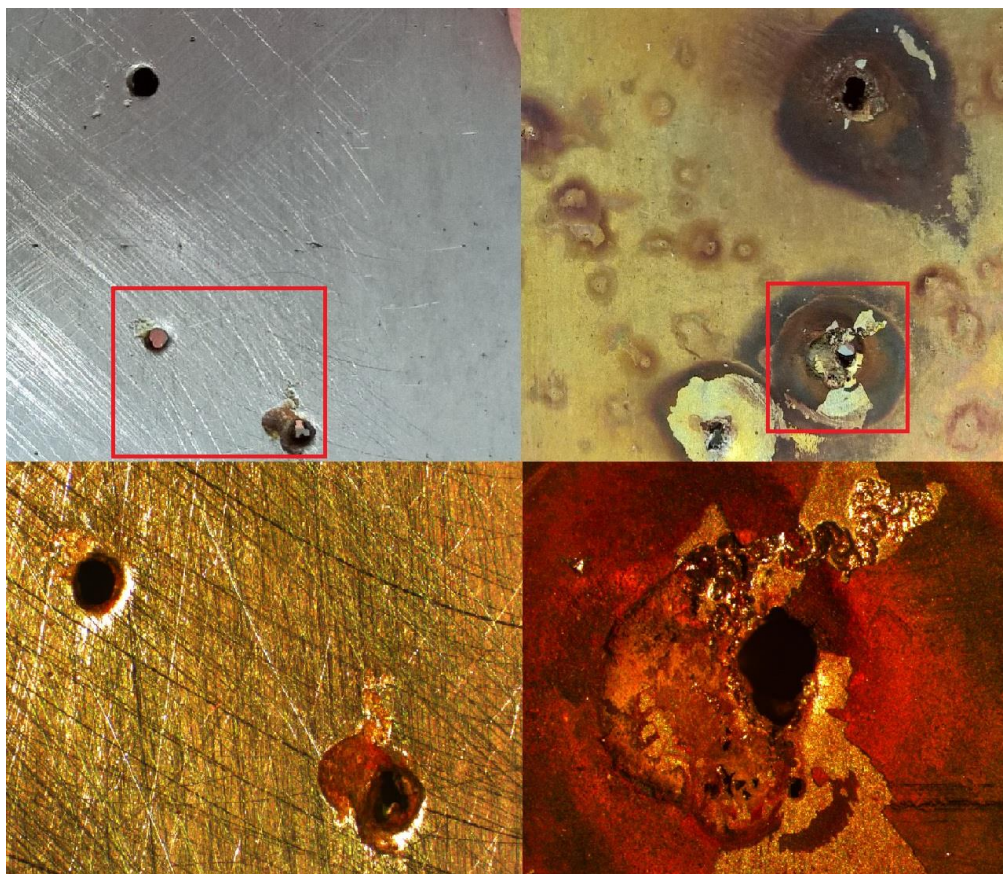


Kuva 27 Käämin kiderakenne



Kuva 28 Käämin pinnalla olevia korroosion syövyttämiä pisteitä. Kiderakenteessa näkyy myös selvä rajakohta, kuinka syvälle korroosio on edennyt.

Pienempisuurennoksisella mikroskoopilla tarkasteltiin erityisesti korrodoituneita pintoja. Itse korroosiosta ei löytynyt mitään tyypillisistä korroosiomuodoista poikkeavaa. Vaikka materiaalit todettiin samaksi ja kaikki kohdat lämmönvaihtimessa altistuvat samalle vedelle, esiintyi korroosio eri muodossa eri pinnoilla. Kuten aiemmin luvussa 4 todettiin, korroosioalttius kasvaa lämpötilan noustessa. Lämmönvaihtimen sisällä käämien pinta on kaikkein kuumin, jolloin myös pintaa suojaava passiivikalvo on tuhoutumisalttiimpi kuin viileämpänä pysyvät seinämät. Vaipan seinämien korroosiomuoto oli pistekorroosiota (kuva 29), kun taas lämmönvaihtajien käämien pintojen korroosio oli enemmän yleistä korroosiota (kuva 30).



Kuva 29 Vaipan pistekorroosiota ulko- ja sisäpinnoilla. Yläpuoliset kuvat ovat suurentamattomia.



Kuva 30 Käämin pinta oli lähes kauttaaltaan korroosion peitossa

Mikroskooppitarkastus paljasti vaipan liitoksesta selkeän hitsausvirheen. Vaipan pitkä hitsiliitos oli juuren puolelta korrodoitunut koko matkalta. Mikroskoopilla otetut kuvat osoittivat, ettei juuren puolella näy hitsipalkoa ollenkaan (kuva 31). Puutteellinen tunkeuma on jättänyt raon levyjen väliin, jolloin saumakohtaan on kehittynyt rakokorroosiota. Levyt olivat myös paikoitellen hyvinkin epätasossa keskenään, jolloin niiden välille on syntynyt porrastusta.



Kuva 31 Puutteellinen hitsin tunkeuma juuren puolella

Korroosiopintoja tutkittiin myös Metropolian pyyhkäiselektronimikroskoopilla, eli SEMillä (Scanning Electron Microscope). SEM muodostaa valon sijaan kuvan elektronisuihkun avulla. Koska elektronin aallonpituus on murto-osa näkyvän valon aallonpituudesta, pystytään SEMillä tarkastelemaan näytteitä huomattavasti yksityiskohtaisemmin. SEM on varustettu myös alkuainepitoisuuksien mittaamisen mahdollistavalla röntgenspektrometrillä, eli EDS:llä (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). EDS pystyy mittaamaan

hyvinkin pienestä näytteestä sen suhteelliset ainepitoisuudet. SEMillä tarkasteltiin muutamia korroosiopistettä ja niistä otettiin EDS-analyysit. Analyysin mukaan vaipan ja käämien koostumuspitoisuudet olivat samaa luokkaa kuin OES-mittauksessa, mutta muutamasta korroosiopisteestä löytyi huomattavan suuria fosforipitoisuuksia (5 - 15 %). Hitsin kuona-aineita, sekä veden epäpuhtauksia ehdotettiin aluksi fosforin alkuperäksi, mutta lopulta päädyttiin siihen, että fosfori oli PT-tarkastuksessa käytetystä fluoresoivasta tunkeumanesteestä peräisin. Huomionarvoista kuitenkin oli se, että ainoa täysin vaurioitumaton osa, eli lämpöanturin putki, oli koostumukseltaan selvästi erilainen. Anturiputken Cr-pitoisuus oli EDS:n mukaan 17,7 % ja Mo 2,7 % (Taulukko 1). Tämä selittää putken hyvän kunnon, sillä etenkin molybdeenin lisäys parantaa juuri pistekorroosion kestävyttä.

Taulukko 1 Anturiputken EDS-analyysi

Element	Element	Wt. %
Line	Wt. % Error	
C K	0.00 ± 0.00	
Al K	0.17 ± 0.01	
Si K	1.24 ± 0.03	
Cr K	17.68 ± 0.09	
Mn K	1.62 ± 0.12	
Fe K	63.61 ± 0.22	
Ni K	12.32 ± 0.19	
Zn K	0.63 ± 0.11	
Mo L	2.73 ± 0.06	

Total	100.00	

EDS:llä pyrittiin löytämään etenkin kloorijäämiä korroosioalueista, mutta näitä ei löydetty. Tämä oli odotettavissa, sillä veden mahdollinen klooripitoisuus on ollut joka tapauksessa todella pieni sekä näyte pestiin etanolissa ultraäänipesurilla ennen tutkimusta, jolloin viimeisetkin kloorijäämät ovat mahdollisesti huuhtoutuneet pois.

8 Tulokset ja päätelmät

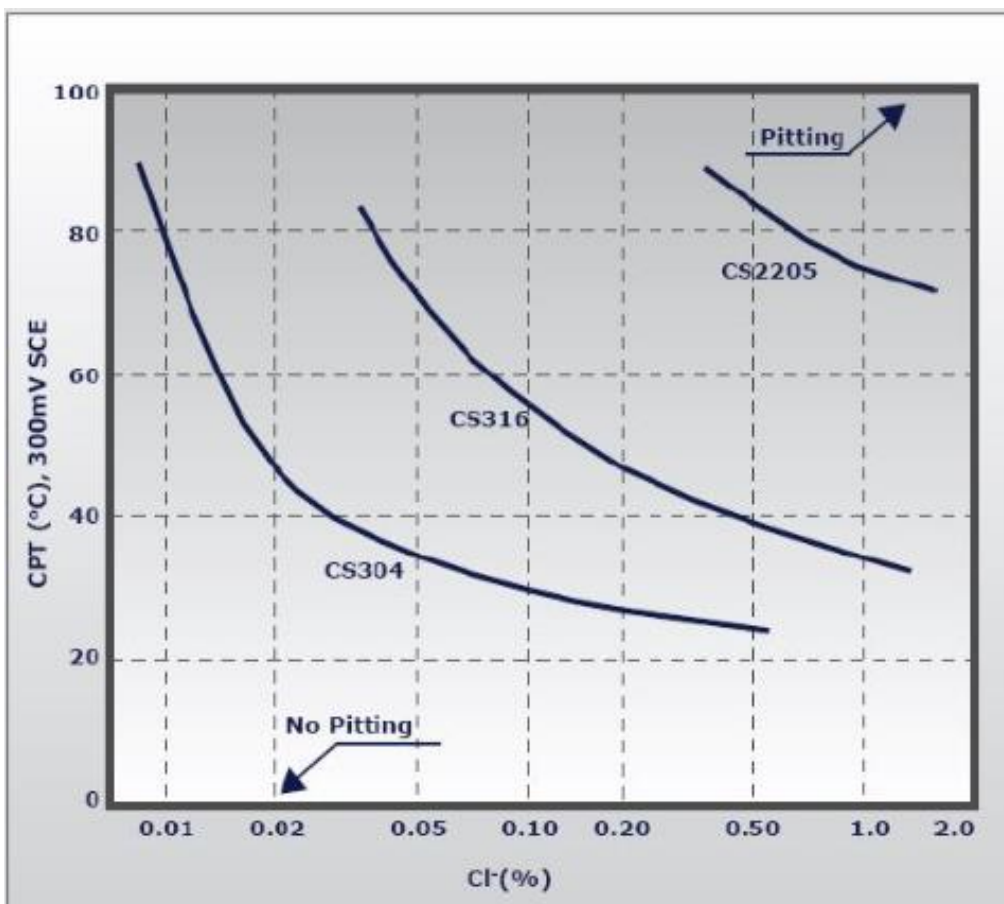
Lämmönvaihtimen hitseissä on selkeitä valmistusvirheitä. Kyljen pitkä sauma on hitsattu mitä ilmeisimmin robotilla. Hitsauksessa suojakaasun käyttö on ollut puutteellista, tai hitsausarvot vääriä. Myös hitsin jälkikäsitely on vajavainen. Tämän todistavat hitsien ulkopuolen tummentumat ja epätasaisuudet sekä hitsin sisäpuolen puutteellinen tunkeuma. Puutteellinen tunkeuma on jättänyt liitettävien levyjen reunat irti toisistaan, jolloin niiden välille on kehittynyt rakokorroosiota. Levyt olivat myös paikoitellen epätasossa toisiinsa nähden, jolloin saumakohtaan kehitty epätasainen reuna. Koska lämmönvaihtimen sisällä olevat olosuhteet ovat jo valmiiksi suotuisat korroosiolle, lisäävät kaikenlaiset pinnan epätasaisuudet korroosion riskiä. Vaipan päätylevyt ovat ilmeisesti käsin hitsattuja. Päätylevyjen hitsien pinta oli hyvin epätasainen ja saumat olivat hapettuneet niin sisäkuin ulkopuoleltakin. Hapettumista pystytään ehkäisemään suojakaasun käytöllä. Höyryputkien hitsiliitokset olivat siistit ja vaurioitumattomat, mutta vaipan läpi kiertävälle vedelle tarkoitettujen putkien istukkaliitoksien ulkopuolen saumoihin oli jäänyt rakoja, ja niihin oli kehittynyt ruostetta.

Vaikka lämmönvaihtimen sisällä hitsit olivat kauttaaltaan enemmän tai vähemmän korrodoituneet, eivät väärin tehdyt hitsit ole primääri syy vaipan puhki ruostumiselle. Koska rakokorroosio syntyy pistekorroosiota helpommin, hitsit olisivat kuitenkin tulevaisuudessa olleet se kohta, joka korrodoituu, vaikka vaippa muuten säilyisikin ehjänä. Nyt kuitenkin yksikään vaipan läpi syöpyneistä korroosiopisteistä ei ollut hitsin kohdalla, vaan läpi menneet reiät olivat tasaisella levypinnalla.

Kuten aiemmin todettiin, on lämpötilalla merkittävä vaikutus korroosion syntymiseen. Astianpesukoneelle asetetuissa vaatimuksissa pesuveden tulee olla vähintään 74 °C. Vesi siis poistuessaan lämmönvaihtimesta on vähintäänkin niin kuumaa. Käytettävän veden tarkka kloridipitoisuus ei ole tiedossa, mutta tiedetään, että vesi on samaa kuin laivan käyttövesiverkostossa. Juomavedelle tyypillinen kloridipitoisuus on 25 - 300 ppm. Lämmönvaihdin on peräisin Karibian risteilijältä, joten laivaan bunkrattu vesi on laadultaan samaa, mitä on Väli-Amerikan maiden hanaverkostossa. On mahdollista, että veden kloridipitoisuus on suurempi, kuin tyypillinen länsimaisten vesijohtovesien kloridipitoisuus on. Kuten aiemmin todettiin, kloridien metalleja syövyttävä vaikutus lisääntyy jo 50 ppm:n pitoisuuksissa. AISI 316 -luokan teräs on tunnetusti hyvin pistekorroosiota kestävä teräslaatu. Teräksien korroosiokestävyys perustuu kuitenkin useiden tekijöiden

summaan, ja kloridipitoisuuden lisäksi mm. veden happi- ja rautapitoisuudet sekä virtausnopeus vaikuttavat veden korrodoivuuteen. Korkeissa lämpötiloissa hyvinkin kestävä teräslaatu saattaa altistua herkemmin korroosiolle, kuin kymmenen astetta viileämmässä, mutta muuten samoissa olosuhteissa oleva heikompileatuinen teräs.

Kuvassa 32 näkyvät tunnetuille rst-laaduille kriittiset lämpötilat suhteessa kloridipitoisuuteen. 316-laadulle kriittinen pitoisuus 80 °C:ssa on noin 400 ppm. Vaipan sisällä lämpötila on kuitenkin käämien pinnoilla n. 100 °C ja käämien välittömässä läheisyydessäkin lämpö voi hyvinkin olla 80 - 100 °C. Näissä lämpötiloissa pienempikin kloridipitoisuus riittää herkistämään teräksen pistekorroosiolle. Taulukon arvot ovat kuitenkin suuntaa antavia, joten korroosio voi alkaa jo huomattavasti alemmissakin kloridipitoisuuksissa. Muita korroosioon vaikuttavia asioita ovat esimerkiksi veden happi- ja rautapitoisuus. Myös työstöstä jääneet metallihiukkaset ja muut epäpuhtaudet voivat tällaisissa olosuhteissa alkaa korrodoitumaan, mistä korroosio lähtee leviämään herkästi.



Kuva 32 Lämpötilan ja kloridipitoisuuden vaikutus pistekorroosioherkkyyteen. Keskimääräinen käyrä vastaa AISI 316 -laatua

Tästä voidaan todeta, että lämmönvaihtimessa käytetty materiaali ei sovellu kyseiseen käyttötarkoitukseen. Lämmönvaihtimen sisäpuolta tutkittaessa käy selvästi ilmi, että korroosiota esiintyy eniten juuri veden virtaussuunnasta katsottuna lämmönvaihtimen loppuosassa ja käämien välittömässä läheisyydessä, jossa vesi on lämpimintä. Lämmönvaihtimen alkupäässä ainoastaan päätylevyssä oli selkää korroosiota. Tämä voi selittyä hitaammasta virtausnopeudesta juuri levyn keskiosan kohdalla. Myös lämmityskäämien kärjet ovat lähellä päätylevyä, jolloin lämpötila voi tässä kohtaa nousta viereisiä seinämiä korkeammaksi. Materiaalin soveltumattomuudesta lisävahvistusta antaa myös verrokina toimiva, moitteettomassa kunnossa oleva anturi, jonka mitatut koostumuspitoisuudet ovat korroosiokestävyyden kannalta paremmat. Anturin materiaalin laatuluokitukselta ei ole tietoa, mutta se voisi korkeahkoa Si-pitoisuutta (1,2 %) lukuun ottamatta kuulua myös 316-luokan teräkseen. Vaipan ja käämien Cr- ja Mo-pitoisuudet olivat aivan luokituksen alarajoilla, kun taas anturin vastaavat olisivat luokituksen ylärajalla. Muutaman prosentin nousu kromi- ja molybdeenipitoisuuksissa nostaa kuitenkin materiaalin pistekorroosiokestävyyttä ilmaisevaa PRE-lukua usealla yksiköllä (käämin PRE=24,17 vrt. anturin PRE=28,3). Olosuhteiden ollessa kriittisillä rajoilla, voi tällaisella eroavaisuudella koostumuksessa olla ratkaiseva merkitys.

Siihen, onko lämmönvaihtimen sisälle jäänyt hitsiroiskeita tai epäpuhtauksia valmistusvaiheesta, ei varmuudella pystytä toteamaan. Varmaa on kuitenkin, että vallitsevissa olosuhteissa materiaalien puhtaus ja saumojen virheettömyys on ehdottoman tärkeää. Varmin korroosiokestävyys kuitenkin saataisiin vaihtamalla lämmönvaihtimen materiaaleja vielä enemmän molybdeeniä sisältävään teräkseen. Korvaaviksi laaduiksi käyvät esimerkiksi lämmönvaihdinkäyttöön hyvin soveltuvat AISI 904L - tai SS2205 -luokan teräkset.

Lähteet

- 1 Spirax-Sarco Engineering. Steam Consumption of Heat Exchangers. Verkkodokumentti: <http://www2.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/steam-consumption-of-heat-exchangers.asp>. Viitattu 18.2.2016
- 2 Cengel Y. A. & Boles M. A. 2011. *Thermodynamics – An Engineerin Approach*. 7.painos. Singapore: McGraw-Hill.
- 3 Kunnossapitoyhdistys Promaint. 2004. *Korroosiokäsikirja*. 4. painos. Helsinki: KP-Media Oyj.
- 4 Outokumpu Oyj. 2015. Corrosion Handbook. 11th edition. Espoo: Outokumpu Oyj.
- 5 Fontana M. G. 1987. *Corrosion Engineering*. 3rd Edition. Singapore: McGraw-Hill.
- 6 Koivisto K., Laitinen E., Niinimäki M., Tiainen T., Tiilikka P. & Tuomikoski J. 2008. *Konetekniikan Materiaalioppi*. 12. painos. Helsinki: Edita Prima Oy.
- 7 Arc Abrasives Inc. Simple Chemistry of Stainless Steel. Verkkodokumentti: <http://www.arcabrasives.com/Metals/Stainless.html>. Viitattu 13.3.2016
- 8 Finfofocus Instruments. Kysymyksiä ja Vastauksia Optisesta Emissiospektroskopiasta. Verkkodokumentti: <http://www.finfofocus.fi/tuotteet/oes-analysaattorit/oes-n-perusteita>. Viitattu 29.4.2016
- 9 Lukkari J. Hitsien laatu ja hitsausvirheet. ESAB Oy. Verkkodokumentti: http://www.esab.fi/fi/fi/support/documentation/educational/upload/hitsien_laatu_ja_hitsausvirheet.pdf. Viitattu 30.4.2016
- 10 Welds B. The Basics: MIG Troubleshooting. Verkkodokumentti: <http://www.bernardwelds.com/the-basics-mig--p152389#.VypatYR97IUU>. Viitattu 20.4.2016
- 11 AGA. Pienoisopas ruostumattoman teräksen MIG/MAG hitsaukseen. Verkkodokumentti: http://www.aga.fi/internet.lg.lg.fin/fi/images/AGA%20Stainless%20Steel%20MIG%20MAG%20Welding%20Brochure%20105x210%20FI634_122435.pdf. Viitattu 20.4.2016
- 12 Woikoski. Hitsaussuojakaasujen tehokas ja taloudellinen käyttö. Verkkodokumentti: <http://www.woikoski.fi/sites/default/files/Hitsaussuojakaasujen%20tehokas%20ja%20taloudellinen%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20KK.PDF>. Viitattu 20.4.2016

- 13 Outokumpu Oyj. 2013. Handbook of Stainless Steel. Espoo: Outokumpu Oyj. Verkkodokumentti: <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-stainless-steel-handbook.pdf>. Viitattu 15.4.2016, 22.4.2016
- 14 Principles Of General Chemistry: Corrosion. Verkkodokumentti: <http://2012books.lardbucket.org/books/principles-of-general-chemistry-v1.0/s23-06-corrosion.html>. Viitattu 5.3.2016
- 15 Cox Engineering. Crevice Corrosion. Verkkodokumentti: <https://coxengineering.sharepoint.com/Pages/Crevice.aspx>. Viitattu 17.4.2016
- 16 Substech. Pitting Corrosion. Verkkodokumentti: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=pitting_corrosion. Viitattu 18.4.2016

AISI 300 –luokan terästen koostumustaulukko

Standard 300 series austenitic grades

Designation			Chemical composition % by mass max unless stated									
UNS No	SAE No	AISI No / Common Name	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Others	
S30100	30301	301	0.15	1.00	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	-	6.0/8.0	N 0.10	
S30103	-	301L	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	-	6.0/8.0	N 0.20	
S30153	-	301LN	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	-	6.0/8.0	N 0.07/0.20	
S30200	30302	302	0.15	0.75	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	8.0/10.0	N 0.10	
S30215	30302B	302B	0.15	2.00/3.00	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	8.0/10.0	-	
S30300	30303	303	0.15	1.00	2.00	0.20	0.15 min	17.0/19.0	-	8.0/10.0	-	
S30310	-	XM-5 (303Plus x)	0.15	1.00	2.50/4.50	0.20	0.25 min	17.00/19.00	-	7.00/9.00	-	
S30323	30303Se	303Se	0.15	1.00	2.00	0.20	0.060	17.0/19.0	-	8.0/10.0	Se 0.15 min	
S30330	-	303Cu	0.15	1.00	2.00	0.15	0.10 min	17.0/19.0	-	6.0/10.0	Cu 2.5/4.0; Se 0.10	
S30400	30304	304	0.07	0.75	2.00	0.045	0.030	17.5/19.5	-	8.0/10.5	N 0.10	
S30400 A276 for bar	30304	304	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	-	8.0/11.0	-	
S30403	30304L	304L	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	17.5/19.5	-	8.0/12.0	N 0.10	
S30403 A276 for bar	30304L	304L	0.030	1.00	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	-	8.0/12.0	-	
S30430	-	302HQ	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	8.0/10.0	Cu 3.0/4.0	
S30452	-	XM-21 (304HN)	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	-	8.00/10.00	N 0.16/0.30	
S30453	-	304LN	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	-	8.0/12.0	N 0.10/0.16	
S30454	-	-	0.03	1.00	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	-	8.0/11.0	N 0.16/0.30	
S30500	30305	305	0.12	0.75	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	10.5/13.0	-	
S30800	30308	308	0.08	1.00	2.00	0.045	0.030	19.0/21.0	-	10.0/12.0	-	
S31600	30316	316	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	2.00/3.00	10.0/14.0	N 0.10	
S31603	30316L	316L	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	2.00/3.00	10.0/14.0	N 0.10	
S31635	-	316Ti	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	2.00/3.00	10.0/14.0	Ti 5x (C+N) / 0.70 N 0.10	
S31640	-	316Cb	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	2.00/3.00	10.0/14.0	Nb 10x C / 1.10 N 0.10	
S31653	-	316LN	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	16.0/18.0	2.00/3.00	10.0/14.0	N 0.10/0.16	
S31700	30317	317	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	3.0/4.0	11.0/15.0	N 0.10	
S31703	-	317L	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	3.00/4.00	11.0/15.0	N 0.10	
S31725	-	317LM	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	4.0/5.0	13.5/17.5	N 0.20	
S31726	-	317LMN	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	17.0/20.0	4.0/5.0	13.5/17.5	N 0.10/0.20	
S31753	-	317LN	0.030	0.75	2.00	0.045	0.030	18.0/20.0	3.0/4.0	11.0/15.0	N 0.10/0.22	
S32100	30321	321	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	9.0/12.0	Ti 5 x C min/0.70 N 0.10	
S34700	30347	347	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	9.0/13.0	Nb+Ta 10 x C min/1.0	
S34720	-	347F	0.08	1.00	2.00	0.040	0.18/0.35	17.00/19.00	0.75	9.00/12.00	Nb 10xC / 1.10; Cu 0.75; Ta 0.05	
S34723	-	347FSe	0.08	1.00	2.00	0.11/0.17	0.030	17.00/19.00	0.75	9.00/12.00	Nb 10xC / 1.10; Cu 0.75; Se 0.15/0.35; Ta 0.05	
S34800	30348	348	0.08	0.75	2.00	0.045	0.030	17.0/19.0	-	9.00/13.0	Nb+Ta 10 x C / 1.00; Ta:0.10 max; Co 0.20	
S38400	30384	384	0.04	1.00	2.00	0.045	0.030	15.0/17.0	-	17.0/19.0	-	

[illegible]

[illegible]