

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Kemiantekniikka

Mikko Saarinen

Kemiallisten esikäsittelyjen vaikutus maalipinnoitteiden toimivuuteen alumiinipinnoilla

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Arto Pihlajamäki
Analyysi-insinööri Liisa Puro

Ohjaajat: Tutkijaopettaja Arto Pihlajamäki
Toimitusjohtaja Pertti Lainisalo

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on omistettu ystävälleni Hepulle. Kiitos viisaista neuvoistasi.

Haluan kiittää lapsiani Beaa, Felixiä ja Elistä, sekä puolisoani Fiaa isin rasittavan harrastuksen jaksamisesta, sekä kaikesta tuesta ja kannustuksesta. Ilman tukeanne ja apuanne opiskelu olisi ollut vaikeaa. Kiitos myös vanhemmilleni kaikesta avusta opintojen varrella.

Kiitän myös diplomityönteettäjän Lainisalo Oy:n kaikkia nykyisiä ja entisiä työntekijöitä, jotka ovat auttaneet diplomityön toteutuksessa ja opintojeni mahdollistamisessa. Samoin kiitän kaikkia työn ohjaajia ja tarkastajia avusta ja kärsivällisyydestä.

Espoossa 25.6.2020

Mikko Saarinen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Kemiantekniikka

Mikko Saarinen

Kemiallisten esikäsittelyjen vaikutus maalipinnoitteiden toimivuuteen alumiinipinnoilla

Diplomityö

2020

118 sivua, 20 kuvaa, 21 taulukkoa, 12 liitettä

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Arto Pihlajamäki
Analyysi-insinööri Liisa Puro

Ohjaajat: Tutkijaopettaja Arto Pihlajamäki
Toimitusjohtaja Pertti Lainisalo

Hakusanat: märkämaalauk, jauhemaalauk, konversiopinnoitus, alumiini, esikäsittely

Keywords: wet painting, powder painting, conversion coating, aluminium, pretreatment

Maalauksessa liitetään yhteen maalikalvo ja maalattava alusta. Maalin ominaisuuksien ohella tämän liitoksen voimakkuuteen vaikuttaa ennen maalausta suoritettavan pinnan esikäsittelyn luonne ja ominaisuudet. Alumiinin maalauksessa esikäsittelyn kyvykkyys varmistaa maalin hyvä tartunta alustaan on erityisen tärkeää. Tämä korostuu varsinkin, jos maalatun alumiinin käyttöympäristössä vallitsee keskivertoa voimakkaampi ilmastollinen korroosiorasitus. Tästä huolimatta erilaisten pinnan esikäsittelystä ja maaliyhdistelmän muodostuvien alumiinin maalausjärjestelmien toimivuudessa ilmastollisessa korroosiorasituksessa on verrattain vähän tietoa saatavilla.

Kuluvalla vuosituhannella alumiinin maalausprosesseissa on kasvavasti aloitettu käyttämään esikäsittelyinä erilaisia konversiopinnoituksia. Näiden tarkoitus on muokata verrattain ympäristöystävällisellä ja kustannustehokkaalla liuoskäsittelyllä alumiinipinnan ominaisuudet maalin tartunnalle otollisiksi ja parantaa alumiinin korroosiokestävyyttä.

Diplomityössä tutkittiin zirkonium-, zirkonium-kromi- ja silaanitekniikkaan perustuvien konversiopinnoitusten toimivuutta alumiiniseosten EN-AW 1050, EN-AW 5754, EN-AW 6060 ja EN-AW6082 esikäsittelynä, kun ne jauhemaalataan yhden maalikerroksen polyesterijauhemaalauksella tai kahden maalikerroksen epoksi-polyuretaani märkämaalauksella.

Tutkimusmenetelmät ja laadulliset arviointikriteerit johdettiin korroosionestomaalausta käsittelevästä standardista SFS-EN ISO 12944. Konversiopinnoitetuille ja maalatuille näytteille toteutettiin standardin SFS-EN ISO 9227 mukainen keinovanhennus 720 tunnin neutraalilla suolasumukokeella. Läpäisemällä tämän koejakson hyväksytysti maalausjärjestelmän voidaan arvioida soveltuvan käyttöön ilmastollisissa korroosiorasitusluokissa C3-VH, C4-H ja C5-M.

Tutkimuksen tulokset osoittavat tutkittujen konversiokäsittelyjen soveltuvan hyvin tutkittujen alumiiniseosten maalausprosesseissa käytettäväksi esikäsittelymenetelmäksi, kun maalauksen käyttöympäristö on vastaava, kuin jokin sanotuista ilmastollisista korroosiorasitusluokista.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Chemical Engineering

Mikko Saarinen

Effect of chemical pretreatment on aluminium surfaces and its relationship to paint performance

Master's Thesis

2020

118 pages, 20 pictures, 21 tables, 12 appendices

Examiners: Researcher-teacher Arto Pihlajamäki
Analysis engineer Liisa Puro

Advisors: Researcher-teacher Arto Pihlajamäki
Managing director Pertti Lainisalo

Keywords: wet painting, powder painting, conversion coating, aluminium, pretreatment

The basis of painting is to form joint between paint film and base material. The strength of this joint strongly depends on character of base material and features and characters of paint and surface pretreatment. When painting aluminium surfaces it is important that pretreatment to be used ensures good adhesion of paint. Especially it is important if painted aluminium will be used in a higher atmospheric-corrosivity environment. Despite this there are relatively few information about how different paint systems for aluminium together with various pretreatments last in atmospheric-corrosivity load.

Utilisation of conversion coating technologies as a pretreatment of aluminium has increased in this millennium. These technologies are relatively eco-friendly and cost-effective. Their functionality is to enable paint good adhesion and improve corrosion resistance properties of aluminium.

In this master thesis zirconium, zirconium-chrome and silane based conversion coatings were in focus. Four different type of aluminium alloy was pretreated with these techniques and painted with single coat polyester powder paint or wet paint system where basecoat was based on epoxy resin and topcoat was polyurethane paint. Aluminium alloys were EN-AW 1050, EN-AW 5754, EN-AW 6060 and EN-AW6082.

Research methods and qualitative evaluation criteria were derived from standard SFS-EN ISO 12944 that deals with corrosion protection by protective paint systems. Conversion coated and painted samples were exposed to neutral salt spray test that was made according to standard SFS-EN ISO 9227. Test period was 720 hours. If painted sample fulfills the criteria, the sample paint system (pretreatment + paint) can be assessed as suitable for use in atmospheric-corrosivity categories C3-VH, C4-H and C5-M.

The results of research shown that investigated conversion coatings can be used as a pretreatment of aluminium alloys when painted surface will be in use in atmospheric-corrosivity categories mentioned above.

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	1
TIIVISTELMÄ	1
ABSTRACT	1
SYMBOLI- JA LYHENNYSLUETTELO	8
1 Johdanto	10
1.1 Taustaa	10
1.2 Ongelman kuvaus	13
1.3 Diplomityön tavoite ja rajausta	13
2 Alumiini	14
2.1 Alumiini materiaalina	14
2.2 Alumiinin korroosio	17
2.2.1 Korroosion yleiset perusteet	18
2.2.2 Alumiinin korroosiokäyttäytyminen	21
2.2.3 Alumiinilla esiintyvät korroosiomuodot	24
2.3 Alumiinin perinteiset pintakäsittelyt	28
2.3.1 Anodisointi	28
2.3.2 Kromatointi	29
2.3.3 Fosfatointi	30
3 Konversiopinnoitteet maalauksen esikäsittelynä alumiinipinnoilla	31
3.1 Zirkoniumkonversiopinnoitus	31
3.1.1 Zirkoniumkonversiopinnoitteen muodostumismekanismi	31
3.1.2 Vaikutus korroosionkestävyyteen	33
3.1.3 Vaikutus maalin tarttuvuuteen	35
3.2 Zirkonium-kromikonversiopinnoitus	35
3.2.1 Zirkonium-kromikonversiopinnoitteen muodostuminen ja ominaisuudet	36
3.3 Silaanikonversiopinnoitus	36
3.3.1 Silaanikonversiopinnoitteen muodostumismekanismi	37
3.3.2 Pinnoitteen ominaisuudet	38
4 Tutkittavat maalausmenetelmät	40
4.1 Märkämaalauksen perusteet	40
4.2 Jauhemaalauksen perusteet	43
4.3 Alumiinin maalaus	43
4.4 Maalin tartunnan teoriaa	45

4.4.1 Pinnan kastelu.....	45
4.4.2 Tartuntamekanismit.....	47
4.5 Maalikalvon vaurioitumismekanismit.....	52
4.5.1 Vauriotypit	52
4.5.2 Maalin vaurioituminen.....	53
5 Tutkimusmenetelmät.....	58
5.1 Menetelmien määrittely.....	58
5.2 Sovellettavat tutkimusmenetelmät.....	65
5.2.1 Neutraali suolasumukoe.....	65
5.2.2 Näytteiden maalipinnoitteen keinotekoinen vaurioittaminen.....	68
5.2.3 Hilaristikkokoe	70
5.2.4 Vetokoe	71
5.2.5 Huononemisen arviointi visuaalisesti	73
5.2.6 Maalaamattomien konversiokäsiteltyjen näytteiden arviointi	76
5.3 Tuloksien laadullinen arviointi	78
6 Tutkimuksen suoritus	81
6.1 Näytematriisi	81
6.2 Näytteiden materiaalit	85
6.2.1 Alumiiniseokset	85
6.2.2 Maalit	87
6.3 Näytteiden valmistus.....	88
6.3.1 Zirkoniumkonversiopinnoitetut näytteet	88
6.3.2 Zirkonium-kromikonversiopinnoitetut näytteet.....	89
6.3.3 Silaanikonversiopinnoitetut näytteet	90
6.3.4 Raesuihkupuhdistetut ja liuotinpuhdistetut näytteet	91
6.4 Näytteiden arviointi ennen keinovalhennusta.....	91
6.4.1 Maalauksen kuivakalvonpaksuuden mittausta ja visuaalinen tarkastelu	91
6.4.2 Hilaristikkokoe ennen keinovalhennusta.....	92
6.4.3 Vetokoe ennen keinovalhennusta.....	92
6.5 Näytteiden keinovalhennus.....	93
6.6 Näytteiden arviointi keinovalhennuksen jälkeen.....	95
6.6.1 Pinnoitteiden huononemisen arviointi	95
6.6.2 Korroosio ja maalin irtoaminen viillosta.....	96
6.6.3 Hilaristikkokoe keinovalhennuksen jälkeen.....	96
6.6.4 Vetokoe keinovalhennuksen jälkeen	96
6.6.5 Maalaamattomien näytteiden arviointi	97
7 Tulokset	98

8 Johtopäätökset.....	108
9 Yhteenveto.....	113
LÄHTEET.....	115
LIITTEET.....	118

SYMBOLI- JA LYHENNYSLUETTELO

1050	Puhdas teollinen alumiinilaatu
5754	Alumiiniseos, pääseosaine magnesium
6060	Alumiiniseos, pääseosaineet pii ja magnesium, pitoisuus noin 0,5 %
6082	Alumiiniseos, pääseosaineet pii ja magnesium, pitoisuus noin 1,0 %
-H	Korkea maalauksen kestävyysluokka
-L	Alhainen maalauksen kestävyysluokka
-M	Kohtalainen maalauksen kestävyysluokka
-VH	Erittäin korkea maalauksen kestävyysluokka
A/B	Adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisen pinnoitekerroksen välillä
AASS	Etikkahapposuolasumukoe
ACS	American Chemical Society
AW	Muokattava alumiiniseos
B	Ensimmäisen pinnoitekerroksen koheesiomurtuma
C	Toisen pinnoitekerroksen koheesiomurtuma
C1	Hyvin lievä ilmastollinen korroosiorasitusluokka
C2	Lievä ilmastollinen korroosiorasitusluokka
C3	Kohtalainen ilmastollinen korroosiorasitusluokka
C4	Ankara ilmastollinen korroosiorasitusluokka
C5	Hyvin ankara ilmastollinen korroosiorasitusluokka
CASS	Kuparilla kiihdytetty etikkahapposuolasumukoe
CR4	Teräslaatu
CX	Äärimmäinen ilmastollinen korroosiorasitusluokka
E°/V	Standardipotentiaali
E_{korr}	Korroosiopotentiaali
EN	Eurooppalainen standardi
EP	Epoksisideaineinen märkämaali
H14	Kylmävalssaus
H22	Kylmämuokattu ja päästöhehkutettu
I_{korr}	Korroosiovirrantiheys
Im1	Makean veden upotusrasitusluokka

Im2	Meri- ja murtoveden upotusrasitusluokka
Im3	Maaperän upotusrasitusluokka
Im4	Offshore upotusrasitusluokka
ISO	International Organization for standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
MPa	megapascal
NSS	Neutraali suolasumukoe
Ph. Eur	European Pharmacopoeia
PUR	Polyuretaanisideaineinen märkämaali
R _A	Appearance rating, ulkonäkökölöluokitus
R _i	Ruostumisaste
R _p	Protection rating, suojausluokitus
SFS	Suomen standardoimisliitto
T6	Liuoshehkutus ja keinovanhennus
USP	United States Pharmacopeia
VOC	Haihtuvat orgaaniset yhdisteet
Y	Liiman koheesiomurtuma
Y/Z	Adheesiomurtuma liiman ja vetokappaleen välillä

1 Johdanto

Teollinen maalausprosessi koostuu kolmesta vaiheesta, joista jokainen vaikuttaa valmiin maalauksen laatuun. Nämä ovat käsiteltävän pinnan esikäsittely, maalipinnoitteen tai -pinnoitteiden levitys, ja levitetyn pinnoitteen kovettuminen kuivaksi maalikalvoksi. Käytännössä maalauksessa liitetään kaksi materiaalia toisiinsa: maalattava alusta ja kuivunut maalikalvo. Tämän liitoksen voimakkuus ja kuinka hyvin se kestää erilaisissa ympäristöissä riippuu alustan ja pinnoitteen yhteensopivuudesta, sekä maalausprosessin kaikkien vaiheiden laadullisesta onnistumisesta.

Teollisessa käytössä alumiiniin seostetaan muita metalleja, jotta metallille saadaan toivottuja ominaisuuksia. Täsmällisemmin teollisesti käytetään siis erilaisia alumiinimetalleja. Jäljempänä tässä diplomityössä selvyiden vuoksi alumiinimetalleista käytetään yleisnimitystä alumiini. Vaikka alumiini on suhteellisen reaktiivinen metalli, se kestää hyvin ilmastollista korroosiota. Tämä johtuu alumiinin kyvystä reagoida hapen kanssa ja muodostaa reaktiotuotteena pintaansa suojakerrokseksi ohuen ja tiiviin alumiinioksidikerroksen. Monissa tapauksissa alumiini ei siis tarvitsisi maalausta suojaksi korroosiota vastaan. Kuitenkin alumiinirakenteita usein maalataan esimerkiksi visuaalisten vaatimusten takia. Maalauksen näkökulmasta alumiinin kyky muodostaa pintaansa oksidikerros, asettaa kuitenkin maalin tarttuvuudelle ja edelleen sen pitkäaikaissiinnipysyvyydelle erilaisissa ympäristöissä haasteen. Tästä seuraa alumiinin maalausprosessin esikäsittelylle keskeiseksi vaatimukseksi käsittelyn kyky parantaa maalin tartuntaa ja pitkäaikaista kiinnipysyvyyttä.

1.1 Taustaa

Olennainen osa maalausprosessia on ennen maalin levitystä käsiteltävälle pinnalle suoritettava pinnan esikäsittely. Yleisesti käytössä olevat pinnan esikäsittelymenetelmät voidaan jakaa mekaanisiin ja kemiallisiin menetelmiin. Mekaanisia esikäsittelymenetelmiä ovat esimerkiksi hionta, teräsharjaus ja raesuihkupuhdistus. Kemiallisia esikäsittelymenetelmiä ovat erilaiset upotus- tai ruiskutustekniikalla toteutettavat pintojen liuoskäsittelyt, kuten pesu happamilla tai alkalisilla liuoksilla, anodisoinnit, peittaukset tai erilaiset reaktio- eli niin kutsutut konversiopinnoitteet. Perinteisiä reaktiopinnoitteita ovat esimerkiksi fosfatoinnit ja kromatoinnit. Uudempaa reaktiopinnoitustekniikkaa edustavat zirkoniumiin ja silaaneihin perustuvat niin kutsutut konversiopinnoitteet. Tietyn maalattavan pinnan esikäsittelymenetelmän valintaan vaikuttaa saatavilla olevat tekniikat, käsiteltävä materiaali ja rakenteen muoto, sekä pinnan lopullinen käyttötarkoitus ja -ympäristö ja tietysti tuotantokustannukset.

Välittömästi maalausprosessin valmistumisen jälkeen pinnan esikäsittelyn onnistuminen voidaan arvioida esimerkiksi visuaalisesti tarkastelemalla maalikalvon laatua (onko pinnalla

havaittavissa virheitä) ja testaamalla maalin tartuntaa alustaan esimerkiksi veto- tai hilaristikkokokeella. Näillä menetelmillä ei kuitenkaan saada välttämättä luotettavaa tietoa siitä, onko esikäsittelyprosessi ollut tarkoitukseen soveltuva ja riittävä varmistamaan maalauksen toimivuus pitkällä aikavälillä, kun maalattu pinta altistuu korroosiota edistävälle ympäristöolosuhteille. Tai miten esimerkiksi maalikalvo pysyy kiinni alustassa vaurion lähiympäristössä, jos maalikalvo vaurioituu ulkoisesta iskusta.

Teräksen ohella alumiinia käytetään laajasti erilaisten koneiden ja laitteiden komponenttien sekä rakennustarvikkeiden rakennemetallina. Metalliseoksina alumiineilla on useita hyviä ominaisuuksia. Niillä on hyvä paino-lujuussuhde, ne ovat helposti työstettäviä ja niiden pinnalle tavanomaisissa olosuhteissa muodostuvan oksidikerroksen myötä niiden korroosionkestävyys on hyvä. Näistä syistä alumiini on toimiva rakennemetalli moniin erilaisiin soveluksiin sekä käyttöympäristöihin. Kuitenkin usein alumiinista valmistetuille tuotteille on asetettu myös vaatimuksia, joita käytetty metalli ei sellaisenaan täytä. Tällaisia ovat esimerkiksi erottuminen laitemarkkinassa visuaalisesti miellyttävällä ja tasalaatuisella ulkonäöllä tai laitteen toimivuuden ja kestävyysvarmistaminen lopullisessa käyttöympäristössä. Sanottujen esimerkkivaatimusten täyttämiseksi alumiini voidaan pintakäsitellä erilaisilla menetelmillä, kuten esimerkiksi maalaamalla. Laitteessa voi myös olla eri materiaaleista valmistettuja komponentteja. Maalaamalla voidaan yhdenmukaistaa näiden komponenttien ulkonäkö. Tällöin tärkeää on, että kaikissa kokoonpanossa käytetyissä materiaaleissa maali säilyttää hyvän kiinnipysyvyyden samanpituisen ajan, joka edelleen asettaa vaatimuksia alumiinin maalausprosessin tarkoitukseen sopivuudelle.

Vaikka alumiinia maalataan laajalti, sen maalauksen standardointi on niukkaa (Teknologiateollisuus, 2006) verrattuna teräksen maalaamiseen. Teräsrakenteen korroosionestomaalauksen suunnitteluun ja vaatimusten määrittelyyn on kansainvälinen standardisoimisjärjestö ISO laatinut standardin ISO 12944, jota soveltamalla voidaan määritellä tarkoituksenmukainen maalausprosessi erilaisille ilmastollisille korroosiorasituksille altistuville teräsrakenteille. Alumiinin maalaukselle vastaavaa standardointia ei ole yleisesti käytössä. Toisaalta yleensä alumiinin maalauksen tarkoitus ei ole tuottaa rakenteelle korroosiosuojaa siten kuin teräsrakenteiden maalauksessa tuotetaan, koska alumiini itsessään kestää ilmastollista korroosiota hyvin. Tällöin maalauksen vaikutus rakenteen tekniseen kestävyysvarmintaan ei ole niin oleellinen, kuin teräksellä. Kuitenkin visuaalisen kestävyysvaatimukset ovat usein yhdenmukaiset maalatulla alumiinilla ja teräksellä. Vähimmäisvaatimus visuaalisen laadun säilymiselle vaatimusten mukaisena on maalin kiinnipysyminen alustassa. Tämän takia myös alumiinin maalauksessa maalausprosessi tulee olla huolellisesti suunniteltu

ja suunnittelussa ottaa huomioon määritetyt kestävyysvaatimukset ympäristöolosuhteissa, joille maalaus altistuu.

Alumiinin maalaamisen standardoinnin puutteista aiheutuu, että maalaukseen käytetään laajasti erilaisia maalausprosesseja. Standardoinnin puuttuessa prosessien lähtökohtaista toimivuutta erilaisissa käyttöympäristöissä ei voi arvioida standardien tietojen perusteella. Tällöin toimivuuden arviointi perustuu usein aine- ja materiaalivalmistajien, suunnittelijoiden tai maalaustyön suorittajan näkemyksiin ja arvioihin. Verraten teräksen maalaamiseen erilaisiin käyttöympäristöihin edellä mainittu aiheuttaa suurempaa vaihtelua siihen, millaisilla maalausprosesseilla alumiinia maalataan. Vaikka alumiini ei tarvitsisi maalausta varsinaiseksi korroosiosuojaksi, tulisi maalausprosessin kuitenkin aina olla sellainen, että sillä valmistettu maalaus toimisi lopullisessa käyttöympäristössä suunnitellun käyttöiän mahdollisimman suurella varmuudella. Tämän arviointi on kuitenkin monesti vaikeaa.

Teollisen maalauksen toimialalla alumiinin maalauksen suorituskyykyvaatimusten asetteluissa hyödynnetään usein teräksen korroosionestomaalauksen standardeja. Tämä perustuu siihen, että usein erilaisista komponenteista valmistettava kokonaisuus rakentuu useasta eri materiaalista, jolloin lähtökohdaksi on valittu teräksen riittävä korroosiosuojaus kyseisessä olosuhteessa. Tällöin samassa olosuhteessa alumiinin maalauksen suorituskyyky on oltava vähintään yhtä hyvä, kuin mitä teräksen maalauksen suorituskyyky on. Esimerkiksi standardin ISO 12944 toinen osa määrittelee ilmastolliset ympäristörasitusluokat sen mukaisesti, miten kussakin olosuhteessa matalahiili-teräksinen tai sinkkinen standardikoekappale syöpyy yhden vuoden altistuksessa. Korrelaatiosta alumiinin ja matalahiili-teräksien tai sinkin syöpymisen välillä näissä ympäristörasitusluokissa ei kuitenkaan ole kovin paljon tutkimustietoa. Yleisesti nämä ympäristörasitusluokat ovat sellaisia, että niissä alumiinin pintaan voi muodostua suojaava oksidikerros, joten alumiinia voisi useissa tapauksissa käyttää niissä sellaisenaan ilman maalausta. Erityistä huomiota vaaditaan kuitenkin, jos alumiini voi altistua teollisuus- tai meriympäristöön tai upotusrasitukselle maassa tai nesteessä.

Teolliseen maalausprosessiin sisältyy aina pinnan esikäsittely, rippumatta käytettävästä maalista tai maaliyhdistelmästä tai siitä, mitä materiaalia maalataan. Esikäsittelyn tulisi olla mahdollisimman kustannustehokas ja tuottaa mahdollisimman hyvä tartunta maalille. Eri-tyisesti alumiinin teollisessa maalauksessa nämä tavoitteet saavutetaan yleensä parhaiten automatisoiduilla ruiskutus- tai kastolinjoilla tehtävillä kemiallisilla liuoskäsittelyillä. Nämä prosessit koostuvat yleensä useasta vaiheesta. Tavallinen prosessi sisältää pinnan puhdistavan pesun, huuhteluvaiheet ja varsinaisen esikäsittelyn, jolla parannetaan metallin korroosionkestävyyttä, sekä muutetaan pintaominaisuuksia maalin tartunnalle edullisiksi. Tie-

toisuuden lisääntyminen erilaisten aineiden ja prosessien terveys- ja ympäristövaikutuksista, sekä tarve kehittää aiempaa nopeampia ja energiatehokkaampia esikäsittelyprosesseja on tuonut markkinoille tällä vuosituhannella uusia maalauksen esikäsittelyprosesseja. Näissä vaiheiden määrät ja liuosten lämmitystarpeet ovat usein aiempia tekniikoita energiatehokkaampia, sekä ne ovat usein myös vaarattomampia operaattorille ja ympäristölle.

1.2 Ongelman kuvaus

Kuten taustoituksessa esiteltiin alumiinia käytetään laajalti useilla valmistavilla toimialoilla rakennemetallina moniin erilaisiin tarkoituksiin. Monissa erilaisissa tarkoituksissa valmiin alumiinirakenteen toimivuutta ja ulkonäköä parannetaan maalauksella.

Huolimatta vähäisestä standardoinnista maalauksen tulisi toimia tarkoituksenmukaisesti koko rakenteen suunnitellun käyttöiän ajan. Tämän ja suunnitteluun liittyvien sidosryhmien laajuudesta aiheutuen alumiinia maalataan teollisesti monilla erilaisilla prosesseilla. Siitä, kuinka hyvin toimivan maalauksen suhteessa rakenteen suunniteltuun käyttöikään jokin tietty maalausprosessi tuottaa, on suhteellisen vähän tietoa saatavilla. Tätäkin niukemmin on tietoa siitä, miten maalattavan alumiinin seostus vaikuttaa maalauksen toimivuuteen, kun maalaus altistuu korroosiota edistävään ympäristöolosuhteeseen.

1.3 Diplomityön tavoite ja rajaus

Maalauksen toimivuuden osatekijöistä monet liittyvät itse maalipinnoitteen ominaisuuksiin, kuten pinnoitteen sulkuominaisuuksiin tai kykyyn vastustaa värin tai kiillon muutoksia. Tämän diplomityön viitekehyksessä toimivuudeksi määritellään ensisijaisesti kuitenkin maalin tartunnan voimakkuus ja kiinnipysyvyys, kun maalaus altistuu kiinnipysyvyyttä heikentävään ympäristöön.

Tässä diplomityössä tutkitaan kolmen erilaisen kemiallisen esikäsittelyprosessin toimivuutta alumiinipinnan esikäsittelynä ennen maalausta. Tutkittavat esikäsittelyprosessit ovat markkinoilla yleisesti käytössä olevia pinnan liuoskäsittelyyn perustuvia reaktiopinnoitteita eli niin kutsuttuja konversiopinnoitteita. Nämä esikäsittelyt ovat uudempaa, tällä vuosituhannella kasvavassa määrin käyttöön otettua zirkoniumiin ja silaaneihin perustuvaa tekniikkaa. Perinteisiin fosfatointeihin ja kromatointeihin verraten ne ovat ympäristöystävällisempiä ja energiatehokkaampia maalattavan pinnan kemiallisia esikäsittelyjä.

Työssä valmistetaan kullakin esikäsittelyprosessilla jauhemaalatus ja märkämaalatus näytesarjat. Jokainen näytesarja koostuu näytteistä, joissa eri alumiiniseoksesta koostuvat näytteet ovat esikäsittely tutkittavalla prosessilla ja tämän jälkeen pinnoitettu märkä- tai jauhe- maalauksella. Jokaisella tutkittavalla esikäsittelyprosessilla valmistetaan samanlaiset näytesarjat. Näytteiden valmistus toteutetaan diplomityön teettäjän tuotantolinjoilla.

Teollisen maalauksen toimialalla erilaisten maalausprosessien toimivuutta tutkitaan ja luokitellaan yleisesti erilaisilla keinovanhennusmenetelmillä. Diplomityönteettäjän arvion mukaan yleisin yksittäinen sanottuun tarkoitukseen käytettävä menetelmä on neutraali suolasumukoe. Tässä diplomityössä valittujen esikäsitelyprosessien toimivuutta määritetyillä alumiiniseoksilla jauhe- ja märkämaalauksen esikäsitelystä tutkitaan standardin ISO 9227 mukaisella neutraalilla suolasumukokeella. Tavoitteena on keinovanhennuksen avulla tuottaa tietoa, millaisiin ilmastollisiin ympäristörasitusluokkiin kullakin testatulla yhdistelmällä (alumiiniseos + esikäsitely + maalaus) maalatut alumiinituotteet soveltuvat käytettäväksi. Tutkimalla konversiopinnoitteiden soveltuvuutta erilaisille alumiiniseoksille on mahdollisuuksien mukaan tarkoitus tuottaa tietoa, miten maalattavan alumiinin seostus vaikuttaa maalauksen toimivuuteen, kun maalattu pinta altistuu korroosioympäristöön.

Varsinaisten näytteiden lisäksi valmistetaan näytteet, joissa esikäsitelystä on pyyhkäisysoihkupuhdistus ja liuotinpyyhintä. Näiden näytteiden tarkoitus on auttaa varsinaisten näytteiden toimivuuden arvioinnissa. Lisäksi testataan esikäsitelyprosessilla valmistettuja maalaamattomia näytteitä, jotta voidaan tarkastella, miten tutkittavat esikäsitelyprosessit itsessään muuttavat alumiinin korroosioikäyttäytymistä.

Tutkimusmenetelminä työssä käytetään standardoituja teollisen maalauksen testaus- ja arviointimenetelmiä. Testausmenetelminä käytetään keinovanhennukseen sanottua suolasumukoetta, maalin tartunnan mittaamista veto- ja hilaristikkokokeella ennen keinovanhennusta ja sen jälkeen, sekä keinotekoisesta maalikalvon vauriosta lähtevän korroosion mittaamista. Arviointimenetelminä käytetään standardoituja visuaaliseen arviointiin perustuvia menetelmiä näytteiden vaurioiden luokitteluun keinovanhennuksen jälkeen.

2 Alumiini

Tässä diplomityössä käsitellään maalinpinnoitteen toimivuutta alumiinipinnoilla. Maalauksessa liitetään kaksi materiaalia toisiinsa: maalattava pinta ja maalikalvo. Tämän liitoksen laatuun ja kestävyys erilaissa ympäristöissä vaikuttaa sekä maalausprosessi aineineen, että maalattavan materiaalin ominaisuudet. Tässä luvussa käsitellään alumiinia ja sen ominaisuuksia tämän diplomityön aiheen viitekehyksessä.

2.1 Alumiini materiaalina

Hapen ja piin jälkeen alumiini on maankuoren kolmanneksi yleisin alkuaine ja yleisin metalli. Se ei esiinny luonnossa puhtaana, vaan useimmiten piin ja hapen yhdisteinä alkali- ja maalkalimetallien kanssa. Maankuoren alumiinipitoisuus on noin 8 %. Kaikki maankuoren alumiini ei kuitenkaan ole sellaisessa muodossa, että sen taloudellinen hyödyntäminen kannattavasti olisi mahdollista. Alumiinia sisältävän mineraalin koostumus ja alumiinipitoisuus

määrittää, voiko sen sisältämän alumiinin jalostaa taloudellisesti kannattavasti. Hyvin jalostukseen soveltuu esimerkiksi bauksiitti, joka onkin yleisin lähtömineraali alumiinin jalostuksessa. Bauksiitti sisältää alumiinioksidia tavallisesti noin 60 – 65 prosenttia. (Teknologiateollisuus, 2006)

Alumiinin tiheys on $2,7 \text{ g/cm}^3$ ja alkuaineena se on tyypillinen hyvin sähköä ja lämpöä johtava kevytmetalli. Väriltään pehmeä ja helposti muokattava puhdas alumiini on hopeanharmaata. Puhtaan alumiinin matalan lujuuden ja pehmeiden takia alumiinia seostetaan muilla metalleilla, jotta se soveltuu paremmin erilaisiin teknisiin käyttöihin. Pienilläkin seosmäärillä saadaan alumiinin ominaisuuksia muutettua erilaisiin tarpeisiin sopivaksi. Esimerkiksi suhteellisen pienellä magnesiumseostuksella voidaan parantaa alumiini lujuusominaisuuksia merkittävästi. Taulukossa I esitetään yleisimmät alumiinin seosmetallit ja niiden vaikutus puhtaan alumiinin ominaisuuksiin. Taulukon aineiden lisäksi alumiiniseokset sisältävät yleensä epäpuhtautena rautaa, mikä vaikuttaa esimerkiksi alumiinin korroosionkestävyyteen negatiivisesti. (Teknologiateollisuus, 2006)

Alumiiniseoksille on standardoitu nimikejärjestelmä, jonka mukaisesti alumiiniseokset jaotellaan muokattaviin (W = wrought alloys, muokattava seokset) ja valuseoksiin (C = cast alloys, valuseokset), sekä edelleen numeroidaan pääseosaineiden mukaisesti. Muokattavat seokset numeroidaan neljällä numerolla ja valuseokset viidellä numerolla. Numeroinnissa ensimmäinen numero osoittaa aina seoksen pääseosaineen seuraavasti:

- 1xxx: puhtaat alumiinit
- 2xxx: pääseosaineena kupari
- 3xxx: pääseosaineena mangaani
- 4xxx: pääseosaineena pii
- 5xxx: pääseosaineena magnesium
- 6xxx: pääseosaineena magnesium ja pii
- 7xxx: pääseosaineena sinkki
- 8xxx: muut seosaineet
- 9xxx: käyttämätön sarja

Nimikejärjestelmässä seostamattoman puhtaan vähintään 99,0 painoprosenttia sisältävän alumiinin numerointi alkaa luvulla yksi, esimerkiksi 1xxx(x). Numerosarjassa toinen numero on yleensä nolla tarkoittaen seoksen sisältävän sille tyypilliset epäpuhtaudet. Kaksi viimeistä numeroa 1000-sarjan alumiineilla osoittaa alumiinin puhtauden. Esimerkiksi EN AW-1050 puhtausaste on 99,5 painoprosenttia. Seostetuilla 2000 – 8000 sarjojen alumiineilla

toisena numerona nolla tarkoittaa seoksen olevan alkuperäinen ja muuna numerona se kertoo muutoksesta epäpuhtausrajoissa tai seosaineissa. Seostetuissa laaduissa kaksi viimeistä numeroa eivät ole merkitseviä muutoin kuin, että ne erottavat saman ryhmän eri seokset toisistaan. Viidettä numeroa käytetään valuseoksien yhteydessä ja se on normaalisti numero nolla. Numerointia ennen merkintätavassa käytetään EN-viittaus merkitsemään eurooppalaista standardia ja A:ta merkitsemään alumiinia ja edelleen A:n jälkeen kirjainta W tai C edellä mainitun mukaisesti. (Teknologiateollisuus, 2006; Ab Jet-steel Oy, 2013)

Taulukko I Alumiinin tavalliset seosmetallit nimellispitoisuuksineen ja seosten nimikejärjestelmän mukainen numerointi. (Teknologiateollisuus, 2006)

Seosmetalli	Vaikutus alumiinin ominaisuuksiin	Tavanomainen nimellispitoisuus erilaisissa Al-seoksissa %	Nimikejärjestelmän mukainen numerointi pääseosaineen mukaisesti:
Mg	Parantaa lujuutta	0,3 – 4,5	5xxx(x), Si+Mg: 6xxx(x)
Zn	Parantaa lujuutta	4,5 – 5,6	7xxx(x)
Si	Parantaa lujuutta, Yli 1 % pitoisuus heikentää anodisoitavuutta	0,4 – 10	4xxx(x), Si+Mg: 6xxx(x)
Cu,	Parantaa lujuutta, Parantaa pinnan kiiltoa, heikentää korroosionkestävyyttä, lisää halkeamisriskiä	0,1 – 5,5	2xxx(x)
Mn	Parantaa korroosionkestävyyttä, Estää raudan haitallisen vaikutuksen, sekä pienentää raekokoa	0,3 – 1,3	3xxx(x)
Cr	Parantaa korroosionkestävyyttä, korkea Cr-pitoisuus tuottaa kellerävän oksidipinnan	0,15 – 0,25	8xxx(x)
Ti	Parantaa pinnan laatua	0,15	8xxx(x)
Pb	Parantaa työstettävyyttä	0,4	8xxx(x)
Bi	Parantaa työstettävyyttä	0,4	8xxx(x)

Laajan saatavuutensa ja sopivien seosaineiden myötä alumiini on hyvin käyttökelpoinen materiaali moniin erilaisiin sovelluksiin. Edullisuuden ohella keskeisimmät alumiinin käyttöä usein puoltavat tekijät ovat sen keveys, usein riittävän hyvä lujuus, hyvä korroosionkestävyys, helppo muokattavuus ja liitettävyyys sekä myrkyttömyys. Taulukkoon II on koottu alumiinin etuja ja heikkouksia.

Taulukko II Yhteenveto alumiinin eduista ja heikkouksista. (Teknologiateollisuus, 2006)

Edut	Heikkoudet
<ul style="list-style-type: none"> • tiheys vain 1/3 teräksen tiheydestä • kevyt, hyvä lujuus-painosuhde • hyvä korroosionkestävyys • usein riittävä lujuus, murtolujuus 70 – 700 MPa • sitkeä myös matalissa lämpötiloissa • helppo työstettävyys (muokkaus, muovaus, hitsaus, asennettavuus) • Hyvä sähkön- ja lämmönjohtavuus • Pintakäsiteltävyys • Kevyt kuljettaa • vähäinen huoltotarve • kierrätettävä • myrkytön • epämagneettisuus 	<ul style="list-style-type: none"> • pieni kimmomoduuli, 1/3 teräksen kimmo-moduulista • kulumiskestävyys • herkkä naarmuuntumaan • matala kuumalujuus • pieni virumislujuus • pieni väsymislujuus

Alumiini on raudan jälkeen maailman toiseksi eniten käytetty metalli. Esimerkiksi tämän vuosituhatosen alkupuolella Länsi-Euroopassa alumiinia on käytetty vuodessa seuraavasti: 3,4 miljoonaa tonnia valssattuja tuotteita, 2,4 miljoonaa tonnia pursotettuja tuotteita, 0,7 miljoonaa tonnia foliota ja 1,9 miljoonaa tonnia kierrätysalumiinista tuotettuja valuseoksia. (Teknologiateollisuus, 2006) Alumiinia käytetään moniin erilaisiin tarkoituksiin esimerkiksi rakentamisessa, rakennustarvikkeissa, kuljetusvälineissä, koneissa ja laitteissa, pakkauksissa, käyttötavaroissa, sekä sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa. (Teknologiateollisuus, 2006)

2.2 Alumiinin korroosio

Usein metallien maalauksen tarkoitus on estää metalleilla spontaanisti tapahtuvien korroosioreaktioiden tapahtuminen. Se kuinka pitkään ajallisesti näiden korroosioreaktioiden tapahtuminen metallin pinnalla voidaan estää, määrittää hyvin pitkälti, miten maalaus toimii rakenteessa suunnitellun käyttöajan ajan. Mikäli metallipinta vaurioituu maalikalvon ja metallin rajapinnalla tapahtuvien korroosioreaktioiden seurauksena, aiheutuu siitä maalikalvon irtoaminen metallin pinnasta. Kun tämä tapahtuu odotettua nopeammin, ei maalaus ole toiminut rakenteessa suunnitellusti. Tämän takia alumiininkin maalauksessa esikäsitteilyprosessin on oltava laadullisesti oikea ja prosessin soveltuvuutta on perusteltua tutkia korroosionestomaalauksen näkökulmasta. Vaikka materiaalina alumiini ei varsinaista korroosionestomaalauksista monissa käyttösovelluksissa tarvitse, on maalauksen alumiinin pinnalla

kestettävä korroosiota edistäviä olosuhteita. Seuraavassa tarkastellaan korroosion perusteita ja alumiinin korroosioilmiöitä.

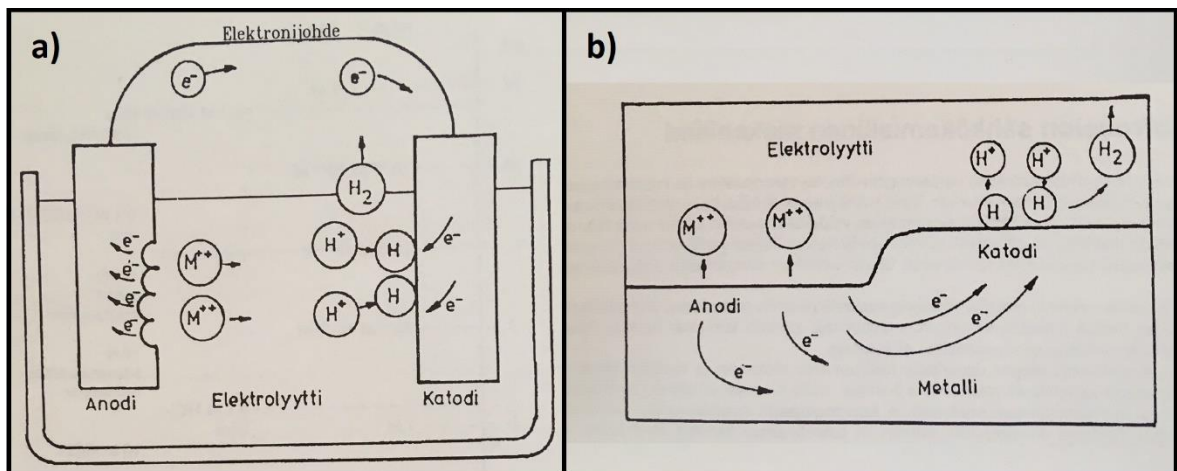
2.2.1 Korroosion yleiset perusteet

Yleisesti korroosiolla tarkoitetaan kiinteän aineen, tavallisesti metallien, vaurioitumista ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta. Käytännössä korroosiossa on kyse aineen pyrkimisestä kemiallisten ja sähkökemiallisten reaktioiden avulla sellaiseen olotilaan, joka kyseisellä aineella on vallitsevassa olosuhteessa pysyvin. Luonnossa metallit esiintyvät tavallisesti esimerkiksi oksidi- tai hydroksidi-yhdisteinä, joista metalleja tuotetaan energiaa sitovilla endotermisillä reaktioilla. Korroosiossa tämä sitoutunut energia vapautuu metallista ja metalli ajan kuluessa etenee normaaliolosuhteissa luonnollisimpaan olomuotoonsa eli takasin esimerkiksi oksidihdisteeksi, jossa sen energiasisältö on matalin. (Laitinen & Toivonen, 1982; Tunturi, 1988)

Korroosioreaktiot voidaan jakaa kemiallisiin ja sähkökemiallisiin reaktioihin. Kemiallisissa reaktioissa reaktio tapahtuu suoraan metallin ja ympäristön välillä. Tavallisesti niissä metalli reagoi sitä ympäröivän kaasun kanssa. Esimerkki kemiallisesta korroosioreaktiosta on reaktio kiinteä alumiinin ja kloorikaasun välillä. Kemiallinen korroosioreaktio voi tapahtua myös joissakin tapauksissa kiinteän metallin ja nesteen välillä. Tällaisia ovat esimerkiksi kiinteän metallin suora liukeneminen sulaan metallihalidiin tai joihinkin nestemäisiin yhdisteisiin. Kemialliset korroosioreaktiot ovat yleensä paikallisia yksittäisiä reaktioita eikä niissä tapahdu sähkövarausten siirtymistä. Korroosioreaktiotyypinä ne ovatkin käytännössä merkittävästi harvinaisempia, kuin sähkökemialliset korroosioreaktiot. (Tunturi, 1988)

Sähkökemialliset korroosioreaktiot sisältävä aina kaksi reaktiota: elektroneja vapauttavan anodisen reaktion ja elektroneja kuluttavan katodisen reaktion. Edellytys anodisen ja katodisen reaktion tapahtumiselle on, että kaksi toisistaan poikkeavan elektrodipotentiaalin omaavaa metallifaasia muodostavat korroosioparin eli niin kutsutun korroosiokennon. Korroosiopari muodostuu, kun metallifaaseja yhdistää elektrolyytti. Anodinen ja katodinen reaktio voi siis tapahtua saman metallin eri kohdissa, joita elektrolyytti yhdistää tai kahden eri elektrolyyttiin upotetun metallin välillä. Reaktioiden tapahtuma-alueita kutsutaan anodiseksi ja katodiseksi alueeksi. Anodisella alueella tapahtuu metallilla elektroneja luovuttava hapettumisreaktio ja katodisella alueella elektroneja vastaanottava pelkistymisreaktio. Jos näiden alueiden sijainti metallien pinnalla ei vaihtelee, metallissa tapahtuu paikallista korroosiota. Mikäli alueiden sijainti vaihtelee jatkuvasti metallin pinnalla, korroosio etenee tasaisesti. Sähkökemiallisessa korroosioreaktiossa olennaista on reaktion tapahtuminen spontaanisti eli vaurioituvan anodisen alueen muodostuminen edellyttää aina jonkin muun aineen tai alueen vaikutusta eli katodia, joka vastaanottaa anodin luovuttamat elektronit. Reaktioissa

katodina toimii suuremman elektrodipotentiaalin metalli eli jalompi metallin tai saman metallin jalompi faasi. Anodina korroosioparissa on matalamman elektrodipotentiaalin epäjalompi metalli tai saman metallinen epäjalompi faasi. Kuvassa 1 on havainnollistettu sähkökemiallinen korroosiopari kahden eri metallin välillä, sekä saman metallin eri kohdissa. (Tunturi, 1988; Laitinen & Toivonen, 1982)



Kuva 1 Sähkökemiallinen korroosiokenno. a) Kaksi eri metalli samassa elektrolyysissä. b) Anodi- ja katodialueet saman metallin eri kohdissa. (Tunturi, 1988)

Eri metallien vaurioitumisherkkyys on erilainen erilaisissa ympäristöissä. Tähän tietoon perustuen erilaisissa ympäristöissä metallit voidaan järjestää niiden elektrodipotentiaalien eli standardipotentiaalin E^0/V perusteella järjestykseen. Kun metalli upotetaan liuokseen, kutsutaan metallia metallielektrodiksi ja liuosta elektrolyytiksi. Kyseisessä systeemissä metallielektrodin ja elektrolyytin välillä on kemiallisesta ja sähköisestä potentiaalierosta muodostuva sähkökemiallinen potentiaaliero. Potentiaalieron suuruus riippuu upotettavan metallin atomien taipumuksesta luovuttaa elektronejaan. Tätä ei voida suoraan mitata, joten elektrodipotentiaalin määrittäminen tapahtuu standardielektrodin eli normaalivetyelektrodin avulla. Standardielektrodin elektrodipotentiaali on sovittu nolaksi. Jonkin metallin elektrodipotentiaali tietyssä ympäristössä voidaan määrittää järjestelyllä, jossa elektrolyyttiin upotetaan standardielektrodi ja metallielektrodi. Mikäli tällaisessa sähkökemiallisessa kennossa elektronit kulkevat standardielektrodilta metallielektrodille on sovitun mukaisesti tutkitavan metallielektrodin standardipotentiaalin etumerkki positiivinen. Jos elektronit kulkevat vastakkaiseen suuntaan, on etumerkki negatiivinen. On myös sovittu negatiivisen standardipotentiaalin metalleja kutsuttavan epäjaloiksi ja positiivisen standardipotentiaalin metalleja jaloiksi metalleiksi. Kun kuvatulla järjestelyllä on määritetty eri metalleille standardipotentiaalit, voidaan metallit järjestää taulukossa III esitettyyn sähkökemialliseen jännitesarjaan. Käytännössä jännitesarja kuvaa metallien hapettumiskykyä. Sähkökemiallisen jännitesarjan avulla

voidaan arvioida, miten herkästi kahden eri metallin välillä tapahtuu hapetus-pelkistysreaktio eli muodostuuko metallien välillä korroosiokenno, jos elektrolyytti, esimerkiksi ohut vesifilmi, yhdistää ne. (Tunturi, 1988)

Taulukko III Yleisimpien metallien sähkökemiallinen jännitesarja. (Kairinen, 2016)

Osa metallien jännitesarjaa:																		
Li	K	Ba	Ca	Na	Mg	Al	Zn	Cr	Fe	Co	Ni	Sn	Pb	H	Cu	Hg	Ag	Au
E°/V < 0														E°/V = 0		E°/V > 0		
Metallin hapettumiskyky laskee →																		

Metallien sähkökemiallinen jännitesarja on määritetty puhtaille metalleille liuoksissa, joissa metalli-ionipitoisuus on suuri. Todelliset korroosioympäristöt poikkeavat tällaisista olosuhteista merkittävästi, joten sellaisenaan jännitesarja soveltuu lähinnä teoreettisiin tarkasteluihin. Käytännön kannalta hyödyllisempiä ovat jännitesarjat, jotka on laadittu huomioiden korroosioympäristön olosuhteet, kuten elektrolyytin koostumus ja lämpötila. Esimerkiksi merivedessä määritetyssä jännitesarjassa alumiinin jalous ja elektrodipotentiaali kasvaa sinkkiä suuremmaksi. Teoreettisessa jännitesarjassa alumiini on sinkkiä epäjalompi. Näitä jännitesarjoja kutsutaan galvaanisiksi jännitesarjoiksi. Ne sisältävät usein puhtaiden metallien lisäksi yleisesti käytettäviä metalliseoksia ja ne on määritetty käyttäen mahdollisimman hyvin todellista käyttöympäristöä kuvaavalla liuoksella ja tarkoitukseen sopivalla vertailelelektrodilla. Tarve galvaanisille jännitesarjoille tulee erityisesti metallien seostuksesta, sekä ympäristön kaasu-, neste- tai kiinteän faasin vaikutuksista metallin pintaan ja näin edelleen sen potentiaaliin. (Tunturi, 1988)

Metallin sähkökemialliseen korroosioreaktioon vaikuttaa elektrolyytillä kytkeytyvien metallien elektrodipotentiaalien eron lisäksi olennaisesti myös elektrolyytin tyyppi ja sähkönjohtavuus. Merkittävä vaikutus on myös anodi- ja katodimetallien pinta-alojen suhteella. Elektrodipotentiaalien eron suuruus kertoo, kuinka todennäköistä epäjalomman metallin syöpyminen on. Se ei kuitenkaan kerro syöpymisen nopeutta. Sen määrää anodisen ja katodisen reaktion reaktiokinetiikat. Katodireaktion tulee kuluttaa kaikki anodireaktion vapauttavat elektronit. Useimmiten korroosionopeutta säätelee katodisen reaktion vedynkehitysnopeus, joka on eri metallien pinnoilla erilainen riippuen siitä, miten elektronit siirtyvät rajapinnan yli. Korroosionopeus kasvaa merkittävästi, jos anodisen alueen pinta-ala on pieni suhteessa katodiseen alueeseen. Elektrolyytin sähkönjohtavuus vaikuttaa vaurioituvan alueen sijoittu-

miseen pinnalla. Matalan sähkönjohtavuuden elektrolyytillä vaurioituminen tapahtuu anodisen ja katodisen alueen rajapinnalla. Korkean sähkönjohtavuuden elektrolyytillä anodisen alueen vaurioituminen on koko sen pinta-alalla tasaista. (Tunturi, 1988)

Todellisissa ympäristöissä tapahtuvissa sähkökemiallisissa korroosioreaktiossa tapahtuu aina erilaisia anodisen ja katodisen alueen elektrodipotentiaalien eroa pienentäviä polarisaatioilmiöitä. Tällainen polarisaatioilmiö on esimerkiksi anodin läheisyydessä elektrolyytissä suurentunut kationien konsentraatio, joka vaikeuttaa uusien kationien liukenemista anodilta. Tämän seurauksena anodin elektrodipotentiaali suurenee. Samoin kationien liukeneminen elektrolyyttiin voi vaikeutua, jos anodi ja elektrolyytti reagoivat ja muodostavat anodin pinnalle liukenemattoman yhdisteen. Katodilla yleinen polarisaatioilmiö on vety-ylijännite. Siinä katodin pinnalle kerääntyy vety-ioneja. Katodin luonteesta ja vallitsevista olosuhteista riippuu, kuinka hyvin vetyionit luovuttavat varauksensa katodille. Mikäli tämä ei tapahdu helposti muodostuu katodin pinnalle vety-ylijännite, joka pienentää katodin elektrodipotentiaalia. Käytännössä polarisaatioilmiöt määrittävät kontrolloiko korroosioreaktioiden etenemistä anodinen vai katodinen reaktio. Erityisen oleellisia ne ovat korroosioneston kannalta, sillä vaikuttamalla näistä toiseen voidaan korroosiota hidastaa tai se voidaan jopa estää täysin. Tällaisia keinoja ovat esimerkiksi elektrolyyttiin anodia tai katodia polarisoivien tai depolarisoivien inhibiittien lisäys, metallin elektrodipotentiaalin muuttaminen positiiviseksi tai estämällä eristämisen avulla anodin ja katodin väliltä sähkökemiallinen yhteys. (Lindroos et al., 1986; Laitinen & Toivonen, 1982)

2.2.2 Alumiinin korroosiokäyttäytyminen

Kuten metallinen sähkökemiallisesta jännitesarjasta havaitaan, alumiini on epäjalo ja helposti hapettuva reaktiivinen alkuainemetalli. Tästä voidaan päätellä alumiinin olevan hyvin altis korroosiolle ja sen korroosiokestävyyden olevan heikko. Käytännössä kuitenkin useissa alumiinin käyttöympäristöissä sitä ympäröi faasi, joka sisältää happea. Tällaisessa ympäristössä alumiinin herkkyys kemialliselle korroosiolle on sen etu. Happea sisältävässä faasissa tapahtuu alumiinilla spontaani kemiallinen korroosioreaktio, jossa alumiini reagoi hapen kanssa muodostaen alumiinin pintaan ohuen ja tiiviin oksidikalvon. Tämän oksidikalvon paksuus riippuu alumiinin puhtausasteesta ja tavallisesti se on noin 5 – 20 nanometriä. Kalvon tiiveys aiheuttaa sen, että metallinen alumiini eristyy ympäristöstä, jolloin oksidikalvon alle suojaan jäävä puhdas alumiini on suojassa korroosioreaktioilta. Muodostunut oksidikalvo muuttaa alumiinin elektrodipotentiaalin jalommaksi. Esimerkiksi vedessä puhtaan alumiinin käytännön elektrodipotentiaali on noin – 0,8 voltia ja oksidoituneen alumiinin potentiaali on – 0,169 voltia. Ympäristöolosuhteet vaikuttavat siihen, millainen on oksidikalvon

rakenne. Normaalissa ilmastollisessa ympäristössä oksidikalvosta tulee amorfinen. Vedessä, vesihöyryssä sekä joissakin kaasufaaseissa se saa kiteisen rakenteen. (Tunturi, 1988; Laitinen & Toivonen, 1982)

Olennaista alumiinin korroosiokäyttäytymisessä on käyttöympäristö. Hyvä korroosiokestävyys edellyttää ympäristöä, jossa alumiinilla on jatkuvasti saatavilla happea oksidikalvon muodostamiseen. Tällaisessa ympäristössä oksidikalvon vaurioituessa palautuu vaurioituneen alueen korroosionkestävyys välittömästi, kun paljastunut puhdas alumiini ja happi reagoivat muodostaen vaurion alueelle uuden oksidikalvon. Korroosionkestävyyttä edistää olennaisesti myös, jos alumiinipinnan märkäaika on mahdollisimman lyhyt. Märkäaika tarkoittaa aikaa, jolloin ilman suhteellinen kosteus on yli 80 prosenttia ja lämpötila yli 0 celsiusastetta. Kuvatussa olosuhteessa metallipinnalle muodostuu ohut vesifilmi elektrolyyttikalvoksi, joka mahdollistaa sähkökemiallisen korroosion. Elektrolyyttikalvo voi muodostua pinnalle myös merkittävästi alhaisemmissa ilman suhteellisissa kosteuksissa, jos pinnalla on vettä itseensä imeviä hygroskooppisia epäpuhtauksia, kuten esimerkiksi suoloja. (Tunturi, 1988; Suomen standardoimisliitto, 2017)

Ilmastollista korroosiota alumiini kestää erinomaisesti maaseutuilmastossa. Kestävyys on hyvä myös meri- ja teollisuusilmastoissa, jos alumiinirakenne on suunniteltu oikein. Näissä alumiinin korroosioauriot rajoittuvat tavallisesti pistesyöpymiseen, joka aiheutuu ilman korkeammista kloridi- tai rikkidioksidipitoisuuksista. (Tunturi, 1988) Taulukossa IV havainnollistetaan alumiinin korroosiokäyttäytymistä suhteessa muihin metalleihin, kun metallit on altistettu ilmastolliselle korroosiolle.

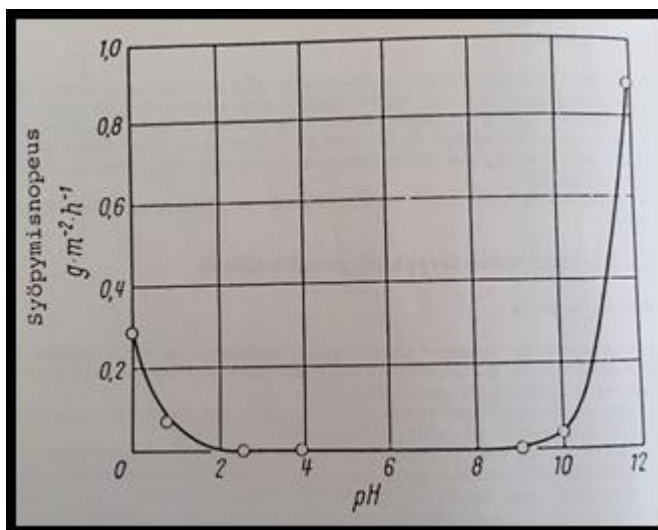
Taulukko IV Esimerkki metallien korroosionopeuksista meri- ja kaupunki-ilmastoissa. (Teknologiateollisuus, 2006)

	Painohäviö g/m ² 8 vuoden altistus meri-ilmastossa (Malmö)	Painohäviö g/m ² 8 vuoden altistus kaupunki-ilmastossa (Tukholma)
Alumiini	7	2
Kupari	57	31
Sinkki	133	61
Hiiliteräs	933	676

Maaperään upotusta alumiini kestää usein melko huonosti. Maaupotuksessa alumiinin kestävyys määräytyy maaperän kosteuden, pH-arvon ja happipitoisuuden perusteella. Yleisesti maaperään upotettaessa alumiinin tulisi suojata pinnoittamalla. Upotettaessa alumiini beto-

niin, alumiini syöpyy betonin kuivumisvaiheen aikana. Tästä ei kuitenkaan yleensä ole haittaa, koska syöpyminen jää verrattain vähäiseksi. Joissakin tapauksissa betonin lisäaineina käytettävät kloridiyhdisteet saattavat kuitenkin aiheuttaa voimakastakin syöpymistä, joten myös betoniupotuksen kohdalla alumiinin suojapinnoitus on usein perusteltua. (Tunturi, 1988)

Kuvassa 2 on esitetty alumiinin syöpmisnopeus liuoksessa, liuoksen pH-arvon funktiona. Voimakkainta alumiinin syöpyminen on emäksisissä liuoksissa. pH-alueella 4,5 – 8,5 syöpyminen on erittäin vähäistä. Liuoksissa alumiinin syöpmiseen vaikuttaa kuitenkin pH-arvon lisäksi merkittävästi liuoksen koostumus. Vesiupotuksessa alumiini kestää hyvin pehmeitä ja tislattuja vesiä, sekä hiilidioksidi- ja happipitoisia vesiä. Erityisesti erittäin puhtaan tai magnesiumilla, mangaanilla ja piillä seostetun alumiinin meriveden kestävyys on myös hyvä. Kovat vedet ja kuparipitoiset vedet aiheuttavat alumiinin pistesyöpymistä. (Tunturi, 1988)



Kuva 2 Alumiinin syöpmisnopeus liuoksessa liuoksen pH-arvon funktiona. (Tunturi, 1988)

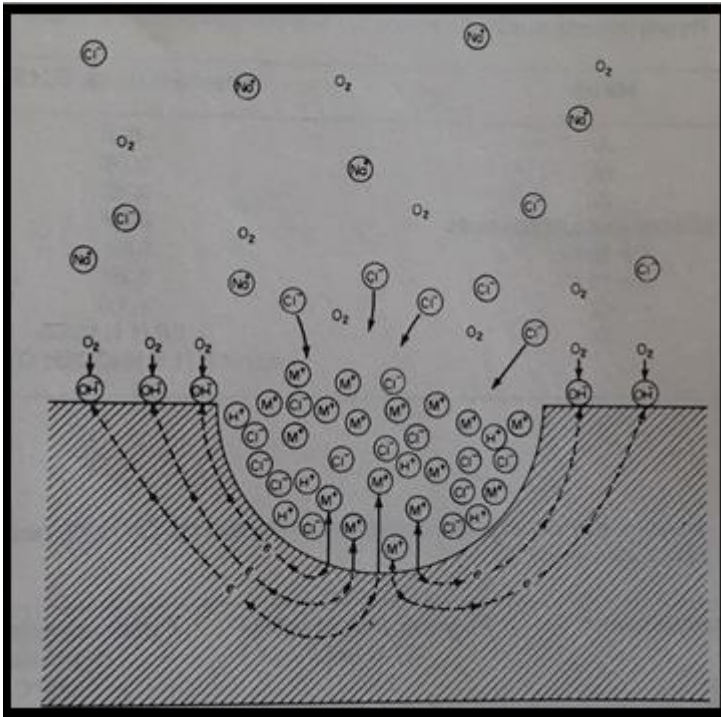
Alumiinin seostus vaikuttaa sen korroosionkestävyyteen. Parhain kestävyys on magnesiumia sisältävillä seoksilla. Näissä seoksissa oksidikalvo muodostuu osin magnesiumoksidista, mikä parantaa korroosionkestävyyttä erityisesti klorideja sisältävissä liuoksissa, kuten merivedessä. Myös piitä sisältävät seokset kestävät suhteellisen hyvin korroosiota. Merkittävästi korroosiokestävyyttä heikentää alumiinia jalommat seosaineet tai epäpuhtaudet, kuten esimerkiksi kupari ja rauta. Nämä metallit saattavat aiheuttaa muodostuvaan oksidikalvoon virheitä, jotka edelleen muodostuvat syöpyviksi alueiksi galvanisen korroosion kautta. Yleisesti seosaineiden kohdalla olennaista korroosiokestävyyden kannalta on, miten

seosaine liukenee muodostuvaan oksidikalvoon ilman, että se aiheuttaa siihen epätasalaatuisuutta. (Teknologiateollisuus, 2006)

2.2.3 Alumiinilla esiintyvät korroosimuodot

Merkittävimmät alumiinilla esiintyvät korroosimuodot ovat pistesyöpyminen, rako- ja raerajakorroosio, galvaaninen korroosio sekä lankamainen korroosio.

Paikallisia kuoppamaisia korroosiovaurioita aiheuttava pistesyöpyminen on yleinen korroosimuoto metalleilla, joiden korroosiokestävyys perustuu passivoituvaan pintaa. Alumiini on tällainen metalli. Alumiinilla pistesyöpyminen alkaa tavallisesti oksidikalvon virheestä tai pinnalle vaikuttamaan pääsevän elektrolyytin, esimerkiksi meriveden, sisältämien aggressiivisten anionien vaikutuksesta. Pistesyöpymisessä anioneja ja happea sisältävä elektrolyytti aiheuttaa metallikationien liukenemisen metallista, mistä aiheutuu liukenemisen alueelle positiivinen varaus. Tälle alueelle anionit hakeutuvat, jotta sähköinen neutraalisuus systeemissä säilyisi. Anionit ja metallikationit muodostavat metallikloridin, joka edelleen reagoi veden kanssa muodostaen metallihydroksidia. Viimeisessä reaktiossa vapautuu vety- ja kloori-ioneja, jolloin niiden pitoisuus syöpymän alueelle nousee ja elektrolyytti väkevoityy paikallisesti. Tämä aiheuttaa syöpymisnopeuden kasvun ja korroosiokennon kato-disen reaktion hapen pelkistyminen siirtyy syöpymän viereisille alueille. Syy tähän on hapen heikko liukoisuus väkevoityneeseen elektrolyyttiin. Hapen pelkistymisen siirtyminen viereisille alueille tarkoittaa, että nämä alueet suojautuvat korroosiolta katodisesti, joka selittää, että syöpyminen jää pistemäiseksi. Kuvassa 3 on esitetty pistesyöpymisen mekanismi. Pistesyöpymisessä siis yksittäinen virhe oksidikalvossa muodostuu sähkökemiallisen korroosioreaktion anodialueeksi ja ympäröivä ehjä oksidikalvo katodialueeksi, kuten puhtaan alumiinin ja oksidoituneen alumiinin elektrodipotentiaaleista voidaan havaita. (Tunturi, 1988)



Kuva 3 Pistesyöpymisen mekanismi. (Tunturi, 1988)

Rakokorroosiossa tapahtuu nimensä mukaisesti raossa. Käytännössä olosuhteet rakokorroosiolle voi muodostua, kun kaksi pintaa on liitetty esimerkiksi pultti-, niitti- tai hitsausliitoksella. Rakokorroosio-olosuhde voi muodostua myös metallipintaa peittävän kiinteän aineksen alle. Tällaisia aineksia voivat olla muun muassa hiekka tai lika tai kiinteät korroosiotuotasaostumat. Edellytyksenä rakokorroosiolle on liuoksen tunkeutuminen ragoon ja edelleen se, että liuos ei pääse vaihtumaan raossa samoin kuin paljailla metallipinnoilla. Rakokorroosion mekanismi on melko yhdenmukainen pistesyöpymisen kanssa. Raossa olevan liuoksen happipitoisuus laskee ja happipitoisuuserojen seurauksena ragoon muodostuu anodinen alue ja metallinsyöpyminen alkaa. Samoin kuin pistesyöpymisessä, syöpymistä nopeuttaa korroosioreaktioiden seurauksena väkevöitynyt elektrolyytti. Alumiinilla ja muillakin metalleilla rakokorroosion riski kasvaa, jos pinnoille pääsevän elektrolyytin sähkönjohtavuus on hyvä esimerkiksi sen sisältämien kloridien vuoksi. (Tunturi, 1988)

Alumiinin sijoittuminen metallien sähkökemiallisessa jännitesarjassa ja erilaisissa galvaanisissa sarjoissa tarkoittaa sen olevan suhteellisen altis galvaaniselle korroosiolle. Galvaanisessa korroosiossa alhaisemman elektrodipotentiaalin epäjalo metalli syöpyy, kun se on elektrolyytin välityksellä sähköisessä yhteydessä korkeamman elektrodipotentiaalin jalompaan metalliin. Metallien elektrodipotentiaalien eron suuruus osoittaa, kuinka todennäköisesti kaksi eri metallia muodostaa galvaanisen parin. Syöpymisen nopeus galvaanisessa

korroosiossa määräytyy anodi- ja katodireaktioiden polarisoitumisesta, sekä anodi- ja kato- dialueiden pinta-alojen suhteesta ja elektrolyytin tyypistä. (Tunturi, 1988) Alumiinin galvaanisessa korroosiossa merkittävä asia on käyttöympäristö. Täsmällisemmin se, mahdollistaako ympäristö elektrolyytin muodostumisen ja pääsyn alumiinin pinnalle. Kuivissa sisätiloissa alumiinin galvaanista korroosiota ei juuri tapahdu, vaikka alumiini olisi suorassa kontaktissa jalompaan metalliin. Ympäristöissä, joissa alumiinin ja jalomman metallin kontaktialueella todennäköisesti voi vaikuttaa elektrolyyttiliuos on riski alumiinin galvaaniselle korroosiolle. Näissä tapauksissa alumiinin liitosta jalompaan metalliin tulisi välttää, estää elektrolyytin pääseminen metallien pinnoille esimerkiksi maalaamalla, eristää metallit toisistaan sähköjohtamattomalla eristeellä tai varmistaa, että epäjalon metallin pinta-ala ei ole pieni suhteessa jalon metallin pinta-alaan. (Tunturi, 1988)

Pistesyöpymisessä korroosioreaktio tapahtuu yksittäisen suuremman epäpuhtaus- tai seosainepartikkelin kohdalla. Raerajakorroosiossa on kysymys tällaisten epäpuhtauksien tai seosaineiden ketjuuntumisesta metallifaasien raerajoille ja näiden edelleen vaurioitumisesta korroosioreaktion seurauksena. Reaktiossa epäpuhtaampi metallifaasin osa muodostuu anodialueeksi ja vaurioituu. Raerajakorroosiota tapahtuu seostetuilla alumiineilla, koska edellytys sille on koostumuserot metallifaasien rajapinnoilla. Raerajoille voi metallin työstön tai käyttöympäristön olosuhteiden vaikutuksesta muodostua korroosiolle herkempiä alueita. Raerajalle metallimatriisiin voi kertyä epäpuhtauksia tai raerajaerkautumisesta voi aiheutua jonkin seosaineen rikastuminen tai köyhtyminen alueella. Esimerkiksi alumiinissa voi olla epäpuhtautena heikosti metallimatriisiin liukenevaa rautaa, joka tällöin kertyy raerajoille ja voi myöhemmin aiheuttaa raerajakorroosiota. (Tunturi, 1988; Lindroos et al., 1986)

Lankamainen korroosio on tyypillistä orgaanisella pinnoitteella pinnoitetulla metallilla. Se lähtee liikkeelle tavallisesti epäjatkuvuudesta pinnoitteessa esimerkiksi naarmusta, reiästä tai ilmahuokosesta. Käynnistymisen jälkeen se etenee pinnoitteen ja metallin välissä alkupisteestään lankamaisesti satunnaisesti suuntiin. Langan kärjessä on niin kutsuttu aktiivinen pää ja langan varsi on muodostuneesta korroosiotuotteesta koostuva häntä. Korroosio tapahtuu langan päässä, jossa tyypillisesti elektrolyytti on väkevöitynyt esimerkiksi ilman kloridien vaikutuksesta. Pinnoitteen paksuudella ei ole oleellista vaikutusta lankamaisen korroosion etenemiseen, koska korroosioreaktio saa tarvitsemansa hapen ja veden hygroskooppisen hännän kautta. Korkea ilman suhteellinen kosteus, epäpuhtauksien tai suolojen määrä edistävät lankamaisen korroosion tapahtumista. (Civil Aviation Authority, 2017; Volk, 2014)

Yleisessä korroosiossa metallin pinnalla anodi- ja katodialueet vaihtavat jatkuvasti tasaisesti paikkaa ja näin metallin pinta syöpyy tasaisesti laajalta pinta-alalta. Normaaleissa olosuhteissa alumiinin pintaan muodostuva oksidikalvo aiheuttaa sen, ettei sillä normaaleissa olosuhteissa esiinny yleistä korroosiota. Sen sijaan alumiinilla voi tapahtua yleistä korroosiota, kun se upotetaan kemikaaliin, johon se liukenee. (Tunturi, 1988)

Jännityskorroosiossa metallipintaan vaikuttaa ulkoisia tai sisäisiä jännityksiä tai näitä molempia samaan aikaan. Sopivassa korroosioympäristössä pintaan kohdistuvat jännitykset aiheuttavat hauraan murtuman metallin pintaan. Alttiutta jännityskorroosiolle nostavat metallin muokkaava työstö ja sen mikrorakenteesta pintaan kohdistuvat jännitykset. Myös hapen läsnäolo ja voimakkaat hapettimet kasvattavat jännityskorroosion mahdollisuutta. Eri-laisten happipitoisten liuosten lisäksi jännityskorroosiota voi aiheuttaa sulat metallit tai suolat ja jotkin epäorgaaniset vedettömät liuokset. Eräs jännityskorroosion muoto on vetyhauraus. Siinä metalliin on diffuusioilmiön seurauksena siirtynyt vetyä, joka on peräisin esimerkiksi pinnalla tapahtuneesta korroosioreaktiosta. Metallin huokosiin siirtynyt vety aiheuttaa niissä paineen nousun ja edelleen metallin halkeamisen. Alumiinilla jännityskorroosiota aiheuttaa erityisesti elohopea, elohopeakloridi, etikkahapon ja elohopeasuolan yhdisteet, vesihöyry ja ilmastettu suolahappo. Sulista metalleista alumiinin jännityskorroosiota aiheuttaa elohopea, gallium, indium, natrium, tina ja sinkki. (Tunturi, 1988)

Korroosioväsyminen tarkoittaa metallin vaurioitumista toistuvan kuormituksen vaikutuksesta nopeammin, kuin miten se vaurioituisi, jos metalli olisi vapaa korroosioympäristön olosuhdevaikutuksilta. Väsymiskestävyyttä kuvataan jännitysamplitudin tai kuormanvaihtokertojen avulla. Jos metalliin ei vaikuta minkäänlainen korroosioympäristö, voidaan sille määrittää niin kutsuttu väsymisraja. Tätä rajaa pienemmät jännitykset eivät aiheuta murtumaa metallin. Kun systeemiin lisätään metallin ympärille korroosioympäristö väsymisrajaa ei voida määrittää, vaan kuormanvaihtokertojen määrän noustessa matalampikin jännitysvaihtelu voi aiheuttaa murtuman metalliin. Mikäli metallissa esiintyy paikallista korroosiota esimerkiksi pistesyöpymää, jännityskorroosio keskittyy usein näihin kohtiin. (Tunturi, 1988)

Valikoiva liukeneminen tarkoittaa tietyssä korroosioympäristössä metalliseoksen tai sen mikrorakenneosan liukenemista seoksen muita osia nopeammin. Korroosiotyyppinä valikoiva liukeneminen ei ole alumiinilla yleinen. Alumiinin kohdalla valikoiva liukeneminen vaikuttaa enemmänkin alumiinin silloin, kun alumiinia on seostettu muuhun metalliin. Tällöin sopivissa olosuhteissa voi tapahtua seosaineena olevan alumiinin valikoiva liukeneminen ennen varsinaisen seostetun metallin liukenemista. (Tunturi, 1988)

Korroosiotyypeistä eroosio-, kavitaatio- ja hiertymiskorroosio eivät ole kovin yleisiä korroosiotyyppejä alumiinilla. Eroosio- ja kavitaatiokorroosiossa nesteen kiinteät partikkelit tai ilmakuplat poistavat metallin pinnalta pintaa suojaavia korroosiotuotteita, jolloin paljastuneen metallin korroosio kiihtyy. Tavallisesti näitä eroosio- ja kavitaatiokorroosiota esiintyy putkien sisäpinnoilla, sekä erilaisissa potkureissa ja siipipyörissä. Hiertymiskorroosiossa kaksi metallipintaa liikkuu toisiaan vasten ja vastakkain olevat pinnat hiertävät pieniä partikkeleita irti toisistaan. Mikäli alumiinilla tapahtuu eroosio-, kavitaatio- tai hiertymiskorroosiota se on yleensä enemmän seurausta alumiinin sopimattomuudesta kyseiseen käyttötarkoitukseen ja -ympäristöön, kuin yleisesti alumiinin heikoista korroosionkestävyysominaisuuksista. (Tunturi, 1988)

2.3 Alumiinin perinteiset pintakäsittelyt

Yleisin syy alumiinin pintakäsittelylle on tarve muuttaa alumiinin visuaalisia ominaisuuksia. Joissakin sovelluksissa alumiinin pintakäsittelyllä parannetaan myös sen kestävyyttä aiottussa käyttötarkoituksessa. Seuraavassa käsitellään perinteisistä alumiinin pintakäsittelyistä anodisointia, kromatointia ja fosfatoointia. Näille käsittelyille voidaan monissa tapauksissa käyttää vaihtoehtoina tässä diplomityössä käsiteltäviä uudempia tekniikoita. Mainituista anodisointia käytetään usein ainoa pintakäsittelynä, mutta sillä tuotettu pinta voidaan myös maalata. Kromatointia ja fosfatoointia käytetään yleensä kemiallisena esikäsittelynä alumiinin maalausprosesseissa. Ne ovat perinteisiä, jo pidempään käytössä olleita reaktiopinnoitteita ja luvussa kolme käsiteltävät konversiokäsittelyt taas ovat uudempia kromatointia ja fosfatoointia korvaavia reaktiopinnoitteita. Joissakin tapauksissa kromatointia tai fosfatoointia käytetään myös ainoana pintakäsittelynä. Esimerkiksi tarkoituksella maalaa-matta jätettävän alumiinipinnan korroosiosuojana.

2.3.1 Anodisointi

Anodisointi on yleisimpiä alumiinin pintakäsittelyjä. Siinä alumiinin luontaista oksidikalvo-kerrosta kasvatetaan elektrolyytisellä hapetusprosessilla. Anodisoinnin etuna on korroosionkestävyyden parantuminen ja mahdollisuus moniin erilaisiin ulkonäköihin värjäämällä muodostettava oksidikerros tai kiillottamalla pinta. Myös monissa teknisissä sovelluksissa voidaan hyötyä anodisoimalla tuotetun oksidikerroksen kovuudesta, kulutuksenkestävyydestä tai sähkön eristysominaisuuksista. (Tunturi & Tunturi, 1999)

Alumiinin seosaineet ja käsiteltävän kappaleen valmistustekniikka vaikuttavat anodisoinnin laatuun. Mitä vähemmän seosaineita alumiinissa on, sitä paremmin sen anodisointi onnistuu. Esimerkiksi ominaisuuksiltaan lähellä alumiinia oleva magnesium on yleinen alumiinin seosaine, eikä sillä juuri ole vaikutusta alumiinin anodisoitavuuteen, mutta erityisen haitallisesti anodisoitavuuteen vaikuttaa seoksen korkea kuparipitoisuus. Valmistustekniikan

osalta profiili- ja levytuotteet ovat hyvin anodisoitavissa. Niissä laadullisia haasteita voi aiheuttaa ainepaksuuden eroista aiheutuvat juovat. Valualumiineissa on tavallisesti runsaammin seosaineita ja mahdollisesti ilmahuokosia. Niiden anodisointi, varsinkin visuaalisen laadun näkökulmasta on usein haasteellista. (Tunturi & Tunturi, 1999)

Alumiinin pintaan normaaliympäristössä muodostuu noin 5 – 20 nanometrin paksuinen oksidikerros. Tämä kerros voidaan anodisoimalla kasvattaa paksuudeltaan jopa 1000 kertaiseksi. Kerroksen kasvattaminen tapahtuu kytkemällä alumiini anodiksi ja upottamalla se elektrolyytinä toimivaan happoliuokseen. Upotuksesta ja sähkövirran kytkennästä alkaa sähkökemiallinen reaktio, jossa liuoksen vesi hajoaa katodille kulkeutuviksi vetykationeiksi ja anodille kulkeutuviksi hydroksyylianioneiksi. Edelleen vetyionit pelkistyvät katodin pinnalla vetykaasuksi ja happi-ionit hapettavat alumiinin pintaa muodostaen alumiinioksidia. Ensimmäisenä pintaan muodostuu tiivis ja ohut este-kerros ja tämän päälle kennomaisen rakenteen saava oksidikerros. Koska pinnoitteen tuottamiseen kulutetaan alumiinin pintaa, on muodostuneesta pinnoitekerroksesta 2/3 osaa alkuperäisen alumiinipinnan alapuolella ja 1/3 sen yläpuolella. Tämä johtuu alumiinioksidin alumiinia pienemmästä ominaistilavuudesta. Oksidikerroksen muodostumiseen voidaan vaikuttaa säätämällä sähkövirtaa ja elektrolyytin koostumusta. Tavallisesti kerros kasvaa tasaisesta ja kasvuvauhti hidastuu kerroksen paksuuntuessa. Lopulta kasvu pysähtyy, kun tasapainotilanne saavutetaan. Varsinaisen anodisoinnin jälkeen kennomainen oksidikerros yleensä tiivistetään anodisoinnin korroosionkestävyyden parantamiseksi. Tiivistys tehdään vedellä tai vesihöyryllä. Reaktiossa alumiinioksidi ja vesi muodostavat alumiinihydroksidia, joka lähtöaineita suuremmalla tilavuudellaan täyttää kennorakenteen aukot ja huokokset. Tiivistämättömänä anodisoitua alumiinia voidaan käyttää maalauksen esikäsitteilynä tai sovelluksissa, joissa korroosionkestävyyttä tärkeämpää on hyvä kulutuskestävyys. (Tunturi & Tunturi, 1999)

Varsinaisen anodisointikylvyn ja jälkitiivistysvaiheen lisäksi anodisointiprosessi sisältää myös muita vaiheita käsiteltävien kappaleiden ripustamisen, rasvanpoistopesun, peittäus-, kiillotus- sekä värjäysvaiheet ja eri vaiheiden väliset huuhtelut. (Tunturi & Tunturi, 1999) Verraten luvussa kolme käsiteltäviin uudempiin teknologioihin anodisointiprosessit ovat useampivaiheisia ja näin ollen kustannus- ja ympäristönäkökulmista tehottomampia varsinkin, jos anodisoinnin tarkoitus on toimia vain maalin toimivuutta parantavana esikäsitteilyprosessina ennen maalausta.

2.3.2 Kromatointi

Metallipinta voidaan passivoida paremmin korroosioympäristöjä kestäväksi. Reaktiopinnoitteiden ryhmään kuuluva kromatointi on pinnan passivointikäsitteily, jota käytetään yleisesti

myös alumiinilla maalauksen esikäsittelynä tai parantamaan alumiinin korroosionkestävyyttä. Aiemmin kromatointiin käytettiin kuudenarvoista kromia, jonka käytöstä on nykyisin luovuttu terveys- ja ympäristöhaittojen vuoksi. Nykyisissä alumiinin kromatointiprosesseissa käytetään kolmenarvoista kromia. Kromatoinnissa käsittelyajalla ja kylvyn koostumuksella voidaan säädellä muodostuvan kerroksen paksuutta ja sen ulkonäköä. Prosessissa alumiinin pintaan muodostuu kerros, joka koostuu reaktiotuotteena muodostuvista hydrautuneista kromaateista ja kromioksideista ja alumiinista. Verraten anodisointiin kromatointikäsittely on alumiinille yleensä edullisempi tehdä, mutta sen korroosionkestävyys on heikompi. Niissä sovelluksissa, joissa paljaan alumiinin korroosionkestävyyttä halutaan parantaa mahdollisimman pienellä sähkönjohtavuuden heikentymisellä kromatointi on käyttökelpoinen pintakäsittely. (Jokinen et al., 2012; Tunturi & Tunturi, 1999)

2.3.3 Fosfatointi

Fosfatoinnit ovat myös niin kutsuttuja reaktiopinnoitteita. Ne ovat olleet teollisessa käytössä pitkään. Niissä metallipinta ja liuos reagoivat muodostaen metallin pintaan ohuen hienokiteisen metallifosfaattikerroksen. Fosfatointia käytetään usein maalauksen esikäsittelynä, sillä se kasvattaa pinnan ominaispinta-alaa ja huokoisuutta, joka parantaa maalin tarttuvuutta pintaan. Lisäksi pinnalle muodostunut metallifosfaattikerroksen sähköinen vastus estää sähkökemiallista korroosiota. Tällä on havaittu olevan positiivinen vaikutus erityisesti maalikalvon alla etenevän korroosion estämiseen. Joissakin sovelluksissa metallifosfaattipinnan huokoisuutta hyödynnetään esimerkiksi moottorien ja laitteiden osissa imeyttämällä siihen öljyjä, vahoja tai ruosteenestoaineita. (Tunturi & Tunturi, 1999)

Fosfatointikäsittelyt koostuvat useasta vaiheesta huuhteluineen. Varsinaisen fosfatoinnin lisäksi prosessiin kuuluu tavallisesti rasvanpoistopesu, happopeittaus ja passivointi huuhteluineen. Yleisimmät fosfatointikäsittelyt ovat rauta-, sinkki ja mangaanifosfatointi. Alumiinille voidaan tehdä rauta- ja sinkkifosfatointi. Sinkkifosfatoinnissa fosfatointikylvyn pääkomponentit ovat fosforihappo, sinkkifosfaatti ja fluoridit. Fluoridit käynnistävät alumiinin liukenemisen, jolloin alumiinin pinnan ympäristössä vapaan hapon pitoisuus laskee ja liuoksen pH nousee. Tämän seurauksena sinkkifosfaatti alkaa saostua alumiinin pintaan hopeiittina. (Tunturi & Tunturi, 1999)

Metallin korroosiokestävyyden parantamisen kannalta sinkkifosfatointi jälkipassivoinnilla on kestävin fosfatointikäsittely. Rautafosfatointi on yksinkertaisin prosessi, joten sen käyttö on yleistä, kun käsiteltävä metalli ei altistu merkittävään korroosioympäristöön tai kun metalli maalataan käsittelyn jälkeen. Fosfatointikäsittelyjen käyttö on kuitenkin vähentymässä, koska niissä kylpyihin saostuu käsittelyä vaativaa sakkaa, kylvyt vaativat lämmityksen ja prosessin jätevedet käsittelyä. (Jokinen et al., 2012)

3 Konversiopinnoitteet maalauksen esikäsittelynä alumiinipinnoilla

Lisääntynyt tietoisuus kemiallisten prosessien ympäristövaikutuksista ja jatkuva prosessien kustannustehokkuuden parantaminen ovat vaikuttaneet myös maalauksen kemiallisten esikäsittelyprosessien kehitykseen. Tällä vuosituhannella erityisesti fosfatoiteja maalauksen esikäsittelynä on korvannut kasvavasti uudet teknologiat. Näiden etuina ovat parantuneet ympäristöystävällisyys ja käyttäjäturvallisuus, jotka saavutetaan vähemmän haitallisilla aineilla, pienemmillä kylpyjen lukumäärillä ja lämmitystarpeilla, sekä vähentyneellä jätteiden ja jätevesien käsittelytarpeilla. Näitä esikäsittelyjä kutsutaan yleisesti konversiokäsittelyiksi ja muodostuvaa pinnoitekerrosta konversiopinnoitteeksi niiden käsiteltävän pinnan ominaisuuksia muuttavan ohuen pinnoitekerroksen vuoksi. Perinteisemmässä pintakäsittelytekniikoiden jaottelussa nämä käsittelyt kuuluvat reaktiopinnoitteiden ryhmään, koska niissä käsiteltävään metallipintaan muodostetaan ohut pinnoitekerros liuoksen ja metallin välisen reaktion seurauksena. Tässä luvussa käsitellään tähän diplomityöhön olennaisesti liittyvän kolmen uudemman teknologian konversiopinnoitteen toimintaperiaatteita.

3.1 Zirkoniumkonversiopinnoitus

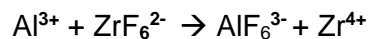
Nykyisin on kohtalaisen yleisessä käytössä zirkoniumiin perustuvat metallipintojen konversiopinnoitteet. Kauppanimeltään zirkonium-konversiokäsittelynä tunnetaan esimerkiksi Bonderite M-NT 1, jonka pääkomponentti on fluorizirkoniumhappo. (Henkel Norden Oy, 2017) Zirkonium-konversiopinnoitetta kuvataan toisinaan nanokeraamiseksi pinnoitteeksi. Tämä perustunee muodostuvan pinnoitteen nanometreissä mitattavaan paksuuteen, liuoksen lisäainekoostumukseen ja sen metallioksidirakenteeseen eli keraamiseen koostumukseen.

3.1.1 Zirkoniumkonversiopinnoitteen muodostumismekanismi

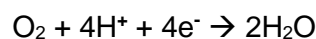
Menetelmässä aiemmissa esikäsittelyn prosessivaiheissa puhdistettu metalli käsitellään upotus tai ruiskutustekniikalla fluorizirkoniumhappoliuoksella. Tavallisesti tässä vaiheessa alumiinin pinnan peittää sen luonnollinen ohut oksidikalvo. Pinnan peittyessä happamalla liuoksella, liuoksen zirkoniumhexafluoridi liuottaa oksidikalvoa ja pinnoitteen muodostuminen käynnistyy. Tämä pinnan aktivointivaihe kestää noin 30 – 50 sekuntia, jonka jälkeen varsinaisen pinnoitteen muodostuminen alumiinin pinnalle alkaa. Alumiinin koostumuseroista ja rakenteesta johtuen pinnalle muodostuu anodisia ja katodisia alueita. Katodisilla alueilla tapahtuu hapen pelkistyminen ja vedyn kehittyminen. Tämä aiheuttaa paikallista alkaloitumista alumiinin ja liuoksen rajapinnalla, mikä johtaa liuoksen fluorometallin saostumiseen pinnalle zirkoniumoksidiksi. Kerroksen saostuminen jatkuu pinnalla sivusuuntaisesti ja sen nopeus ohittaa alumiinin liukenemisnopeuden. Noin 200 sekunnin kuluttua reaktio

saavuttaa tasapainotilan ja alumiinin pinta on täysin peittynyt zirkoniumoksidikerroksella. Tavallisesti muodostunut kerros sisältää myös alumiinioksidia ja erinäisiä käsittelykylvyn lisäaineita, esimerkiksi pieniä polymeerejä. Pinnoitteen muodostumisreaktio on itseään rajoittava. Kun reaktiota käynnissä pitävä potentiaaliero pienenee, reaktio hidastuu ja lopulta lakkaa. Varsinaisen pinnoituksen jälkeen käsiteltävältä pinnalta poistetaan puhtaalla vedellä huuhtelemalla reaktiossa muodostuneet heikosti pinnoitekerrokseen kiinnittyneet karkeat zirkoniumfluoridit. Muodostunut pinnoite on noin 20 – 200 nanometrin paksuinen, riippuen alustan ja liuoksen koostumuksista sekä käsittelyajasta. (Milosev & Frankel, 2018; Ramanathan & Balasubramanian, 2016) Yleisesti kerroksen muodostumisreaktiot alumiinipinnalla voidaan esittää seuraavasti:

Heksazirkoniumfluoridi liuottaa alumiinin luonnollisen oksidikerroksen:



Katodialueen pinnalla happi pelkistyy ja vetyä kehittyy:



Katodilla tapahtuu liuoksen ja alumiinin rajapinnalla paikallista alkaloitumista. Zirkoniumoksidi saostuu alumiinin pintaan fluorometallin hydrolyysinä ja zirkoniumkonversiokerros muodostuu:



ja



Riippuen pinnoituskylvyn koostumuksesta saostunut oksidikerros sisältää usein myös fluori- ja fosfaatteja ja muita orgaanisia ja epäorgaanisia komponentteja. Jotkin komponentit voivat tulla kerrokseen epäpuhtauksina ja jotkin ovat siihen tarkoituksella lisättyjä lisäaineita, joiden tarkoitus on parantaa muodostuvan pinnoitteen tartuntaa alustaan, kerroksen homogeenisuutta, korroosion kestävyyttä ja myöhemmän orgaanisen pinnoitteen tartuntaa kerrokseen tai nopeuttaa pinnoitusreaktiota. Esimerkiksi kuparilla voidaan tehostaa katodisten alueiden muodostumista ja näin nopeuttaa alkaloitumista rajapinnoilla, joka saa aikaan pinnoitteen saostumisen nopeutumisen. (Milosev & Frankel, 2018)

Alumiinin seosaineet vaikuttavat zirkoniumpinnoitteen muodostumiseen. Oleellisin vaikutus seosaineilla on katodialueiden muodostumiseen. Yleensä alumiinin seosainepartikkelit kuten rauta muodostuu katodiseksi alueeksi. Myös metallin inter-metalliset partikkelit toimivat katodeina. Alumiinilla seosaineiden käytännön vaikutus usein on, että paikallisesti niiden kohdalla pinnoitekerros muodostuu paksummaksi. (Milosev & Frankel, 2018)

3.1.2 Vaikutus korroosionkestävyyteen

Metallioksidit ovat yleensä epästoikiometrisia yhdisteitä. Verrattuna kemialliseen kaa-vaansa, ne sisältävät usein yli- tai alimäärän metalli- tai oksidi-ioneja. Tämä aiheuttaa oksidirakenteeseen kidevirheitä, joka vaikuttaa kerroksen aineensiirto- ja sähkönjohtavuusominaisuuksiin. Ioni ylimäärän kohdalla kidevirhe aiheutuu varsinaisen matriisin välitiloissa olevasta ylimääräisestä ionista. Varausten tasapainon säilymiseksi kiteessä on välitilassa olevaa ionia kohden vapaita elektroneja. Nämä vapaat elektronit johtavat sähköä ja aineensiirto tapahtuu välitilan ionin avulla. Tällainen metallioksidi toimii puolijohteena. Ioni ylimäärään perustuvaa puolijohdetta kutsutaan n-tyyppin puolijohteeksi. Ioni alimääräisessä metallioksidissa kidevirheenä on puuttuva kationi. Tätä puuttuvaa kationia kohden kidehilassa on korkeamman hapetusluvun ioneja. Korkeamman hapetusluvun ioneja kutsutaan elektroniaukoiksi, niistä puuttuvien elektronien takia. Tällainen metallioksidi on p-tyyppin puolijohde ja siinä sähkövaraus siirtyy elektroniaukkojen ja aineensiirto tapahtuu kationiaukkojen kautta. Käytännössä edellä esitetty tarkoittaa, että metallin vaurioituminen riippuu kidevirheiden määrästä. Jotta sähkökemiallinen korroosioreaktio voi tapahtua tulee anodin ja katodin välillä tapahtua aineen ja sähkövarauksen siirtymistä. Puolijohdemetallioksidikerroksessa nämä voivat tapahtua vain kidevirheiden kautta. Tällöin, jos metallioksidi on huono ioninjohdin tai sähkönjohdin, estyy aineensiirto ja metallioksidikerros suojaa metallia korroosiolta. (Tunturi, 1988)

Zirkoniumkonversiopinnoituksessa pintaan muodostuu tiivis kerros huonosti sähköä johtavista ioni alijäämäisistä zirkoniumoksidoista. (Tunturi, 1988) Pinnoitetun metallin korroosionkestävyyden parantuminen perustuu tällöin kerroksen kykyyn eristää metalli korroosioympäristöstä. Toisin sanoen se estää anodi-katodiparin muodostumisen, sillä elektrolyytti ei läpäise kerrosta, jolloin korroosioparin muodostuminen estyy.

Sähkökemiallisessa korroosioreaktiossa anodilla ja katodilla tapahtuu polarisaatiota ja näiden elektrodipotentiaalit lähentyvät toisiaan, kunnes reaktio on tasapainossa ja katodi kuluttaa anodin vapauttamat elektronit. Tasapainotilassa systeemin sähkökemiallisen kennon korroosipotentiaali on E_{kor} ja siinä kulkee sähkövirta, joka ilmoitetaan anodin pinta-alayksikköä kohden laskettuna korroosiovirrantiheytenä I_{kor} . Korroosipotentiaalin yksikkönä

käytetään yleensä voltia (V) ja korroosiovirrantiheyden yksikkönä mikroampeeria neliösenttimetriä kohden ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$). Mitä negatiivisempi korroosiopotentiaalin arvo on, sitä todennäköisemmin anodina oleva pinta vaurioituu. Korroosiovirrantiheys kertoo korroosioreaktion nopeuden. Mitä suurempi arvo on, sitä nopeammin tapahtuu aineensiirto eli korroosioreaktio etenee aiheuttaen voimakkaammin metallin vaurioitumisen. (Tunturi, 1988; Eivaz Mohammadloo et al., 2013; Eivaz Mohammadloo et al., 2012) Taulukossa V esitetään eräissä tutkimuksissa zirkoniumkonversiopinnoitetuista ja pinnoittamattomasta teräspinnasta tehdyt korroosiovirrantiheyden ja korroosiopotentiaalin mittaukset.

Taulukko V Zirkoniumkonversiopinnoitteen vaikutus teräspinnan korroosiovirrantiheyteen ja korroosiopotentiaaliin. (Eivaz Mohammadloo et al., 2013; Eivaz Mohammadloo et al., 2012)

	Korroosiovirrantiheys I_{korr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Korroosiopotentiaali E_{korr} (V)
Pinnoittamaton teräs	14,53	-0,538
Zr-konversio, liuoksen pH-arvo 3,5, teräsalusta	6,556	-0,385
Zr-konversio, liuoksen pH-arvo 4,5, teräsalusta	6,158	-0,369
Zr-konversio, liuoksen pH-arvo 5,5, teräsalusta	6,884	-0,398

Taulukon V mittaustuloksista havaitaan pinnalle muodostuvan tiiviin zirkoniumoksidikerroksen laskevan korroosiopotentiaalia ja korroosiovirrantiheyttä. Tällöin konversiopinnoitetun teräksen herkkyys muodostua anodiksi erilaisissa ympäristöissä pienenee. Lisäksi kun konversiopinnoitettu teräs muodostuu korroosiokennon anodiksi, kennossa kulkevan korroosiovirrantiheys pienenee ja teräksen korroosionopeus laskee. (Milosev & Frankel, 2018) Samalla tavalla mekanismin voisi ajatella toimivan myös alumiinilla, mutta alumiinin hyvän korroosiokestävyyden takia konversiopinnoituksen vaikutusta korroosiokestävyyteen on vaikeampi havaita.

Muodostuneen konversiokerroksen morfologia vaikuttaa sen korroosiokestävyyteen. Joissakin tutkimuksissa on havaittu käsittelykylvyn korkeamman lämpötilan tai pidemmän käsittelyajan aiheuttavan pinnoitteeseen halkeamia. Nämä halkeamat luovat yhteyden pinnoitetun alustan ja korroosioympäristön välille, jolloin alustan syöpyminen mahdollistuu. (Eivaz Mohammadloo et al., 2013; Eivaz Mohammadloo et al., 2012; Milosev & Frankel, 2018) Muodostuvan konversiokerroksen morfologiaan vaikuttaa käsittelyliuoksen ja pinnoitettavan alustan koostumus. (Milosev & Frankel, 2018)

Zirkoniumkonversiopinnoitteiden korroosiokestävyyteen sellaisenaan vaikuttaa merkittävästi pinnoitekylvyn lisäaineet. Esimerkiksi eri kaupalliset pinnoitteet ovat kestäneet kiihdytetyissä korroosiotesteissä hyvinkin vaihtelevasti. (Milosev & Frankel, 2018) Lisäaineet vaikuttavat olennaisesti muodostuvan kerroksen morfologiaan. Erilaisilla orgaanisilla tai epäorgaanisilla aineilla tai näiden yhdistelmillä voidaan parantaa muodostuvan pinnoitteen homogeenisyyttä, mikä parantaa korroosionkestävyyttä. Tai niillä voidaan parantaa konversiokerroksen kykyä toimia itsekorjautuvana eli kykyä paikata kerroksen vauriokohdat uudella suojaavalla kerroksella. (Milosev & Frankel, 2018) Sellaisenaan zirkoniumkonversiokerros ei toimi kovin pitkäkestoisesti korroosiosuojana. Kuitenkin homogeeninen, tiivis ja maalille hyvän tartunta-alustan antava kerros parantaa valmiin maalatun metallin korroosiokestävyyttä. Tilanteessa, jossa käsittelemättömän ja zirkoniumkonversiopinnoitetun metallin päällä maalikalvot ovat yhdenmukaiset ja elektrolyytti on läpäissyt maalikalvon, alkaa metallin vaurioituminen todennäköisesti nopeammin käsittelemättömällä metallilla, koska madaltunut korroosiovirrantiheys ja kasvanut korroosipotentiaali hidastavat korroosiota konversiokäsitellyllä metallilla.

3.1.3 Vaikutus maalin tarttuvuuteen

Metallien maalauksessa korroosionkestävyyden parantamisen ohella konversiopinnoitteiden toinen tärkeä tehtävä on parantaa maalin tarttuvuutta ja kiinnipysyvyyttä metallissa. Zirkoniumkonversiopinnoitteilla voidaan parantaa maalin tartuntaa alustaan. Erityisesti tarttuvuuden parantamiseen vaikuttaa käsittelyliuokseen lisätyt polymeeriset lisäaineet. (Milosev & Frankel, 2018) Käsittelyaika ja käsiteltävän pinnan koostumus vaikuttaa muodostuvan pinnoitteen karheuteen. Karheuttamalla pintaa voidaan parantaa maalin ja alustan keskinäisiä vuorovaikutuksia. Tämä perustuu niiden välisen rajapinnan kasvaneeseen pinta-alaan. (Milosev & Frankel, 2018)

Esimerkiksi polyakryylihapo, polyvinyylialkoholi ja tanniinihapo toimivat zirkoniumpinnoiteliuoksessa maalin tarttuvuutta parantavina lisäaineina. Näistä muodostuneeseen zirkoniumoksidikerrokseen jää hiiltä, joka mahdollistaa maalin adsorboitumisen pintaan osin kemisorptiona. Lisäksi zirkoniumoksidikerroksen morfologia ja kohonnut maalattavan pinnan pintaenergia parantavat maalin kykyä levittyä pinnalle ja adsorboitua siihen fyysisorptiona. (Ramanathan & Balasubramanian, 2016; Milosev & Frankel, 2018)

3.2 Zirkonium-kromikonversiopinnoitus

Zirkonium-konversiopinnoituksessa käsittelyliuos sisältää lisäaineita, joilla vaikutetaan pinnoitteen muodostumismekanismiin ja parannetaan muodostuvan pinnoitekerroksen ominaisuuksia. Eräs menetelmä, jolla voi vaikuttaa muodostettavan konversiokerroksen toimivuuteen on lisätä liuokseen kolmenarvoista kromia. Esimerkiksi kauppanimellä SurTec® 609

GV on markkinoilla konversiopinnoite, johon on lisätty kolmenarvoista kromia. Tällaisella ratkaisulla voidaan tuottaa teknisesti toimiva konversiopinnoite, jossa ei ole lainkaan esimerkiksi polymeerisiä lisäaineita. (Pohl & Möller, 2009)

3.2.1 Zirkonium-kromikonversiopinnoitteen muodostuminen ja ominaisuudet

Zirkonium-kromikonversiopinnoiteliuoksen koostumuksessa funktionaaliset aineet ovat fluorizirkoniumhappo ja kromi(III)nitraatti. Lisäksi liuos sisältää joitakin lisäaineita. (SurTec Deutschland GmbH, 2018) Kuten alumiinin fosfatoinnissa, sekä muissa zirkonium -konversiopinnoituksissa kylvyn fluoridit käynnistävät pinnoitekerroksen muodostumisen liuottamalla alumiinin luonnollista oksidikerrosta, joka aiheuttaa alkaloitumista metallin ja liuoksen rajapinnalla. Alkaloituminen käynnistää kromin ja zirkoniumin saostumisen alumiinin pintaan. Ensimmäisten kymmenten sekuntien jälkeen konversiokerros on peittänyt alumiinin pinnan täysin ja konversiokerros jatkaa kasvua vertikaalisesti. Muodostunut konversiokerros koostuu zirkonium-, kromi- ja alumiinioksidoista. Kerroksessa kromi- ja zirkoniumoksidoja on tavallisesti painon mukaisesti suhteessa yhden suhde neljään ($\text{Cr}_2\text{O}_3 \times 4\text{ZrO}_2$). Lisäksi kerroksessa voi olla alustasta tai liuoksesta peräisin olevia aineita tai liuokseen tarkoituksella lisättyjä lisäaineita. Tavallisesti konversiokerroksen paksuus on noin 20 – 400 nanometriä. (Honselmann et al., 2018; Volk, 2014; Volk, 2019; Qi et al., 2015)

Zirkonium-kromioksidikerros on hyvin tiivis. Tällöin se parantaa käsitellyn metallin korroosion kestävyyttä toimien eristeenä ja estäen korroosiokennon muodostumisen metallin ja ympäristön välille samalla periaatteella, kuin kohdassa 3.1.3 on esitetty. (Honselmann et al., 2018) Kromioksidin tarkoitus on parantaa pinnoitteen korroosionkestävyyttä parantamalla pinnoitteen itsekorjaantumista. Joissakin tutkimuksissa on havaittu kolmenarvoista kromia sisältävien zirkoniumkonversiopinnoitteilla olevan itsekorjaantumisominaisuuksia eli pinnoitteen vaurioituessa se paikkaa itse itsensä ja suojatun metallin korroosion eteneminen estyy. (Milosev & Frankel, 2018)

Zirkonium-kromikonversiokerros parantaa maalin tartuntaa alustaan. Tarttuvuuden parantuminen perustuu samoihin asioihin kuin kromittomassa zirkoniumkonversiopinnoitteessa: tartunta pinta-alan kasvattamiseen pinnan karheutumisella ja mahdollisten lisäaineiden vaikutuksiin.

3.3 Silaanikonversiopinnoitus

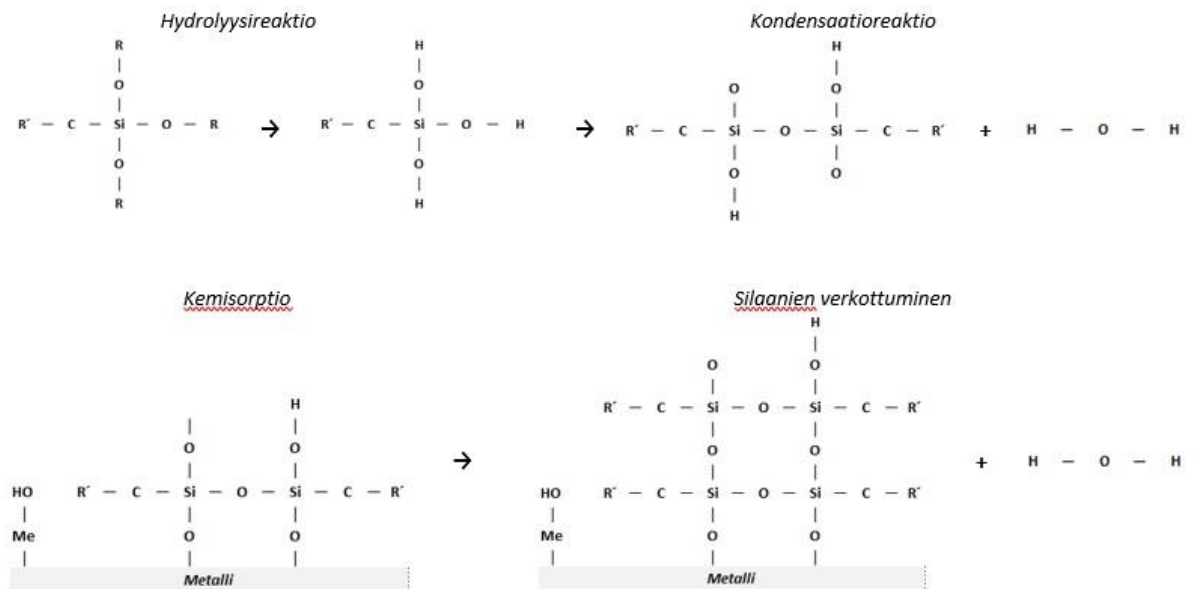
Zirkoniumoksidista muodostuvan konversiopinnoitteen ohella toinen merkittävä teknologia on silaaneihin perustuvat konversiokäsittelyt. Kappanimeltään tällainen pinnoite on esimerkiksi Oxsilan MM 0706. Pinnoituksessa metallin pintaan muodostetaan liuoskäsittelyllä ta-

vallisesti noin 20 – 150 nanometrin paksuinen hyvin tiivis silaaneista muodostunut polymeeriverkko (Salonen, 2011; Jokinen et al., 2012) Hydridit ovat jonkin alkuaineen ja vedyn yhdisteistä. Pii muodostaa vedyn kanssa hydridejä ja pinnoitteen muodostavat silaanit ovat yksi piihydridien tyyppi.

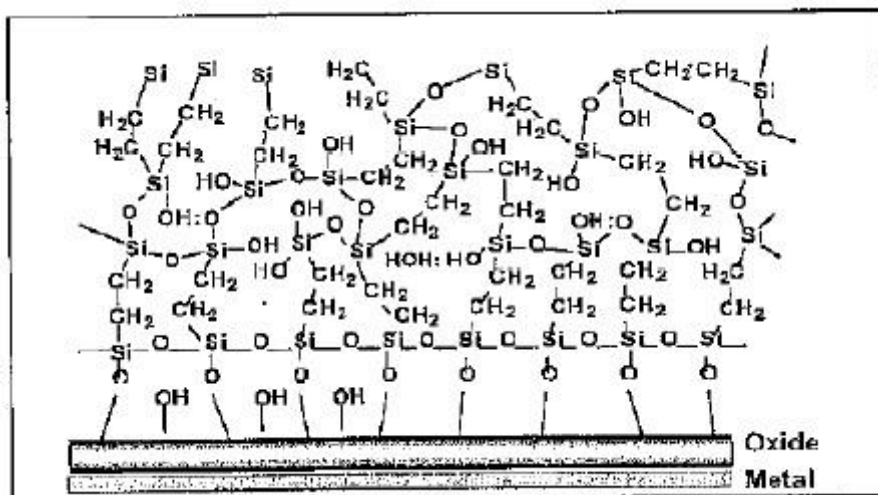
3.3.1 Silaanikonversiopinnoitteen muodostumismekanismi

Silaanikonversiopinnoitteen muodostumisessa varsinaisen pinnoitusliuoksella käsittelyn ohella olennaiset vaiheet ovat pinnoitusta edeltävä pinnan puhdistus ja pinnoituksen jälkeinen pinnoitteen kuivaus. Pinnan puhdistusvaiheessa metallin pinnalle muodostuu metallihydroksideja. Silaanikonversiopinnoitusliuoksessa pii-happi-sidoksia sisältävät siloksaanit ovat hydroksyloitu orgaaniseen liuottimeen, esimerkiksi etanoliin (Chemetall AB, 2019). Pinnoitteen muodostuminen tapahtuu metallin hydroksidien ja kylpyliuoksen siloksaanien hydroksidien välisenä reaktiona, joka johtaa sidoksien muodostumiseen metallin, hapen, piin ja funktionaalisen ryhmän välillä. Funktionaalinen ryhmä voi olla esimerkiksi amiiniryhmä, joka parantaa maalin tarttuvuutta pinnoitekerrokseen. (Karlsson, 2011; Chico et al., 2007)

Käsittelyliuoksen silaanikonsentraatio määrittää muodostuvan konversiokerroksen paksuuden. Tavallisesti se on noin 20 – 150 nanometriä. Kuvassa 4 on kuvattu pinnoitteen muodostuminen. Pinnoitusliuoksessa muodostuu siloksaaneja additio- ja eliminaatiomekanismeilla toimivien hydrolyysi- ja kondensaatioreaktioita kautta. Edelleen muodostunut siloksaanipolymeeri sitoutuu metallin pintaan kovalenttisilla sidoksilla ja liuoskäsittelyn jälkeisen kuivauksen aikana pinnoitekerros verkottuu tiiviiksi polymeeriverkoksi siloksaanimolekyylien hydroksidiryhmien välisillä sidoksilla. Pinnoitteen kuivauslämpötila ei ole kovin kriittinen (Chemetall GmbH, 2011), mutta kuivausajan pituuteen on kiinnitettävä huomiota. Liian pitkä kuivausaika aiheuttaa pinnoitekerroksen tiheän verkottumisen, joka voi heikentää maalin tartuntaa pinnoitteeseen. Kuvassa 5 on esitetty silaanikonversiokerroksen rakenne. (Karlsson, 2011; Chico et al., 2007)



Kuva 4 Silaanikonversiokerroksen muodostumismekanismi. (Salonen, 2011)



Kuva 5 Silaanipinnoitekerroksen rakenne. (Karlsson, 2011)

3.3.2 Pinnoitteen ominaisuudet

Silaanikonversiokerros parantaa pinnoitetun metallin korroosionkestävyyttä. Silaanit ovat hyvin verkottuvia polymeerejä ja pinnoituskylvyn jälkeinen kuivausvaihe vaikuttaa pinnoitteen verkottumisasteeseen. Mikäli silaanikonversiokerrosta käytetään korroosiosuojaukseen ilman myöhempää pinnoitusta, on korkea verkottumisaste hyödyllinen. Korkean verkottumisasteen silaanipolymeerikerros on tiivis, jolloin se toimii korroosioreaktioita estävänä eristekerroksena metallin ja korroosioympäristön välillä. Käytettäessä silaanikonversiokerrosta yhtenä kerroksena useamman kerroksen korroosiosuojajyhdistelmästä, esimerkiksi

maalauksen esikäsitteilynä, käsittely vaikuttaa korroosiosuojauksen toimintaan kahdella tavalla. Verkottunut silaanikerros toimii yhtenä metallia korroosioympäristöstä eristävänä kerroksen ja samalla sopivalla verkottumisasteella mahdollistaa seuraavan pinnoitekerroksen mahdollisimman hyvän ja pitkäkestoisen kiinnipysyvyyden. (Chico et al., 2007; Chico et al., 2009) Tutkimuksissa on havaittu silaanikonversiopinnoitteiden toimivan korroosionsuojauks-tarkoituksessa maalauksen esikäsitteilynä eri metalleilla yhtä hyvin tai paremmin, kuin miten toimii perinteinen rautafosfointikäsitteily. (Salonen, 2011)

Silaanikonversiopinnoitusta käytetään usein parantamaan maalin tartuntaa. Tätä varten pinnoitusliuoksen silaanipolymeereissä on tarkoitukseen sopiva funktionaalinen pääte-ryhmä. Tämä ryhmä on yleensä esimerkiksi -SH, -OH, tai -NH₂. Maalin mahdollisimman hyvän tartunnan kannalta tämän ryhmän tulisi olla yhteensopiva käytettävän maalityypin kanssa. Esimerkiksi keinovalmisteillä on havaittu yhteensopivuuseroja erilaisten silaanipinnoitteiden ja maalityyppien välillä. (Chico et al., 2009) Kuten edellä on esitetty silaanikonversiopinnoitteen kuivaus vaikuttaa sen verkottumisasteeseen. Sopivassa verkottumisasteessa polymeerien pääte-ryhmät, esimerkiksi silanolit (SiOH), ovat vapaana ja sopivissa olosuhteissa, esimerkiksi korotetussa lämpötilassa, ne voivat sitoutua maalin kanssa. Lisäksi tulee maalin polymeerin olla yhteensopiva silaanikerroksen kanssa, jotta näiden välinen reaktio on mahdollinen. Eräässä tutkimuksessa 15 minuutin kuivaus 75 °C lämpötilassa on todettu kuivausajaksi, jolla verkottumisaste parantaa melko optimaalisesti korroosion-kestävyyttä ja maalin tartuntaa. (Chico et al., 2007)

Maalin tarttuvuuden kannalta olennainen mekanismi myös silaanikonversiopinnoituksessa, on käsiteltävän pinnan pintaenergian kasvattaminen lähemmäksi maalien polymeerikomponenttien pintaenergiaa eli pinnan ja pinnoitteen kompatibiliteetti paranee. Tämä perustuu käsitellyn pinnan muuttumiseen hydrofiilisemmaksi, jolloin pinnalle levitetty maali kykenee kastelemaan pintaa paremmin kuin, jos pinta olisi hydrofobisempi, jolloin levitetty maali kastelun sijaan vetäytyisi pinnalle pisaroiksi. Silaanikonversiopinnoituksen onnistumisessa tärkeä tekijä on, miten silaanimolekyylit järjestäytyvät metallin pinnalle. Molekyylin silanolin tulisi kiinnittyä metallin pintaan ja funktionaalisen pääte-ryhmän osoittaa pinnasta pois-päin. Tavallisesti tämä onkin normaali järjestyminen, mutta riskinä on myös esimerkiksi aminoryhmän protonoituminen, jolloin pinnoitteeseen muodostuu epävakaita vetysidoksia, joka aiheuttaa konversiokerroksen tartunnan heikentymisen. (Chico et al., 2009)

4 Tutkittavat maalausmenetelmät

Alumiinin teollisessa maalaamisessa käytetään usein märkä- tai jauhemaalauksia. Menetelmien nimet juontuvat maalin olomuodosta sen levityksen aikana. Märkämaalauksessa levitettävä maali on perinteisessä nestemäisessä muodossa. Jauhemaalauksessa levitettävä maali on hienojakoista jauhetta. Tässä diplomityössä tutkitaan valittujen kemiallisten esikäsittelyjen vaikutusta märkä- ja jauhemaalauksella tuotettujen maalipinnoitteiden toimivuuteen alumiinipinnalla. Seuraavassa käsitellään näiden maalausmenetelmien perusteita.

4.1 Märkämaalauksen perusteet

Märkämaalauksessa nestemäinen maali levitetään pinnalle sivelemällä, upotuksella tai ruiskuttamalla. Ruiskutuksessa nestemäinen maali hajotetaan ruiskutuslaitteistossa hienoksi maalisumuksi paineilman tai paine-eron avulla ja edelleen maalisumu kohdistetaan maalattavaan pintaan. Teollisessa käytössä ruiskutuslaitteistoja on käytössä useita erilaisia, kuten esimerkiksi korkeapaine- ja hajotusilmaruiskuja tai sähköstatiikkaa hyödyntäviä laitteistoja. Kullakin ruiskutuslaitteistotyyppillä on ominaisuuksia, jotka puoltavat laitteen käyttöä joissakin tietyssä maalaustyössä. Tällaisia voivat olla esimerkiksi korkeapaineruiskun suuri ruiskutustyön edistymisnopeus tai hajotusilmaruiskun korkea pinnan visuaalinen laatu. Käytettävän ruiskutuslaitteiston tyyppin määrittää tavallisesti maalattavan pinnan tyyppi ja konstruktio, valmiille maalikalvolle asetetut vaatimukset, esimerkiksi visuaalinen laatu tai kuivakalvonpaksuus, sekä käytettävän maalin laitteistolle asettamat rajoitteet. (Jokinen et al., 2012)

Märkämaalit ovat polymeeriseoksia, jotka levitetään pinnalle nestemäisessä muodossa. Maalien koostumus voidaan eritellä neljään ryhmään. Nämä ovat sideaine, liuotin, pigmentit, sekä lisä- ja täyteaineet. (Teknos Oy, 2013)

Maaleja nimitetään usein sideaineiden mukaisesti. Sideaine on tärkein maalikalvon ominaisuuksia määrittävä tekijä. Sen ominaisuudet määräävät maalin tartunnan voimakkuuden, kalvon sisäisen lujuuden ja sen kemiallisen sekä mekaanisen rasituksen kestävyys. Lisäksi sideaine vaikuttaa maalin visuaalisiin ominaisuuksiin. Sideaine on tavallisesti joko suurikokoinen molekyyli tai reaktiivinen molekyylikooltaan pieni hartsi. Sideaineen kuivuessa kemiallisesti tai fysikaalisesti, muodostuu polymeerejä ja niistä edelleen kuivunut maalikalvon. Fysikaalisesti kuivuissa maaleissa sideaineena on valmiit polymeerimolekyylit, jotka liittyvät yhteen liuottimen haihtuessa pois maalikalvosta. Kemiallisesti kuivuissa maaleissa tapahtuu kemiallinen polymerointireaktio maalin kuivuessa, esimerkiksi sideainehartsi hapettuu ja verkottuu ilman hapen vaikutuksesta tai kaksikomponenttisissa maaleissa

esimerkiksi reaktiivinen epoksihartsi verkottuu polymeereiksi, kun muovikomponenttiin sekoitetaan amiinikovete. (Teknos Oy, 2013; Tunturi, 1988)

Liuotin on märkämaalissa komponentti, johon sideaine on liuotettu, jotta maali on saatu nestemäiseksi ja sideaineen viskositeetti matalammaksi. Maalikalvon kuivuminen alkaa liuotinkomponentin pois haihtumisella. Liuotin voi olla esimerkiksi vesi tai jokin orgaaninen liuotin kuten aromaattinen hiilivety ksyleeni. Joissakin maaleissa liuotin osallistuu myös maalikalvon muodostumiseen esimerkiksi toimien vesiohenteisissa dispersiomaaleissa dispersion ulkoisena vaiheena. Erityisesti ruiskumaalauksessa maalin viskositeettia säädetään lisäämällä maaliin ohennetta. Maalista riippuen lisättävä ohenne voi olla sama kuin maalin liuotin, mutta se voi olla myös jokin muu levitetystä maalikalvosta tarkoituksenmukaisesti pois haihtuva aine. Esimerkiksi monia vesiohenteisia maaleja ohennetaan vedellä, mutta niiden sideaine ei kuitenkaan ole vesiliukoinen. Maalin liuotin vaikuttaa keskeisesti maalin työturvallisuus- ja ympäristönäkökohtiin. Liuottimen leimahduspisteen mukaisesti maalille määräytyy palavien nesteiden luokka. Liuottimen koostumus vaikuttaa maalikalvosta haihtuvien yhdisteiden koostumukseen ja siten maalin työturvallisuus- ja ympäristövaikutuksiin. Haihtuvat yhdisteet voivat sisältää esimerkiksi erilaisina VOC-yhdisteistä. (Teknos Oy, 2013; Tunturi, 1988)

Maalien pigmentit voidaan jakaa väripigmentteihin ja korroosionestopigmentteihin. Väripigmenttien tarkoitus maalissa on antaa maalille haluttu väri ja kiilto, sekä usein myös ne parantavat maalin UV-valon kestävyyttä. Korroosionestopigmenteilla voidaan parantaa maalauksen korroosionkestävyyttä inhiboimalla korroosioreaktioita tai tiivistämällä maalikalvoa. Pigmentit ovat hienojakoisia kiinteitä jauheita, jotka maalin sideaine sitoo yhteen. (Teknos Oy, 2013; Tunturi, 1988)

Moninaisilla apu-, lisä- ja täyteaineiksi kutsutuilla maalin ainesosilla vaikutetaan esimerkiksi maalin säilyvyyteen, sekä valmiin kuivan maalikalvon kestävyys-, tiiveys- tai kiilto-ominaisuuksiin. Lisäksi niillä voidaan muokata maalin reologisia ominaisuuksia, kuten sen vaahdotamisherkkyyttä, levitysominaisuuksia ja levitetyn kalvon kuivumistapahtuman luonnetta. Mahdollisuuksien mukaan tällaisilla aineilla voidaan vähentää myös maalin valmistamisen kustannuksia korvaamalla kalliimpia aineita edullisemmilla. (Teknos Oy, 2013; Tunturi, 1988)

Teollisia märkämaaleja on markkinoilla monia erilaisia ja ne voidaan jaotella monin erilaisin perustein. Esimerkiksi maalin sideaineiden, kuivumismekanismien tai käyttötarkoituksen perusteella. Näistä viimeisen mukaisesti märkämaalit voidaan jakaa karkeasti maaleihin, joiden ensisijainen tarkoitus on antaa pinnalle mahdollisimman pitkäkestoinen suoja tiettyä

korroosioympäristöä vastaan ja maaleihin, joiden ensisijainen tarkoitus on antaa pinnalle miellyttävä visuaalinen ulkonäkö. Ensin mainittujen maalien kohdalla puhutaan korroosionestomaalauksesta ja jälkimmäisten kohdalla tuotemaalauksesta. Korroosionestomaaleja useimmiten käytetään monikerrosyhdistelminä, joissa pinnalle tehdään esimerkiksi tarkoitukseen soveltuva mekaaninen tai kemiallinen esikäsitely, pohjamaalaus, yksi tai useampi välimaalaukset ja pintamaalaus. Näissä jokaisessa maalauksessa käytetään tarkoitukseen suunniteltua märkämaalaa. Esikäsitely mahdollistaa pohjamaalin mahdollisimman hyvän tartunnan pintaan. Pohja- ja välimaalit parantavat korroosion kestävyttä tiiviydellään tai erillisellä tarkoitukseen sopivalla pigmentoinnilla ja pintamaali antaa järjestelmälle toivotun visuaalisen ulkonäön ja kestävyuden esimerkiksi kemikaaleja ja auringon UV-säteilyä vastaan. Lisäksi jokainen maalikerros kasvattaa maalattavaa pintaa korroosioympäristöstä eristävän pinnoitekerroksen paksuutta. Tuotemaalauksessakin maalausprosessi koostuu pinnan esikäsitelystä ja yhdestä tai useammasta maalikerroksesta, joista jokaisella on oma tarkoituksensa. Toki myös siinä valmiin maalauksen tulee myös kestää lopullisessa käyttöympäristössään suunniteltu ajanjakso, mutta tuotemaalauksessa verraten perinteiseen korroosionestomaalaukseen on yleensä korkeammat vaatimukset maalipinnan visuaaliselle laadulle.

Märkämaalauksen etuna on, ettei se vaadi merkittäviä erikoislaitteita, korjaus- ja huolto- maalauksen ja monikerrosmaalausten helppous, sekä suhteellisen hyvä menetelmien ja materiaalien standardointi. Haasteena märkämaalauksessa on usean valmiin maalikalvon laatuun vaikuttavan tekijän huomioon ottaminen. Märkämaalit kuivuvat hitaasti kosketuskuivaksi ja vielä hitaammin saavuttavat lopullisen kovuuden. Siksi märkämaalauksessa ympäristöolosuhteiden, kuten lämpötilan ja ilman suhteellisen kosteuden, sekä ilmavirtojen vaatimustenmukaisuus maalin levitystyön, sekä sen kuivauksen aikana on erityisen tärkeää. Lisäksi maalattavan pinnan lämpötilan tulee olla oikealla alueella suhteessa sanottuihin ympäristöolosuhteisiin. Oleellisia tekijöitä ovat myös maalin ohennuksen ja sekoituksen oikeellisuus, sekä levitetyn märkämaalikerroksen paksuus, jotta maalikalvo kuivuu ja kovettuu tarkoituksenmukaisesti. Työturvallisuus ja ympäristönäkökulmasta märkämaalien huono ominaisuus on monesti niiden liuotinsisältö.

Alumiinin märkämaalauksessa esikäsitelyn onnistuminen on tärkeää, jotta maalin hyvä tartunta mahdollistuu. Tavallisesti alumiinipinnoille suositeltavia esikäsitelyjä ovat pinnan huolellinen puhdistaminen ja pyyhkäisy raesuihkupuhdistus, hionta tai soveltuva kemiallinen esikäsitely, kuten fosfatoiointi, kromatoiointi tai uudemmat konversiopinnoitukset.

4.2 Jauhemaalauksen perusteet

Märkämaaliseos sisältää tavallisesti kymmeniä prosentteja liuotinta. Jauhemaalit eivät sisällä liuottimia. Rakenteeltaan ne ovat kuivaa hienojakoista jauheseosta. Tiivistetysti jauhe- maalin valmistusprosessissa maalin sideaine, kovete, pigmentit, sekä apu-, lisä- ja täyteai- neet sekoitetaan homegeeniseksi seokseksi, seos kuumennetaan, jäähdytetään ja jauhe- taan tasalaatuiseksi partikkelikooltaan noin 40 – 50 mikrometrin jauheeksi. Jauhemaalauk- sessa tämä jauheseos levitetään maalattavalle pinnalle tarkoitukseen valmistetuilla sähkö- s- tatiikkaa hyödyntävillä jauhemaalauslaitteistoilla. Jauhemaalauslaitteistolla levitettävä jauhe varataan sähköisesti ja ruiskutetaan pintaa kohden. Sähköisesti varautunut hienoja- koinen jauhepöly hakeutuu maadoitetun kappaleen pintaan ja peittää sen. Tämän jälkeen maalattu pinta siirretään polttouuniin ja, kun levitetyn jauheen välittömässä ympäristössä lämpötila on noussut riittävän korkeaksi jauhepartikkelit sulavat ja kemiallinen verkottumis- reaktio kuivaksi maalikalvoksi alkaa. Lopulta jauhekerros on täysin polymeroitunut ja pin- nalle on muodostunut kuiva maalikalvo. Tyypillisesti jauhemaaleilla polymeroitumisreaktio tapahtuu noin 5 – 20 minuutissa, lämpötilan ollessa 140 – 200 celsiusastetta. (Teknos Oy, 2013; Jokinen et al., 2012)

Kuivumismekanismiin mukaisesti määritettynä jauhemaalit ovat kemiallisesti kovettuvia. Yleisimmät jauhemaalien sideaineet ovat polyesteri, epoksi ja polyuretaani. Samoin kuin märkämaaleissa, jauhemaalien sideaine määrittää maalikalvon ominaisuudet, sekä hyvin oleellinen vaikutus valmiin maalauksen toimivuuteen erilaisissa käyttöympäristöissä on maalausta ennen suoritettavan esikäsittelyn laadulla ja tarkoitukseen sopivuudella. Märkä- maalaukseen verraten jauhemaalauksella on joitakin etuja. Esimerkiksi se on usein hel- pompi automatisoida, maalikalvo on täysin kuivunut ja kovettunut heti pinnan jäähtyttyä, maalit eivät sisällä haitallisia liuottimia ja jauhemaalit ovat usein mekaanisesti kestäviä. Toi- saalta jauhemaalien heikkouksia märkämaaleihin verraten ovat maalaustyön edellyttämät erikoislaitteet, polttouunin energiankulutus, maalauksen standardoinnin niukkuus, korjaus- maalauksen ja monikerrosmaalausten suorittamisen haasteellisuus. (Jokinen et al., 2012)

Samoin kuin erilaisia märkämaaleja, on markkinoilla myös jauhemaaleja useisiin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Esimerkiksi jauhemaalien visuaalisia ominaisuuksia, korroosion- tai ke- mikaalien kestävyyttä voidaan optimoida tai formuloida matalammassa lämpötilassa ver- kottuva energiatehokkaampi jauhemaal tai parantaa jauhemaalien kykyä päästää alustasta haihtuvat kaasut paremmin läpi verkottumisen aikana.

4.3 Alumiinin maalaus

Alumiinin pintaan normaaleissa olosuhteissa muodostuva oksidikerros ei ole tiiviytensä vuoksi sellaisenaan hyvä maalausalausta. Tästä syystä alumiinin maalaamisessa korostuu

kaksi asiaa: alumiinipinnan esikäsittelyn on oltava maalin tartuntaa parantava, sekä esikäsittelyn ja maalin levityksen välissä uuden oksidikerroksen muodostuminen on estettävä. Näistä ensimmäiseen tarkoitukseen soveltuu mekaaniset (hionta, raesuihkupuhdistus) ja kemialliset esikäsittelyt (kromatointi, fosfatointi, uudet konversiopinnoitteet), joilla oksidikerros saadaan poistettua. Jälkimmäiseen voidaan vaikuttaa maalausprosessin suunnittelulla tai käyttämällä esikäsittelyä, joka muuttaa alumiinipinnan ominaisuudet pysyvämmiin otollisemmaksi maalausaluksiksi. (Teknologiaeollisuus, 2006)

Jauhemaalauksessa käytetään usein alumiinin maalausmenetelmänä. Alumiini itsessään kestää erilaisia korroosioympäristöjä hyvin ja alumiinirakenteet ovat usein massaltaan kevyitä, sekä alumiini johtaa hyvin sähköä. Näistä ensimmäinen tarkoittaa, että usein jauhemaalaukselle tyypillinen yksikerrosmaalaus on riittävä parantamaan alumiinin korroosionkestävyyttä aiotussa käyttöympäristössä. Toinen tarkoittaa, että alumiinirakenteen lämmittäminen jauhemaalain edellyttämään polttolämpötilaan ei vie kohtuuttomasti aikaa, jolloin tehokas sarjatuotantomaalaus mahdollistuu. Hyvä sähkönjohtavuus antaa mahdollisuuden käyttää maalausmenetelmänä jauhemaalauksessa. Alumiinin maalauksessa tärkeää ovat esikäsittelyprosessin pintaa muokkaavat ominaisuudet ja hyvin suunniteltu maalausprosessi. Usein jauhemaalaukselinjastoilla maalausta edeltävä esikäsittelyprosessi on kiinteä osa linjastoa, jolloin voidaan yhteensovittaa laadullisesti ja tuotantokustannusten näkökulmasta mahdollisimman hyvin alumiinipinnan esikäsittely ja sen maalaus, minimoimalla väliaika sekä tarpeettomat siirrot ja käsittelyt esikäsittelyn ja maalauksen välissä. Verraten alumiinin märkemaalaukseen, on jauhemaalauksessa sopivan jauhemaalain valitseminen helppoa, sillä merkittävä osa markkinoilla olevista erilaisista jauhemaalaleista soveltuu käytettäväksi alumiinipinnoilla. Haasteina alumiinin jauhemaalauksessa ovat erityisesti Faradayn häkki-ilmiön aiheuttama sisänurkkien ja -kulmien maalauksen vaikeus, polttouunissa korkeassa lämpötilassa maalattavasta kappaleesta läpi verkottuvan maalikalvon poistuvat kaasut, kappaleen lämmittämisen kontrollointi, sekä maalikalvon visuaalisen laadun varmistaminen ja säätäminen jo prosessin aikana.

Märkemaalauksessa käytetään alumiinin maalausmenetelmänä erityisesti, jos maalattava pinta täytyy yhteensovittaa muiden märkemaalattujen rakenteiden kanssa tai rakenteen mittojen tai konstruktion vuoksi jauhemaalauksella ei ole mahdollinen. Myös korkeat visuaaliset vaatimukset, spesifit tekniset vaatimukset tai tarve käyttää perinteisempää maalausmenetelmää ovat tavallisia perusteita alumiinin märkemaalaukseen. Alumiinin märkemaalauksessakin hyvin tärkeää on esikäsittelyn sopivuus ja laatu. Erityisesti tämä korostuu maalattaessa alumiinia vaativampiin korroosioympäristöihin. Tavallisesti märkemaalauksessa alumiinin esi-

käsittelysuositus on pyyhkäisysuihkupuhdistus (SaS). Myös kemiallisia esikäsittelyjä käytetään. Kohtalaisen yleistä on myös ensimmäisenä maalikerroksena erillisen ohuesti levitetävän tartuntapohjamaalin käyttö. Poiketen varsinaisista pinnan täysin peittävästä pohjamaaleista tartuntapohjamaalit toimivat, kuten kemialliset esikäsittelyt: ne muuttavat alumiinin pintaominaisuudet seuraavan maalikerroksen tartunnalle otollisiksi.

Sopivan maalausjärjestelmän valinta on märkämaalauksessa tärkeää. Verraten jauhemaalihin, markkinoilla on paljon märkämaaleja, jotka eivät sovellu alumiinin maalaukseen. Vaikka alumiini kestää hyvin korroosiota sellaisenaan, sisältävät alumiinin märkämaalausjärjestelmät soveltuvan esikäsittelyn ja useamman maalikerroksen pohja-, väli- ja pintamaaleineen. Valmiin maalauksen kokonaiskalvonpaksuus myös kasvaa sen mukaisesti, kuinka voimakkaaseen korroosioympäristöön alumiini maalataan. Tämä johtuu kaasujen, höyryjen ja nesteiden kyvystä läpäistä polymeerejä. Tällöin paksumpi ja mahdollisimman tiivis maalikerros pidentää etäisyyttä, jonka korroosiota alumiinin pinnalla aiheuttavan aineen, esimerkiksi veden, tulee läpäistä ennen kuin se pääsee vuorovaikutukseen alumiinipinnan kanssa. Kun aine on saavuttanut alumiinin pinnan, voi muodostua korroosiokenno ja tapahtuvan korroosioreaktion vaikutuksesta alumiini vaurioitua, mikä edelleen aiheuttaa vaurion maalikalvoon.

4.4 Maalin tartunnan teoriaa

4.4.1 Pinnan kastelu

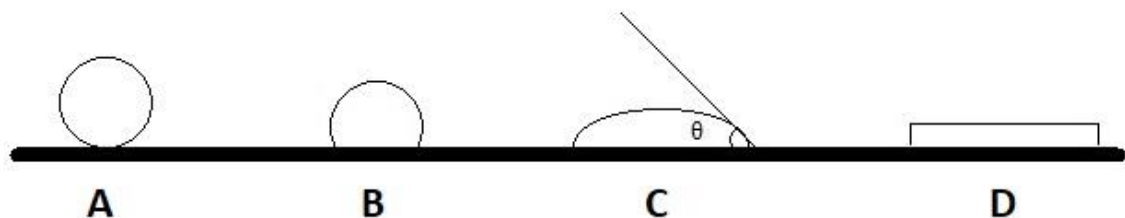
Erilaisilla molekyyileillä ja atomeilla on taipumus vuorovaikutukseen toisten molekyylien tai atomien kanssa. Käytännössä vuorovaikutus tarkoittaa molekyylien tai atomien välisiä vetovoimia. Jotta molekyylit voivat olla vuorovaikutuksessa ja niiden väliset vetovoimat voivat vaikuttaa toisiinsa, tulee molekyylien välisen etäisyyden olla pieni. Yleensä molekyylien väliseen vuorovaikutukseen vaaditaan alle 10 nanometri etäisyys vuorovaikuttavien molekyylien välillä. Jotta vuorovaikutuksen parantavat maalimolekyylien tartuntaa pintaan, tulisi tämän etäisyyden olla alle 1 nanometriä. Tarttuakseen pintaan maalin täytyy siis päästä hyvin tiiviiseen vuorovaikutukseen pinnan kanssa. Tällaiseen vuorovaikutukseen päästäkseen maalin täytyy kastella pinta eli syrjäyttää pinnalta ilma ja muut pinnalle adsorboituneet aineet. (Turner, 1980; Sarrica, 2011)

Maalin tai nesteen kyky kastella pinta riippuu fysikaalisista ilmiöistä nimeltä pintaenergia ja pintajännitys. Pintaenergialla tarkoitetaan kiinteän aineen, nesteen ja kaasun väliseen rajapintaan sitoutunutta energiaa. Pintajännitys on nesteiden ominaisuus. Nesteiden molekyylit vaikuttavat toisiinsa kaikista suunnista yhtä suurella voimalla. Nesteiden keskellä nämä vetovoimat suuntautuvat tasaisesti kaikkiin suuntiin. Reunimmaisten eli nesteen pinnan molekyylien vetovoimat vaikuttavat kuitenkin vain sivusuunnassa ja kohden nesteen sisäosia.

Koska nesteen ulkopuolelta ei kohdistu molekyyliin vetovoimia tasaavaa voimaa, aiheutuu nesteen pintaan jännitys. Tämä on nestepisaraa koossa pitävä voima ja sitä kutsutaan pintajännitykseksi. Käytännössä pintajännitys on nesteen pintaenergia. Nesteen pintajännitys määrittää, miten se käyttäytyy jollakin pinnalla. Käyttäytymistä voidaan tutkia mittaamalla kontaktikulma θ nesteen ja pinnan välillä. Kontaktikulma mitataan siirtämällä nestepisara pinnalle ja mittaamalla nesteen, kaasun ja kiinteän aineen välinen kulma. Tarkasteluissa on kuitenkin huomioitava, että käytännössä tilanne on usein hyvin kompleksinen, koska kiinteän pinnan mikroskooppiset muodot ja karheus vaikuttavat hyvin paljon nesteen käyttäytymiseen kiinteällä pinnalla. Taulukossa VI ja kuvassa 6 on esitetty mitatun kontaktikulman ja kastelun välinen yhteys ja arvioitu erilaisissa tilanteissa vallitseva nesteen pintajännityksen ja kiinteän pinnan pintaenergian erotuksen suuruus. (Vold & Vold, 1983)

Taulukko VI Nesteen kontaktikulman vaikutus pinnan kastumiseen sekä arvioitu pintajännityksen ja pintaenergian erotuksen suuruus. (Vold & Vold, 1983)

Mitattu kontaktikulma θ	Nesteen käyttäytyminen pinnalla	Kuvan 6 tilanne	Nesteen pintajännityksen ja kiinteän pinnan pintaenergian välinen suhde:
$\theta = 180^\circ$	Neste ei leviä. Pinnan kastelua ei tapahdu.	A	Nesteen pintajännitys \gg Pinnan pintaenergia
$\theta = 90^\circ$ - 180°	Neste ei kastele pintaa hyvin. Vähäistä kastumista tapahtuu.	B	Nesteen pintajännitys $>$ tai $=$ Pinnan pintaenergia
$\theta = 0^\circ - 90^\circ$	Neste kastelee pintaa hyvin, mutta ei täydellisesti	C	Nesteen pintajännitys $=$ tai $<$ Pinnan pintaenergia
$\theta = 0^\circ$	Neste leviää ja kastelee pinnan täydellisesti	D	Nesteen pintajännitys $<<$ Pinnan pintaenergia



Kuva 6 Havainnollistavat kuvat taulukon VI tulkitsemiseen. (Vold & Vold, 1983)

Maalauksessa tällaisissa systeemeissä kiinteä aine on maalattava pinta, neste on levitettävä maali (tai polttouunissa sulanut jauhemaali) ja kaasu on ympäröivä ilma. Tarttuakseen maalin tulee päästä tiiviiseen vuorovaikutukseen pinnan kanssa eli kastella pinta täysin.

Tämä on mahdollista, kun pinnan energia on suurempi kuin maalin pintaenergia eli pinta-jännitys. Kiinteät aineet voidaan jaotella pintaenergian mukaisesti korkean ja matalan pintaenergian aineisiin. Metallit, lasit ja keraamit ovat tyypillisiä korkean pintaenergian aineita, koska näissä luja kovalenttinen-, ioni- tai metallisidos sitoo pinnan atomit korkealla sidosenergialla. Tällaisen sidoksen rikkominen ja pinnan atomien irrottaminen aineesta vaatii suuren energian, joka tarkoittaa korkeaa pintaenergiaa. Matalan pintaenergian kiinteitä aineita ovat esimerkiksi useat muovit kuten erilaiset polyeteenit, polypropeenit ja polyolefiinit. Esimerkiksi raudan pintaenergia on 0,0136 ja polyeteenin 0,00031 joulea neliometriä kohden (Vold & Vold, 1983). Esimerkiksi maalien liuottimena ja ohentimena käytettävien ksyleenin vapaa pintaenergia on 0,00029 ja alkoholien 0,00022 joulea neliometriä kohden. (Ebenesajjad, 2007) Tarkasteltaessa pintaenergian arvoja on huomioitava sen riippuvuus lämpötilasta, jotta taulukoiduista materiaalien pintaenergian arvoista tietyissä lämpötiloissa ei tehdä virheellisiä päätelmiä. Esimerkiksi maalin kykyyn kastella pintaa voi vaikuttaa lämmitämällä maalattavaa pintaa tai maalin levityksen jälkeisellä uunikuivauksella.

Märkämaalit ovat kolloidiseoksia, jossa kantajafaasina on liuotin tai vesi ja dispergoituneena faasina maalin sideaine ja muut komponentit. Tässä luvussa kuvattujen tekijöiden lisäksi nestemäisen maalin kykyyn kastella pintaa vaikuttaa olennaisesti onko kolloidiseos lyofiilinen vai lyofobinen. Lyofiilissä kolloideissa kantajafaasin ja dispergoituneiden partikkelien välillä vaikuttaa suuri vetovoima ja nämä ovat termodynaamisesti vakaita. Lyofobiset kolloidit ovat termodynaamisesti epävakaita. Niissä kantajafaasin ja dispergoituneen faasin välillä on heikko vetovoima tai sitä ei ole lainkaan. Märkämaaleilla kolloidin luonne on usein lyofobinen, jotta pinnalle levitetty maali voi kuivua ja kovettua reagoimalla lisätyn kovetekomponentin tai ilman hapen kanssa. Maalin kykyyn kastella pinta tämä vaikuttaa siten, että lyofiiliset kolloidit eivät suurista systeemin sisäisistä vetovoimista aiheutuen kastele pintaa niin helposti, kuin miten lyofobiset kolloidit kastelevat. Nesteen luonteen ja ominaisuuksien ohella, olennaisesti pinnan kastumiseen vaikuttaa myös pinnan mikroskooppinen karheus. Jauhemaaleissa pinnalle levittynyt maali on sulaa polymeeriseosta, joka ei ole kolloidiseos. Tällöin pinnan kastelu perustuu selvemmin polymeeriseoksen pintajännitykseen ja alustan pintaenergian väliseen suhteeseen. (Turner, 1980; Ibrahim, 2012; Pihlajamäki, 2020)

4.4.2 Tartuntamekanismit

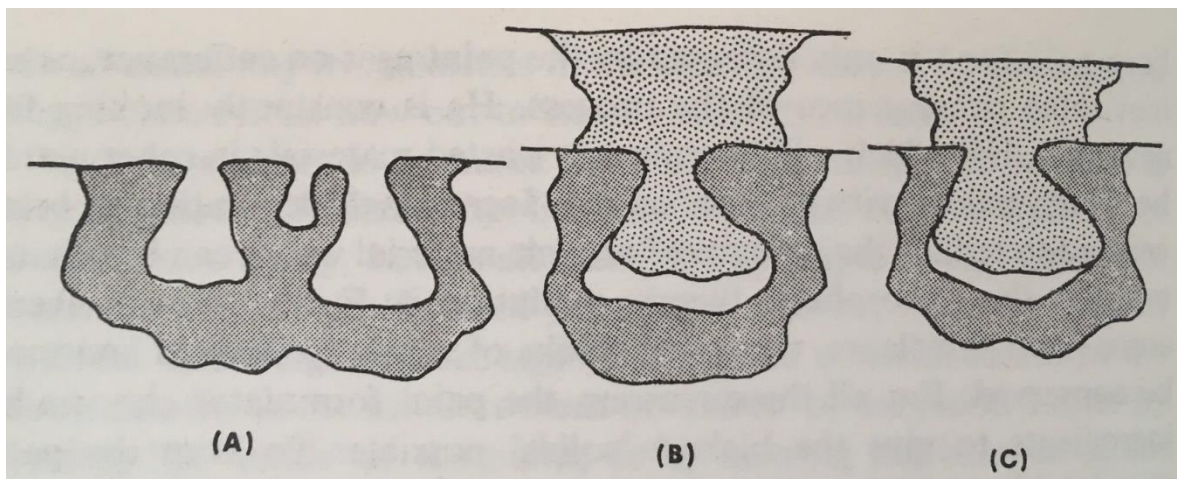
Maalin kyky kastella ja levitä pinnalle on perusedellytys tartunnalle. Kun maali on kastellut pinnan mahdollisimman täydellisesti, on hyvä tartunta maalikalvon ja maalattavan pinnan välillä mahdollinen. Maalin tartuntamekanismiksi on esitetty erilaisia teorioita. Taulukossa

VII on esitetty teorioita ja mittakaava, jossa ne vaikuttavat. Yleisen käsityksen mukaan lopullinen tartunta perustuu usean tartuntamekanismin vaikutuksiin samanaikaisesti sen sijaan, että se perustuisi täysin vain yhteen tiettyyn mekanismiin. (Ebnesajjad, 2007)

Taulukko VII Maalin tartuntamekanismit ja niiden vaikutustaso.

Tartuntamekanismi	Mittakaava
Mekaaninen lukittuminen	Mikroskooppinen
Sähköstaattinen	Makroskooppinen
Diffuusioteoria	Molekyyli
Kasteluteoria	Molekyyli
Kemiallinen sitoutuminen	Atomi
Heikko rajakerrosteoria	Molekyyli
Happo-emästeoria	Molekyyli

Mekaaninen lukittuminen on perinteisin teoria maalin tartunnalle. Sen mukaisesti pinnalle levitetty maali imeytyy ja täyttää pinnan huokokset, ontelot ja muut epätasaisuudet syrjäyttäen niistä ilman. Edelleen maalin kuivuessa tapahtuu sen lukittuminen mekaanisesti pinnan epätasaisuuksiin, kuten kuvassa 7 esitetään. (Ebnesajjad, 2007; Turner, 1980)



Kuva 7 Maalin mekaaninen lukittuminen pinnan epätasaisuuksiin. A. Poikkileikkaus maalamattomasta huokoisesta pinnasta. B. Märkämaalikalvo pinnalla C. Kuivunut, huokoseen kiristynyt maalikalvo. (Turner, 1980)

Mekaaninen lukittuminen on laajalti hyväksytty tartunnan teoria ja siihen perustuu esimerkiksi mekaaniset esikäsittelymenetelmät, joilla pinnan profiilia muutetaan ennen maalausta.

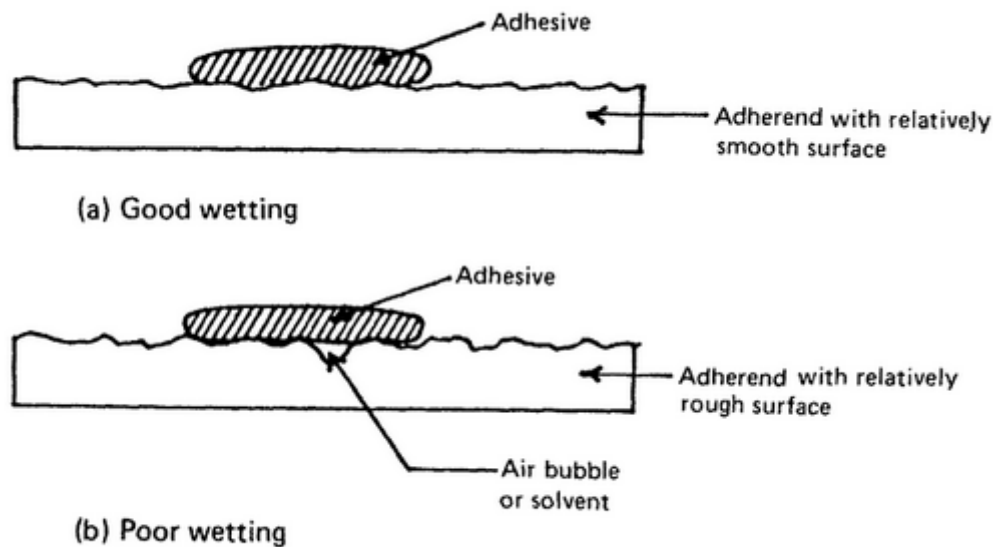
Kuitenkin mekaanisen lukittumisen parantaminen pinnan karhentamisella, esimerkiksi hio-malla tai raesuihkupuhdistuksella, mahdollistaa myös muiden tartuntamekanismien paremman toteutumisen. Pinnan mekaaninen esikäsittely parantaa pinnan puhtausastetta epäpuhtauksien poistumisen myötä ja lisää maalin ja pinnan rajapinnan pinta-alaa, jolloin maali kastelee pintaa paremmin ja mahdollinen muu tartuntamekanismi tapahtuu suuremmalla rajapinnan pinta-alalla. (Ebnesajjad, 2007)

Sähköstaattisen teorian mukaan maalikalvon tartunta ja kiinnipysyminen pinnassa johtuu alustan ja kalvon välillä vaikuttavista sähköstaattisista voimista. Tarkemmin pinnan ja maalin rajapinnalle muodostuvaan sähköiseen kaksoiskerrokseen, joka vetää pinnan ja kuivan maalikalvon kiinni toisiinsa. Teoria perustuu havainnolle, että poistettaessa maalikalvo pinnalta tapahtuu pinnalla sähköpurkauksia. Käytännössä teoria on merkittävämpi metallien ja polymeerien (metalli - maali) välisessä tartunnassa. Kahden polymeerin (muovi - maali tai maali - maali) välillä sähköstaattisten voimien vaikutus tartuntaan on havaittu vähäiseksi. (Ebnesajjad, 2007)

Pääasiassa kahden polymeerin (muovi - maali tai maali - maali) välillä tapahtuvaan tartuntaan soveltuva diffuusioteoria perustuu siihen, että pinta ja pinnoite koostuu liikkumaan pääsevästä pitkäketjuisista polymeeriketjuista. Pinnan ja pinnoitteen koostumus, sekä ympäristöolosuhteet määrittävät, miten diffuusiota tapahtuu. Tartunta perustuu pinnan ja pinnoitteen väliin muodostuvaan paksuudeltaan 1 – 1000 Ångström olevaan diffuusiokerrokseen, jossa pinta ja pinnoite on sekoittunut. Tällöin rajapinnalle ei muodostu jänniteitä, koska fyysikaalisia epäjatkuvuuskohtia ei muodostu. Muodostuvan tartunnan lujuus voidaan ennustaa pinnan ja pinnoitteen välisen liukoisuusparametrin yhteensopivuuden avulla. Ympäristöolosuhteet voi vaikuttaa diffuusiolla tapahtuvan tartunnan voimakkuuteen olennaisesti. Esimerkiksi joidenkin polymeerien huoneenlämpötilassa tapahtunut tartunta voi olla heikko, mutta yli 100 celsiusasteen lämpötilassa saadaan tuotetuksi voimakas tartunta. (Ebnesajjad, 2007)

Fysikaaliset ilmiöt pintaenergia ja pintajännitys määrittelevät, miten neste levittyy kiinteälle pinnalle. Hyvä levittyminen ja pinnan kastuminen edellyttää, että maalin pintajännitys on pienempi, kuin kiinteän pinnan kriittinen pintajännitys. Kriittinen pintajännitys on kiinteällä aineella pintajännityksen arvo, jolla valitun nesteen kontaktikulma on alle 90 °, jolloin nestepisara levittyy pinnalle ja kastelee sen. Kasteluteoriassa maalin tartunta selittyy pinnalle tiiviisti levittyneeseen maaliin, joka pääsee suurella pinta-alalla hyvin läheiseen vuorovaikutukseen alustan kanssa. Kun maalin ja alustan rajapinta on tiivis ja niiden välinen etäisyys riittävän lyhyt, molekyylien välillä vaikuttavat Van der Waalsin voimat. Nämä parantavat tar-

tunnan voimakkuutta, mutta eivät selitä yksinään sitä. Kasteluteorian mukaisesti maali tarttuu sitä paremmin, mitä vähemmän maalin ja pinnan rajapinnalle jää epäjatkuvuuskohtia, kuten ilmahuokosia tai pinnan epäpuhtauksia. Toisin sanoen mitä suurempi ja yhtenäisempi on pinta-ala, jolla alusta ja maali ovat vuorovaikutuksessa, sitä voimakkaampi on maalin tartunta alustaan. Kuvassa 8 havainnollistetaan, miten vuorovaikutuksen pinta-ala pienenee, jos maalin ja alustan väliin jää ilmaa tai epäpuhtauksia. (Ebnesajjad, 2007)



Kuva 8. Ilmakuplan vaikutus maalin ja pinnan vuorovaikutukseen. Tilanteessa (a) pinta-ala maalin ja alustan välillä on suuri ja yhtenäinen. Tilanteessa (b) ilmakupla jakaa vuorovaikuttavan pinta-alan kahteen pienempään osaan, jolloin tartunta heikkenee. (Ebnesajjad, 2007)

Tartunta molekyylien välisiä vuorovaikutuksia lujemmilla kemiallisilla sidoksilla on myös mahdollinen. Rajapinnan rakenne määrittää edellytykset kemiallisille sidoksille ja millaisia sidoksia voi muodostua. Tartunta voi perustua lujiin kovalenttisiin sidoksiin, ionisidoksiin, heikkoihin vety- tai dipolisidoksiin tai Londonin dispersiovoimiin. Tartunnan voimakkuus on suurempi lujilla sidoksilla, mutta matalan sidosenergian vetysidos on merkittävin maalin tartuntaa aiheuttava sidostyyppi. Luja kovalenttinen sidos voi muodostua, kun alustassa on funktionaalinen ryhmä, joka voi reagoida maalimolekyylin kanssa muodostaen sidoksen alustan ja maalin välille. Korkeasti verkottuvat polymeerit ja lämpökovettuvat pinnoitteet muodostavat parhaiten lujia kovalenttisiä sidoksia alustan funktionaalisten ryhmien kanssa. Esikäsittelyjen avulla voidaan lisätä pinnan funktionaalisia ryhmiä, joihin edelleen maalin

sideaine voi sitoutua. Esimerkiksi organosilaaneita käytetään parantamaan tartuntaa. Esikäsittelyllä pintaan tuodaan silaaniryhmiä, jotka reagoivat esimerkiksi alustan metallioksidiin, muodostaen eetteriryhmän, johon esimerkiksi maalin reaktiiviset hydroksyyli-ryhmät voivat sitoutua. Vastaavasti pinnalle voidaan muodostaa hydroksyyli-ryhmiä, joihin esimerkiksi epoksiryhmät sitoutuvat hyvin. (Ebnesajjad, 2007)

Heikko rajakerrosteoria ei ole varsinainen tartuntamekanismi vaan se selittää enemmänkin, miksi tartunta voi olla erilainen alustan ja pinnoitteen välisen rajapinnan eri kohdissa. Alustan ja pinnan väliin voi muodostua heikko rajakerros, mikä voi olla aiheutunut alustasta pinnoitteesta tai ympäristöolosuhteista tai näiden yhteisvaikutuksesta. Tavallisesti tällaisen aiheuttaa jokin epäpuhtaus, kuten esimerkiksi lika tai pinnalle tiivistynyt ohut vesifilmi, jotka häiritsevät pinnan kastumista tai kemiallisen sidoksen muodostumista alustan ja pinnoitteen välillä. Myös alustan rakenne, kuten heikosti alustassa kiinniolevat metallioksidit tai polymeerien ketjurakenne voivat aiheuttaa heikon rajakerroksen. Alumiinioksidin ei kuitenkaan ole todettu vaikuttavat merkittävästi heikon rajakerroksen muodostumiseen. Teorian mukaisesti pinnoitteen irtoaminen alustasta tapahtuu muodostuneen heikon rajakerroksen kohdalta. Tämä selittää sen, että pinnoite voi irrota paikallisesti jostakin kohtaa, koska kyseiseen kohtaan on jostakin syystä muodostunut heikkorajakerros alustan ja pinnoitteen välille. Käytännössä teoriassa kyse on siitä, että lähtökohtaisesti tartunta on kauttaaltaan tasalaatuinen ja hyvä, mutta erinäisistä ulkoisista syistä pinnoitteeseen muodostuu alueita, joissa tartuntaan tulee paikallisia virhekohtia. (Ebnesajjad, 2007)

Happo-emästeoria perustuu G. N. Lewisin määritelmään, jonka mukaisesti happo on aine, joka voi vastaanottaa elektroniparin emäkseltä ja emäs on aine, joka voi luovuttaa elektroniparin hapolle. Määritelmän mukaisesti kaikki kationit ovat happoja ja vastaavasti anionit ovat emäksiä. Teorian mukaisesti tartunta selittyy Lewiksen määrittelyn mukaisten happojen ja emästen välisiin polaarisin vaikutuksiin elektronirikkaiden ja -köyhien aineiden välillä. Esimerkiksi booritrifluoridin korkean elektronegatiivisuuden fluoriatomit syrjäyttää jaetut booriatomit muodostaen molekyylin, jonka booriosan on positiivisesti varautunut ja fluoriosa on negatiivisesti varautunut. Kun systeemiin tuodaan esimerkiksi ammoniakki, jossa typpi-osa on varautunut negatiivisesti, aiheutuu systeemissä vuorovaikutus positiivisen booriosan ja negatiivisen typpiosan välillä aiheuttaen booritrifluoridi- ja ammoniakkimolekyylien välille liitoksen. (Ebnesajjad, 2007)

Maalin kykyyn tarttua alustaan vaikuttaa olennaisesti myös sen reologia. Varsinkin tällä on vaikutusta siihen, miten maali on mahdollista levittää pinnalle erilaisilla tasalaatuisesti ja miten se soveltuu levitettäväksi maalauslaitteilla. Märkämaalit ovat usein pseudoplastisia

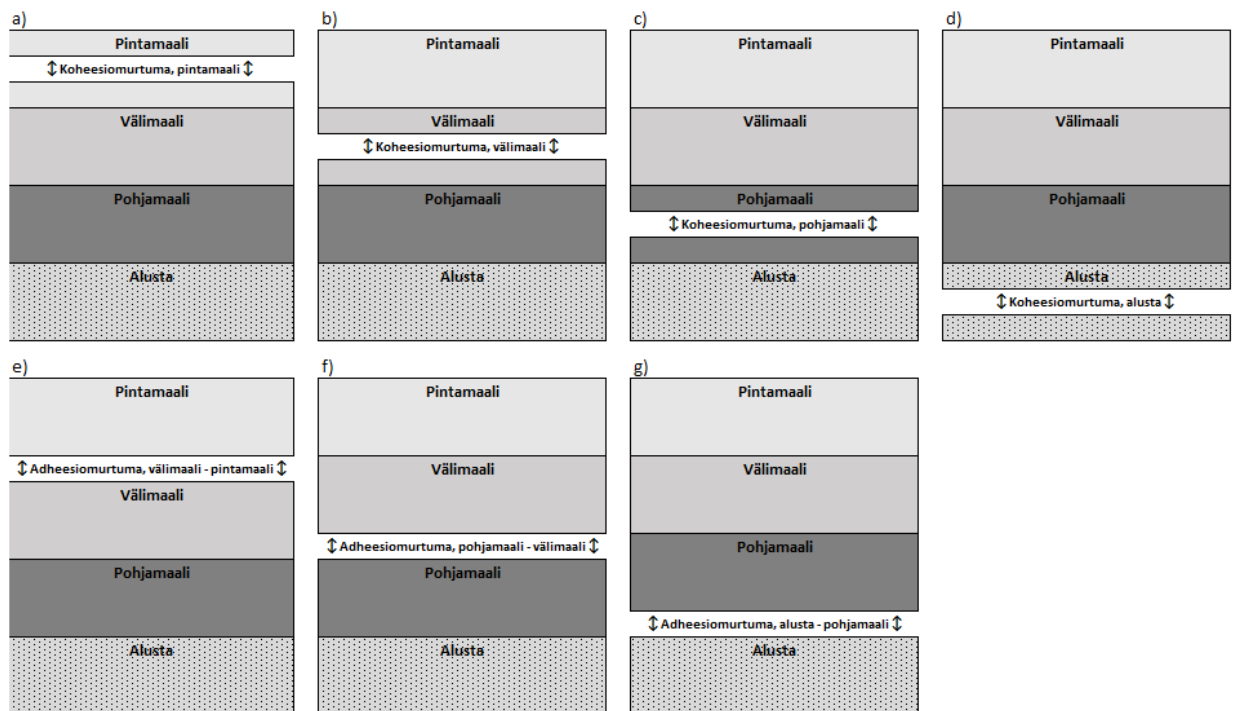
tiksotrooppisia nesteitä eli nesteitä, joiden viskositeetti suurenee nesteen seisoessa ja alenee, kun sitä sekoitetaan. Maalauksessa tätä hyödynnetään siten, että ennen maalin leviytystä maalia sekoitetaan, jolloin se on paremmin ruiskutettavissa. Pinnalle ruiskutettu maali jää pinnalle seisomaan ilman sekoitusta, jolloin sen viskositeetti alkaa kasvaa ja edelleen ilmiön seurauksena märkämaalikalvo pysyy pinnalla tasaisena filminä valumatta.

4.5 Maalikalvon vaurioitumismekanismit

Maalikalvo voi vaurioitua monin erilaisin tavoin. Se voi naarmuuntua, haljeta, rakkuloitua, irrota alustasta tai toisesta maalikalvosta tai esimerkiksi sen värisävy tai kiiltoaste voivat muuttua ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta. Tässä luvussa keskitytään tarkastelemaan maalikalvon ja alustan rajapinnalla tapahtuvia ilmiöitä, jotka aiheuttavat maalikalvon vaurioitumisen ja yleensä lopulta sen irtoamisen alustastaan.

4.5.1 Vauriotyypit

Maalikalvon vaurioituminen irtoamalla jaetaan kahteen päätyyppiin: adheesio- ja koheesio-vaurioon. Adheesiovauriossa vaurioituminen tapahtuu maalikerroksen ja alustan tai kahden maalikerroksen välisen rajapinnan murtumisena. Koheesiovauriossa murtuu alusta tai maalikerros sisäisesti kahteen osaan. Kuvassa 9 havainnollistetaan kolmikerrosmaalauksen mahdolliset koheesio ja adheesiomurtumat. (Ebnesajjad, 2007; Suomen standardoimisliitto, 2016)



Kuva 9 Poikkileikkaus tyypillisestä kolmikerrosmaalauksesta. Murtumat a) – d) ovat koheesiomurtumia e) – g) adheesiomurtumia. (Ebnesajjad, 2007; Suomen standardoimisliitto, 2016)

Maalauksen toimivuuden näkökulmasta jonkin maalikerroksen 100 % koheesiomurtuma on edullisempi tilanne kuin adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisen maalikerroksen välillä. Olettaen, että maalikerroksissa ei ole poikkeavaa koheesiomurtuman aiheuttanutta virhettä, tarkoittaa koheesiomurtuma tavallisesti sitä, että adheesio maalin ja alustan välillä on riittävän suuri, sillä se on suurempi kuin murtuneen maalikerroksen koossa pitävät sisäiset koheesiovoimat. Tavallisesti maalin vaurioituessa on usein molempia murtumatyyppejä havaittavissa. (Ebnesajjad, 2007)

4.5.2 Maalin vaurioituminen

Kun maalin ja alustan rajapinnalle jää epäpuhtauksia, ilmaa tai heikosti alustassa kiinnioleva pintakerros, kuten esimerkiksi ruostetta, aiheuttavat nämä heikon rajakerrosteorian mukaisesti maalin irtoamisen alustasta. Myös huono pinnan puhdistus tai soveltumaton esikäsittely saattavat aiheuttaa maalin huonon tartunnan ja edelleen maalikalvon ennen aikaisen irtoamisen. Esimerkiksi kiinteällä pinnalla olevat rasvat muuttavat pinnan pintaenergiaa estäen pinnan riittävän kastumisen ja tarpeeksi läheisen vuorovaikutuksen alustan ja maalikalvon välillä. Riittämättömän pinnan esikäsittelyn ohella maalin ennen aikainen irtoaminen voi aiheutua virheestä maalin levitysvaiheessa. Levityksen ja maalin kuivauksen aikana ympäristöolosuhteet voivat olla virheelliset

suhteessa maalin vaatimukseen tai maalin sekoituksessa ja käytössä on voinut käydä virhe. Edellä mainitut maalin irtoamisen syyt ovat virheitä jossakin maalausprosessin vaiheessa. Niitä ei tässä yhteydessä käsitellä tarkemmin. Seuraavaksi tarkastellaan, miten maalikalvo vaurioituu, kun lähtökohtaisesti maalausprosessin eri vaiheet ovat laadullisesti tarkoituksenmukaisesti suoritettu.

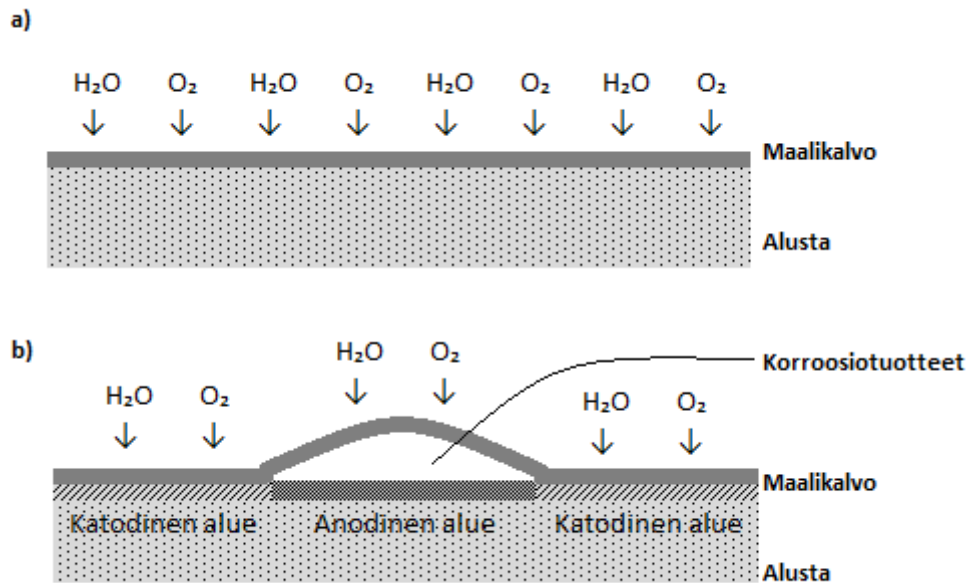
Alustan ja maalipinnoitteen fysikaaliset ominaisuudet vaikuttavat maalin kiinnipysyvyyteen olennaisesti. Systeemiin voi muodostua sisäisiä jännitteitä, jos alustan ja pinnoitteen fysikaaliset ominaisuudet poikkeavat toisistaan merkittävästi. Normaalisti jännitteitä muodostuu myös maalin verkottumisen jatkumisesta ja sen vaikutuksesta kalvon kiristymisestä tiukemmin alustan pinnalle. Sisäisten jännitteiden vaikutuksen vähentämiseksi alustan ja maalin lämpölaajenemiskertoimien olisi suotavaa olla mahdollisimman lähellä toisiaan, jolloin systeemin lämmitessä tai viilentyessä siihen ei muodostu vahingollisia jännityksiä tartuntarajapinnalle. Myös maalin kovuus ja joustavuus vaikuttavat sen kiinnipysyvyyteen. Korkean verkottumisasteen maalikalvot ovat usein kovia ja kestäviä, mutta hauraita. Kova ja hauras maalipinta on epäedullinen kiinnipysyvyyden kannalta varsinkin, jos se altistuu lämpötilan vaihteluille. Korkeasti verkottuneen maalikalvon kovuus aiheutuu siitä, että sen polymeeriketjut eivät pääse liikkumaan vapaasti, jolloin se ei voi mukautua alustan lämpölaajentumisesta aiheutuviin liikkeisiin. Joustavammissa maalikalvoissa polymeeriketjut ovat verkottuneet vähemmän tai polymeeriketjujen väliin on lisätty pienempiä molekyylejä, jotka pitävät ne kauempana toisistaan, helpottaen samalla ketjujen mahdollisuutta liikkua suhteessa toisiinsa. Lämpölaajentumisen haitallista vaikutusta kiinnipysyvyyteen voidaan vähentää käyttämällä systeemin sisäisiä jännityksiä vähentävää pohja- tai välimaalialia tai käyttämällä joustavampia maaleja. (Ebnesajjad, 2007; Turner, 1980)

Alustan ja maalikalvon fysikaalisten ominaisuuksien yhteensopivuus suunnitellussa käyttöolosuhteessa on tärkeää. Sen lisäksi maalin kiinnipysyvyyteen vaikuttaa olennaisesti maalin veden- ja kaasunläpäisyominaisuudet. Vesi kykenee läpäisemään orgaanisia polymeerejä ja niistä valmistettuja pinnoitteita. Samoin niihin voi absorboitua aineita, esimerkiksi erilaisia kaasuja. Läpäisyn ja absorboitumisen voimakkuus vaihtelee eri polymeerien välillä. Aineen kulkeutuminen polymeerin läpi tapahtuu mikrohuokoisten lävitse tai polymeerimolekyylien välistä. Läpäisyn luonteeseen ja nopeuteen on havaittu vaikuttavan lämpötilan, paineen, läpäisevän aineen konsentraation ja läpäistävän kerroksen paksuuden. Näistä viimeisin selittää, miksi erityisesti korroosionestomaalauksessa maalin kokonaiskuivakalvonpaksuudella ja maalikerrosten

lukumäärä vaikuttaa olennaisesti maalauksen korroosionsuojaominaisuuksiin ja kestävyYTEEN. (Schweitzer, 2007)

Maalauksen toimivuuteen maalikalvon läpikulkeutuvilla nesteillä ja kaasuilla on merkittävä vaikutus. Kun esimerkiksi vesi tai jokin muu alustan korroosiota nopeuttava aine kulkeutuu maalikalvon läpi ja saavuttaa maalin ja alustan rajapinnan mahdollistuu korroosioreaktiot alustan pinnalla. Käynnistyneiden reaktioiden seurauksena rajapinnalla tapahtuu kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia, mistä aiheutuu maalin ja alustan välillä vaikuttaviin tartuntavoimiin muutoksia. Tämän seurauksena lopulta maalaus vaurioituu irroten alustasta. Puutteellisen esikäsitteilyn jäljiltä maalin ja alustan rajapinnalle on voinut jäädä myös haitallisia aineita, kuten suoloja, jotka maalikalvon läpi kulkeutuneen veden kanssa reagoiessaan aiheuttaa alustan nopeaa vaurioitumista ja edelleen maalauksen vaurioitumisen. Kun vesi on läpäissyt maalikalvon, tapahtuu maalin irtoaminen alustasta tavallisesti kolmella erilaisella mekanismilla. Nämä ovat katodinen ja anodinen irtoaminen sekä lankamainen korrosio. Näistä kaksi jälkimmäistä ovat yleisiä erityisesti maalatun alumiininpinnan vauriomekanismeina. Katodinen irtoaminen on yleisempää maalatulla teräksellä. (Schweitzer, 2007)

Katodisessa irtoamisessa maalin irtoaminen perustuu siihen, että maalikalvon läpäisseen veden on helpompi vaurioittaa alustan ja maalin rajapinnalla vallitsevia tartuntavoimia, kuin jatkaa kulkeutumista edelleen metalliin. Maalikalvon läpäissyt vesi kertyy metallin pinnalle syrjäyttäen maalin tartuntavoimat. Kun kalvon läpi pinnalle kulkeutuu jatkuvasti tasaisesti vettä ja happea, korroosioreaktio käynnistyy ja pysyy käynnissä. Katodisessa irtoamisessa metallin pinnalle muodostuu anodinen alue esimerkiksi kohtaan, jossa maalin tartunnan voimakkuus on paikallisesti heikompi. Anodisen alueen ympärille muodostuu katodiset alueet. Korroosioreaktiosta muodostuu korroosiotuotteita, jotka yleensä ovat tilavuudeltaan suurempia, kuin niiden lähtöaineet. Kun nämä muodostuvat maalikalvon ja alustan rajapinnalle ne käytännössä tekevät itselleen tilaa työntämällä maalikalvon irti alustasta. Tämän seurauksena maalikalvoon muodostuu tavallisesti rakkuloita ja tapahtuu maalin irtoamista. Joissakin tapauksissa rakkula voi muodostua myös rajapinnalle kertyneen veden aiheuttaman korkean osmoottisenpaineen seurauksena. Kuvassa 10 on esitetty katodisen irtoamisen periaate. Katodinen irtoaminen voi lähteä liikkeelle myös maalikalvon virheestä (ilmahuokonen) tai vauriosta (mekaaninen isku). Tällöin korroosiotuotteet voivat sulkea maalikalvon läpäisevän aukon (virhe tai vaurio) ja korroosioreaktio aiheuttaa maalin irtoamisen kyseisen alueen ympäriltä. (Schweitzer, 2007)



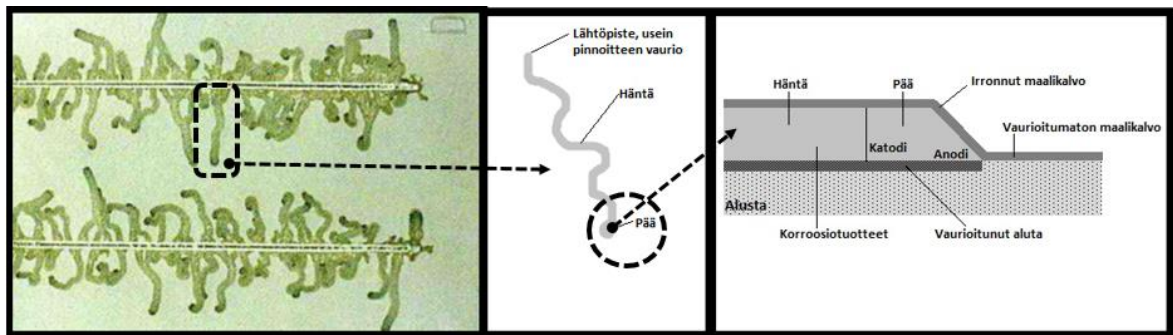
Kuva 10 Maalin katodinen irtoaminen. a) Vesi ja happi kulkeutuvat maalikalvonläpi alustan ja kalvon rajapinnalle. b) Veden ja hapen siirtyminen alustan pinnalle jatkuu, korroosioreaktio käynnistyy muodostuneiden anodin ja katodin välillä. Korroosireaktiotuotteet muodostavat maalikalvoon rakkulan ja pakottavat sen irti alustasta. (Schweitzer, 2007)

Anodinen irtoaminen tapahtuu vastaavasti, kuin katodinen irtoaminen, mutta siinä muodostuneessa korroosiokennossa katodinen alue sijaitsee kennon keskipisteessä ja anodinen alue sen reunalla. Erityisesti anodista irtoamista tapahtuu kohdissa, joissa alustan ja maalikalvon rajapinnalla on korroosioreaktiota kiihdyttäviä epäpuhtauksia, kuten esimerkiksi suoloja. Korroosioreaktion reaktiotuotteet tekevät tilaa itselleen ja irtoittavat maalikalvon alustasta muodostaen rakkulan. Koska syöpyvät anodiset alueet ovat rakkulan reunoilla, korroosion eteneminen maalikalvon alle ja rakkulan kasvu on yleistä anodisessa irtoamisessa. (Schweitzer, 2007)

Metallien sähkökemiallisen jännitesarjan mukaisesti alumiini on melko epäjalo metalli. Tällöin sillä on luonnollista taipumusta muodostua korroosioparissa anodiksia. Alumiinin seosaineet ja epäpuhtaudet vaikuttavat sen korroosiokestävyyteen. Niiden osalta olennaista on, onko ne muodostaneet alumiinin kanssa homogeenisen rakenteen vai muodostavatko ne seosaineita tai epäpuhtauksia sisältäviä erkaumia ja näin heterogeenisen rakenteen. Elektrodipotentiaaliltaan alumiinia jalommat erkaumat aiheuttavat pinnalla sähkökemiallisia paikalliskennoja. (Lindroos et al., 1986) Alumiini epäjalouden ja sanottujen paikalliskennojen voidaan ajatella selittävän alumiinilla tyypillisen

maalikalvon anodisen irtoamisen. Pinnan korkeamman elektrodipotentiaalin erkauma tai epäpuhaus muodostuu katodiseksi keskipisteksi, kun kosteus on läpäissyt maalikalvon ja anodialueeksi muodostuu keskipistettä ympäröivä matalamman elektrodipotentiaalin alumiini.

Maalikalvon alla lankamaisesti etenevää anodista irtoamista nimitetään lankamaiseksi korroosioksi. Lankamainen korrosio käynnistyy pinnoitteen virheestä tai vauriosta. Lanka koostuu hännästä ja päästä. Langan päässä on aktiivinen korroosiokenno. Häntä koostuu muodostuneista korroosiotuotteista. Langan etenemisen edellytyksenä on riittävän korkea ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ja korroosiota kiihdyttävien aineiden läsnäolo. Tällaisia ovat esimerkiksi suolat, joita voi olla rajapinnalla, pinnoitteen tai ilman epäpuhtautena. Mekanismissa hännän kautta kulkeutuu vettä ja happea langan päähän, jossa korroosioreaktio tapahtuu johtaen maalikalvon irtoamiseen. Kuvassa 11 on havainnollistettu lankamaisen korroosion periaate. (Schweitzer, 2007; Karlsson, 2011; Volk, 2014)



Kuva 11 Lankamaisen korroosion aiheuttama maalikalvon irtoaminen. (Karlsson, 2011; Volk, 2014)

Maalauksen vaurioitumisella voidaan todeta olevan kaksi pääasiallista syytä. Toinen on laadullisesti epäonnistunut esikäsitteily tai maalin levitystyö. Rajapinnalle on voinut jäädä epäpuhtauksia tai suoritettulla esikäsitteilyllä ei ole saavutettu maalin tarttuvuudelle optimaalisia pintaominaisuuksia maalattavalle pinnalle. Levitystyössä on maalikalvon verkottuminen ja alustaan tartunta voinut häiriintyä johtuen epäpuhtauksista tai ympäristöolosuhteista. Toinen perussyy vaurioitumiselle on käyttöympäristön vaikutukset maalikalvoon tai tarkemmin, miten maalikalvo soveltuu käyttöön tietyn ympäristön rasituksissa. Esimerkiksi maalikalvon veden ja hapen läpäisyn vastustuskyky ei ole riittävä tai polymeerin tartuntavoimat alustaan tai sen sisäiset koheesiovoimat voivat olla liian heikot. Näin voi olla varsinkin silloin, jos maalattavan rakenteen konstruktiio aiheuttaa maalikalvoon paikallisia muuta kalvoa heikompia alueita. Tällaisia voivat olla esimerkiksi

särmät, terävät reunat tai maalin levitystyössä vaikeasti saavutettavat pinnat. Johtuen nesteiden luontaisesta käyttäytymisestä tällaisilla pinnoilla, näillä alueilla kuivan maalikalvon paksuus on yleensä pienempi kuin tasaisilla hyvin maalattavissa olevilla pinnoilla. Yhteenvedona maalin vaurioitumisen syistä voidaan todeta, että riippumatta siitä onko vaurioitumista edistänyt heikko pinnan esikäsitteily tai maalin levitystyö vai onko käytetty maalipolymeeri soveltumaton käytettäväksi kyseessä olevassa käyttöympäristössä, molemmat aiheuttavat sen, että maalin ja alustan rajapinnalla pääsee tapahtumaan odotettua nopeammin kemiallisia (esim. korroosioreaktiot) ja fysikaalisia ilmiöitä (esim. lämpölaajeneminen), jotka vaurioittavat maalausta.

5 Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa käsitellään tutkimusmenetelmät, joiden avulla määritellään tutkittavien kemiallisten esikäsitteilyjen vaikutusta maalipinnoitteiden toimivuuteen alumiinipinnoilla. Valitut tutkimusmenetelmät ovat standardoituja menetelmiä, joita teollisen maalauksen teollisuudessa käytetään yleisesti erilaisten maalien ja maalauksien laadulliseen arviointiin. Tutkimustyyppiltään menetelmät ovat pääasiassa kvalitatiivisia, mutta standardoinnin kautta niillä on myös kvantitatiivista luonnetta.

5.1 Menetelmien määrittely

Tässä diplomityössä tutkitaan kemiallisten esikäsitteilyjen vaikutusta valmistamalla esikäsitellyt ja maalatut näytteet erilaisilla maalausprosesseilla. Toimivuutta arvioidaan suorittamalla keinovalvonnus standardin SFS-EN ISO 9227 mukaisella neutraalilla suolasumulla. Arviointimenetelminä sovelletaan standardista SFS-EN ISO 12944-6 johdettuja arviointimenetelmiä. Esikäsitellyt, mutta maalaamattomat näytteet arvioidaan soveltaen standardissa SFS-EN ISO 10289 kuvattua menetelmää. Seuraavassa taustoitetaan ja perustellaan valittuja tutkimusmenetelmiä.

Esikäsitteilystä ja maalikerroksista muodostuvan maalausjärjestelmän soveltuvuutta erilaisiin käyttöympäristöihin voidaan tutkia laboratoriomenetelmillä. Näissä tavallisesti maalatut näytteet keinovalvonnetaan ja tämän jälkeen arvioidaan, miten keinovalvonnus vaikutti maalin kiinnipysyvyyteen ja kykyyn suojata pintaa vaurioitumiselta, esimerkiksi korroosiolta. Diplomityönteettäjän kokemuksen perusteella alumiinin maaliyhdistelmille ei ole yleisesti käytettäviä standardoituja laboratoriotestimenetelmiä, joilla jonkin alumiinin maalauksen voidaan arvioida soveltuvan käyttöön tietyssä käyttöympäristössä. Eli voidaan odottaa maalin pysyvän kiinni alumiinipinnassa pinnan käyttöä vaatimusten mukaisesti ja suojaamaan pintaa käyttöympäristön aiheuttamalta vaurioitumiselta. Koska alumiinin maalauksille ei ole käytettävissä standardoituja laboratoriotestimenetelmiä, sovelletaan tässä diplomityössä

teräsrakenteiden maaliyhdistelmien standardoituja testimenetelmiä. Peruste tälle on, että usein tiettyyn käyttöympäristöön maalataan monia erilaisia materiaaleja ja suorituskäytännöt maalaukselle määritellään yleensä teräksen maalauksen kestävyden avulla. Tällöin voidaan ajatella, että mikäli alumiinin maalausjärjestelmä läpäisee vastaavat laboratoriotestit, kuin teräksen maalausjärjestelmä, sitä voidaan ainakin lähtökohtaisesti pitää soveltuvaksi käyttöön testitulosten osoittamassa ympäristössä. Diplomityönteettäjän kokemuksen perusteella vastaavia teräksen maalauksen laboratoriotestausmenetelmiä alumiinin maalauksen toimivuuden arvioinnissa käyttävät yleisesti maalien ja esikäsittelyaineiden valmistajat, sekä myös monet koneiden ja laitteiden valmistajat.

Standardi SFS-EN ISO 12944 käsittelee teräsrakenteiden korroosionestoa suojamaalalla. Teollisuudessa kyseinen standardi on monesti viiteasiakirjana, kun erilaisia rakenteita ja materiaaleja maalataan käyttöympäristöihin, joissa ympäristöolosuhteet aiheuttavat ilmastollisen korroosiorasituksen. Standardin osa 2 jaottelee erilaiset käyttöympäristöt niiden odotetun korroosiorasituksen voimakkuuden mukaisesti kuuteen ilmastollisen korroosion rasitusluokkaan ja neljään upotuskorroosiorasituksen rasitusluokkaan. Taulukossa VIII on esitetty nämä rasitusluokat. Rasitusluokat perustuvat matalahiiliteräksisten ja sinkkisten standardikoekappaleiden paino- ja paksuushäviöön pinta-alayksikköä kohden ensimmäisen altistusvuoden jälkeen, kun ne altistetaan korroosioympäristöön. Taulukossa VIII esitetään myös esimerkkejä tyypillisistä eri rasitusluokkien korroosioympäristöistä. Annettujen esimerkkien osalta on kuitenkin huomioitava, että standardin mukaisesti jonkin tietyn ympäristön todellisen täsmällisen rasitusluokan määrittämiseksi ainoa keino on suorittaa vuoden pituinen paino- ja paksuushäviömittaus. Tämä siksi, koska lyhyempien tai pidempien mittausten ekstrapolointi vuoden mittausjaksoon ei anna luotettavia tuloksia ympäristön korroosiorasituksen voimakkuudesta. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Taulukko VIII

Ilmastolliset ja upotus rasitusluokat standardin SFS-EN ISO 12944-2 mukaan. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Ilmastollinen korroosiorasitusluokka	Painohäviö pinta-alayksikköä kohden/paksuushäviö (ensimmäisen altistusvuoden jälkeen)				Esimerkkejä tyypillisistä ympäristöistä (vain opastava)	
	Matalahiilinen teräs		Sinkki		Ulkona	Sisällä
	Painohäviö g/m ²	Paksuushäviö µm	Painohäviö g/m ²	Paksuushäviö µm		
C1 hyvin lievä	≤ 10	≤ 1,3	≤ 0,7	≤ 0,1	-	Lämmitetyt rakennukset, joissa puhtaat ilmatilat, esim. toimistot, kaupat, koulut, hotellit
C2 lievä	> 10 - 200	> 1,3 - 25	> 0,7 - 5	> 0,1 - 0,7	Ilmatilat, joissa epäpuhtauksien määrä alhainen: enimmäkseen maaseutualueita	Lämmittämättömät rakennukset, joissa voi esiintyä kondensoitumista, esim. varastot, urheiluhallit
C3 kohtalainen	> 200 - 400	> 25 - 50	> 5 - 15	> 0,7 - 2,1	Kaupunki- ja teollisuusilmatilat, joissa kohtalainen rikkidioksidikuormitus, rannikkoalueet, joilla alhainen suolapitoisuus	Tuotantotilat, joissa on korkea kosteus ja hieman epäpuhtauksia ilmassa, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit
C4 ankara	> 400 - 650	> 50 - 80	> 15 - 30	> 2,1 - 4,2	Teollisuusalueet ja rannikkoalueet, joilla suolapitoisuus on kohtalainen	Kemialliset tehtaat, uima-altaat, rannikolla sijaitsevat telakat ja veneveistämöt
C5 hyvin ankara	> 650 - 1 500	> 80 - 200	> 30 - 60	> 4,2 - 8,4	Teollisuusalueet, joilla kosteus korkea ja ilmatila syövyttävä sekä rannikkoalueet, joilla suolapitoisuus korkea	Rakennukset tai alueet, joilla lähes jatkuvaa kondensoitumista ja saasteiden määrä korkea
CX äärimmäinen	> 1 500 - 5 500	> 200 - 700	> 60 - 180	> 8,4 - 25	Offshore-alueet, joilla suolapitoisuus korkea ja teollisuusalueet, joilla kosteus on äärimmäinen ja ilmatila syövyttävä sekä subtrooppiset ja trooppiset ilmastot	Teollisuusalueet, joilla kosteus äärimmäinen ja ilmatila syövyttävä
Upotuskorroosiorasitusluokka	Ympäristö		Esimerkkejä ympäristöstä ja rakenteista			
Im1	Makea vesi		Jokirakenteet, vesivoimalat			
Im2	Meri- tai murtovesi		Upotetut rakenteet ilman katodista suojausta (esim. satama-alueen rakenteet kuten patoluukut, sulkulaitteet, laiturit)			
Im3	Maaperä		Maanalaiset säiliöt, teräspaalut, teräsputket			
Im4	Meri- tai murtovesi		Upotetut rakenteet ilman katodista suojausta (esim. offshore-rakenteet)			

Kuten taulukosta VIII nähdään ilmastollinen korroosiorasitus on erilainen erilaisissa ympäristöissä. Ilmastollisen korroosiorasituksen voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä esitetään taulukossa IX.

Taulukko IX Ilmastollisen korroosion voimakkuuteen vaikuttavia asioita.
(Suomen standardoimisliitto, 2017)




Vaikuttava asia	Vaikutuksen selitys
Pinnan märkäaika	Kun ilman suhteellinen kosteus on yli 80 % ja lämpötila yli 0 °C, pinnalle tiivistyy hyvin todennäköisesti kosteutta, joka toimii korroosioreaktion mahdollistavana elektrolyytinä. Tämä perustuu siihen, että sanotun ilman kosteuden arvoilla pinnan lämpötila on hyvin todennäköisesti alle ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden perusteella määrittävän kastepistelämpötilan eli lämpötilan, jossa ilman kosteus alkaa tiivistyä pinnalle vesifilmiksi. Pinnan märkäaika vaihtelee huomattavasti riippuen ilmastosta. Se voi olla esimerkiksi erittäin kylmässä ilmastossa alle 100 tuntia vuodessa ja tasaisessa lämpimän kosteassa ilmastossa jopa 6000 tuntia vuodessa.
Ilman epäpuhtaudet.	Korroosiota aiheuttavat aineet voivat reagoida metallin kanssa kiihdyttäen korroosiota. Esimerkiksi ilman sisältämä suola voi laskeutua pinnalle.
Pinnalla olevat hygroσκοoppiset suolat	Pinnalla olevat suolat aiheuttavat korroosiota myös ilman suhteellisen kosteuden ollessa matalampi, sillä ne imevät ilmasta kosteutta pinnalle.
Rakenteen sijainti, muodot ja mikroympäristö	Vaikuttavat olennaisesti korroosion voimakkuuteen. Esimerkiksi siltojen alapuoliset rakenteet voivat altistua huomattavasti voimakkaammalle ilmastolliselle korroosiolle kuin yläpuoliset rakenteet tai rakenne voi kerätä seisovaa vettä tai tuulettua huonosti, jolloin voi esiintyä paikallisesti voimakasta korroosiota tietyssä rakenteen osassa.

Myös upotusrasituksessa on aina hyvin monia tapauskohtaisia tekijöitä, jotka vaikuttavat korroosiorasituksen voimakkuuteen. Näitä ovat esimerkiksi upotuspaikalla nesteen tai maan aineksen koostumus ja rajavyöhykkeen ominaisuudet upotetun ja näkyvän osan välillä. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Standardin SFS-EN ISO 12944 ensimmäisessä osassa kuvataan maalipinnoitteen ajallinen kestävyysaika suhteessa rasitusluokkaan. Määrittelyssä kestävyysaika on jaettu neljään ryhmään. Nämä ovat alhainen (L), kohtalainen (M), korkea (H) ja erittäin korkea (VH). Alhaisessa kestävyysaika on seitsemään vuoteen saakka, kohtalaisessa 7 – 15 vuotta, korkeassa 15 – 25 vuotta ja erittäin korkeassa yli 25 vuotta. Kestävyys tässä yhteydessä on määritelty siten, että mainituissa ajassa on arvioitu maalipinnoitteen saavuttavan kyseessä olevassa rasituksessa ruostumisasteen Ri 3 standardin SFS-EN ISO 4628 osan 3 mukaisesti määriteltynä, joka tarkoittaa pinnan pinta-alasta 1 % olevan ruostunut. Yhdessä taulukon VIII rasitusluokkien kanssa kestävyysmäärittelyä käytetään teollisen maalauksen teollisuudessa, kuten seuraavassa esitetään. Jokin maalausjärjestelmä (esikäsittely + maali-kerrokset) voidaan määritellä soveltuvaksi käyttöön jossakin taulukon VIII rasitusluokassa tai tätä matalammassa rasitusluokassa ja tässä rasitusluokassa sen voidaan odottaa kestävän ilmoitetun kestävyysajan. Esimerkiksi maalausjärjestelmän soveltuvuus ja kestävyys voidaan ilmoittaa merkinnällä "C3-M", joka tarkoittaa sopivuutta käytettäväksi korkeintaan rasitusluokassa C3 ja siinä voidaan odottaa maalauksen kestävän 7 – 15 vuotta ennen kuin se tulee uudistaa laajalla huoltomaalauksella. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Erilaiset maaliyhdistelmät esikäsittelyineen osoitetaan soveltuvaksi taulukon VIII rasisusluokkiin C2 – C5 ja Im1 – Im3 standardin SFS-EN ISO 12944 kuudennessa osassa kuvatuilla laboratoriotesteillä. Standardi SFS-EN ISO 12944 uudistettiin vuonna 2018, jolloin uusia rasisusluokkina mukaan lisättiin korkeimmat rasisusluokat CX ja Im4. Laboratoriotestit näihin luokkiin kuvataan myös tuolloin laaditulla uudella yhdeksännellä osalla. Taulukossa X esitetään testausmenetelmät, joilla jonkin esikäsittelyn ja maaliyhdistelmän mukainen maalaus voidaan arvioida soveltuvan käyttöön tietyssä rasisusluokassa.

Taulukko X Teräsrakenteiden korroosionestoon tarkoitettujen maaliyhdistelmien laboratoriotestausmenetelmät standardien SFS-EN ISO 12944-6 ja SFS-EN ISO 12944-9 mukaan. (Suomen standardoimisliitto, 2018)

Korroosio- rasitus- luokka:	Kestä- vyys- luokka:	Testijärjestelmä 1			Testijärjes- telmä 2	Lisätestit offshore-olo- suhteisiin	
		ISO 2812-2 (vesiupotus)	ISO 6270-1 (veden konden- soituminen)	ISO 9227 (neutraali suolasumu)	Syklinen van- hentamis- testi, ks. alla.	ISO 15711 Katodinen sidospurkau- tuminen	
		tuntia	tuntia	tuntia	tuntia	tuntia	
C2 lievä	L	-	48	-	-	-	
	M	-	48	-	-	-	
	H	-	120	-	-	-	
	VH	-	240	480	-	-	
C3 kohtalainen	L	-	48	120	-	-	
	M	-	120	240	-	-	
	H	-	240	480	-	-	
	VH	-	480	720	-	-	
C4 ankara	L	-	120	240	-	-	
	M	-	240	480	-	-	
	H	-	480	720	-	-	
	VH	-	720	1440	1 680	-	
C5 hyvin an- kara	L	-	240	480	-	-	
	M	-	480	720	-	-	
	H	-	720	1440	1 680	-	
	VH	-	-	-	2688	-	
CX äärimmäi- nen	H	-	-	-	4200	-	
CX/Im 4 raja-alue (roiske- ja vuorove- silohkot)	H	4200	-	-	4200	4200	
Im1	H	3000	1440	-	-	-	
	VH	4000	2160	-	-	-	
Im2	H	3000	-	1440	-	-	
	VH	4000	-	2160	-	-	
Im3	H	3000	-	1440	-	-	
	VH	4000	-	2160	-	-	
Im4	H	4200	-	-	-	4200	
Syklinen vanhentamistesti:					Kestävyysluokat:		
Päivä 1		Päivä 2	Päivä 3	Päivä 4	Päivä 5	Päivä 6	Päivä 7
UV/kondensatio – ISO 16474-3			Neutraali suolasumu – ISO 9227			Altistus alh. lämpötilalle lämpötilassa (-20 ± 2) °C	
							

Taulukossa X esitetään laboratoriotestimenetelmät ja kunkin menetelmän keinoanvahnennuksen pituus tunneissa. Testijärjestelmiä on kaksi ja mikäli taulukon rivillä annetaan keinoanvahnennuksen pituus molemmille testijärjestelmille, voidaan näistä käyttää kumpaa tahansa. Molempien testijärjestelmien testit tulee suorittaa erillisillä näytesarjoilla. Taulukkoa X lue-

taan vasemmalta oikealle esimerkiksi seuraavasti. Testattaessa maalausjärjestelmän toimivuus korroosiorasitusluokkaan C4-H tulee näytteiden läpäistä seuraavat testit, kun noudatetaan testijärjestelmää yksi:

720 tunnin standardin SFS-EN ISO 6270-1 veden kondensoitumisrasitus.

1440 tunnin standardin SFS-EN ISO 9227 mukainen neutraali suolasumurasitus.

Tai vaihtoehtoisesti 1680 tunnin syklinen keinovanhennusrasitus, jossa UV-, kondensaatio- ja suolasumu-, pakkasrasitusolosuhde vaihtelevat sykleittäin. Äärimmäiseen korroosiorasitukseen (CX) ja upotusrasitukseen vaaditaan sanottujen testien lisäksi myös vesiupotus- ja katodisen sidospurkautumistestin läpäisyä, kuten taulukossa X esitetään.

Taulukosta X havaitaan, että useimpiin rasitusluokkiin maalausjärjestelmän soveltuvuuden voi arvioida neutraalilla suolasumutestillä ja kondensoituvan veden kestävyystestillä. Diplomityön teettäjän arvion mukaan näistä ensimmäinen on yleisempi testimenetelmä, jota esimerkiksi monet pinnoitteiden ja esikäsittelyaineiden valmistajat käyttävät osoittamaan tuotteen toimivuuden erilaisissa korroosiorasituksissa. Tästä syystä tässä diplomityössä käytettäväksi keinovanhennusmenetelmäksi valittiin neutraalisuolasumukoe. Tällöin saatuja tuloksia voidaan sujuvammin verrata jo olemassa olevaan tietoon.

Suolasumun ja kosteuden kestävyys tutkimisella saadaan tietoa pinnoitteen märkätarttuvuudesta ja pinnoitekalvon sulkuominaisuuksista eli kyvystä eristää alusta korroosiota aiheuttavista ympäristöstä ja aineista. Tämän diplomityön viitekehyksessä maalin märkätarttuvuus on tärkeä muuttuja eli, miten tutkittavat konversiopinnoitteet parantavat maalien märkätarttuvuutta pintaan. Toisin sanoen märkätarttuvuus on riittävän hyvä, jos näytteet läpäisevät hyväksytysti toteutetun keinovanhennuksen. Konversiokäsittelyn vaikutusta märkätarttuvuuteen havainnoidaan vertailunäytteillä, joita ei ole esikäsitelty kemiallisesti.

Keskeinen näkökulma tässä diplomityössä on tutkia todellisia teollisessa käytössä olevia maalausprosesseja. Tutkimustulosten hyödyntämisen ja luotettavuuden näkökulmasta on tärkeää, että tutkimusmenetelmät ovat johdettu alalla yleisesti käytettävistä testausmenetelmistä ja suoritettavat tutkimukset tehdään mahdollisimman huolellisesti valittuja standardeja noudattaen.

5.2 Sovellettavat tutkimusmenetelmät

5.2.1 Neutraali suolasumukoe

Erilaisten maalien, pinnoitteiden, maalausprosessien tai sen osien suorituskykyä tutkitaan erilaisilla keinovanhennusmenetelmillä. Hyvin yleinen menetelmä näytteiden keinovanhennukseen on suolasumukokeet. Standardi SFS-EN ISO 9227 käsittelee keinotekoisissa kaasuympäristöissä toteutettavia suolasumukokeita.

Keinovanhennuksien kohdalla tärkeää on ymmärtää, että tietty keinovanhennus todentaa, miten näyte käyttäytyy juuri siinä olosuhteessa, jota käytetään keinovanhennukseen. Käytännössä todellisuudessa kuitenkin erilaisten materiaalien käyttäytymiseen ja vanhentumiseen vaikuttaa olennaisesti vallitsevat olosuhteet; mahdollistaako esimerkiksi vallitseva olosuhde alumiinin pintaan suojaavan oksidikalvon muodostumisen. Tästä syystä suolasumukokeen tuloksista ei voida tehdä liian pitkälle vietyjä johtopäätöksiä erilaisten materiaalien tai pinnoitteiden korroosiorasitusten kestävyydestä. Kuitenkin keinovanhennus suolasumulla soveltuu hyvin erilaisten näytteiden laadulliseen arviointiin. Kun näytteet ovat luonteeltaan riittävän yhdenmukaisia ja käytetään huolellista ja varovaista arviointia, voi menetelmää soveltaa vertailevaan arviointiin.

Edellä mainittu standardi kuvailee kolme erilaista suolasumukoemenetelmää. Nämä ovat neutraali suolasumukoe (NSS), etikkahapposuolasumukoe (AASS) ja kuparilla kiihdytetty etikkahapposuolasumukoe (CASS). (Suomen standardoimisliitto, 2017) Tässä diplomityössä näytteiden keinovanhennukseen käytetään ensin mainittua menetelmää.

Neutraali suolasumukoe soveltuu keinovanhennusmenetelmäksi metalleille, metalliseoksille, metallisille pinnoitteille, anodisointipinnoitteille ja metallisten materiaalien orgaanisille pinnoitteille eli esimerkiksi maaleille, sekä erilaisille reaktiopinnoitteille, kuten esimerkiksi tässä diplomityössä tutkittaville konversiopinnoitteille. Menetelmässä tarkoitukseen sopivalla laitteella näytteet altistetaan jatkuvalla neutraalille suolasumulle suljetussa kammiassa. Suolasumuliuksena käytetään natriumkloridiliuosta, joka täyttää seuraavat kriteerit:

- käytettävä natriumkloridisuola on puhdasta. Soveltuva laatuja ovat mm. Ph. Eur/USP, JIS tai ACS
- liuos on valmistettu puhdistettuun veteen, jonka johtokyky on alle $20 \mu\text{S}/\text{cm}$ mitattuna lämpötilassa $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$.

Sumutetun liuoksen natriumkloridipitoisuuden tulee olla $50 \text{ g/l} \pm 5 \text{ g/l}$ ja pH-arvon $6,5 - 7,2$. Tarvittaessa koeliuoksen natriumkloridipitoisuus säädetään lisäämällä liuokseen suolaa tai vettä. pH-arvoa voidaan säätää analyysilaatua olevalla suolahapolla, natriumhydroksidiliuoksella tai natriumkarbonaattiliuoksella. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Standardissa kuvataan, millainen suolasumukammion tulee olla. Yhteenvedona laitteen tulee kestää käytettävät koeliuokset eikä sen materiaalit tai ominaisuudet saa vaikuttaa koetuloksiin. Esimerkiksi kokoonpanon on oltava sellainen, sumutus on tasaista ja epäsuoraa näytteisiin nähden, eikä kammion pinnoilta saa tippua koeliuospisaroita näytteiden pinnoille. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Suolasumukammion toimivuus ja syövyttävyyys voidaan arvioida vertailunäytteiden avulla. Arviointiin käytetään vähintään neljää teräslaadusta CR4 valmistettua koelevyä, joiden mitat ovat 150 mm x 70 mm x 1 mm. Vertailunäytteet puhdistetaan huolellisesti orgaanisella liuottimella, punnitaan ± 1 mg tarkkuudella ja suojataan näytteiden toinen pinta. Tämän jälkeen vertailunäytteet asetetaan kammioon siten, että jokaisella kammion neljänneksellä on vertailunäyte. Näyte asetetaan suojaamaton pinta ylöspäin 15 - 25° asteen kulmassa pystysuorasta korkeudelle, jolla vertailunäytteiden alareuna on suolasumunkeruu välineen yläreunan tasalla. Kammioon sumutetun suolaliuoksen määrää ja levittäytymisen tasaisuutta mitataan keruuvälineillä, sekä kammion syövyttävyyttä vertailunäytteillä testattaessa, että varsinaisen kokeen aikana. Keruuastioiden tulee olla suolasumuun reagoimattomasta materiaalista valmistettuja mitta-asteikolla varustettuja lieriömäisiä astioita, joihin sumutettua liuosta kerätään halkaisijaltaan 100 mm² suppilolla, jolloin keruu pinta-ala on noin 8000 mm². Nämä astiat sijoitetaan kammioon siten, että niihin ei valu liuosta näytteistä tai kammion osista. Toinen astia on sijoitettava suolasumun syöttökohdan lähelle ja toinen kauas siitä. Kun vertailunäytteet on asetettu kammioon, aloitetaan suolasumurasitus, jossa kammion lämpötila on 35 °C \pm 2 °C ja liuoksen keruuastioihin kertymisen keskimääräinen nopeus 1,5 ml/h \pm 0,5 ml/h. Myös varsinaisessa kokeessa koeolosuhteiden tulee olla nämä. Teräksisiä vertailunäytteitä pidetään kammiossa 48 tuntia. Tämän jälkeen ne poistetaan kammioista, poistetaan niistä taustan suoja ja poistetaan pinnalta korroosiotuotteet mekaanisesti tai kemiallisesti esimerkiksi käyttämällä veden ja analyysilaatuisen diammoniumsitraatin seosta. Näytteiden puhdistamisen jälkeen ne huuhdellaan ja kuivataan huolellisesti. Tämän jälkeen suoritetaan vertailunäytteiden punnitseminen 1 mg tarkkuudella ja määritetään massahäviö neliometriä kohden jakamalla mitattu massahäviö vertailunäytteen testatulla pinta-alalla. Kuvatulla menettelyllä määritettynä neutraalissa suolasumurasituksessa teräksisten vertailunäytteiden massahäviön tulee olla 50 – 90 g/m² 48 tunnin koestusajassa. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Suolasumukokeessa koekappaleiden mitat ja geometria voidaan sopia asianosaisten kesken. Mikäli tästä ei erikseen sovita, on orgaanisella pinnoitteella pinnoitettuja näytteitä tutkittaessa suositeltavaa käyttää mitoiltaan 150 x 100 x 1 mm koelevyjä. Korroosionestomaa-
lien hyväksyntää laboratoriotesteillä käsittelevä standardi SFS-EN ISO 12944-6 määrittelee

teräksisten koelevyjen vähimmäismitaksi 150 x 75 x 3 mm. Pinnoitettujen koelevyjen taustan ja reunojen pinnoitteen tulee olla yhdenmukainen tai korroosionkestävyydeltään parempi kuin varsinaisella tutkittavalla pinnalla oleva pinnoite. Usein levyn reuna on terävä, jolloin sen kohdalla pinnoite on tavallisesti tasopintaa ohuempi ja täten korroosionkestävyys ominaisuuksiltaan heikompi. Tästä syystä suolasumukokeessa on aiheellista suojata levyn reunat esimerkiksi teippaamalla, jotta näytteen heikomman korroosionkestävyyden alueelta ei korroosioauriot virheellisesti etene tutkittavalle pinnalle aiheuttaen virhettä koetulokseen. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Suolasumukammioon koekappaleet asemoidaan vastaavasti, kuten edellä vertailunäytteitä käsittelevässä kappaleessa kirjoitetaan. Ennen koekappaleiden asettamista kammioon on varmistettava niiden puhtaus ja mahdollisen orgaanisen pinnoitteen kunto. Näytteiden asettelun jälkeen kammioon asetetaan suolasumun keruuvälineet, joilla mitataan kokeen aikana sumutetun liuoksen määrää ja laatua. Tämän jälkeen aloitetaan koe ja näytteitä pidetään kammiossa valittu koejakso, joka voi olla esimerkiksi muutamasta tunnista yli tuhanteen tuntiin. Koejakson aikana koe on sallittua pysäyttää lyhyiksi ajoiksi esimerkiksi keruuvälineiden tyhjentämistä, laitteen säätämistä tai näytteiden silmämääräistä tarkastelua varten. Pysäytyksen pituus tulee kuitenkin olla kerrallaan alle yksi tunti. (Suomen standardoimisliitto, 2017) Tähän diplomityöhön valittiin esikäsitellyille ja maalatuille näytteille koejakson pituudeksi 720 tuntia, joka on taulukon X mukaisesti käytettävä keinovanhennusjakso, kun tutkitaan maalauksen soveltuvuutta enintään rasisluokkiin C3-VH, C4-H tai C5-M. Tämä pituisen koejakson voidaan odottaa antavan tietoa tutkittavien konversiokäsittelyjen toimivuudesta alumiinipinnoilla, kun näytteissä maaleina käytetään maaleja, joiden kestävyysominaisuudet tunnetaan. Maalaamattomien näytteiden keinovanhennusjakson pituudeksi määritettiin 240 tuntia. Tämä perustuu arvioon, että tässä ajassa näytteisiin muodostuu vaurioita, mutta näytteet eivät kuitenkaan ennätä vaurioitua liian voimakkaasti, jotta mahdollisia eroja voidaan vanhennusjakson päätyttyä havaita.

Koejakson päätyttyä näytteet poistetaan suolasumukammioista ja orgaanisella pinnoitteella pinnoitetut näytteet puhdistetaan välittömästi huuhtelemalla ne juoksevalla vesijohtovedellä käyttäen apuna pehmeää sientä. Puhdistuksessa on varottava näytteisiin muodostuneiden korroosioilmiöiden vaurioittamista tai niiden luonteen muuttamista. Tämän jälkeen näytteitä kuivataan 24 tuntia huoneilmassa ja suoritetaan irronneen tai heikosti kiinni olevan pinnoitteen poistaminen mahdollisen keinotekoisien viillon ympäriltä. Poistaminen tehdään teipillä tai varovasti veitsellä nostamalla. Tämän jälkeen suoritetaan näytteiden arviointi noudattaen

koesuunnitelmaan määritettyjen arviointimenetelmien mukaisesti. (Suomen standardoimisliitto, 2017) Tässä diplomityössä näytteiden käsittely suoritetaan kuvatulla menettelyllä ja arvioidaan tämän luvun muissa osissa kuvatuilla menetelmillä.

Metallisten näytteiden, joita ei ole pinnoitettu orgaanisella pinnoitteella, annetaan koejakson päätyttyä kuivua 30 – 60 minuuttia, jonka jälkeen ne huuhdellaan juoksevalla vesijohtovedellä ja kuivataan puhtaalla paineilmalla. Käsittelyssä on varottava, että näytteisiin muodostuneita korroosiovaurioita ei muuteta. Tämän jälkeen suoritetaan näytteiden arviointi valituilla arviointimenetelmillä. (Suomen standardoimisliitto, 2017) Tässä diplomityössä käsitellään maalaamattomat näytteet edellä kuvatun mukaisesti.

5.2.2 Näytteiden maalipinnoitteen keinotekoinen vaurioittaminen

Erilaisten pinnoitettujen pintojen todellisissa käyttöympäristöissä on aina olemassa riski pinnoitteen vaurioitumiselle. Pinnoitteen vaurioituessa esimerkiksi mekaanisesta iskusta, aiheutuu siitä usein pinnoitteen irtoaminen vaurioalueelta ja alustan paljastuminen, joka edelleen asettaa alustan alttiiksi korroosiolle. Tästä syystä standardit SFS-EN ISO 12944-6 ja SFS-EN ISO 9227 edellyttävät, että näytteisiin tehdään viiltämällä keinotekoinen vaurio pinnoitteen läpi alustaan ennen keinovanhennuksen aloitusta. Tämän tarkoitus on auttaa havainnoimaan, miten alusta käyttäytyy vauriokohdassa ja miten pinnoite vaurioituu viillon ympäriltä keinovanhennuksessa.

Korroosionestomaalausta käsittelevän standardin SFS-EN ISO 12944-6 liite A määrittelee viillolle asemoinnin ja mitat, sekä sen miten viillosta lähtevän korroosion voimakkuus arvioidaan. Edellä mainitut ovat melko yhdenmukaiset standardin SFS-EN ISO 9227 liitteen C kanssa, joka määrittelee viillon vaatimukset, kun alumiini on pinnoitettu orgaanisella pinnoitteella. Mainitun liitteen C mukaisesti tulee tehdä kaksi viiltoa, jotka ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden, mutta eivät risteä. Viiltojen leveyden tulee olla 0,2 – 1,0 mm. Viiltojen pituuden tulee olla vähintään 30 mm ja niiden sijaita vähintään 20 mm päässä toisistaan ja koelevyn reunoista. Tässä diplomityössä tehdään näytteisiin viillot edellä kuvatun mukaisesti soveltaen viiltämisessä standardin SFS-EN ISO 17872 ohjeita. Sanottu standardi käsittelee metallialustojen pinnoitteen viiltämistä korroosiokokeita varten. (Suomen standardoimisliitto, 2017)

Näytteiden keinovanhennuksen jälkeen arvioidaan pinnoitteen ja alustan vaurioituminen viillon alueelta aiheutta käsittelevässä standardissa SFS-EN ISO 4628-8 kuvatuilla menetelmillä. Pinnoitteen vaurioituminen tarkoittaa sen irtoamista alustasta ja alustan vaurioituminen metallin vaurioitumista korroosioreaktioiden seurauksena. Arviointi suoritetaan seuraavasti:

1. Huuhdellaan näyte puhtaalla vedellä ja kuivataan se.
2. Irrotetaan heikosti kiinni oleva pinnoite tarkoitukseen soveltuvalla menetelmällä.
3. Mitataan maalin irtoamisen kokonaisleveys 0,5 mm tarkkuudella vähintään kuudesta tasaisesti viillon kokonaispituudelle asetetusta mittauspisteestä (a – f). Viillon alku- ja päätepisteen ulkopuolella olevaa pinnoitteen irtoamista ei huomioida.
4. Lasketaan mittaustuloksista keskimääräinen irtoamisen kokonaisleveys d_1 0,5 mm tarkkuudella käyttäen yhtälöä:

$$d_1 = (a + b + c + d + e + f) / 6$$

5. Lasketaan pinnoitteen irtoaminen d millimetreinä käyttäen yhtälöä:

$$d = (d_1 - w) / 2$$

Missä d_1 on maalin irtoamisalueen kokonaisleveyden keskiarvo millimetreinä ja w on alkuperäisen viillon leveys millimetreinä.

Maalin irtoamisen d määrittämisen jälkeen määritetään samalla periaatteella alustan korroosio c:

1. Mitataan korroosion leveys 0,5 mm tarkkuudella kuudesta viillon kokonaispituudelle tasaisesti jaetusta mittauspisteestä (a – f). Viillon alku- ja päätepisteen ulkopuolella olevaa korroosiota ei huomioida
2. Lasketaan korroosion keskimääräinen kokonaisleveys w_c yhtälöllä:

$$w_c = (a + b + c + d + f) / 6$$

3. Lasketaan korroosio c millimetreinä yhtälöllä:

$$c = (w_c - w) / 2$$

Missä w_c on korroosion kokonaisleveyden keskiarvo millimetreinä ja w on alkuperäisen viillon leveys millimetreinä.







Edellä esitetyt maalin irtoamisen ja alustan korroosion määrittämiset soveltuvat käyttöön, kun vaurioituminen on kohtuullisen tasaista koko viillon pituudelta. Mikäli vaurioituminen on epätasaista, tulee lisätä mittauspisteiden määrää tai käyttää standardissa annettua tällaiseen tapaukseen soveltuvaa yhtälöä. Maalin irtoamisen d ja alustan korroosion c tulokset ilmoitetaan 0,5 mm tarkkuudella. (Suomen standardoimisliitto, 2013)

Tässä diplomityössä maalin irtoaminen ja alustan korroosio viillosta määritetään edellä kuvatuksi ja laadullisena kriteerinä käytetään taulukossa XV kuvattua kriteeristöä.

5.2.3 Hilaristikkokoe

Hilaristikkokoe on menetelmä, jolla arvioidaan maalipinnoitteen irtoamiskestävyyttä. Kun vetokokeessa vedetään maalikalvoa irti alustasta voimalla, joka kohdistuu alustaan kohtisuoraan, hilaristikkokokeessa maalikalvoon kohdistuu leikkaava voima vinosti. Menetelmässä maalikalvon läpi alustaan tai edelliseen pinnoitekerrokseen tehdään viilto tarkoitukseen soveltuvalla leikkurilla. Leikkuri voi olla yksi- tai moniteräinen ja käsi- tai moottorikäyttöinen. Leikkuri valitaan alustan kovuuden ja testattavan maalipinnoitteen paksuuden perusteella. Erona leikkureiden välillä on pinnoitteen läpäisevien viiltojen keskinäinen etäisyys, joka voi olla yksi, kaksi tai kolme millimetriä. Kovilla alustoilla, kuten alumiinilla, käytetään 1 mm terää, kun tutkittavan maalipinnoitteen kuivakalvonpaksuus on alle 60 µm, 2 mm terää kalvonpaksuudelle 61 – 120 µm ja 3 mm terää kalvonpaksuudelle 121 – 250 µm. Maksimi maalin kuivakalvonpaksuus hilaristikkokokeelle on 250 µm. Sopivan leikkurin valinnan lisäksi ennen hilaristikkokokeen suorittamista on varmistettava testattavien maalikalvojen kuivauksen vaatimustenmukaisuus ja dokumentoitava koeolosuhteet. (Suomen standardoimisliitto, 2013)

Hilaristikkokokeessa leikataan leikkurilla maalipinnoitteen läpi alustaan asti ristikkokuvio, jossa leikkausuria on ristikon kummassakin suunnassa kuusi. Leikkauksen jälkeen leikkausalueelta poistetaan kaikki irtonainen maali harjausmenettelyllä tai itseliimautuvalla teipillä. Hilaristikkoja leikataan rutiinitestauksessa yksi kappale. Tarkempia tuloksia vaadittaessa määritysten lukumäärä on kolme. Leikkauksen jälkeen tulos arvioidaan hyvässä valaistuksessa huolellisesti tarkastellen ja määritetään tulos kuvassa 12 esitetyn luokittelun mukaisesti. Mikäli maalin irtoaminen tapahtuu alustan sijaan esimerkiksi toisesta maalikerroksesta, tämä ilmoitetaan tuloksen ilmoittamisen yhteydessä. Samoin on ilmoitettava, jos maalin kovuuden takia hilaristikon leikkaus alustaan asti ei onnistu lainkaan tai jokaisen risteävän kuuden viiltolinjan kohdalla. Suositeltava tapa ilmoittaa tulos on viitata sovellettuun standardiin, ilmoittaa käytetty leikkurin tyyppi ja tulos. Esimerkiksi hilaristikkokoe, jossa leikkurina on käytetty käsikäyttöistä moniteräistä leikkuria ja tulos on ollut 1, ilmoitetaan merkinnällä ”ISO 2409:2013 – 2a – 1”. Eli standardi, leikkurin tyyppi ja tulos. Tämän lisäksi tuloksen raportoinnissa on ilmoitettava sopimuksen mukaisella laajuudella tarvittavat tunnistus-, olosuhte-, esikäsittely- ja maalaustiedot, sekä kaikki havaitut poikkeavuudet ja epätavalliset ominaisuudet näytteissä. (Suomen standardoimisliitto, 2013)

0	1	2	3	4	5
					
Leikkausurien reunat ovat täysin sileät, yksikään ristikon ruuduista ei ole irronnut.	Pientä hilseilyä urien leikkauspisteissä. Leikkausristikon alueesta korkeintaan 5 % on vaurioitunut.	Pinnoite on hilseillyt urien reunoilta tai urien leikkauspisteissä. Leikkausristikon alueesta on vaurioitunut enemmän kuin 5 % mutta korkeintaan 15 %.	Pinnoite on hilseillyt urien reunoilta osittain tai kokonaan suurina kaistaleina tai on hilseillyt osittain tai kokonaan ruutujen eri osista. Leikkausristikon alueesta on vaurioitunut enemmän kuin 15 % mutta korkeintaan 35 %.	Pinnoite on hilseillyt urien reunoilta osittain tai kokonaan suurina kaistaleina tai joitain ruutuja on irronnut osittain tai kokonaan. Leikkausristikon alueesta on vaurioitunut enemmän kuin 35 % mutta korkeintaan 65 %.	Mikä tahansa hilseily, jota ei voida luokitella edes luokitteluasteen 4 mukaisesti.

Kuva 12 Hilaristikkokokeen koetulosten luokitteluasteikko. (Suomen standardoimisliitto, 2013)

Hilaristikkokokeessa toistettavuusraja r on 1. Kun menetelmää käytetään toistettavuusehtojen mukaisesti käyttäen samoja materiaaleja, samaa testaajaa ja samaa laboratoriota, on kahden määrittelyn, jossa kummassakin tulos on määritetty kahden rinnakkaismäärittelyn keskiarvona, tulosten erotuksen itseisarvo 95 % todennäköisyydellä alle sanotun toistettavuusrajan. Uusittavuusraja R on 2. Uusittavuusrajassa periaate on sama kuin toistettavuusrajassa, mutta testit tehdään identtisillä materiaaleilla eri laboratorioissa eri testaajien toimesta. (Suomen standardoimisliitto, 2013)

Tässä diplomityössä hilaristikkokoea käytetään varmistamaan, että tutkittavilla esikäsitteilyprosesseilla saadaan riittävän hyvä maalin tartunta alumiiniin, sekä keinovanhennuksen jälkeen maalin kiinnipysyvyyden muutosten arviointiin.

5.2.4 Vetokoe

Standardi SFS-EN ISO 4624 kuvaa tartuntavetokomenettelyä, jolla voidaan arvioida maalin alustaan tartunnan voimakkuutta. Menetelmässä valmisteltuun ja spesifikaatioiden mukaisesti valmistettuun maalipintaan liimataan vetokappale, joka vedetään irti tarkoitukseen valmistetulla vetolaitteella. Irtivedon tulokseksi saadaan vetojännitys eli voima, joka vaadittiin rikkomaan maalin ja alustan välinen sidos. Menetelmä soveltuu käytettäväksi yksikerrosmaalaukselle ja monikerrosmaalaukselle. Irtivedon myötä murtuma tapahtuu järjestelmän heikoimman kerroksen sisäisenä murtumana eli koheesiomurtumana tai kahden eri kerroksen rajapinnan murtumana eli adheesiomurtumana. Erilaiset murtumatyypit on havainnollistettu edellä kuvassa 9. Alustan ja maalin murtumien lisäksi murtuma voi tapahtua adheesiomurtumana liiman ja pintakerroksen välillä tai liiman ja vetokappaleen välillä tai liiman

koheesiomurtumana. Taulukossa XI kuvataan vetokokeen erilaisten murtumatyyppien merkintätapa. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

Taulukko XI Vetokokeen murtumatyyppien merkintätapa. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

	Tunnus	Selite
Kerroksen sisäinen murtuma = Koheesiomurtuma	A	Alustan koheesiomurtuma
	B	Koheesiomurtuma 1. pinnoitekerroksessa
	C	Koheesiomurtuma 2. pinnoitekerroksessa
	D	Koheesiomurtuma 3. pinnoitekerroksessa
	E	Koheesiomurtuma 4. pinnoitekerroksessa
	Y	Liiman koheesiomurtuma
Kahden kerroksen välinen murtuma = Adheesiomurtuma	A/B	Adheesiomurtuma alustan ja 1. pinnoitekerroksen välillä
	B/C	Adheesiomurtuma 1. ja 2. pinnoitekerroksen välillä
	C/D	Adheesiomurtuma 1. ja 2. pinnoitekerroksen välillä
	D/E	Adheesiomurtuma 3. ja 4. pinnoitekerroksen välillä
	-/Y	Adheesiomurtuma liiman ja pintakerroksen välillä
	Y/Z	Adheesiomurtuma liiman ja vetokappaleen välillä

Usein samaan aikaan voi esiintyä useaa erilaista murtumatyyppiä. Tulosten arvioinnissa murtumapinta-alalta havaitut murtumatyyppit arvioidaan ja ne ilmoitetaan 10 prosentin tarkkuudella. Murtumapinta-alan raportoinnin lisäksi tuloksena ilmoitetaan vetojännitys, joka vaadittiin murtuman muodostumiseen. Seuraava on suositeltava tapa ilmoittaa tulokset:

6 MPa, 30 % B, 70 % B/C

Eli murtumaan vaadittu vetojännitys oli 6 MPa ja murtumapinta-alan arvioinnissa havaittiin 30 % pinta-alalla ensimmäisen pinnoitekerroksen koheesiomurtuma ja 70 % pinta-alalla adheesiomurtuma ensimmäisen ja toisen pinnoitekerroksen välillä.

Ilmoitettu murtolujuus σ lasketaan yhtälöllä:

$$\sigma = F / A$$

Yhtälössä F on murtovoima, yksikkönä newton ja A on vetokappaleen pinta-ala (murtumapinta-ala) neliömillimetreinä. Murtolujuuden yksikkö on megapascal. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

Standardin mukaisesti määrittämiä tehdään kuusi kappaletta tai osapuolten sopima määrä. Olennaisia huomioitavia asioita vetokokeessa ovat seuraavat asiat:

- Vetokappaleiden liimaamiseen käytettävän liiman on oltava tarkoitukseen soveltuva eli sen tartuntavoiman oltava riittävän suuri ja sen laatu sellainen, ettei se vaurioita pinnoitekerrosta tai välineitä.
- Ennen irtivetoa tulee leikata pinnoitteen läpi pinnoite rikki alustaan asti vetokappaleen kehää pitkin, jotta pinnoitekerroksen sisäiset voimat eivät vääristä mittaustulosta.
- Irtivedossa voima on kohdistettava kohtisuoraan alustaan nähden ja sitä lisätään tasaisella alle 1 MPa/s nopeudella.
- Irtimurtumisen on tapahduttava 90 sekunnin kuluessa vetorasituksen aloituksesta.

Testausraportissa tulisi ilmoittaa normaalit testauksen, näytteiden valmistuksen ja materiaalien tunnistetiedot, olosuhdetiedot, käytettyjen välineiden ja liiman tiedot, sekä tietysti tulokset. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

Vetokokeen tarkkuudesta ei ole saatavilla tietoja, johtuen irtoamiskohdan ja murtumatyyppin arvioinnin harkinnanvaraisuudesta. Tartunnan arviointiin vetokoe on kuitenkin hyödyllinen, koska sillä saadaan suhteellisia arvoja, jolloin se soveltuu esimerkiksi pinnoitteiden tartunnan voimakkuuden vertailuun, kun näytteet on valmistettu huolellisesti ja riittävän yhdenmukaisesti.

Tässä diplomityössä vetokokeella saadaan vertailukelpoisia maalin tartunnan arvoja tutkittavien esikäsittelyjen välillä, selvitetään tartunnan voimakkuus ennen keinovanhennusta ja arvioidaan keinovanhennuksesta aiheutuneet muutokset tartunnassa. Vetokoemenetelmänä tässä diplomityössä käytetään standardin SFS-EN ISO 4624 menetelmää B; testataan tartuntaa vain yhdeltä puolelta käyttäen yhtä vetokappaletta.

5.2.5 Huononemisen arviointi visuaalisesti

Standardi SFS-EN ISO 4628 käsittelee maali- ja lakkapinnoitteiden huononemisen arviointia. Sen keskeiset osat ovat ensimmäisestä viidenteen, joihin viitataan myös maalauksen laboratoriotestejä käsittelevän standardin SFS-EN ISO 12944-6 hyväksyntäkriteereissä.

Standardin SFS-EN ISO 4628 osat kahdesta viiteen käsittelevät tyypillisiä pinnoitteiden vaurioita. Nämä osat määrittelevät arviointikriteerit ja vaurioiden luokittelun periaatteet seuraaville tyypillisille maalattujen pintojen vaurioille:

SFS EN ISO 4628-2: Rakkuloitumisaste

SFS EN ISO 4628-3: Ruostumisaste

SFS EN ISO 4628-4: Halkeilemisaste

SFS EN ISO 4628-5: Hilseilyaste

Mainitut vauriot ovat tyypillisiä vaurioita, joita maalikalvoon muodostuu, kun maalattu metallialusta keinovanhennetaan esimerkiksi taulukossa X mainituilla keinovanhennusmenetelmillä tai maalauksen altistuessa todellisessa käyttöympäristössä korroosiorasitukselle. Kyseisiä standardeja käytetäänkin usein osana erilaisten keinovanhennustestien hyväksyntäkriteeristöä tai kenttäolosuhteissa arvioitaessa jonkin maalatun rakenteen kuntoa ja huoltomaalaustarvetta.

Ensimmäinen osa standardissa SFS-EN ISO 4628 määrittelee periaatteet standardin muiden osien käsittelemien pinnoitteen virheiden esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkinnälle. Ensimmäinen osa soveltuu käytettäväksi myös, kun arvioidaan virhetyyppejä, jota standardin muissa osissa ei erikseen kuvata. Periaate arvioinnissa on luokitella pinnoitteen virheiden määrä ja koko ja mahdollisuuksien mukaan havaitun muutoksen voimakkuus. Usein kuitenkin virheiden määrän ja koon arviointi riittää kuvaamaan muutoksen voimakkuuden, jolloin sen erilliselle luokittelulle ei välttämättä ole tarvetta. Voimakkuuden luokittelu voi olla tarpeen, jos maalipinnoitteen huononemisen arviointia tehdään pitkäkestoisesti osana jonkin rakenteen kunnossapitoa. Luokitteluasteikoksi on määritelty 0...5, jossa luokitus nolla tarkoittaa, ettei virhettä ole havaittavissa ja luokitus viisi tarkoittaa virheen olevan niin voimakas, ettei luokittelun jatkaminen pidemmälle ole tarkoituksenmukaista. Pääasiassa virheiden arvioinnissa ja luokittelussa sovelletaan ensimmäisessä osassa kuvattuja virheiden määrän ja koon luokituksia, mutta joillekin virhetyypeille on kyseistä virhetyyppeä käsittelevässä standardin osassa määritelty paremmin tarkoitukseen soveltuvia luokituksia. Taulukossa XII esitetään standardin osien 1...5 määrittämät virheiden määrä- ja kokoluokitukset. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

Taulukko XII Standardin SFS-EN ISO 4628 osissa 1...5 määriteltyt pinnoitteen virheiden määrä- ja kokoluokitukset. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

Pinnoitteen virheiden luokittelu:		
Luokitus	^a SFS EN ISO 4628-1: Yleispätevä merkintäjärjestelmä ja muut virheet ^b SFS EN ISO 4628-2: Rakkuloitumisaste ^c SFS EN ISO 4628-3: Ruostumisaste	^d SFS EN ISO 4628-4: Halkeilemisaste ^e SFS EN ISO 4628-5: Hilseilyaste
	Määrä:	Koko:
0 ^{a, b, d, e} Ri 0 ^c	a, b) Ei mitään, ts. ei havaittavissa olevia muutoksia c) Ruostunut alue 0 % d) ei mitään, ts. ei havaittavia halkeamia e) Hilseillyt alue: 0 %	a, b, c, d, e) ei havaittavissa 10 x suurennuksella
1 ^{a, b, d, e} Ri 1 ^c	a, b) hyvin harvoja, ts. pieni, tuskin merkittävä määrä virheitä c) Ruostunut alue 0,05 % d) hyvin harvoja, ts. pieni, tuskin merkittävä määrä halkeamia e) Hilseillyt alue: 0,1 %	a, b, c, d) havaittavissa ainoastaan 10 x tai sitä pienemmillä suurennuksilla e) Hilseilleen alueen koko 1 mm saakka
2 ^{a, b, d, e} Ri 2 ^c	a, b) joitain, ts. pieni mutta merkittävä määrä virheitä c) Ruostunut alue 0,5 % d) harvoja, ts. pieni mutta merkittävä määrä halkeamia e) Hilseillyt alue: 0,3 %	a, b, c, d) juuri ja juuri havaittavissa paljain silmin (0,2 mm saakka) e) Hilseilleen alueen koko 3 mm saakka
3 ^{a, b, d, e} Ri 3 ^c	a, b) kohtalainen määrä virheitä c) Ruostunut alue 1 % d) kohtalainen määrä halkeamia e) Hilseillyt alue: 1 %	a, b, c, d) selvästi havaittavissa paljain silmin (suurempi kuin 0,2 mm ja 0,5 mm:iin saakka) e) Hilseilleen alueen koko 10 mm saakka
4 ^{a, b, d, e} Ri 4 ^c	a, b) merkittävä määrä virheitä c) Ruostunut alue 8 % d) merkittävä määrä halkeamia e) Hilseillyt alue: 3 %	a, b, c) suurempi kuin 0,5 mm ja 5 mm:iin saakka d) suuria halkeamia, leveys suurempi kuin 0,5 mm ja 1 mm:iin saakka e) Hilseilleen alueen koko 30 mm saakka
5 ^{a, b, d, e} Ri 5 ^c	a, b) tiheä kuvio virheitä c) Ruostunut alue 40...50 % d) tiheä halkeilukuvio e) Hilseillyt alue: 15 %	a, b, c) suurempi kuin 5 mm d) erittäin suuria halkeamia. leveys yleensä suurempi kuin 1 mm e) Hilseilleen alueen koko yli 30 mm
Halkeilemisvaurioiden tyypit: a) pintahalkeamat, jotka eivät täysin läpäise pintamaalia (eli mikrohalkeilu) b) halkeamat, jotka läpäisevät pintamaalin sen alla olevien kalvojen ollessa käytännöllisesti katsoen vaurioitumattomia c) halkeamat, jotka läpäisevät koko pinnoiteyhdistelmän.		Hilseilyvaurioiden tyypit: a) kerrokset hilseilevät alla olevasta kerroksesta b) koko pinnoiteyhdistelmä hilseilee alustasta.

Virheiden arviointi tulee suorittaa hyvässä valaistuksessa, joka tarkemmin kuvataan standardissa SFS-EN ISO 13076. Kutakin pinnoitteen vauriotyyppiä käsittelevässä osassa on

esimerkkivalokuvat. Näiden ja taulukkoon XII koottujen sanallisten kuvausten avulla arvioidaan arvosteltavan pinnoitteen vaurioiden määrä ja koko. Arvioinnin tulos ilmoitetaan esimerkiksi seuraavasti:

rakkuloitumisaste 2(S2), eli määrä 2/koko 2.

ruostumisaste Ri3 (S4), eli tarkasteltavasta alueesta 1 % on ruostunut ja ruostepisteiden koko on välillä 0,5 - 1 mm.

halkeilemisaste 2(S3)b, eli määrä 2/koko 3 ja halkeamat läpäisevät pintamaalin, mutta eivät sen alla olevia maalikalvoja.

hilseilyaste 3(S2)b, eli määrä 3/koko 2 ja pinnoite hilseilee irti alustasta.

Lisäksi tuloksia voi tarkentaa sanallisilla tarkennuksilla. Esimerkiksi kuvailemalla erilaisten vaurioiden kokoja hajontaa, sijainteja tai muotoja. Arvioinnin raportoinnissa on oleellisten tunnistetietojen ja tulosten lisäksi ilmoitettava valaistus, jossa arviointi on suoritettu. (Suomen standardoimisliitto, 2016)

Tässä diplomityössä suoritetaan näytteiden rakkuloitumisen, soveltuvasti ”ruostumisen”, halkeilun ja hilseilyn arviointi edellä kuvatuilla menettelyillä keinovalkaisuun päätyttyä. Tyypillisesti nämä vauriot muodostuvat, kun metallia suojaavan maalikalvon tartunta alustaan ei ole riittävän voimakas estämään metallin pinnalla tapahtuvien korroosioreaktioiden aiheuttamaa maalin irtoamista. Kuten tässä diplomityössä on esitetty, alumiinilla maalin tartuntaan vaikuttaa olennaisesti pinnan esikäsittely ennen maalausta ja esikäsittely tavallisesti myös parantaa alumiinin korroosionkestävyyttä. Tällöin siis, jos keinovalkaisuun jälkeen pinnalta ei havaita tässä luvussa käsiteltäviä vaurioita, on tutkittava esikäsittelyprosessi toiminut tarkoituksen mukaisesti. Varsinkin, jos esikäsittelyprosessissä vaurioita havaitaan. Arviointi standardin mukaisilla kriteereillä on perusteltua myös, jotta tuloksien avulla voidaan arvioida millaisissa raskausluokissa näytteiden mukaiset maalausprosessit soveltuvat käyttöön alumiinipinnoilla.

5.2.6 Maalaamattomien konversiokäsittelyjen näytteiden arviointi

Näytteiden keinovalkaisu tehdään neutraalilla suolasumukokeella, jota käsittelevän standardin mukaan metallisia näytteitä tulisi arvioida valkaisuun jälkeen standardin SFS-EN ISO 10289 mukaisesti. Tässä diplomityössä menetellään näin niiden näytteiden kohdalla, joita ei ole maalattu. Tarkoituksena on saada tietoa, miten tutkittavat esikäsittelyprosessit parantavat alumiinin korroosionkestävyyttä. Tämä tieto on hyödyllinen, jos tietty pinta esikäsitellään täysin, mutta vain osa siitä maalataan ja lopulta valmis pinta päättyy käyttöön korroosiota aiheuttavaan ympäristöön.

Standardi SFS-EN ISO 10289 määrittelee menetelmän metallien ja epäorgaanisella pinnoitteella, kuten esimerkiksi konversiopinnoituksella, pinnoitetun metallin vaurioiden arviointiin, kun näytteet on altistettu keinovanhennukselle tai luonnolliselle rasitukselle. Näytteistä arvioidaan kaksi asiaa:

R_p eli *protection rating* eli suojausluokitus eli miten arvioitava pinnoite suojaa perusmetallia korroosiolta tai miten tutkittu metalli kestää korroosiota

ja

R_A eli *appearance rating* eli ulkonäköluokitus eli miten arvioitava pinnoite tai metalli kestää visuaalisesti korroosiorasituksen.

Taulukkoon XIII on koottu standardin SFS-EN ISO 10289 määrittämät luokitukset suojaus- ja ulkonäköluokituksille ja pinnoitteen huononemisen tyyppien tunnusmerkinnät.

Taulukko XIII Standardin SFS-EN ISO 10289 suojaus- ja ulkonäköluokittelu ja pinnoitteen huononemisen tyyppien merkintä. (Suomen standardoimisliitto, 2001)

Vaurioitunut alue A (%)	Luokitus R_p tai R_A	Virhetyyppien merkintä	Kuvaus
Ei vaurioita	10	A	Väriin muutos, joka on aiheutunut muusta kuin perusmetallin korroosiotuotteista.
$0 < A \leq 0,1$	9	B	Himmentyminen, pinnoitteen korroosion ollessa vähäistä tai näkymätöntä.
$0,1 < A \leq 0,25$	8	C	Anodisen pinnoitteen korroosiotuotteet.
$0,25 < A \leq 0,5$	7	D	Katodisen pinnoitteen korroosiotuotteet.
$0,5 < A \leq 1,0$	6	E	Pinnoitteen kuoppakorroosio. Korroosiokuopat eivät todennäköisesti ylety perusmetalliin asti.
$1,0 < A \leq 2,5$	5	F	Pinnoitteen irtoaminen, hilseily tai lohkeilu.
$2,5 < A \leq 5,0$	4	G	Pinnoitteen rakkuloituminen.
$5,0 < A \leq 10$	3	H	Pinnoitteen halkeilu.
$10 < A \leq 25$	2	I	Pinnoitteen säröily.
$25 < A \leq 50$	1	J	"Variksen jalan" tai "tähden" muotoiset pinnoitteen vauriot.
$50 < A$	0	Muutoksen voimakkuus: erittäin pieni = vs kohtalainen = m pieni = s hyvin suuri = x	

Näytteet arvioidaan ennen keinovanhennusta ja keinovanhennuksen jälkeen. Näytteiden arviointi tulee suorittaa hyvässä ja tasalaatuisessa valaistuksessa, sekä näytteitä tulee tarkastella useasta eri kulmasta, jotta mahdollisimman hyvin havaittaisiin kaikki muutokset. Arviointi suoritetaan silmämääräisesti ja vaurioina pidetään sellaisia muutoksia, jotka voidaan havaita ilman apuvälineitä. Tarpeen vaatiessa ennen keinovanhennuksen jälkeistä arviointia näytteet voidaan puhdistaa varovasti miedolla pesuaineella ja vesihuuhtelulla kuitenkin siten, että puhdistus ei vaikuta luokitukseen.

Suojausluokitus R_p määritetään seuraavalla yhtälöllä:

$$R_p = 3 (2 - \log A)$$

Yhtälössä A on prosenttiosuus kokonaispinta-alasta, jolla pinnoitettu metalli on korrodoitunut. Luku A voidaan määrittää mittaamalla tai huolellisella arvioinnilla, jos mittaus ei ole mahdollinen. Saatu suojausluokituksen arvo R_p pyöristetään lähimpään kokonaislukuun, kuten taulukossa XIII esitetään. Edellä esitetty yhtälö soveltuu käytettäväksi, kun A on suurempi kuin 0,046416 %. Tällöin näytteet, joissa pinnoitetun metallin korroosio on hyvin vähäistä saavat luokituksen 10, joka tarkoittaa, että havaittavia korroosiovaurioita ei käytännössä ole. Suojausluokituksen määrittelyssä voidaan käyttää apuna standardin liitteiden pistekaavioita ja valokuvia. Pinnoitteen ollessa anodinen suhteessa perusmetalliin on huomioitava, että voimakkaasta korroosiotuotteiden muodostumisesta aiheutuen perusmetallin korrodoituneen alueen määrittäminen luotettavasti voi olla hyvin vaikeaa.

Ulkonäköluokitus R_A määritellään arvioimalla taulukossa XIII kuvattujen pinnoitteen vaurio-tyyppien olemassaolo ja kunkin havaitun vaurion osuus tarkasteltavasta pinta-alasta, kuten taulukossa esitetään. Tämän jälkeen määritellään subjektiivisesti arvioiden havaittujen muutosten voimakkuus määreisiin erittäin pieni ”vs”, pieni ”s”, kohtalainen ”m” tai hyvin suuri ”x”. Suojaus- ja ulkonäköluokituksen tuloksen voi ilmoittaa suorituskykyluokituksena R_p / R_A . Merkintätavassa suojausluokitus ilmoitetaan ensin ja tämän jälkeen ilmoitetaan ulkonäköluokitus, jossa ensin annetaan luokitusluku, tämän jälkeen muutosten voimakkuus ja viimeisenä virhetyyppi. Tulosta voidaan tarkentaa myös sanallisesti. Esimerkiksi merkintä ”5 / 2 m A” tarkoittaa, että perusmetallin pinta-alasta on ruostunut 1 – 2,5 % ja 10 – 25 % pinta-alasta on muuttanut väriään kohtalaisen voimakkaasti. (Suomen standardoimisliitto, 2001)

5.3 Tuloksien laadullinen arviointi

Tämän diplomityön ohjaavaksi standardiksi valitun maalauksen laboratoriotestejä käsittelevän standardin SFS-EN ISO 12944-6 mukaisesti rinnakkaisnäytteiden määrä kussakin keinovalmistustestissä tulisi olla kolme tai vaihtoehtoisesti osapuolten sopima määrä. Kolmesta rinnakkaisnäytteestä kahden tulee läpäistä testit, jotta maalausjärjestelmä soveltuu käyttöön testatussa rasitusluokassa. Tässä diplomityössä taulukon X keinovalmistuksista suoritetaan neutraali suolasumukoe. Koska erilaisia näytteitä tässä diplomityössä on kohtalaisen paljon, valmistetaan testeihin kutakin esikäsittelyä ja maalattua näytettä kaksi kappaletta. Näistä toisella varmistetaan maalausprosessin laadullinen onnistuminen ennen keinovalmistusta ja toinen keinovalmistetaan ja arvioidaan keinovalmistuksen päätyttyä. Vertailunäytteinä mukana olevia näytteitä, joissa esikäsittelynä on vain liuotinpuhdistus tai

raesuihkupuhdistus, valmistetaan vain yhdet kappaleet kunkin alumiiniseoksen ja maalaus-tyypin yhdistelmällä. Näytteitä, jotka esikäsitellään tutkittavilla konversiokäsittelyillä, mutta ei maalata valmistetaan vain yksi kappale kullakin alumiiniseoksen ja esikäsitteilyn yhdistelmällä.

Ennen keinovalvannusta neutraalilla suolasumukokeella näytteiden pinnoitus tulee dokumentoida huolellisesti ja pinnoitustyössä on noudatettava materiaalien valmistajien ohjeita. Dokumentoidulla näytteiden valmistuksella varmistetaan, että testien tulokset voidaan mahdollisimman tarkasti kohdentaa osoittamaan tietyn pinnoitusprosessin toimivuus. Kun on dokumentoitu, millaista maalausprosessia näytteet kuvaavat, varmistetaan niiden vaatimusten mukainen laatu ennen keinovalvannusta suorittamalla taulukossa XIV mainitut testit. Vaatimusten mukaisuus todetaan sillä, täyttääkö testattu näyte taulukon XIV sarakkeen ”Vaatimukset” kriteerit.

Taulukko XIV Standardin SFS-EN ISO 12944-6 arviointimenetelmät ja hyväksyntäkriteerit ennen keinovalvannusta. (Suomen standardoimisliitto, 2018)

Arviointimenetelmä	Vaatimukset	Olosuhteet
ISO 2409, Poikkileikkaus	Luokitus 0...2	Vain jos maaliyhdistelmän kuivakalvonpaksuus on pienempi tai yhtä suuri kuin 250 µm (mitattu arvo ilman korjausta, kalibroitu viimeistelyllä pinnalla).
ISO 4624, Mene- telmä A tai B, Vetotestaus	Minimi vetoarvo 2,5 MPa jokaiselle mittaukselle 0 % virhe tarttumisessa hiiliteräksen/ metalloituneen teräksen ja ensimmäisen kalvon välillä (ellei vetoarvot ole vähintään 5 MPa)	Vaaditaan, että muodostettu voima on säädetty ja on lineaarinen standardissa ISO 4624 kuvatulla tavalla, esim. käyttämällä automaattista hydraulista testauslaitetta. Tarttuvuuden vetotestaus ei ole sallittua. Varmista, että leikkaat vetokappaleen kehää pitkin hiiliteräkselle saakka. Vähintään kolme vetokappaletta levyä kohti on vedettävä pois.

Kun näytteet on altistettu 720 tunnin neutraalille suolasumurasitukselle, ne arvioidaan taulukossa XV kuvatuilla menetelmillä ja näytteiden laatua arvioidaan vertaamalla tuloksia taulukon sarakkeen ”Vaatimukset” kriteeristöön. Taulukossa esitetystä poiketen viillon osalta arvioidaan korroosion lisäksi myös maalin irtoaminen. Näiden määritys suoritetaan edellä kappaleessa 5.2.2 kuvatun mukaisesti ja ohjeellisena tuloksen laadun kriteerinä käytetään taulukon XV vaatimusta.

Taulukko XV

Standardin SFS-EN ISO 12944-6 arviointimenetelmät ja hyväksyntäkriteerit keinovalvontajärjestelmän jälkeen. (Suomen standardoimisliitto, 2018)

Arviointimenetelmät	Vaatimukset	Arvioinnin aika	Olosuhteet/Huomautukset
ISO 4628-2, Kupliminen	0 (S0)	Välittömästi	-
ISO 4628-3, Ruostuminen	Ri 0	Välittömästi	-
ISO 4628-4, Halkeilu	0 (S0)	Välittömästi	-
ISO 4628-5, Hilseily	0 (S0)	Välittömästi	-
Viillon korroosio suola-sumutestin jälkeen	Maksimi 1,5 mm viillon korroosio keskiarvona	Mahdollisimman pian, mutta viimeistään 8 tunnin kuluttua testin päättymisestä	Riippumatta teräsalustan suojaamiseksi käytettävän korroosion-suojayhdistelmän tyypistä, korroosion mittaus viillossa on vain teräksen korroosiota varten. Kuumasinkitty tai termisesti ruiskutettu metallipinnoite katsotaan osaksi korroosiosuojayhdistelmää eikä osaa alustaa. Korroosion arviointi viillossa on suoritettava liitteen A (A.2) mukaisesti käyttäen mittauslaitetta, jonka tarkkuus on 0,1 mm. Keskimääräinen korroosioarvo ilmoitetaan 0,1 mm:n tarkkuudella.
Viillon korroosio syklisen vanhentamistestin jälkeen	Maksimi 3,0 mm viillon korroosio keskiarvona	Mahdollisimman pian, mutta viimeistään 8 tunnin kuluttua testin päättymisestä	Riippumatta teräsalustan suojaamiseksi käytettävän korroosion-suojayhdistelmän tyypistä, korroosion mittaus viillossa on vain teräksen korroosiota varten. Kuumasinkitty tai termisesti ruiskutettu metallipinnoite katsotaan osaksi korroosiosuojayhdistelmää eikä osaa alustaa. Korroosion arviointi viillossa on suoritettava liitteen A (A.2) mukaisesti käyttäen mittauslaitetta, jonka tarkkuus on 0,1 mm. Keskimääräinen korroosioarvo ilmoitetaan 0,1 mm:n tarkkuudella.
ISO 2409, Poikkileikkaus	Luokitus 0...2	arviointi 7 päivän kuluttua standardissa ISO 3270 kuvatulla vakioilmastossa	Vain jos maaliyhdistelmän kuivakalvonpaksuus on pienempi tai yhtä suuri kuin 250 µm (mitattu arvo ilman korjausta, kalibroitu viimeistellyllä pinnalla).
ISO 4624, Menetelmä A tai B, Vetotestaus	Minimi vetoarvo 2,5 MPa jokaiselle mittaukselle 0 % virhe tarttumisessa hiiliteräksen/ metalloituneen teräksen ja ensimmäisen kalvon välillä (ellei vetoarvot ole vähintään 5 MPa)	arviointi 7 päivän kuluttua standardissa ISO 3270 kuvatulla vakioilmastossa	Vaaditaan, että muodostettu voima on säädetty ja on lineaarinen standardissa ISO 4624 kuvatulla tavalla, esim. käyttämällä automaattista hydraulista testauslaitetta. Tarttuvuuden vetotestaus ei ole sallittua. Varmista, että leikkaat vetokappaleen kehää pitkin hiiliteräkselle saakka. Vähintään kolme vetokappaletta levyä kohti on vedettävä pois.

Tämän diplomityön tuloksien tulkinnan osalta on huomioitava, että taulukon XV hyväksyntäkriteerit soveltuvat noudatettaviksi kaikissa muissa rasitusluokissa paitsi korkeimmissa luokissa C5-VH, CX ja Im4. Näihin standardi SFS-EN ISO 12944-9 määrittää taulukosta poikkeavia hyväksyntäkriteerejä vetotestille, maalin vaurioitumiselle liituumalla, viillosta lähtevän korroosion voimakkuudelle ja katodiselle sidospurkautumiselle. (Suomen standardoimisliitto, 2018) Tämä tarkoittaa tuloksien olevan kuitenkin kohtuullisen edustavat, kun

arvioidaan tutkittujen maalausprosessien soveltuvuutta käytettäväksi jossakin tietyssä ilmastollisessa korroosiorasitusluokassa.

6 Tutkimuksen suoritus

Tässä luvussa kuvataan tämän diplomityön kokeellisen osuuden suoritus. Luvussa määritellään näytematriisi, näytteiden valmistus, keinovalaistus ja arviointi.

6.1 Näytematriisi

Tutkimuksen tarkoitus oli tutkia kemiallisten esikäsittelyprosessien vaikutusta maalauksen toimivuuteen alumiinipinnalla. Tutkittaviksi näkökohdiksi näytematriisin määrittelyssä asetettiin seuraavat asiat:

Alumiiniseoksen vaikutus; toimiiko esikäsittelyprosessit tasalaatuisesti eri seoksille.

Soveltuvuus eri maalausmenetelmien esikäsittelyksi; tutkittavien konversiopinnoitusten toimivuus märkämaalaukselle ja jauhemaalaukselle.

Miten tutkittavat konversiopinnoitukset vertautuvat pinnan mekaaniseen esikäsittelyyn (SaS, pyyhkäisysuihkupuhdistus).

Miten tutkittavat konversiopinnoitukset vertautuvat esikäsittelemättömään pintaan (vain liuotinpuhdistus).

Miten tutkittavat konversiopinnoitukset vaikuttavat alumiinin korroosiokestävyyteen, kun käsiteltyä pintaa ei maalata.

Taulukossa XVI esitetään tutkimuksen näytematriisi. Näytematriisissa on esitetty kunkin näytteen tunnistenumerointi, alumiiniseos, esikäsittelyn ja maalauksen tiedot ja kullekin näytteelle suoritettavat testit.

Taulukko XVI (1/3)

Tutkimuksen näytematriisi. Näytteiden numerointi ja niiden esikäsittely-, maalaus- ja alumiiniseostieto, sekä näytteille tehtävät testit.

NÄYTTEEN NUMERO	ESIKÄSITTELY				MAALAUUS	ALUMIINISEOS				TESTIT							
	Zirkonium-kromikonversio	Zirkonium-kromikonversio	Zirkonium-kromikonversio	Zirkonium-kromikonversio	Mätkämaalauus, ISO 12944-5/C4-05-EP/PUR, NDT = 160 µm	Polyesterjauhemaalauus, NDT = 100 µm	EN AW-5754 H22	EN AW-6060 T6	EN AW-6082 T6	ISO 2409 Hilariittikoke	ISO 4624 Vetokoe	ISO 9227 Neutraali suolasumukoe 720 tuntia	ISO 4628-8 Korroosio ja maalin irtoaminen villiosta	ISO 4628-2 Rakkautumisasete	ISO 4628-3 Ruostumisasete	ISO 4628-4 Halkeilemisaste	ISO 4628-5 Hilselyaste
11	X				X		X					X	X	X	X	X	X
25	X				X		X					X	X	X	X	X	X
29	X				X			X				X	X	X	X	X	X
43	X				X				X			X	X	X	X	X	X
10		X			X		X					X	X	X	X	X	X
24		X			X		X					X	X	X	X	X	X
39		X			X			X				X	X	X	X	X	X
53		X			X				X			X	X	X	X	X	X
2			X		X		X					X	X	X	X	X	X
2b			X		X		X			X	X						
16			X		X		X					X	X	X	X	X	X
16b			X		X		X			X	X						
30			X		X			X				X	X	X	X	X	X
30b			X		X			X		X	X						
44			X		X				X			X	X	X	X	X	X
44b			X		X				X	X	X						
3				X	X		X					X	X	X	X	X	X
3b				X	X		X			X	X						
18				X	X		X					X	X	X	X	X	X
17				X	X		X			X	X						
32				X	X			X				X	X	X	X	X	X
32b				X	X			X		X	X						
45				X	X				X			X	X	X	X	X	X
45b				X	X				X	X	X						
6				X	X		X					X	X	X	X	X	X
6b				X	X		X			X	X						
20				X	X		X					X	X	X	X	X	X
20b				X	X		X			X	X						
34				X	X			X				X	X	X	X	X	X
34b				X	X			X		X	X						
48				X	X				X			X	X	X	X	X	X
48b				X	X				X	X	X						

Taulukko XVI (2/3)

Tutkimuksen näytematriisi. Näytteiden numerointi ja niiden esikäsittely-, maalaus- ja alumiiniseostieto, sekä näytteille tehtävät testit.

NÄYTTEEN NUMERO	ESIKÄSITTELY					MAALAU	ALUMIINISEOS				TESTIT									
	Raasutinkupudistus, SaS, Alumiinioksid, grit	Uuotinyhntä, etanoli	Zirkonumkonversioipinotus	Zirkonum-kromkonversioipinotus	Silaanikonversioipinotus	Märkämaalaus, ISO 12944-5/C405-EP/PUR, NDFT = 160 µm	Polyesterjauhemaalaus, NDFT = 100 µm	EN AW-1050 H14	EN AW-5754 H22	EN AW-6060 T6	EN AW-6082 T6	ISO 2409 Hilaristikoke	ISO 4624 Vetokoe	ISO 9227 Neutraali suolasumukoe 720 tuntia	ISO 4628-8 Korroosio ja maaliin irtoaminen villiosta	ISO 4628-2 Rakkautumaste	ISO 4628-3 Ruostumiste	ISO 4628-4 Halkelimeste	ISO 4628-5 Hilselyaste	ISO 10289 Epioorganisen pinnoitteen vaurioituminen
7	X						X	X						X	X	X	X	X	X	
21	X						X		X					X	X	X	X	X	X	
35	X						X			X				X	X	X	X	X	X	
49	X						X				X			X	X	X	X	X	X	
9		X					X	X						X	X	X	X	X	X	
23		X					X		X					X	X	X	X	X	X	
37		X					X			X				X	X	X	X	X	X	
51		X					X				X			X	X	X	X	X	X	
1			X				X	X						X	X	X	X	X	X	
1b			X				X	X				X	X							
8			X				X	X						X	X	X	X	X	X	
15			X				X		X					X	X	X	X	X	X	
15b			X				X		X			X	X							
22			X				X		X					X	X	X	X	X	X	
38			X				X			X				X	X	X	X	X	X	
29b			X				X			X		X	X							
36			X				X			X				X	X	X	X	X	X	
52			X				X				X			X	X	X	X	X	X	
43b			X				X				X	X	X							
4				X			X	X						X	X	X	X	X	X	
4b				X			X	X				X	X							
13				X			X	X						X	X	X	X	X	X	
17b				X			X		X					X	X	X	X	X	X	
18b				X			X		X			X	X							
27				X			X		X					X	X	X	X	X	X	
31				X			X			X				X	X	X	X	X	X	
31b				X			X			X		X	X							
46				X			X				X			X	X	X	X	X	X	
46b				X			X				X	X	X							
5					X		X	X						X	X	X	X	X	X	
5b					X		X	X				X	X							
19					X		X		X					X	X	X	X	X	X	
19b					X		X		X			X	X							
33					X		X			X				X	X	X	X	X	X	
33b					X		X			X		X	X							
47b					X		X				X			X	X	X	X	X	X	
54					X		X				X	X	X							

Taulukko XVI (3/3)

Tutkimuksen näytematriisi. Näytteiden numerointi ja niiden esikäsittely-, maalaus- ja alumiiniseostieto, sekä näytteille tehtävät testit.

NÄYTTEEN NUMERO	ESIKÄSITTELY				MAALAU	ALUMIINISEOS				TESTIT										
	Raeseuhkupuuhdistus, SaS, Alumiiniloksidit, grit	Liutoinpyyhintä, etanoli	Zirkoniumkonversiopinnoitus	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus		Polyesterjauhemaalaus, NDT = 100 µm	Märkämaalaus, ISO 12944-5/C4-05-EP/PUR, NDT = 160 µm	EN AW-1050 H14	EN AW-5754 H22	EN AW-6060 T6	EN AW-6082 T6	ISO 2409 Hilaristikoke	ISO 4624 Vetokoe	ISO 9227 Neutraali suolasumukoe 720 tuntia	ISO 4628-8 Korrosio ja maalin irtoaminen villiosasta	ISO 4628-2 Rakkulotumissaste	ISO 4628-3 Ruostumisaste	ISO 4628-4 Halkeilumissaste	ISO 4628-5 Hilsielvyaste	ISO 10289 Epäorgaanisen pinnon vaurioituminen
14			X				X						X ¹							X
28			X					X					X ¹							X
42			X						X				X ¹							X
56			X							X			X ¹							X
12								X					X ¹							X
26								X					X ¹							X
40									X				X ¹							X
47										X			X ¹							X
41				X					X				X ¹							X
55				X						X			X ¹							X

¹ = Neutraali suolasumukoe 240 tuntia

Näytteiden kokonaismäärä oli seitsemänkymmentäyhdeksän. Nämä jakautuivat kolmeen toista ryhmään. Ryhmiä erottava tekijä oli näytteelle suoritettu esikäsittely. Taulukossa XVII luotellaan nämä ryhmät.

Taulukko XVII

Näytematriisin jaottelu ryhmiin esikäsittelyn perusteella.

Ryhmä	Käsittelyn yhteenveto	Ryhmän näytteet
Vertailuryhmä 1	Raesuihkupuuhdistus + Märkämaalaus	11, 25, 29, 43
Vertailuryhmä 2	Liutoinpyyhintä + Märkämaalaus	10, 24, 39, 53
Vertailuryhmä 3	Raesuihkupuuhdistus + Jauhemaalaus	7, 21, 35, 49
Vertailuryhmä 4	Liutoinpyyhintä + Jauhemaalaus	9, 23, 37, 51
Märkäryhmä 1	Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus	2, 2b, 16, 16b, 30, 30b, 44, 44b
Märkäryhmä 2	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus	3, 3b, 18, 17, 32, 32b, 45, 45b
Märkäryhmä 3	Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus	6, 6b, 20, 20b, 34, 34b, 48, 48b
Jauheryhmä 1	Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalaus	1, 1b, 8, 15, 15b, 22, 38, 29b, 36, 52, 43b
Jauheryhmä 2	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus	4, 4b, 13, 17b, 18b, 27, 31, 31b, 46, 46b
Jauheryhmä 3	Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus	5, 5b, 19, 19b, 33, 33b, 47b, 54
Maalaamaton ryhmä 1	Zirkoniumkonversiopinnoitus	14, 28, 42, 56
Maalaamaton ryhmä 2	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus	12, 26, 40, 47
Maalaamaton ryhmä 3	Silaanikonversiopinnoitus	41, 55

Saatavilla olleesta koelevymateriaalista, tutkimusvälineistön kapasiteetista, näytteiden valmistuksen maantieteellisestä hajautumisesta ja käytössä olevien resurssien vuoksi rinnakkaisia näytteitä ei ollut, kuin vain viidelle erilaiselle yhdistelmälle. Näille yhdistelmille rinnakkaisnäytteiden määrä oli kaksi. Nämä yhdistelmät olivat seuraavat:

EN AW 1050 + Zirkoniumkonversiopinnoitus + Polyesterijauhemaalaus

EN AW 5754 + Zirkoniumkonversiopinnoitus + Polyesterijauhemaalaus

EN AW 6060 + Zirkoniumkonversiopinnoitus + Polyesterijauhemaalaus

EN AW 1050 + Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Polyesterijauhemaalaus

EN AW 5754 + Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Polyesterijauhemaalaus

Kaikki muita näytteitä oli vain yksi kutakin yhdistelmää kohden. Kuitenkin tulosten luotettavuuden parantamiseksi rinnakkaisia näytteitä oli maalin tartunnan tutkimiseen; näytteet, jotka testattiin ennen keinovalkaisuun ja sen jälkeen testatut yhdenmukaiset näytteet. Samaa näkökulmaan liittyen myös ennen keinovalkaisuun maalin tarttuvuuden tutkimiseen käytetyt näytteet arkistoitiin, jotta niiden ominaisuuksia voidaan myöhemmin tutkia, jos tällaiselle on tarve.

6.2 Näytteiden materiaalit

6.2.1 Alumiiniseokset

Näytteiden alumiiniseoksiksi valittiin kolme teollisuudessa yleisesti käytettävää alumiiniseosta EN AW-5754, EN AW-6060 ja EN AW-6082, sekä teollinen seostamaton alumiinilaatu EN AW-1050. Diplomityön teettäjän arvioin mukaan kolmea ensin mainittua seosta käytetään monissa erilaisissa teollisissa sovelluksissa maalattuna.

Näytteeksi valitun puhtaan eli seostamattoman alumiinin nimikejärjestelmän mukainen nimike oli EN AW-1050. Sen puhtausaste oli 99,5 % ja tila eli aiemman käsittelyn kuvaus oli H14. Tällaisessa alumiinissa on pieniä määriä epäpuhtautena alumiinin raaka-aineesta bauksiitista peräisin olevaa rautaa ja piitä. Tila H14 tarkoittaa, että alumiini on kylmämuokattu kylmävalssauksella ja sen kovuus on ½-kova. Puhdasta alumiinia käytetään teollisesti esimerkiksi taloustavaroissa ja erilaisten aineiden säilytys- ja käsittelyastioissa, sähkötekniisissä sovelluksissa ja joissakin tapauksissa laitteiden ja koneiden osissa tai rakennusmateriaalina. Käyttökohteet ovat usein sellaisia, että puhdasta alumiini maalataan verrattain vähän. Tässä diplomityössä seoksen tarkoitus on toimia vertailukohtana sen arviointiin, miten alumiinin seostus vaikuttaa maalipinnoitteen toimivuuteen. (Teknologiateollisuus, 2006)

5000-sarjan alumiiniseoksissa pääseosaine on magnesium. Näistä näytteeksi valittiin seos EN AW-5754, jonka tila oli H22 eli se on kylmämuokattu ja päästöhehkutettu ja se on ¼-kova. Erityisesti korkean pitoisuutena (yli 3 %) magnesium lisää voimakkaasti seoksen veto- ja murtolujuutta, sekä korroosionkestävyyttä myös meriolosuhteissa. Seosta EN AW-5754 käytetään usein käyttökohteissa, joissa vaaditaan rakenteelta voimakkaamman ympäristöolosuhderasituksen kestävyttä, kuten esimerkiksi vene- ja laivanrakennuksessa, sekä erilaisissa laitteissa, joita käytetään korkeamman rasituksen käyttöympäristöissä. (Teknologiaeollisuus, 2006) Tällaisissa käyttötarkoituksissa muodostuu usein myös tarve alumiinin maalaukselle, jotta sen ulkonäkö saadaan muutetuksi tai alumiini suojattua ilmastolliselta korroosiolta tai kemikaaliroiskeilta. Peruste tämän seoksen valinnalle tutkittavaksi tässä diplomityössä on, että kun seosta EN AW-5754 maalataan, on hyvin mahdollista, että maalattu pinta päätyy käyttöön korkeamman korroosiorasituksen käyttöympäristöön. Tällöin ennen maalausta pinnalle tehdyn esikäsittelyn on oltava tarkoitukseen soveltuva ja sen parannettava maalipinnoitteen kiinnipysyvyyttä.

6000-sarjan alumiineissa seosaineina on pii ja magnesium. Näiden seosten muokattavuus ja työstettävyys sekä korroosionkestävyys- ja lujuusominaisuudet ovat hyviä. Näin ollen niitä käytetään usein rakennemateriaalina erilaisissa käyttökohteissa, kuten rakentamisessa ja ajoneuvoissa, sekä laivoissa. Koska käyttö on laajaa, on myös 6000-sarjan alumiinien maalaaminen yleistä. Mikäli materiaalilta tarvitaan lujuus- ja korroosionkesto-ominaisuuksia, oletettavasti tällaisen rakenteen tulee kestää käyttöympäristössään vaurioitumatta mahdollisimman pitkään. Tällöin 6000-sarjan alumiinista valmistetun rakenteen käyttöiän pidentämiseksi tai sen ulkonäön muuttamiseksi maalaamalla on usein tarve. Näyte seoksiksi valittiin seokset EN AW-6060 ja EN AW-6082. Näistä EN AW-6060 on erittäin yleinen alumiiniprofiileissa käytettävä materiaali, sillä sen pieni magnesium- ja piipitoisuus tekevät siitä helposti pursotettavan. Näitä 6060-seoksessa on tavallisesti noin 0,5 %. Seoksessa EN AW-6082 näiden pitoisuus on noin 1 %. Korkeampi magnesium- ja piiseostus parantaa seoksen lujuutta. Tällä seoksella myötöraja on vähintään 300 MPa, joka tarkoittaa seoksen hyvää soveltuvuutta rasituksen alaiseen rakenteeseen. (Teknologiaeollisuus, 2006) Molempien näytteiksi valittujen 6000-sarjan alumiinien lämpökäsittelytila oli niille hyvin yleinen T6 eli seokset on liuoshehkutettu ja keinovalvohennettu.

EN AW-1050, EN AW-5754 ja EN AW-6082 näytteet valmistettiin leikkaamalla ne 2 mm paksusta levystä. EN AW-6060 näytteet valmistettiin leikkaamalla näytepalat 100 mm leveästä ja 3 mm paksusta lattaprofiilista. Näytteiden mitat valittiin standardien SFS-EN ISO 9227 ja SFS-EN ISO 12944-6 ohjeistuksien mukaisesti. Levyistä leikattujen koelevyjen mitat olivat 150 x 100 x 2 mm ja profiilista leikattujen 150 x 100 x 3 mm.

6.2.2 Maalit

Näytteiden märkämaaliksi valittiin epoksi-polyuretaanimaaliyhdistelmä. Standardin SFS-EN ISO 12944 viidenteen osaan on luetteloitu eri rasitusluokkiin soveltuvia maaliyhdistelmiä. Tässä diplomityössä käytetty yhdistelmä on lähellä sanotun standardin yhdistelmää ISO 12944-5/C4.05-EP/PUR, jossa maalikalvojen lukumäärä on kaksi ja kokonaisnimelliskuivakalvonpaksuus 180 mikrometriä. Järjestelmän pohjamaalin sideaineena on epoksi ja pohjamaalauksen nimelliskuivakalvonpaksuus on 80 – 160 mikrometriä. Pintamaalina käytetään maalia, jonka sideaine on polyuretaani ja nimelliskuivakalvonpaksuus noin 40 – 80 mikrometriä. Tämä maaliyhdistelmä valittiin käyttöön, koska se on diplomityön teettäjän arvion mukaan yleisesti teollisuusmaalauksessa käytettävä maaliyhdistelmä. Toinen olennainen näkökulma maalin valinnassa oli, että standardin SFS-EN ISO 12944 mukaan kyseinen yhdistelmä soveltuu käytettäväksi teräspinoilla korkeintaan rasitusluokissa C4-L ja C4-M, kun esikäsittelynä on raesuihkupuhdistus. Tässä diplomityössä kokeellisen osuuden keinovanhennusjakson pituudeksi määritettiin 720 tuntia, joka vastaa maalausjärjestelmän testausta rasitusluokkiin C3-VH, C4-H ja C5-M. Tällöin valitun maaliyhdistelmän arvioitiin olevan tarkoitukseen sopiva, koska keinovanhennusjakson pituus on suurempi, kuin mihin valittu yhdistelmä standardin mukaisesti soveltuu käytettäväksi. Testattaessa maaliyhdistelmää rasitusluokkaan C4-M neutraalin suolasumukokeen koejakson pituus olisi 480 tuntia. Lähtökohtaisesti siis näytteisiin valitun maaliyhdistelmän odotettiin mahdollisesti läpäisevän 720 tunnin neutraalin suolasumukokeen, mutta ei kuitenkaan varmasti. Olennainen tekijä mahdollisuudessa läpäistä korkeamman rasitusluokan koejakso on koko maalausprosessin ja varsinkin esikäsittelyn laadullinen onnistuminen. Eli tämän diplomityön viitekehyksessä tutkittavien konversiokäsittelyjen suorituskky, kun niitä käytetään korroosioympäristöön päätyvien maalausten esikäsittelynä. Korkeampien rasitusluokkien maaliyhdistelmien arvioitiin olevan liian suorituskkyisiä, jotta esikäsittelyjen vaikutuksia maalauksen toimivuuteen olisi ollut mahdollista havainnoida. Matalampien rasitusluokkien yhdistelmien taas katsottiin olevan soveltumattomia, sillä matalammissa rasitusluokissa soveltuu käyttöön laajemmin erilaiset esikäsittelymenetelmät tai siis esikäsittelyn toimivuudella ei ole välttämättä niin suurta merkitystä, koska korroosiorasituksen voimakkuus on pienempi. Koska tarkoitus oli tutkia todellisia teollisia esikäsittely- ja maalausprosesseja, arvioitiin ettei ole perusteltua valita matalan rasitusluokan maaliyhdistelmään ja testata se reilusti liian pitkällä keinovanhennusjaksolla. Riskinä tällaisessa on, että näytteet vaurioituisivat keinovanhennuksessa niin voimakkaasti ettei tutkittavien konversiokäsittelyjen toimivuutta pystyisi tarkoituksen mukaisesti arvioimaan.

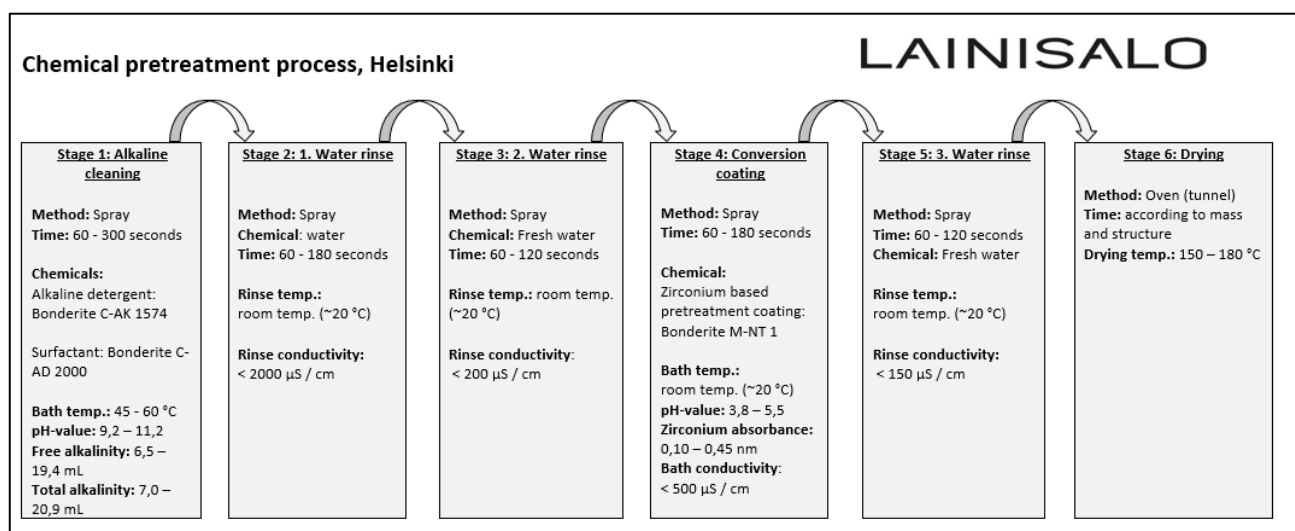
Jauhemaaliksi valittiin polyesterisideaineinen jauhemaali, joka maalin valmistajan ilmoittaman tiedon mukaan soveltuu käyttöön kemiallisesti esikäsitellyillä teräspinoilla räsitusluokassa C4 kestävyysajalla alhainen (L), kun kuivakalvonpaksuus on 100 mikrometriä ja kestävyysajalla kohtalainen (M), kun kuivakalvonpaksuus on 160 mikrometriä. Näihin perustuen määriteltiin jauhemaalattavien näytteiden maalaukseksi yksikerrosjauhemaalaus nimelliskuivakalvonpaksuudella 80 – 120 mikrometriä. Tämän arvioitiin olevan soveltuva tämän diplomityön tutkimukseen, sillä samoin kuin märkemaalauksen kohdalla, myös jauhemaalattujen näytteiden maalauksen suorituskyky on lähtökohtaisesti hieman liian pieni valitulle neutraalin suolasumukokeen pituudelle. Myös jauhemaalain valinnassa olennainen tekijä oli valita testattavaksi maalausjärjestelmäksi todellinen teollisessa käytössä oleva maalausjärjestelmä.

Näytteissä käytetyt maalit on nimetty liitteeseen XII.

6.3 Näytteiden valmistus

6.3.1 Zirkoniumkonversiopinnoitetut näytteet

Zirkoniumkonversiopinnoitetut näytteet valmistettiin Lainisalo Oy:n Helsingin tuotantolaitoksen kuusivaiheisella kemiallisella esikäsitelyprosessilla. Kuvassa 12 on esitetty prosessin vaiheet.



Kuva 12 Lainisalo Oy:n Helsingin tuotantolaitoksen kemiallinen esikäsitelyprosessi.

Ensimmäisessä vaiheessa käsiteltävä pinta puhdistetaan epäpuhtauksista emäksisellä Kaliumhydroksidipohjaisen pesuaineen, terpeeni-dodekanolipohjaisen pesutensidin ja veden seoksella. Tätä seuraa kaksi huuteluja. Ensimmäisessä huuhtelussa käytetään vesijohtovettä ja toisessa puhdistettua vettä. Neljännessä vaiheessa käsiteltävälle pinnalle levitetään

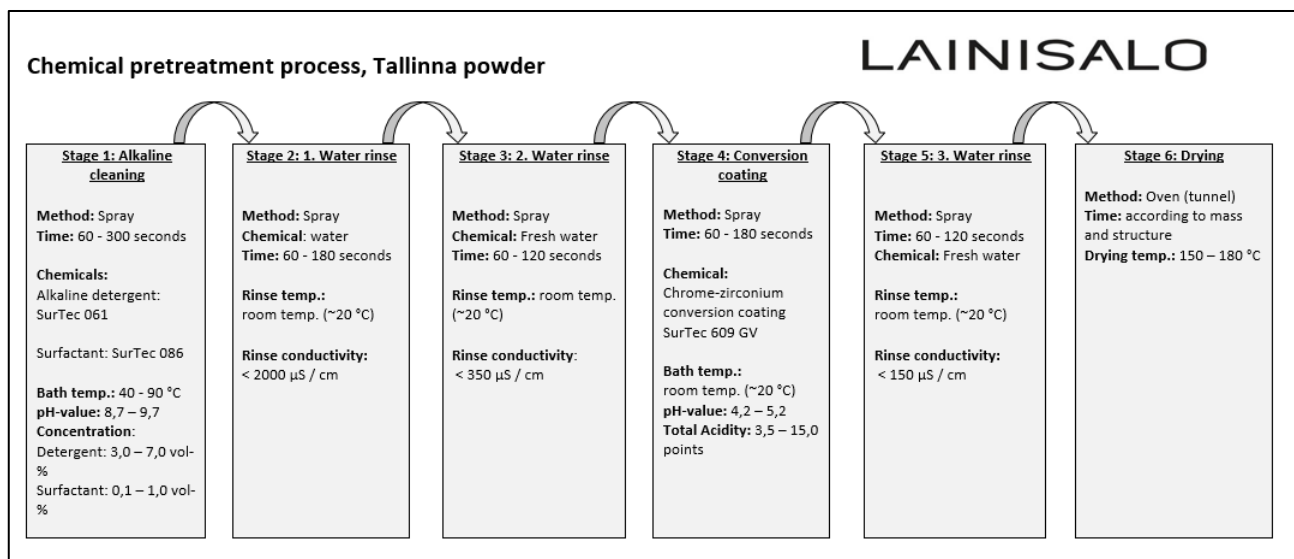
varsinainen zirkoniumkonversiopinnoitusliuos. Konversiopinnoituksen jälkeen pinta huuhdellaan puhdistetulla vedellä ja kuivataan kuivausuunilla.

Kaikki vaiheet tapahtuvat automatisoituna ruiskutuskäsittelynä, jossa liuokset ja huuhteluvedet ruiskutetaan käsiteltävällä pinnalle. Vaiheajat määräytyvät käsiteltävän kappaleen mittojen ja rakenteen perusteella. Esikäsittelyprosessin jälkeen käsitelty pinta on valmis maalattavaksi.

Zirkoniumkonversiopinnoitus suoritettiin kahdessa erässä. Märkämaalatut näytteet pinnoitettiin 22.4.2020 ja jauhemaalatut näytteet, sekä maalaamattomat näytteet 24.4.2020. Näytteiden märkämaalaus suoritettiin 23.4.2020 ja 24.4.2020 Lainisalo Oy:n Ähtärin tuotantolaitoksella. Jauhemaalatut näytteet maalattiin 24.4.2020 välittömästi samalla maalauslinjalla, jolla niille suoritettiin konversiopinnoitus. Konversiopinnoituksen ja maalauksien prosessidokumentaatio esitetään liitteessä I.

6.3.2 Zirkonium-kromikonversiopinnoitetut näytteet

Zirkonium-kromikonversiopinnoitus suoritettiin diplomityön teettäjän tytäryhtiön maalauslinjalla. Maalauslinjan esikäsittelyprosessissa on kuusivaihetta. Kuvassa 13 on kuvattu prosessi.



Kuva 13 Lainisalo Powder Painting Oü:n kemiallinen esikäsittelyprosessi.

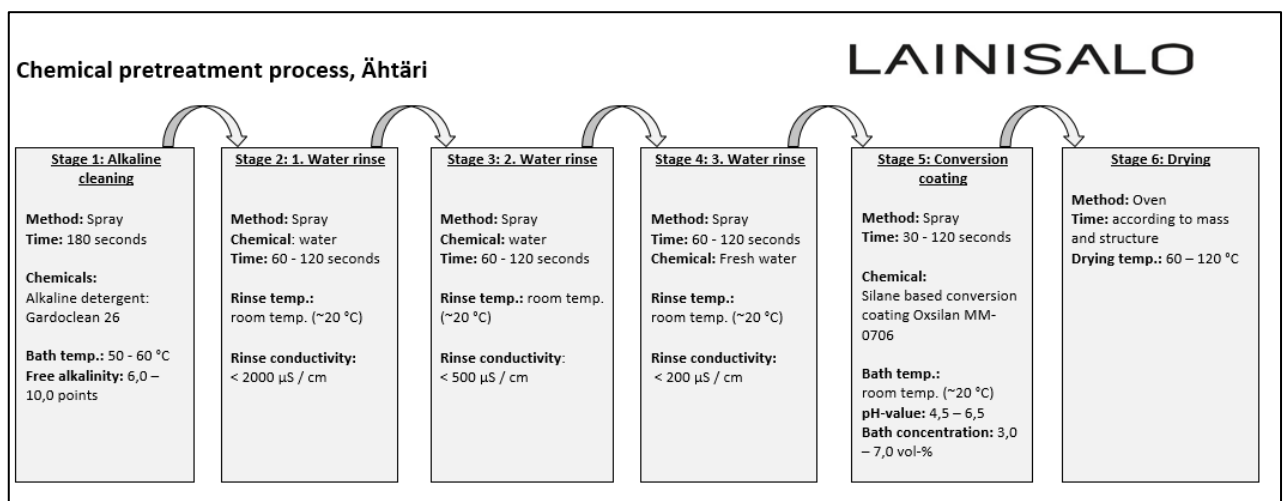
Prosessissa käsiteltävä pinta on ripustettu kuljettimeen koukulla ja kuljetin kuljettaa pintaa eteenpäin prosessivaiheesta toiseen valitulla nopeudella. Käsittelyliuokset ja huuhteluvedet ruiskutetaan käsiteltävään pintaan. Ensimmäisessä vaiheessa pinta puhdistetaan alkaalisella pesukylvyllä. Pesuliuos huuhdellaan pinnalta kahdella huuhtelulla, joita seuraa

puhdistetun pinnan konversiopinnoitus zirkonium-kromikonversiopinnoitusliuoksella. Pinnoituksen päätteeksi huuhtelulla pinnalta poistetaan heikosti pintaan kiinnittyneet konversiopinnoituksen tuotteet. Viimeisenä vaiheena pinta kuivataan, jonka jälkeen se on valmis maalattavaksi.

Kaikki Zirkonium-kromi-konversiopinnoitetut näytteet konversiopinnoitettiin 7.4.2020 ja jauhemaalattut näytteet maalattiin välittömästi samalla maalauslinjalla esikäsittelyn jälkeen. Märkämaalattut näytteet maalattiin 23.4.2020 ja 24.4.2020 Lainisalo Oy:n Ähtärin tuotantolaitoksella. Esikäsittelyn ja maalauksien prosessidokumentaatio esitetään liitteessä I.

6.3.3 Silaanikonversiopinnoitetut näytteet

Silaanikonversiopinnoitetut näytteet valmistettiin Lainisalo Oy:n Ähtärin tuotantolaitoksen esikäsittelylinjalla. Prosessissa on kuusi vaihetta, jotka jakautuvat kolmeen kammioon. Kuvassa 14 kuvataan prosessin vaiheet.



Kuva 14 Lainisalo Oy:n Ähtärin tehtaan esikäsittelyprosessi.

Vaiheet yhdestä neljään tapahtuvat ensimmäisessä kammiossa. Prosessi alkaa käsiteltävän pinnan puhdistuksella alkalisella pesuliuoksella, joka on luonteeltaan orgaanisten ja epäorgaanisten suolojen vesiliuos. Pesukäsittelyä seuraa kolme huuhtelua, jossa huuhteluveden puhtausaste kasvaa vaiheittain. Näiden jälkeen käsiteltävä pinta siirtyy seuraavaan kammioon, jossa pinnalle ruiskutetaan silaanikonversiopinnoitusliuos. Konversiopinnoitteen levityksen jälkeen käsiteltävä pinta siirtyy prosessissa eteenpäin kuivauskammioon, jossa konversiopinnoitettu pinta kuivataan. Tämän jälkeen käsiteltävä pinta on valmis maalattavaksi.

Silaanikonversiopinnoitettujen näytteiden konversiopinnoitus suoritettiin Lainisalo Oy:n Ähtärin tehtaalla 23.4.2020. Muista näytteistä poiketen näytteiden konversiokäsittelyä ei tehty

varsinaisella tuotantolinjalla. Käsittely toteutettiin upotuskäsittelynä, jossa koelevyt upotettiin suoraan liuosaltaisiin. Tällä menettelyllä näytteiden valmistus pystyttiin paremmin toteuttamaan ilman muun tuotannon häiriintymistä. Käsittelyssä noudatettiin vaihekohtaisesti kemikaalitoimittajan käyttöohjeen käsittelyaikoja, jotka olivat yhdenmukaisia myös varsinaisen prosessin vaiheaikoihin. Märkämaalattavat silaanikonversiopinnoitetut näytteet maalattiin heti käsittelyn jälkeen samalla, kun muutkin tämän diplomityön märkämaalatut näytteet. Märkämaalauksessa pohjamaalaus suoritettiin 23.4.2020 ja pintamaalaus 24.4.2020. Jauhemaalattavat näytteet maalattiin Lainisalo Oy:n Helsingin tuotantolaitoksella 24.4.2020 yhdessä zirkoniumkonversiopinnoitettujen näytteiden kanssa. Silaanikonversiopinnoitettujen näytteiden valmistuksen prosessidokumentaatio esitetään liitteessä I.

6.3.4 Raesuihkupuhdistetut ja liuotinpuhdistetut näytteet

Raesuihkupuhdistetut näytteet esikäsiteltiin Lainisalo Oy:n Helsingin tuotantolaitoksen raesuihkupuhdistuslaitteistolla. Märkämaalattavat näytteet raesuihkupuhdistettiin 22.4.2020 ja jauhemaalattavat näytteet 24.4.2020. Raesuihkupuhdistuksessa rakeena käytettiin särmikästä alumiinioksidia ja näytteet puhdistettiin puhtausasteeseen SaS. Ennen työn suoritusta näytteet puhdistettiin etanolilla. Raesuihkupuhdistuksessa ilman lämpötila oli 23,3 °C ja suhteellinen kosteus 20,0 %.

Näytteet, joissa maalausta edeltävänä esikäsittelynä oli liuotinpuhdistus, esikäsiteltiin 23.4.2020 ja 24.4.2020 juuri ennen maalin levityksen suorittamista. Liuottimena käytettiin etanolia ja puhdistustyö suoritettiin puhtaalla liinalla pyyhkien, kunnes pinnasta ei enää jäänyt likaa liinaan. Ympäristöolosuhteet liuotinpyyhinnän aikana, sekä pyyhinnän ja maalauksen välillä olivat vastaavat, kuin maalaustyön aikana.

6.4 Näytteiden arviointi ennen keinovanhennusta

6.4.1 Maalauksen kuivakalvonpaksuuden mittaaminen ja visuaalinen tarkastelu

Valmiista maalatuista näytteistä mitattiin maalauksen kuivakalvonpaksuus mittalaitteella, joka täyttää standardin SFS-EN ISO 2808 vaatimukset. Jokaisesta maalatuista näytteestä mitattiin kuivakalvonpaksuus kymmenestä yksittäisestä kohdasta. Mittaustuloksista kirjattiin muistiin kunkin näytteen pienin ja suurin yksittäinen kuivakalvonpaksuus, sekä kuivakalvonpaksuuden aritmeettinen keskiarvo. Ennen mittausten suorittamista mittalaite kalibroitiin laitteen käyttöohjeen mukaisesti käyttäen kalibrointialustana alumiiniseosta EN AW-1050 ja kalibrointiliuskana paksuudeltaan 125,2 µm liuskaa. Märkämaalatuista levyistä pohjamaalin kalvonpaksuus varmistettiin ennen pintamaalin levitystä ja muistiin kirjattiin vastaavat tiedot, kuin yllä mainittu.

Ennen keinovanhennusta ja tartuntatestejä näytteille suoritettiin visuaalinen tarkastelu. Tarkastelu suoritettiin hyvässä valaistuksessa, jossa valaistusvoimakkuus oli noin 1000 luksia.

Kalvonpaksuuden ja visuaalisen tarkastelun tulokset on esitetty liitteessä II.

6.4.2 Hilaristikkokoe ennen keinovanhennusta

Ennen keinovanhennusta varmistettiin kunkin konversiokäsittelyn ja maalatun näytteen oikeellisuus hilaristikkokokeella. Oikeellisuuden arviointikriteerinä käytettiin taulukon XIV arvoja. Maalin tartunnan määrittämisen tarkoitus oli varmistaa, että näyttein esikäsittely ja maalausprosessit olivat toteutettu onnistuneesti, sekä määrittää arvot, joihin mahdollisia keinovanhennuksesta aiheutuneita tartunnan voimakkuuden muutoksia voitiin verrata.

Hilaristikkokoe suoritettiin 6.5.2020. Ilman lämpötila kokeen aikana oli noin 24 °C ja ilman suhteellinen kosteus noin 25 %. Näytteet oli vakioitu lämpötilassa 20 – 25 °C ja ilman suhteellisessa kosteudessa 20 – 40 %. Vakiointiaika oli jauheryhmän 2 näytteillä oli noin 29 päivää ja kaikilla muilla näytteillä noin 12 päivää. Leikkurina käytettiin leikkuri tyyppiä 2a eli käsikäyttöistä moniteräistä leikkuria. Kunkin levyn leikkaukseen valittiin sopiva terä standardin SFS-EN ISO 2409 ohjeiden mukaisesti näytteen maalikalvon kuivakalvonpaksuuden perusteella. Leikkauksiin käytettiin teriä, joiden leikkausurien keskinäinen etäisyys oli 2 tai 3 millimetriä. Irtonainen maali poistettiin leikkausalueelta standardin menetelmällä A.1 eli harjaamalla useita kertoja edestakaisin ristikon molempien viiltojen suuntaisesti. Kullekin näytteelle tehtiin tuloksen luotettavuuden varmistamiseksi kaksi määrittystä. Ennen keinovanhennusta suoritettujen hilaristikkokokeiden tulokset on esitetty liitteessä III.

6.4.3 Vetokoe ennen keinovanhennusta

Toinen sovellettu menetelmä näytteiden vaatimusten mukaisuuden varmistukseen ennen keinovanhennusta oli standardin SFS-EN ISO 4624 mukainen vetokoe. Tämä suoritettiin kullekin märkä- ja jauheryhmän näytteelle. Määrittämiseen käytettiin näytteitä, jotka oli valmistettu yhdenmukaisesti näytteiden kanssa, jotka laitettiin suolasumurasitukseen.

Vetokokeet suoritettiin 6.5.2020, 11.5.2020 ja 16.5.2020. Halkaisijaltaan 19,39 millimetrin vetokappaleet liimattiin vuorokausi ennen irtivetoja. Poiketen taulukon XIV määrittämästä kolme vetokoetta näytettä kohden, suoritettiin kaksi määrittystä kutakin näytettä kohden. Jauheryhmien näytteille tehtiin kolme määrittystä, koska ensimmäisissä määrittämissä vetokappaleiden liimaukseen käytetty liima murtui useassa määrittämissä koheesiomurtumana. Vetokappaleiden liimaukseen käytettiin syanoakrylaattiliimaa ja sovellettiin standardin menetelmää B, jossa tartuntaa testataan vain yhdeltä puolen yhdellä vetokappaleella. Ennen vetokoetta leikattiin vetokappaleen kehää pitkin testattavan maalikalvon läpi alustaan asti

käyttäen käsikäyttöistä leikkaavaa pyöreää terää, jonka halkaisija on vetokappaleen halkaisijaa hieman suurempi. Näytteiden vakiointiaika ennen määrittämiä oli vastaava tai joitakin päiviä pidempi, kuin ennen keinovalvonnasta suoritettussa halaristikokokeessa. Ilman lämpötila vakionnin ja vetokokeiden aikana oli noin 20 – 25 °C ja ilman suhteellinen kosteus 20 – 40 %. Ennen keinovalvonnasta suoritettujen vetokokeiden tulokset esitetään liitteessä IV. Edellä kappaleessa 4.5.1 on kuvattu erilaiset mahdolliset maalauksen vaurioitumisen tyypit. Tässä diplomityössä tuloksien kirjauksissa käytetyt merkinnät ja murtumatyypit selitetään taulukossa XVIII.

Taulukko XVIII Vetokokeen tulosten merkinnät ja murtumatyypit.

Merkinnät:	Murtumatyypit:
A = alusta	Adheesiomurtumat:
B = märkänäytteiden pohjamaali tai jauhe-	A/B = murtuma alustan ja märkäpohjamaalin tai jauhemaalain välillä
näytteiden jauhemaalai	B/C = murtuma märkäpohjamaalin ja märkäpintamaalin välillä
C = märkänäytteiden pintamaali	-/Y = liiman ja märkäpintamaalin tai jauhemaalain välillä
Y = liima	Y/Z = murtuma liiman ja vetokappaleen välillä
Z = vetokappale	Koheesiomurtumat:
	B = märkäpohjamaalin tai jauhemaalain sisäinen murtuma
	C = märkäpintamaalin sisäinen murtuma
	Y = liiman sisäinen murtuma

6.5 Näytteiden keinovalvonnus

Näytteiden keinovalvonnus toteutettiin standardin SFS-EN ISO 9227 mukaisella neutraalilla suolasumukokeella Lainisalo Oy:n laboratoriossa 1.5.2020 – 31.5.2020. Suolasumukammilaitteisto oli kuvassa 15 esitetty laite Q-Fog CCT-600. Koejakso oli koesuunnitelmassa määritelty 720 tuntia, joka taulukon X mukaisesti soveltuu neutraalin suolasumukokeen pituudeksi, kun tutkitaan maalauksen toimivuutta rasitusluokkiin C3-VH, C4-H ja C5-M. Ennen keinovalvonnuksen aloittamista näytteet vakioitiin olosuhteissa, jossa lämpötila oli noin 20 – 25 °C ja ilman suhteellinen kosteus 20 – 40 %. Vakiointiaika kaikilla märkäryhmillä, vertailuryhmillä, sekä jauheryhmillä yksi ja kolme oli 7 vuorokautta. Jauheryhmällä kaksi vakiointiaika oli 24 vuorokautta.

Ennen suolasumurasituksen aloitusta kuhunkin näytteeseen tehtiin kaksi keinovalvonnasta vauriota viiltämällä, kuten edellä kappaleessa 5.2.2 kuvataan. Lisäksi näytteiden reunat suojattiin teipillä. Kuvassa 16 havainnollistetaan näytteiden tila, jollaisina ne asetettiin suolasumukammioon.



Kuva 15 Keinovanhennukseen käytetty suolasumulaite Q-Fog CCT-600.

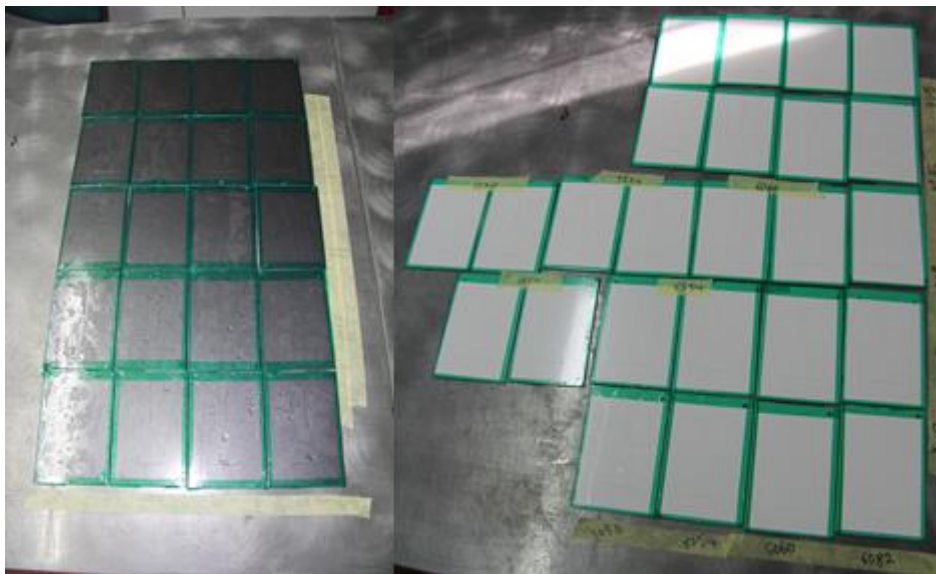


Kuva 16 Märkämaalatut näytteet ennen suolasumun aloitusta.

Näytteet asetettiin suolasumukammioon tarkoitukseen sopiviin koetelineisiin, jolloin niiden sijainti kammiossa oli sovelletun standardin mukainen. Koeliuos valmistettiin liuottamalla Ph.Eur. -laadun natriumkloridia ionivaihdettuun veteen. Käytetyn veden johtokyky oli alle 1 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Valmistetun liuoksen laskennallinen väkevyys oli 50 g/l ja sen pH-arvo säädettiin analyysilaatuisella natriumhydroksidiliuoksella. Koejakson aikana laitteen toimivuutta valvottiin suolasumun keruuastioilla, mittaamalla kerätyn liuoksen pH-arvoa, sekä valvomalla

koetilan lämpötilaa ja laitteen toimintaa. Kokeen aikana suoritettiin kertaalleen laitteen syövyttävyyden määrittäminen teräksisillä vertailunäytteillä mainitun standardin ohjeiden mukaisesti. 352 tunnin koejakson jälkeen näytteiden paikat vaihdettiin kammiossa siten, että suolasumun sumutuspisteen vasemmalla puolella olleet näytteet siirrettiin oikealle puolelle ja oikealla puolella olleet näytteet vasemmalle puolelle. Laitteen toimivuuden valvonnan tiedot ja syövyttävyyden määrittäksen tulokset esitetään liitteessä V.

Koejakson päätyttyä näytteet huuhdeltiin juoksevassa vedessä ja kuivattiin. Kuvassa 17 esitetään näytteet välittömästi koejakson päätyttyä. Valokuvat näytteistä huuhtelun ja kuivauksen jälkeen ovat liitteessä VI.



Kuvat 17 Maalatut näytteet 720 tunnin suolasumurasituksen päätettyä. Vasemmalla märkämaalatut ja oikealla jauhemaalatut näytteet.

6.6 Näytteiden arviointi keinovanhennuksen jälkeen

6.6.1 Pinnoitteiden huononemisen arviointi

Pinnoitteiden huononemisen arviointi suoritettiin 1.6.2020 noin 14 tuntia suolasumun päättymisen jälkeen. Arviointi suoritettiin noin 1000 luksin valaistuksessa soveltamalla standardin SFS-EN ISO 4628 osia yksi, kaksi, kolme, neljä ja viisi. Tarkastelussa jätettiin huomioimatta vauriot, jotka olivat viillon välittömässä yhteydessä, sillä nämä arvioitiin osana viillon arviointia. Standardin teräksen ruostumisastetta käsittelevää osaa kolme sovellettiin tulkitsemalla ruostumiseksi alumiinin korroosio. Arvioinnin tulokset esitetään liitteessä VII.

6.6.2 Korroosio ja maalin irtoaminen viillosta

Maalin irtoaminen viillosta ja alustan korroosio viillon ympärillä määritettiin 1.6.2020 soveltaen standardin SFS-EN ISO 4628 kahdeksannetta osaa. Määrittämiseen käytettiin standardin mittaus- ja laskentamenetelmää. Viiltojen pituus oli 40 millimetriä ja viillon alkuperäinen leveys 0,2 mm. Mittauspisteiksi määritettiin pisteet, jotka olivat noin 6, 12, 18, 24, 30 ja 3,5 millimetriä viillon alkupisteestä. Ennen mittauksia viiltojen ympäriltä poistettiin pinnoite, jonka tartunta alustaan oli heikentynyt. Poistaminen suoritettiin veitsenterällä nostaen käyttäen kohtalaista voimaa.

Määrittäykset suoritettiin, kuten edellä kappaleessa 5.2.2 on kuvailtu. Ensin mitattiin maalin irtoaminen ja tämän jälkeen alustan korroosio. Mittalaitteena käytettiin digitaalista työntömittaa. Mittaustuloksista laskettiin maalin irtoamisen tulos d millimetreissä ja viillosta lähtevän korroosion tulos c millimetreissä. Irtoamisen osalta arvioitiin myös irtoamisen tyyppi luokittelemalla irtoaminen kolmeen tyyppiin:

A/B = ensimmäinen maalikerros irtoaa alustasta

B/C = pintamaali irtoaa pohjamaalista

- = irtoamista ei havaittavissa.

Määrittäyksen tulokset on esitetty liitteessä VIII.

6.6.3 Hilaristikkokoe keinovanhennuksen jälkeen

Standardin SFS-EN ISO 2409 määritelmien mukainen hilaristikkokoe suoritettiin keinovanhennuksessa olleille näytteille noin 13 vuorokautta keinovanhennuksen päättymisen jälkeen 13.6.2020. Ilman lämpötila kokeen aikana oli 24,5 ° C ja ilman suhteellinen kosteus 33,9 %. Olosuhteet olivat vastaavat myös keinovanhennuksen päättymisen ja kokeen aloituksen välisen ajan. Määrittäysten lukumäärä näytettä kohden oli kaksi. Leikkurina käytettiin tyyppin 2a leikkuria ja irtonaisen maalin poistamismenetelmä oli menetelmä A.1 harjaus. Moniteräisen leikkurin terien keskinäinen etäisyys valittiin kullekin näytteelle näytteen kuivakalvonpaksuuden perusteella. Käytössä olivat terä, joissa etäisyys oli 2 mm tai 3 mm. Liitteessä IX esitetään hilaristikkokokeen tulokset.

6.6.4 Vetokoe keinovanhennuksen jälkeen

Standardin SFS-EN ISO 4624 kuvaama vetokoe keinovanhennetuille näytteille suoritettiin vetonappien kokonaismäärän takia kolmessa osassa 6.6.2020, 7.6.2020 ja 8.6.2020. Kullekin näytteelle tehtiin kaksi koetta. Ensimmäisessä erässä tehtiin ensimmäiset irtivedot kaikille jauhemaalatuille näytteille. Toisessa erässä suoritettiin kokeet kaikille märkämaalatuille näytteille. Kolmannessa erässä tehtiin toiset kokeet jauhemaalatuille näytteille. Kokeissa

tartuntaa testattiin standardin menetelmän B mukaisesti näytteen yhdeltä puolen käyttäen yhtä vetokappaletta. Halkaisijaltaan 19,39 millimetrin vetokappaleet liimattiin syanoakrylaattiliimalla vuorokausi ennen jokaista koetta. Kuvassa 18 havainnollistetaan näytteisiin liimatut vetokappaleet. Ennen vetokappaleiden irtivetoa suoritettiin pinnoitteen leikkaus alustaan asti vetokappaleen kehää pitkin samalla vetolaitteen valmistajan valmistamalla työkalulla, jota käytettiin ennen keinovalvannusta tehdyissä vetokokeissa. Ilman lämpötila kokeiden aikana vaihteli 23 ja 25 celsiusasteen välillä, sekä ilman suhteellinen kosteus 33,5 ja 42,7 prosentin välillä.



Kuvat 18 Märkäryhmien näytteisiin keinovalvannuksen jälkeen liimatut vetokappaleet.

720 tunnin neutraalin suolasumukokeen jälkeen suoritettujen vetokokeiden tulokset on esitetty liitteessä X. Erilaiset mahdolliset maalauksen vaurioitumisen tyypit kuvaillaan kappaleessa 4.5.1, sekä tässä diplomityössä käytetyt merkinnät ja murtumatyypit selitetään taulukossa XVIII

6.6.5 Maalaamattomien näytteiden arviointi

Maalaamattomat näytteet pidettiin neutraalissa suolasumurasituksessa 240 tuntia 6.5.2020 – 16.5.2020. Näytteet olivat samassa kammiossa, kuin maalatut näytteet. Suolasumurasi-

tuksen valvontatiedot on esitetty liitteessä V. Näytteet valokuvattiin ennen suolasumurasituksen aloitusta ja sen jälkeen, sekä koejakson aikana 24 ja 168 tunnin rasituksen jälkeen. Koejakson päätyttyä näytteet poistettiin suolasumukammioista ja niiden annettiin kuivua 30 minuuttia, jonka jälkeen ne huuhdeltiin juoksevalla vedellä. Tämän jälkeen suoritettiin näytteiden arviointi, kuten kappaleessa 5.2.6 kuvaillaan. Valokuvat näytteistä ja arvioinnin tulokset esitetään liitteessä XI.

7 Tulokset

Tämän diplomityön kokeellisen tutkimuksen tulokset esitetään tarkemmin liitteissä. Työssä tarkoituksena oli arvioida konversiokäsittelyjen toimivuutta maalauksen esikäsittelynä arvioiden niiden suorituskykyä standardoiduilla menetelmillä, joita alan teollisuudessa laajalti käytetään. Tässä luvussa käsitellään keskeiset havainnot tutkimustuloksista.

Taulukoissa XIV ja XV esitettiin kriteerit, joilla voidaan arvioida, jonkin maalausjärjestelmän soveltuvuus tiettyyn ilmastolliseen rasitusluokkaan, kun yhdistelmän suorituskykyä tutkitaan laboratoriomenetelmin. Tässä diplomityössä toteutettiin laboratoriotesteistä neutraali suolasumukoe, jossa laadullinen arviointi suoritettiin mainittujen taulukkojen kriteerien mukaisesti. Taulukkoon XIX on laadittu suoritetuista testeistä ja arvioinneista tulosmatriisi, jossa tarkastelleen jokaisen näytteen suoriutuminen kussakin kriteerissä.

Taulukko XIX (1/2)

Tulosmatriisi tutkimuksen tuloksista, miten taulukkojen XIV ja XV vaatimukset täyttyivät kussakin maalatussa näytteessä.

KRITEERI:		VAATIMUS:						
HILARISTIKKO:		Luokitus 0...2						
VETOKOE:		Minimi vetoarvo 2,5 MPa jokaiselle mittaukselle, 0 % virhe tarttumisessa alustan ja ensimmäisen kalvon välillä (ellei vetoarvot ole vähintään 5 MPa)						
KORROOSIO VIILLOSTA:		Maksimi 1,5 mm viillon korroosio keskiarvona						
RAKKULOITUMISASTE:		0 (S0)						
RUOSTUMISASTE:		0 (S0)						
HALKEILEMISASTE:		0 (S0)						
HILSEILYASTE:		0 (S0)						
✓ = VAATIMUS TÄYTTYY					✗ = VAATIMUS EI TÄYTY			
NÄYTERYHMÄ:	NÄYTTEEN NUMERO:	ISO 2409 Hilaristikkokoe	ISO 4624 Vetokoe	ISO 4628-8 Vaurioitumisen viillosta	ISO 4628-2 Rakkuloitumisaste	ISO 4628-3 Ruostumisasaste	ISO 4628-4 Halkeilemisaaste	ISO 4628-5 Hilseilyaste
Vertailuryhmä 1: SaS + Märkä	11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	25	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	29	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	43	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vertailuryhmä 2: Liutinpyyhintä + Märkä	10	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	24	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	39	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	53	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Märkäryhmä 1: Zr-konversio + Märkä	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	2b	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	16b	✓	✓					
	30	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	30b	✓	✓					
	44	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	44b	✓	✓					
Märkäryhmä 2: Zr-Cr-konversio + Märkä	3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	3b	✓	✓					
	18	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	17	✓	✓					
	32	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	32b	✓	✓					
	45	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	45b	✓	✓					
Märkäryhmä 3: Silaanikonversio + Märkä	6	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	6b	✓	✓					
	20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	20b	✓	✓					
	34	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	34b	✓	✓					
	48	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	48b	✓	✓					

Taulukko XIX (2/2)

Tulosmatriisi tutkimuksen tuloksista, miten taulukkojen XIV ja XV vaatimukset täyttyivät kussakin maalatussa näytteessä.

KRITTEERI:		VAATIMUS:						
HILARISTIKKO:		Luokitus 0...2						
VETOKOE:		Minimi vetoarvo 2,5 MPa jokaiselle mittaukselle, 0 % virhe tarttumisessa alustan ja ensimmäisen kalvon välillä (ellei vetoarvot ole vähintään 5 MPa)						
KORROOSIO VIILLOSTA:		Maksimi 1,5 mm viillon korroosio keskiarvona						
RAKKULOITUMISASTE:		0 (S0)						
RUOSTUMISASTE:		0 (S0)						
HALKEILEMISASTE:		0 (S0)						
HILSEILYASTE:		0 (S0)						
✓ = VAATIMUS TÄYTTYY					✗ = VAATIMUS EI TÄYTY			
NÄYTERYHMÄ:	NÄYTTEEN NUMERO:	ISO 2409 Hilaristikkokoe	ISO 4624 Vetokoe	ISO 4628-8 Vaurioitumisen viilosta	ISO 4628-2 Rakkuloitumisaste	ISO 4628-3 Ruostumisasaste	ISO 4628-4 Halkeilemisaste	ISO 4628-5 Hilseilyaste
Vertailuryhmä 3: SaS + Jauhe	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	21	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	35	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	49	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Vertailuryhmä 4: Liuotinpyyhintä + Jauhe	9	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	23	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	37	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	51	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
Jauheryhmä 1: Zr-konversio + Jauhe	1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	1b	✓	✓					
	8	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	15b	✓	✓					
	22	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	38	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	29b	✓	✓					
	36	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	52	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	43b	✓	✓					
Jauheryhmä 2: Zr-Cr-konversio + Jauhe	4	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	4b	✓	✓					
	13	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	17b	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	18b	✓	✓					
	27	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
	31	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓
	31b	✓	✓					
	46	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	46b	✓	✓					
Jauheryhmä 3: Silaanikonversio + Jauhe	5	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	5b	✓	✓					
	19	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
	19b	✓	✓					
	33	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	33b	✓	✓					
	47b	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	54	✓	✓					

Kuten taulukosta XIX havaitaan, suurin osa näytteistä läpäisi toteutetun 720 tunnin neutraalin suolasumukokeen kriteerit täyttäen. Seuraavien ryhmien kaikki näytteet läpäisivät suoritettut testit ja arvioinnit hyväksytysti:

Vertailuryhmä 1: Raesuihkupuhdistus + Märkämaalaus

Vertailuryhmä 2: Liuotinpyyhintä + Märkämaalaus

Vertailuryhmä 3: Raesuihkupuhdistus + Jauhemaalaus

Märkärühmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus

Märkärühmä 2: Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus + Märkämaalaus

Jauheryhmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalaus

Kun alustana on alumiiniseos EN AW-1050, EN-AW-5754, EN AW-6060 tai EN AW-6082, edellä mainittujen ryhmien käsittämällä maalausjärjestelmällä on siis tuloksien perusteella hyvä mahdollisuus toimia vaatimusten mukaisesti, kun valmis maalaus altistuu rasitusluokkien C3-VH, C4-H tai C5-M mukaiselle ilmastolliselle korroosiorasitukselle. Sama arvio pätee tuloksien perusteella myös seuraaville niiden ryhmien näytteille, joiden kaikki näytteet eivät läpäisseet kaikkia laadullisia kriteerejä:

EN-AW-5754 + Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus

EN AW-6082 + Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus

EN AW-6060 + Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus

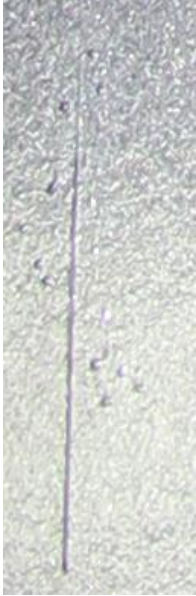

EN AW-6082 + Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus

EN AW-6082 + Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus + Jauhemaalaus.

Näytteet, jotka eivät läpäisseet suoritettua tutkimusta täyttäen kaikki valitut kriteerit on koottu taulukkoon XX. Taulukossa esitetään myös havainnot virheistä.

Taulukko XX (1/2)

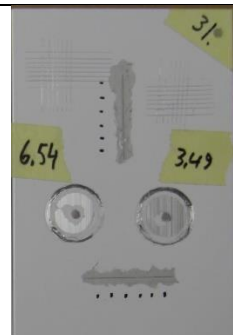
Maalatut näytteet, jotka eivät läpäisseet tutkimusta täysimääräisesti asetetut kriteerit täyttäen.

Näyte	Täyttymätön kriteeri	Havainto
6. EN AW-1050 + Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalau	Rakkuloitumisaste	Rakkuloitumisaste 1(S2). Rakkuloita havaittavissa vain pystysuoran viillon ympärillä. Etäisyys viillosta alle 10 mm. 
9. EN AW-1050 + Liuotinpyyhintä + Jauhemaalau	Vetokoe	Murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa molemmissa määrityksissä.
23. EN AW-5754 + Liuotinpyyhintä + Jauhemaalau	Vetokoe	Murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa molemmissa määrityksissä.
37. EN AW-6060 + Liuotinpyyhintä + Jauhemaalau	Viilto	Korroosio pystysuorasta viillosta yli 1,5 mm. 
51. EN AW-6082 + Liuotinpyyhintä + Jauhemaalau	Vetokoe	Murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa molemmissa määrityksissä.
4. & 13. EN AW-1050 + Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus + Jauhemaalau	Vetokoe	Murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa 3/4 määrityksissä.

Taulukko XX (2/2)

Maalatut näytteet, jotka eivät läpäisseet tutkimusta täysimääräisesti asetetut kriteerit täyttäen.

Näyte	Täyttymätön kriteeri	Havainto
17b. & 27. EN AW-5754, + Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus + Jauhemaalaus	Rakkuloitumisaste	Rakkuloitumisaste 2 (S2). Rakkuloituminen hyvin paikallista.
31. EN-AW-6060, + Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus + Jauhemaalaus	Vetokoe, Viilto, Rakkuloitumisaste	Vetokokeen murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa 1/2 määrittelyssä. Korroosio viilloista yli 1,5 mm. Rakkuloitumisaste 1(S2)
5. EN AW-1050 + Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus	Vetokoe	Murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa molemmissa määrittelyssä
19. EN AW-5754 + Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus	Vetokoe	Murtumatyyppi A/B, tulos alle 5 MPa molemmissa määrittelyssä
33. EN AW-6060+ Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus	Viilto	Korroosio viillosta yli 1,5 mm.



Vertaamalla taulukon XX näytteiden maalauksien kuivakalvonpaksuutta kaikkien näytteiden kuivakalvonpaksuuteen, havaitaan, että keinovalvonnassa vaurioituneiden näytteiden kuivakalvonpaksuudet eivät merkittävästi poikkea niistä näytteistä, jotka eivät vaurioituneet. Tämän ja havaittujen vaurioiden kohtalaisen satunnaisuuden perusteella voidaan arvioida, että vaurioiden syy ei ole ollut liian ohut maalauksen kuivakalvonpaksuus, mikä tunnetusti vaikuttaa olennaisesti maalauksen korroosionkestävyyteen.

Konversiopinnoituksella esikäsiteltyjä ja valituilla maalauksilla maalattuja näytteitä valmistettiin näytekappaleet, joilla testattiin maalin tartunnan voimakkuus hilaristikkokokeella ja

vetokokeella ennen kuin näytteet altistettiin keinotekoiseen korroosioympäristöön. Tulokset on esitetty liitteissä III ja IV. Tuloksista havaitaan, että kaikki tutkitut konversiokäsittelyt mahdollistavat maalin hyvän tartunnan kaikilla tutkituilla alumiiniseoksilla. Hilaristikkokokeessa kaikkien näytteiden tulos oli luokitus nolla. Vetokokeessa tartunnan voimakkuus oli yli 2,5 MPa eikä alustan ja ensimmäisen maalikerroksen välistä murtumatyyppiä A/B havaittu alle 5 MPa arvoilla. Ainoa poikkeus vetokokeissa oli näyte 4b (EN-AN 1050 + Zr-Cr -konversio + jauhemaalaus), jossa murtumatyyppiä A/B havaittiin alle 5 MPa vetoarvolla. Kuitenkaan näytteen dominoiva murtumatyyppi ei ollut adheesiomurtuma alustan ja ensimmäisen maalikerroksen välillä. Ennen suolasumurasitusta suoritetuista maalin tarttuvuuden testeistä voidaan tehdä johtopäätös, että kaikki tutkitut konversiokäsittelyt luovat tutkituilla alumiiniseoksilla hyvän alustan maalin tartunnalle. Hyvällä tässä yhteydessä tarkoitetaan tartunnan voimakkuuden olevan vähintään tämän diplomityön taulukossa XIV esitetyt arvot eli hilaristikkokokeessa luokitus 0...2 ja vetokokeessa tartunnan maksimi arvo yli 2,5 MPa tai yli 5 MPa, jos murtumatyyppi on A/B. Kun tarkastellaan tartuntatestien tuloksia erilaisten käyttöympäristöjen, kuten esimerkiksi ilmastollisten rasitusluokkien, näkökulmasta voidaan päätellä tutkittujen konversiopinnoitusten toimivan hyvin suurella todennäköisyydellä tarkoituksenmukaisesti maalattavan alumiinin esikäsittelynä, jos valmiin maalauksen käyttöympäristö on matalamman tai kohtalaisen ilmastollisen korroosiorasituksen ympäristö. Tällaisia ovat esimerkiksi kuivat sisätilat tai puhdas maaseutuilmasto. Tämä päätelmä perustuu teoriaan, jossa maalin tartunta on hyvä sen levityksen ja tarkoituksenmukaisen vakioinnin jälkeen, voidaan sen ajatella säilyvän hyvänä pitkän ajanjakson myös silloin, kun maalaus ei altistu voimakkaalle korroosioympäristölle, joka heikentäisi kiinnipysyvyyttä. Tätä päätelmää tukee myös kaikkien tartuntatestien tuloksien yhdenmukaisuus; tartunnan mittausten tulokset olivat kohtalaisen yhdenmukaisia kaikkien 24 näytteen välillä.

Taulukossa XXI esitetään vetokokeen tuloksista yhteenveto. Taulukossa erilaisia näytetyppejä on järjestetty sen perusteella, kuinka paljon maalin tartuntalujuus heikkeni prosentuaalisesti toteutetussa neutraalissa suolasumurasituksessa. Taulukon tiedoista havaitaan seuraavat asiat:

- Kaikkien jauhemaalattujen näytteiden tartuntalujuus heikkeni neutraalissa suolasumurasituksessa.
- Märkämaalatuilla näytteissä tartuntalujuus kasvoi useammassa näytteessä, kuin aleni.
- Tartuntalujuudet heikkenivät useammin ja voimakkaammin 6000-sarjan alumiiniseoksilla, sekä silaani- ja zirkoniumkonversiopinnoitetuilla näytteillä.

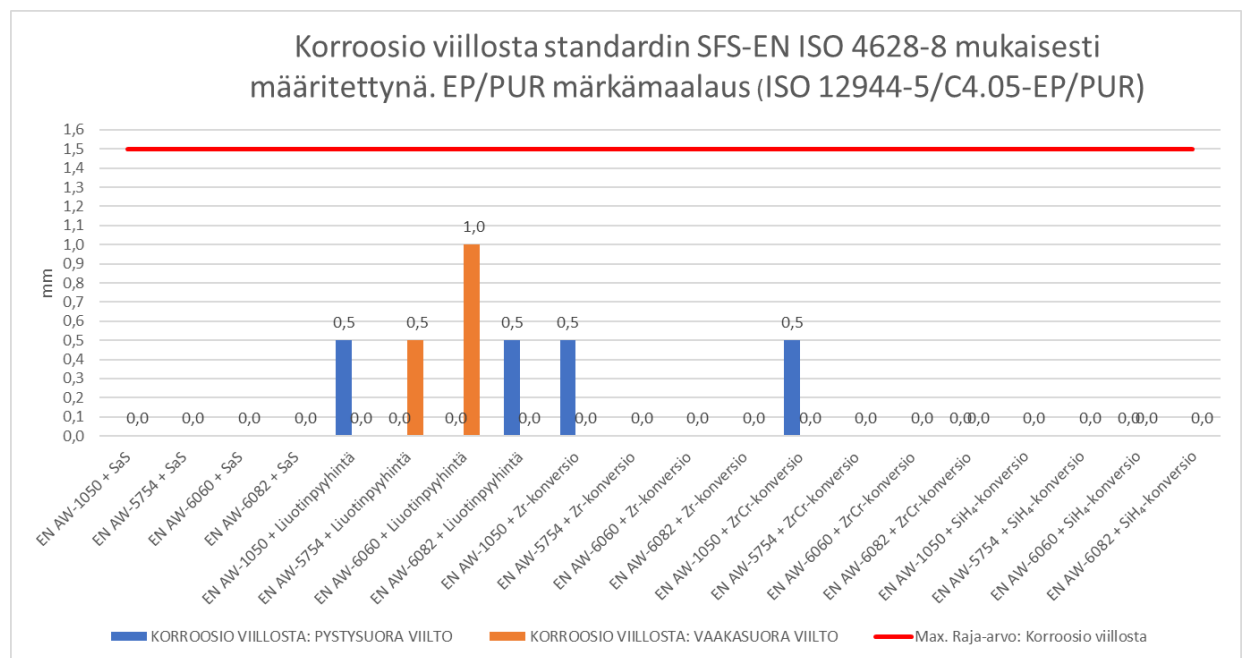
Nämä havainnot esiintyvät tuloksissa kohtalaisen systemaattisesti. Ilmiön esiintymiseen vaikuttaa varmasti usea tekijä, kuten esikäsitteily- ja maalaustapahtumat, sekä maalin ominaisuudet. Tuloksien perusteella voidaan kuitenkin päätellä myös alustan seostuksella olevan vaikutusta maalauksen pitkäaikaistoimivuuteen. Tässä diplomityössä eri seosten näytteiden esikäsitteily- ja maalaustapahtumat suoritettiin kaikille seoksille yhtä aikaa ja yhdenmukaisesti. Tällöin eri seosten välillä nämä ovat varsin yhdenmukaiset. Alumiiniseoksen vaikutuksen merkitystä toimivuuteen tukee myös havainto, että esimerkiksi EN-AW 6060 seoksilla maalin tartuntalujuus heikkeni yhtä lailla jauhemaalatuissa zirkonium-kromi -konversiopinnoitetuilla näytteillä ja silaanikonversiokäsittelyillä näytteillä, vaikka näiden maalaus suoritettiin eri tuotantolaitoksilla. Toisaalta tuloksien avulla ei voida sulkea pois sitä, että EN-AW 6060 -seoksen heikommat tulokset johtuisivat näytteiden valmistustekniikasta. Kyseiset näytteet oli valmistettu pursotetusta lattaprofiilista, kun muut näytteet olivat leikattu valssatusta levystä. Silti tämä on hyödyllinen tieto; itse pintakäsittelytapahtuman lisäksi maalauksen pitkäaikaistoimivuuteen vaikuttaa ääritapauksissa myös pinnoitettavan materiaalin valmistustekniikka, sekä metalliseoksen koostumus ja laatu.

Taulukko XXI

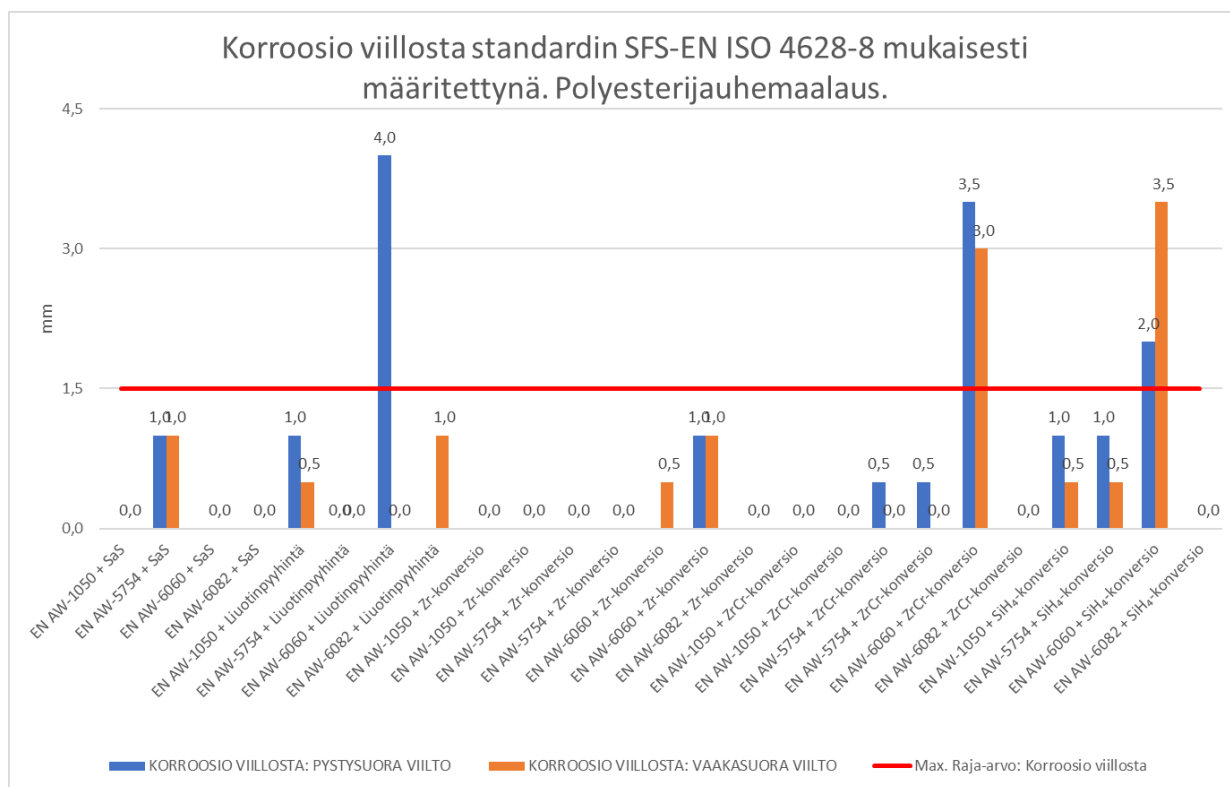
Yhteenvedo vetokoetuloksista ja maalin tartuntalujuuden muutoksista.

Vetokoetuloksien yhteenvedo. Yhteenvedosta jätetty pois ensimmäiset jauhenäytteiden irtivedot (liiman koheesiomurtumat).			Vetokoe tulokset ennen 720 tunnin neutraalia suolasumurasituksen jälkeen		Vetokoe tulokset 720 tunnin neutraalin suolasumurasitusta			Murtolujuuden muutos	
Alumiiniseos:	Selite / Näytteet:	Rivin vetokokeiden lukumäärä	Murtolujuus, keskiarvo (MPa)	Murtolujuus, keskihajonta (MPa)	Rivin vetokokeiden lukumäärä	Murtolujuus, keskiarvo (MPa)	Murtolujuus, keskihajonta (MPa)	%	MPa
EN-AW 6060	Zr-Cr-konversio + jauhemaalaus	2	12,73	5,08	2	5,02	2,16	-61 %	-7,71
EN-AW 6060	silaanikonversio + jauhemaalaus	2	14,79	2,46	2	6,08	0,42	-59 %	-8,72
EN-AW 6060	konversio + jauhemaalaus, kaikki näytteet	6	12,97	3,02	8	7,35	2,63	-43 %	-5,63
EN-AW 5754	silaanikonversio + jauhemaalaus	2	6,77	0,22	2	3,84	0,30	-43 %	-2,93
EN-AW 6082	silaanikonversio + jauhemaalaus	2	7,90	0,18	2	4,63	0,69	-41 %	-3,27
EN-AW 6082	Zr-konversio + jauhemaalaus	2	10,05	1,39	2	6,81	1,58	-32 %	-3,24
EN-AW 1050	silaanikonversio + jauhemaalaus	2	6,77	0,63	2	4,69	0,41	-31 %	-2,08
EN-AW 6060	konversio + maalaus, kaikki näytteet	12	9,24	4,25	14	6,94	1,94	-25 %	-2,29
EN-AW 5754	Zr-konversio + jauhemaalaus	2	8,15	0,18	4	6,18	0,46	-24 %	-1,97
EN-AW 6082	konversio + jauhemaalaus, kaikki näytteet	6	9,34	1,41	6	7,23	2,19	-23 %	-2,12
EN-AW 1050	Zr-konversio + märkämaalaus	2	4,27	0,10	2	3,41	0,36	-20 %	-0,86
EN-AW 6060	Zr-konversio + jauhemaalaus	2	11,41	1,45	4	9,15	2,35	-20 %	-2,26
EN-AW 5754	konversio + jauhemaalaus, kaikki näytteet	6	7,16	0,78	10	5,77	1,22	-19 %	-1,38
EN-AW 6082	Zr-konversio + märkämaalaus	2	4,79	0,83	2	3,94	0,29	-18 %	-0,85
EN-AW 6082	konversio + maalaus, kaikki näytteet	12	6,84	2,71	12	5,74	2,02	-16 %	-1,10
EN-AW 1050	konversio + jauhemaalaus, kaikki näytteet	6	5,38	0,59	10	4,89	0,58	-9 %	-0,49
EN-AW 1050	Zr-Cr-konversio + märkämaalaus	2	3,82	0,14	2	3,50	1,15	-8 %	-0,32
EN-AW 5754	Zr-Cr-konversio + märkämaalaus	2	3,90	0,98	2	3,60	0,35	-8 %	-0,30
EN-AW 5754	konversio + maalaus, kaikki näytteet	12	5,56	1,71	16	5,13	1,28	-8 %	-0,43
EN-AW 1050	Zr-Cr-konversio + jauhemaalaus	2	4,80	0,63	4	4,53	0,49	-6 %	-0,27
EN-AW 1050	konversio + maalaus, kaikki näytteet	12	4,59	0,95	16	4,40	0,83	-4 %	-0,20
EN-AW 6082	Zr-Cr-konversio + jauhemaalaus	3	9,78	1,06	2	9,44	2,14	-4 %	-0,35
EN-AW 5754	Zr-Cr-konversio + jauhemaalaus	2	6,56	0,02	4	6,33	1,06	-3 %	-0,22
EN-AW 6060	silaanikonversio + märkämaalaus	2	6,40	0,11	2	6,19	0,98	-3 %	-0,21
EN-AW 5754	Zr-konversio + märkämaalaus	2	4,16	0,26	2	4,07	0,54	-2 %	-0,09
EN-AW 6082	konversio + märkämaalaus, kaikki näytteet	6	4,34	0,75	6	4,26	0,55	-2 %	-0,08
EN-AW 1050	Zr-konversio + jauhemaalaus	2	5,35	-	4	5,34	0,48	0 %	-0,01
EN-AW 5754	konversio + märkämaalaus, kaikki näytteet	6	3,96	0,54	6	4,07	0,61	3 %	0,10
EN-AW 1050	silaanikonversio + märkämaalaus	2	3,33	0,66	2	3,50	1,15	5 %	0,18
EN-AW 6082	silaanikonversio + märkämaalaus	2	4,39	0,50	2	4,63	0,69	6 %	0,25
EN-AW 6082	Zr-Cr-konversio + märkämaalaus	2	3,84	0,97	2	4,21	0,66	10 %	0,38
EN-AW 1050	konversio + märkämaalaus, kaikki näytteet	6	3,81	0,48	8	4,21	1,30	11 %	0,41
EN-AW 6060	konversio + märkämaalaus, kaikki näytteet	6	5,50	0,80	6	6,41	0,50	16 %	0,91
EN-AW 5754	silaanikonversio + märkämaalaus	2	3,84	0,56	2	4,53	0,78	18 %	0,69
EN-AW 6060	Zr-konversio + märkämaalaus	2	5,44	0,16	2	6,60	0,23	21 %	1,16
EN-AW 6060	Zr-Cr-konversio + märkämaalaus	2	4,67	0,36	2	6,44	0,28	38 %	1,78

Kuviin 19 ja 20 on koostettu yhteenveto maalattujen näytteiden maalikalvon viillosta lähtevän korroosion mittaustuloksista. Kuten kuvista havaitaan, märkämaalatuilla näytteillä ei viilloista juurikaan lähtenyt etenemään maalin irtoamista tai alustan korroosiota. Myös jauhemaalatuilla näytteillä suurimmalla osalla irtoaminen ja korroosio oli vähäistä, eli alle 1,50 mm standardin SFS-EN ISO 4628-8 mukaisesti määritettynä. Viiltojen tarkastelussa havaittiin, että näissäkkin tuloksissa korostuu alumiiniseoksen EN-AW 6060 näytteet, joissa viillosta alkava alustan korroosio oli voimakkainta. Jonkin verran havaittiin eroja maalin irtoamisessa myös horisontaalisen ja vertikaalisen viillon välillä.



Kuva 19 Viillosta lähtevän korroosion mittaustulokset märkämaalatuissa näytteissä.



Kuva 20 Viillosta lähtevän korroosion mittaustulokset jauhemaalatuissa näytteissä.

Pinnoitteiden huononemisen arvioinnissa ei havaittu juurikaan tutkimuksessa sovellettujen standardien mukaisia vauriotyyppejä. Muutamissa näytteissä havaittiin satunnaista ja vähäistä pinnoitteen rakkuloitumista. Niissä levyissä, joissa tätä havaittiin, virheet olivat hyvin paikallisia. Tämän perusteella voidaan arvioida niiden todennäköisimmin aiheutuneen jostakin paikallisesta pinnalle muodostuneesta virheellisestä alueesta sen sijaan, että syynä olisi yleispätevästi jokin alustan, esikäsittelyn tai maalin ominaispiirre. Päättelmää tukee, ettei kyseisiä virheitä havaittu näytteissä, jotka oli esikäsitelty liuotinpuhdistuksella. Tällöin voidaan ajatella, että esikäsitely tai maalausprosessissa on pinnalle muodostunut paikallinen virhe, jossa maalin tartunta alustaan on muita kohtia heikompi. Tällainen voi olla esimerkiksi pinnalle varsinaisen esikäsittelyn jälkeen kuljettimesta tippunut ja edelleen kuivunut nestepisara. Tuloksien analysoinnissa korrelaatiota maalauksen kuivakalvonpaksuuden ja rakkuloitumisen välillä ei havaittu.

Maalaamattomien konversiopinnoitettujen näytteiden suolasumukokeen tuloksista voidaan todeta, että konversiopinnoitteet vaikuttavat alumiiniseosten vaurioitumisen nopeuteen korroosioympäristössä, mutta ne eivät estä alumiinin korroosiota.

8 Johtopäätökset

Tässä luvussa esitetään diplomityön johtopäätökset. Suoritetussa tutkimuksessa tarkasteltaviksi näkökulmiksi oli valittu alumiiniseoksen vaikutuksen tutkiminen, tutkittujen konversiopinnoitusten soveltuminen jauhe- ja märkämaalauksen esikäsittelyksi ja miten ne itsessään vaikuttavat alumiinin korroosion kestävyYTEEN. Seuraavassa tarkastellaan tutkimustuloksia näistä näkökulmista ja arvioidaan tutkimuksen tuloksia. Olennainen huomioitava näkökohta tuloksien arvioinnissa on, että suoritettu tutkimus tosiasiasa kuvaa täsmälleen valmistettujen näytteiden esikäsittelyjen ja maalauksien toimivuutta. Näin ollen on noudatettava huolellista arviointia, jos tutkimuksen tuloksista tekee laajempia yleispäteviä johtopäätöksiä erilaisten esikäsittelyjen ja maalausten toimivuudesta tai vertailee eri tekniikoita keskenään. Tästä syystä tässä diplomityössä ei vertailla tutkittuja konversiopinnoituksia keskenään paremmuuden näkökulmasta.

Diplomityön tutkimuksen suoritus onnistui hyvin. Tuloksellisesti tutkimus oli näkökulmasta riippuen onnistunut tai vähemmän onnistunut. Diplomityön teettäjän näkökulmasta ja siitä, että tarkoitus oli suorittaa tutkimus käyttäen todellisia teollisia tuotantolinjoja ja maalausjärjestelmiä tutkimus oli onnistunut, koska kaikki näytteet kestivät erittäin hyvin tai vähintään kohtalaisesti toteutetun 720 tunnin neutraalin suolasumukokeen. Toisaalta tämä edelleen johtaa näkökulmaan, että tutkimus ei onnistunut täysin niin hyvin, kuin oli odotuksena. Koska kaikki näytteet kestivät keinovanhennuksen ilman suuria eroavaisuuksia, oli vaikeaa havainnoida eri konversiokäsittelyjen toimivuuden ominaisuuksia. Vain konversiokäsittelyjen toimivuuden tarkastelun näkökulmasta hyödyllisempiä tuloksia olisi voinut olla mahdollista saada, jos tutkimus olisi toteutettu määrittelemällä näytteiden maalaukseksi maalaus, jonka suorituskyky valitussa keinovanhennustestissä olisi lähtökohtaisesti ollut selvästi liian heikko. Tämä olisi vaatinut hyvin tiivistä näytteiden vaurioitumisen seuranta suolasumujakson aikana, mikä olisi ollut haastavaa toteuttaa. Tällöin olisi myös suoritettu tutkimus etäänäytynyt periaatteesta noudattaa sovellettavia standardeja mahdollisimman tarkasti. Siten tuloksien hyöty ei välttämättä olisi ollut niin merkittävä, koska usein teollisessa ympäristössä standardoiduilla menetelmillä tuotettua tietoa on helpompi hyödyntää, kuin standardoimattomilla menetelmillä tuotettua tietoa

Verraten odotuksiin kaikki näytteet suoriutuivat yllättävän hyvin neutraalissa suolasumukokeessa. Erityisesti yllätys oli niiden näytteiden maalauksen toimivuus, joissa esikäsittelynä oli pelkkä liuotinpuhdistus. Näiden näytteiden odotettiin vaurioituvan voimakkaasti suolasumukokeessa. Tämä ei kuitenkaan toteutunut. Kun tarkastelee erilaisten maalien käyttöohjeita, annetaan niissä alumiinipintojen esikäsittelyn ohjeeksi yleensä jokin mekaaninen tai kemiallinen esikäsittely, eikä pelkkää liuotinpuhdistusta suositella. Myös diplomityön

teittäjän kokemuksen perusteella alumiinipinnat vaativat esikäsitteilyksi ennen maalausta pelkän liuotinpuhdistuksen sijaan tai lisäksi jonkin varsinaisen mekaanisen tai kemiallisen esikäsitteilyn. Suoritetussa tutkimuksessa kuitenkin myös liuotinpuhdistetut näytteet, erityisesti märkämaalatut, pärjäsivät hyvin. Tästä voidaan päätellä valittujen maalien toimineen tarkoituksenmukaisesti ja vastaavan toimivuudeltaan niiden valmistajan antamia tietoja. Samoin voidaan päätellä huolellisen esikäsitteilyn, sekä sen ja maalin levityksen väliajan pituuden vaikuttavan hyvinkin todennäköisesti maalauksen toimivuuteen. Liuotinpuhdistetut näytteet puhdistettiin siten, että niitä pyyhittiin puhtaaksi, kunnes rättiin ei enää jäänyt likaa levystä. Välittömästi tämän jälkeen suoritettiin maalin levitys. Mahdollisimman lyhyttä väliaikaa tulisikin aina tavoitella, sillä pidemmällä väliajalla todennäköisyys pintojen likaantumiselle tai muille muutoksille väliajan aikana kasvaa.

Raesuihkupuhdistus toimi esikäsitteilymenetelmänä, kuten oli odotettua: kaikista näytteistä parhaiten. Tästä voidaan tehdä johtopäätös seuraava johtopäätös. Maalatessa alumiinia korkeampiin ilmastollisiin rasitusluokkiin, hyvin todennäköisesti odotuksien mukaisesti toimivan maalauksen voi saavuttaa, kun esikäsitteilymenetelmä on huolellinen raesuihkupuhdistus. Raesuihkupuhdistettujen näytteiden tarkoitus oli toimia tutkimuksessa vertailunäytteinä, joihin konversiokäsiteltujen näytteiden suorituskykyä voidaan verrata. Tuloksien perusteella voidaan todeta, että kaikilla tutkituilla alumiiniseosten, konversiokäsittelyjen ja märkämaalauksien yhdistelmällä on mahdollista saavuttaa sama suorituskyky, kuin käyttäen esikäsitteilynä raesuihkupuhdistusta. Tai täsmällisemmin johonkin tiettyyn rajaan asti, joka tämän diplomityön tuloksien perusteella on korkeampi kuin 720 tunnin neutraalia suolasumua vastaavat rasitusluokat C3-VH, C4-H ja C5-M. Tarkkaa rajaa ei kuitenkaan suoritettujen tutkimuksen tuloksien avulla ole mahdollista määrittää.

Tutkimustulosten perusteella voidaan päätellä, että tutkitut konversiokäsittelyt soveltuvat jauhemaalauksen esikäsitteilyksi hyvin, kun alustana on tutkitut alumiiniseokset. Vaikka jauhemaalattujen näytteiden kestävyys keinovanhennuksessa ei ollut aivan yhtä hyvä, kuin märkämaalatuilla näytteillä, voi tuloksien silti arvioida osoittavan esikäsitteilyjen toimivan varsin tarkoituksenmukaisesti. Erityisesti, kun toimivuutta arvioidaan sen tiedon pohjalta, että jauhemaalauksia käytetään usein maalausmenetelmänä sellaisissa sovelluksissa, joissa valmis maalaus ei päädy käyttöön huomattavan voimakkaaseen korroosioympäristöön. Tähän verraten testatut rasitusluokat C3-VH, C4-H ja C5-M ovat kohtalaisen korkeat. Keinovanhennuksen jälkeen suoritetuissa vetokokeissa jauhemaalatuilla näytteillä havaittiin alustan ja ensimmäisen maalikerroksen välistä adheesiomurtumatyyppiä A/B kohtalaisesti. Ennen keinovanhennusta tehdyissä kokeissa tätä murtumatyyppiä näytteistä ei juurikaan havaittu. Tutkimustuloksista ei kuitenkaan voida varmuudella päätellä aiheutuiko tämä

alumiiniseoksen, konversiokäsittelyn vai maalin ominaisuuksista, koska A/B -murtumaa havaittiin kaikilla konversiokäsitellyillä näytteillä ja myös liuotinpuhdistetuilla näytteillä. Raesuihkupuhdistetuilla näytteillä tätä murtumaa ei esiintynyt. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että tutkitut konversiokäsittelyt eivät saavuttaneet samaa suorituskykyä, kuin jos jauhemaalauksen esikäsittelynä on raesuihkupuhdistus. Kuitenkin konversiokäsittelyt jauhemaalauksen näytteet kestivät keinovanhennuksen paremmin kuin liuotinpuhdistetut näytteet. Tämän perusteella voidaan todeta konversiokäsittelyn parantavan maalauksen toimivuutta alumiinipinnoilla verraten siihen, että esikäsittelyä ei ole tai se on pelkkä liuotinpuhdistus.

Yksi näkökulma diplomityössä oli tutkia, onko alumiiniseoksella mahdollisesti vaikutusta maalauksen toimivuuteen. Tuloksien perusteella ei voida sulkea mahdollisuutta pois, että myös maalattavan alustan seostus ja valmistustekniikka vaikuttavat siihen, miten maalaus toimii, kun se altistuu voimakkaampaan korroosiorasitukseen. Eri seosten välillä havaittiin eroja vaurioiden voimakkuudessa 720 tunnin neutraalin suolasumurasituksen jälkeen. Huomionarvoista on, että valitut seokset ovat yleisesti teollisuuden käyttämiä ja siten verrattain hyvin maalattavia ja korroosiota kestäviä. Vertailuseoksena mukana oli puhdas teollinen alumiinilaatu EN-AW 1050. Vertaamalla kolmen muun tutkitun seoksen tuloksia edellä mainittuun, voidaan todeta, että piin ja magnesiumin seostus alumiinin ei lähtökohtaisesti heikennä sen maalattavuutta tutkituilla maalausjärjestelmillä. Selkeämpiä eroja seosten välillä olisi varmastikin voinut havaita, jos tutkimukseen olisi valittu ominaisuuksiltaan enemmän toisistaan poikkeavia seoksia. Kuitenkaan tuloksien teollisen hyödyntämisen näkökulmasta tämä ei ollut perusteltua, koska esimerkiksi heikomman korroosionkestävyyden kuparia sisältäviä alumiiniseoksia ei teollisuudessa maalata niin laajalti, kuin valittuja seoksia. Kuitenkaan tuloksien perusteella ei voida varmuudella päätellä, johtuiko esimerkiksi seoksen EN-AW 6060 muista poikkeava vaurioituminen seostuksesta vai muista näytteisiin liittyvistä tekijöistä.

Tässä diplomityössä käsiteltiin maalin tartunnan teorioita. Suoritettu tutkimus osaltaan tuki näiden teorioiden pätevyyttä. Erityisen selvästi havaittiin maalin mekaanisen lukittumisen merkitys; raesuihkupuhdistetuissa näytteissä maalin tartunta ja kiinnipysyvyys keinovanhennuksen jälkeenkin olivat hyvät. Viitteitä myös etäisyyden merkityksestä havaittiin. Teoriassa maali tarttuu alustaan, kun pinta on puhdas ja maali kastelee pinnan, joka johtaa tiiviiseen vuorovaikutukseen alustan ja maalin välillä. Jos pinnalla on epäpuhtauksia, tulee tähän tiiviiseen vuorovaikutukseen epäjatkuvuuskohtia ja muodostuu paikallinen heikko rajakerros tartuntaan. Mahdollisesti tällaisesta paikallisesta heikon rajakerroksen tartunnan epäjatkuvuuskohtasta aiheutui keinovanhennuksessa yksittäistä rakkuloitumista muutama näytteisiin. Eli paikallisesti tartunnan voimakkuus on heikompi, jolloin alustan pinnalla

tapahtuvien ilmiöiden seurauksena tartuntaa ylläpitävän voima syrjäytetään, joka aiheuttaa maalin irtoamisen alustasta ja rakkulan muodostumisen.

Kuten tässä diplomityössä on edellä esitetty, lankamainen korroosio on yleistä pinnoitetulla alumiinilla. Suoritetussa tutkimuksessa lankamaista korroosiota ei kuitenkaan havaittu. Maalatuissa näytteissä korroosiotyyppi oli viillosta lähtevä rakokorroosio maalin alla. Maalaamattomissa näytteissä havaittiin enimmäkseen voimakkuudeltaan vaihtelevaa pistesyöpymisiä. Tarkasteltaessa maalaamattomia konversiokäsiteltyjä näytteitä, havaittiin eri alumiiniseosten ja eri konversiokäsiteltyjen näytteiden vaurioituvan suolasumurasituksessa eri nopeutta. Havaintojen mukaan silaani- ja zirkonium-kromi -konversiokäsitellyt levyt vaurioituivat hitaammin. Zirkoniumkonversiokäsitellyt levyt vaurioituivat selkeästi edellä mainittuja nopeammin. Tämä tukee edellä tässä diplomityössä esitettyjä tietoja, joiden mukaan silaani-konversiopinnoituksessa pintaan muodostuu korroosionkestävyyttä parantava tiivis silaani-kerros ja zirkonium-kromi konversiopinnoituksessa pinnoitekerroksen kromi parantaa sen korroosionkestävyyttä. Tutkimustulosten perusteella pelkkien konversiopinnoitusten korroosionkestävyydestä voidaan tehdä johtopäätelmä, että ne parantavat alumiinin korroosionkestävyyttä hieman, mutta eivät ole tai toimi yksinään varsinaisena korroosionestokäsittelynä. Toisaalta niiden luoma pienikin korroosionkestävyyden paraneminen voi olla monessa teknisessä sovelluksessa hyödyllinen. Esimerkiksi ne voivat suojata maalaamattomaksi jätettyjä pintoja korroosiolta, kun ilmastollinen korroosiorasitus on maltillinen.

Tutkimuksen tuloksien luotettavuuden edistämiseksi pyrittiin kaikki testit toteuttamaan mahdollisimman tarkasti noudattaen kutakin käyttöön valittua standardia ja varmistamalla mahdollisuuksien mukaan laitteiden toimivuus mittanormaaleilla ennen niiden käyttöä. Tärkein tulosten luotettavuutta varmistava yksittäinen tekijä oli keinovalaistukseen käytetyn suolasumukammin syövyttävyyden määrittäminen sovelletun standardin ohjeita noudattaen. Tällä varmistettiin suolasumukokeen korroosiorasituksen oikea taso. Arvion mukaan tuloksissa ei ole merkittävää virheriskiä. Virheiden havaitsemiseksi esimerkiksi hilaristikko- ja vetokokeita suoritettiin aina vähintään kaksi näytettä kohden. Havaintojen perusteella kaikissa näissä määrittäyksissä kahden kokeen välillä ei havaittu oleellisia eroja. Merkittävin riski tulosten luotettavuudelle on pinnoitteen huononemisen arvioinnin ja hilaristikkovaurioiden ja vetokokeen murtumatyyppien määrittämisen osin subjektiivinen luonne. Tämän riskin pienentämiseksi diplomityön liitteissä esitetään valokuvat kaikista hilaristikko- ja vetokoemäärittäyksistä, sekä näytteistä keinovalaistuksen jälkeen. Toinen luotettavuusriski liittyy maalin irtoamisen ja korroosion mittaamiseen viillosta. Nämä mitattiin silmämääräisesti työntömitalla. Toisaalta tämä on arvion mukaan riittävä tarkkuus, koska sovellettu standardi oh-

jeistaa mittaamaan nämä 0,5 millimetrin tarkkuudella, joka kohtuullisen luotettavasti toteutuu käytetyllä välineellä ja menetelmällä. Kolmas luotettavuusriski liittyy materiaaleihin. Alumiiniseosten, esikäsitteilyaineiden ja maalien laatua tai koostumusta ei varmistettu erillisillä menetelmillä. Toisaalta nämä kaikki olivat normaaleja yleisesti saatavilla olevia teollisuuslaatuja, jotka hankittiin normaaleja hankintakanavia pitkin. Siten niiden voidaan melko suurella varmuudella odottaa olleen laadullisesti laajaan luotettavasti edustavia.

Mielenkiintoinen havainto tutkimustuloksista oli, että teollisen maalauksen laadunvarmistusprosesseissa usein erityisesti korostettavalla maalauksen kuivakalvonpaksuudella ei havaittu olevan huomattavaa merkitystä näytteiden vaurioitumiseen, vaikka märkemaalatuissa näytteissä kuivakalvonpaksuus vaihteli välillä 117 – 321 mikrometriä ja jauhemaalatuissa näytteissä välillä 52,8 - 184 mikrometriä. Kuivakalvonpaksuus on tunnetusti merkittävä tekijä maalauksen korroosionkestävyydessä, mutta diplomityön tuloksien perusteella se ei ole ainoa ja tärkein vaikuttava tekijä. Tuloksien perusteella vaikuttaisi siltä, että äärimmäisen tärkeää on huolellinen maalausprosessin suunnittelu ja toteutus. Vaikka tässä diplomityössä tutkittiin maalauksia, niille hieman liian korkean rasisitusluokan neutraalin suolasumukokeen koejaksolla, näytteet kestivät rasisituksen hyvin. Kun tarkastellaan keinovanhennuksen jälkeen havaittuja virheitä tai esimerkiksi silaanikonversiokäsittelyjen näytteiden muita hieman matalampia tartuntalujuuksia, huomataan, että kunkin poikkeaman selittää usein jokin poikkeama kyseisen näytteen maalausprosessissa. Esimerkiksi yksittäiset rakkulat ovat todennäköisesti seurausta paikallisista prosessin virheistä, sillä muutoin niitä esiintyisi laajemmin näytteen kaikilla pinnoilla. Silaanikonversiokäsittelyssä taas merkittävä laatuun vaikuttava tekijä on väliajan pituus konversiokäsittelyn ja maalauksen välillä. Koska silaanikonversiokäsittelyt levyt konversiopinnoitettiin ja jauhemaalattiin eri tuotantolaitoksilla, väliaika käsittelyjen välillä oli suositusta pidempi, mikä mahdollisesti edelleen näkyy maalin matalammassa tartuntalujuudessa. Viimeisenä johtopäätöksenä voidaankin todeta, että kaikki tutkitut konversiokäsittelyt toimivat hyvin, sekä märkä-, että jauhemaalattavien alumiinipintojen esikäsitteilynä ja niiden, sekä tarkoituksenmukaisen maaliyhdistelmän muodostamilla maalausjärjestelmillä on mahdollista maalata alumiinia korkeampienkin ilmastolisten rasisitusluokkien käyttöympäristöihin. Tämä edellyttää kuitenkin, sekä esikäsitteilyn, että maalausvaiheen huolellista toteuttamista. Mikäli riittävä huolellisuus puuttuu, ei välttämättä ole niinkään suurta merkitystä, sillä mikä on spesifi käytössä oleva esikäsitteilymenetelmä.

Diplomityössä toteutettiin taulukon X ensimmäisen testijärjestelmän testeistä neutraali suolasumukoe. Mikäli on tarve määrittää tutkitut maalausjärjestelmät toimiviksi rasisitusluokkiin C3-VH, C4-H, C5-M tulisi testijärjestelmän mukaisesti maalausjärjestelmien läpäistä vielä

480 tunnin veden kondensoitumistesti. Jos tarpeena on saada selkeämpiä eroja tutkittujen konversiokäsittelyjen toimivuudesta, on suositus suorittaa neutraali suolasumukoe pidemmällä, esimerkiksi 1440 tunnin, koejaksolla tai käyttäen heikommin toimivaa maaliyhdistelmää. Lisätietoa alumiinin seostuksen vaikutuksista voisi saada toistamalla suoritettu tutkimus näytteillä, joissa on selvemmät erot seostuksessa ja varmistamalla seosten koostumus tarkoitukseen sopivilla analyysimenetelmillä osana tutkimusta.

9 Yhteenveto

Alumiinia maalataan teollisesti paljon. Tietoa erilaisten alumiinin maalausjärjestelmien toimivuudesta voimakkaammissa ilmastollisissa korroosiorasituksissa on verrattain niukasti saatavilla. Kuluvalla vuosituhannella on voimakkaasti yleistynyt alumiinin maalausprosesseissa niin kutsuttujen konversiopinnoitteiden hyödyntäminen esikäsittelymenetelmänä, jolla maalin tartuntaa alustaan ja pitkäaikaissiinnipysyvyyttä parannetaan. Tässä diplomityössä tutkittiin kolmea erilaista konversiopinnoitusta, joita teollisesti käytetään maalauksen esikäsittelynä. Tarkoitus oli selvittää, kuinka ne toimivat keskipintaa voimakkaammassa ilmastollisessa korroosiorasituksessa, sekä onko toimivuus mahdollisesti riippuvainen alumiinin seostuksesta tai maalausmenetelmästä.

Tutkitut konversiopinnoitukset olivat zirkonium-, zirkonium-kromi- ja silaaniteknikkaan perustuvia. Alustoiden seosaineiksi määritettiin valmistavassa teollisuudessa laajalti käytettävät alumiiniseokset EN-AW 5754, EN-AW 6060 ja EN-AW 6082, sekä näille vertailukohdaksi seostamaton puhdas teollinen alumiinilaatu EN-AW 1050. Maalausmenetelmät olivat yhden maalikerroksen polyesterijauhemaalauksen ja kahden maalikerroksen epoksi-polyuretaanimärkämaalauksen.

Tutkimusmenetelmien määrittelyssä periaatteeksi valittiin tutkimuksen suoritus mahdollisimman tarkasti noudattaen teollisen maalauksen standardoituja koemenetelmiä. Tutkimuksessa valmistettiin näytteet kunkin konversiopinnoituksen ja maalausmenetelmän yhdistelmästä. Vertailunäytteiksi valmistettiin vastaavat näytteet, joissa toisissa esikäsittelynä oli pelkkä liuotinpuhdistus ja toisissa raesuihkupuhdistus. Näiden tarkoitus oli auttaa konversiopinnoitettujen näytteiden suorituskyvyn määrittelyssä. Lisäksi valmistettiin vain konversiopinnoitetut näytteet, joilla tutkittiin, miten pelkkä konversiopinnoite suojaa alumiinia korroosiolta.

Valmistettuja näytteitä tutkittiin keinoanhentamalla ne standardin SFS-EN ISO 9227 mukaisella 720 tunnin neutraalilla suolasumukokeella. Keinoanhennuksen pituudeksi johdettiin standardista SFS-EN ISO 12944 ilmastollisiin rasiiniluokkiin C3-VH, C4-H ja C5-M soveltuva neutraalin suolasumukokeen pituus. Samasta standardista johdettiin sovellettavat

arviointi- ja laadulliset kriteerit. Arviointimenetelminä käytettiin standardin SFS-EN ISO 2409 määrittelemää hilaristikkokoetta, standardin SFS-EN ISO 4624 kuvaamaa vetokoetta ja standardin SFS-EN ISO 4628 opastavia pinnoitteiden huononemisen arvioinnin menetelmiä.

Tutkimustulokset osoittivat kaikkien tutkittujen esikäsittelyjen ja maalausten yhdistelmien toimivan tarkoituksenmukaisesti. Märkämaalatut näytteet läpäisivät suoritetun keinovanhennuksen määritellyt laadullisten kriteerit täyttäen hyvin. Myös jauhemaalatuista näytteistä suuri osa läpäisi kokeet hyvin. Joissakin näytteissä keinovanhennuksessa muodostuneet vauriot olivat keskimääräistä voimakkaampia. Näiden pääteltiin aiheutuneen näytteiden valmistuksen prosessivirheistä tai johtuneen osin alumiiniseoksen tai maalimateriaalin ominaisuuksista. Päätelmissä arvioitiin, ettei verrattain vähäiset virheet johtuneet kunkin konversiopinnoitteen tyypillisistä ominaispiirteistä ja täten edelleen pääteltiin tutkittujen konversiopinnoitusten soveltuvan hyvin esikäsittelymenetelmäksi, kun alumiinia maalataan keskimääräistä korkeampiin ilmastollisiin korroosiorasitusluokkiin.

Maalattujen näytteiden ohessa tutkittiin 240 tunnin neutraalilla suolasumukokeella vain konversiopinnoitettuja näytteitä. Näytteiden arvioinnissa sovellettiin tarkoitukseen sopivaa standardia SFS-EN ISO 10289. Tutkimuksen tuloksien perusteella voidaan todeta eri konversiotekniikoilla olevan toisistaan poikkeava vaurioitumisnopeus, kun ne altistuvat korroosioympäristöön. Samoin eroja havaittiin eri alumiiniseosten välillä. Loppupäätelmänä sanottuista näytteistä tehtiin, että tutkitut konversiopinnoitukset suojaavat alumiinia hieman korroosiolta, mutta eivät toimi alumiinilla varsinaisina korroosionestopinnoitteina.

LÄHTEET

Ab Jet-steel Oy, 2013. Alumiinilaatujen jaottelu. [online]. Saatavilla: <http://jetsteeloy.blogspot.com/2013/09/alumiinilaatujen-jaottelu.html> . Viitattu 17.6.2019.

Chemetall, 2011. Process Instruction, Oxsilan MM 0706. Frankfurt: Chemetall.

Chemetall, 2019. Käyttöturvallisuustiedote Oxsilan MM 0706. Tampere: Chemetall.

Chico B., de la Fuente D., Pérez M. L. & Morcillo M., 2009. Corrosion resistance of steel treated with different silane / paint systems. Madrid: Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas.

Chico B., Galvan J. C., de la Fuente D. & Morcillo M.. Electrochemical impedance spectroscopy study of the effect of curing time on the early barrier properties of silane systems applied on steel substrates. *Progress in Organic Coatings*, 60/2007, s. 46, 52.

Civil Aviation Authority, 2017. Corrosion and Inspection of General, Aviation Aircraft, CAP 1570. West Sussex: Civil Aviation Authority.

Ebnesajjad S., 2007. Surface Treatment of Materials for Adhesion Bonding. Norwich (USA): William Andrew Publishing.

Eivaz Mohammadloo H., Sarabi A. A., Sabbagh Alvani A. A., Salimi R. & Sameie H.. The effect of solution temperature and pH on corrosion performance and morphology of nanoceramic-based conversion thin film. *Materials and Corrosion*, 6/2013, s.536 – 537, 540.

Eivaz Mohammadloo H., Sarabi A. A., Sabbagh Alvani A. A., Sameie H. & Salimi R. Nanoceramic hexafluorozirconic acid based conversion thin film: Surface characterization and electrochemical study. *Surface & Coatings Technology*, 206/2012, s. 4134.

Henkel, 2017. Käyttöturvallisuustiedote, Bonderite M-NT 1 conversion coating. Vantaa: Henkel Norden.

Honselmann J., Mankel E. & Volk P.. Formation of Trivalent Chromium Passivation Layers. *Products Finishing Magazine*, 03/2018, s. 20 – 22.

Ibrahim M., 2012. Modifioitujen nanopartikkelien erottelumenetelmät. Opinnäytetyö, Turun ammattikorkeakoulu, Bio- ja elintarviketekniikka.

Jokinen I., Kuusela A., Nikkari T., 2012. Pinnalla 2, Metallituotteiden maalaus. Helsinki: Opetushallitus.

Kairinen K. (toim.), 2016. MAOL taulukot. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Karlsson J., 2011. Corrosion Mechanisms under Organic Coatings, A study in relation to Next Generation's Pretreatments. Master of Science Thesis, Chalmers University of technology, Department of Chemical and Biological Engineering.

Laitinen R. & Toivonen J., 1982. Yleinen ja epäorgaaninen kemia, 16. painos. Helsinki: Otatieto.

Lindroos V., Sulonen M. & Veistinen M., 1986. Uudistettu Miekk-ojan Metalliooppi. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Otava.

Milosev I. & Frankel G. S.. Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, julkaistu 17.2.2018. s. 128-141.

Pihlajamäki A. (Tutkijaopettaja, LUT-yliopisto) keskustelu 23.1.2020.

Pohl J. & Möller R.. New Cr(III)-based pretreatment, A simple, all-purpose, environmentally friendly process. JOT International Surface Technology. Nro 1/2009 s. 2-3.

Qi J. T., Hashimoto T., Walton J. R., Zhou X., Skeldon P. & Thompson G. E.. Trivalent chromium conversion coating formation on aluminium. Surface & Coatings Technology, 280/2015, s. 317.

Ramanathan E. & Balasubramanian S.. Comparative study on polyester epoxy powder coat and amide cured epoxy liquid paint over nano-zirconia treated mild steel. Progress in Organic Coatings, 93/2016, s. 68, 72 & 75.

Salonen J., 2011. Gardobond AP/EPP ja Oxsilan, Ympäristöystävällinen metallin esikäsittelymenetelmä. Tampere: Chemetall.

Sarrica S., 2011. Paints: types, components, and applications. New York: Nova Science Publishers.

Schweitzer P., 2007. Corrosion engineering handbook, Corrosion of linings and coatings, Cathodic and inhibitor protection and corrosion monitoring, 2. painos. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Schweitzer P., 2007. Corrosion engineering handbook, Corrosion of polymers and elastomers, 2. painos. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2001. SFS-EN ISO 10289, Metallisilla alustoilla olevien metallisten ja muiden epäorgaanisten pinnoitteiden korroosiotestausmenetelmät. Korroosiokeissa olleiden koekappaleiden ja valmiiden tuotteiden arvostelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2013. SFS-EN ISO 2409, Maalit ja lakat. Hilaristikkokoe. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2013. SFS-EN ISO 4628-8, Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten vaurioiden esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 8: Viiltoa tai muuta pinnoitteeseen tehtyä vauriota ympäröivän irtoamisen ja korroosion arviointi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2016. SFS-EN ISO 4624, Maalit ja lakat. Tarttuvuuden arviointi vetokokeella. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2016. SFS-EN ISO 4628-1, Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 1: Yleistä ja merkintäjärjestelmä. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2016. SFS-EN ISO 4628-2, Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 2: Rakkuloitumisasteen arviointi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2016. SFS-EN ISO 4628-3, Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 3: Ruostumisasteen arviointi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2016. SFS-EN ISO 4628-4, Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 4: Halkeilemisasteen arviointi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2016. SFS-EN ISO 4628-5, Maalit ja lakat. Pinnoitteiden huononemisen arviointi. Yleisten virhetyyppien esiintymisen voimakkuuden, määrän ja koon merkintä. Osa 5: Hilseilyasteen arviointi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2017. SFS-EN ISO 9227, Korroosiokokeet keinotekoisissa kaasuympäristöissä. Suolasumukokeet. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2018. SFS-EN ISO 12944-2, Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 2: Ympäristöolosuhteiden luokittelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2018. SFS-EN ISO 12944-6, Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 6: Menetelmät laboratorion suorituskyvyn testaamiseksi. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Suomen standardoimisliitto SFS ry, 2018. SFS-EN ISO 12944-9, Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 9: Suojamaaliyhdistelmät ja laboratorion suorituskyvyn testimenetelmät offshore- ja vastaavissa rakenteissa. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS ry.

Surtec, 2018. Material safety data sheet, Surtec 609 GV. Zwingenberg: SurTec Deutschland.

Teknoliateollisuus ry, 2006. Raaka-ainekäsikirja, osa 5 Alumiinit. Helsinki: Teknoliateollisuus ry

Teknos, 2013. Korroosionestomaalauksen käsikirja. Helsinki: Teknos Oy.

Tunturi P. (toim.) & Tunturi P. (toim.), 1999. Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt, 3. painos. Tampere: Metalliteollisuuden keskusliitto.

Tunturi P. J. (toim.), 1988. Korroosio käsikirja. Helsinki: Suomen korroosioyhdistys.

Turner G. P. A., 1980. Introduction to paint chemistry and principles of paint technology, 2. painos. New York: Chapman and Hall.

Vold R. & Vold M., 1983. Colloid and interface chemistry. Reading (USA): Addison-Wesley publishing company.

Volk P., 2014. Pre-Treatments of Metals before Painting, Phosphatings and Energy-Efficient Alternatives. Fachforum parts2clean, 25.6.2014, s. 7 -9, 22.

Volk, P.. Conversion coating for metal surfaces. Patentti. Julkaisunumero US 2019/0145009, julkaistu 16.5.2019

LIITTEET

LIITE I	Näytteiden konversiopinnoitusten ja maalauksien prosessidokumentaatio
LIITE II	Näytteiden maalauksien kuivakalvonpaksuuden mittaustulokset ja visuaalisen tarkastelun huomiot ennen keinovanhennusta
LIITE III	Hilaristikkokokeen tulokset ennen keinovanhennusta
LIITE IV	Vetokokeen tulokset ennen keinovanhennusta
LIITE V	Suolasumukammion valvontatiedot ja syövyttävyyden määrittäminen
LIITE VI	Valokuvat maalatuista näytteistä keinovanhennuksen jälkeen
LIITE VII	Pinnoitteiden huononemisen arvioinnin tulokset
LIITE VIII	Maalin irtoamisen ja korroosion mittaustulokset viillosta
LIITE IX	Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen
LIITE X	Vetokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen
LIITE XI	Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset
LIITE XII	Luettelo diplomityössä käytetyistä aineista ja laitteista

LIITE I 1(3) Näytteiden konversiopinnoitusten ja maalauksien prosessidokumentaatio

ZIRKONIUMKONVERSIOPINNOITUS		Märkärühmä 1	Jauheryhmä 1 Maalaamaton ryhmä 1
Tuotantolaitos:		Lainisalo Oy, Helsinki	Lainisalo Oy, Helsinki
Päivämäärä:		22.4.2020	24.4.2020
PESUKYLPY	Lämpötila (° C):	46,0	48,0
	pH:	9,82	9,97
	Vapaa alkaliteetti:	4,5	7,0
	Kokonaisalkaliteetti:	13,5	14,4
HUUHTELU 1	Lämpötila (° C):	room temp.	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	516	576
HUUHTELU 2	Lämpötila (° C):	room temp.	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	< 1,0	< 1,0
KONVERSIOPINNOITUS	Lämpötila (° C):	23,6	23,1
	Zirkonium absorbanssi:	0,258	0,273
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	236	249
	pH:	4,75	4,68
HUUHTELU 3	Lämpötila (° C):	room temp.	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	0	0
KUIVAUS	Lämpötila (° C):	170	169
	Ratanopeus¹ (m /min):	0,8	0,8
¹ Ratanopeus sama kaikissa vaiheissa.			

ZIRKONIUM-KROMIKONVERSIOPINNOITUS		Märkärühmä 2 Jauheryhmä 2 Maalaamaton ryhmä 2
Tuotantolaitos:		Lainisalo Powder Painting Oü
Päivämäärä:		7.4.2020
PESUKYLPY	Lämpötila (° C):	55,0
	pH:	8,8
	Pesuainepitoisuus (til.-%):	3,5
HUUHTELU 1	Lämpötila (° C):	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	1140
HUUHTELU 2	Lämpötila (° C):	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	-
KONVERSIOPINNOITUS	Lämpötila (° C):	room temp.
	Kokonaishappoluku (TA):	3,5
	pH:	5,2
HUUHTELU 3	Lämpötila (° C):	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	8
KUIVAUS	Lämpötila (° C):	170
	Ratanopeus¹ (m /min):	1,0
¹ Ratanopeus sama kaikissa vaiheissa.		

LIITE I 2(3) Näytteiden konversiopinnoitusten ja maalauksien prosessidokumentaatio

SILAANIKONVERSIOPINNOITUS		Märkäryhmä 3, Jauheryhmä 3, Maalaamaton ryhmä 3
Tuotantolaitos:		Lainisalo Oy, Ähtäri
Päivämäärä:		23.4.2020
PESUKYLPY	Lämpötila (° C):	52,0
	Vapaa alkaliteetti	7,2
	Käsittelyaika (s):	180
HUUHTELU 1	Lämpötila (° C):	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	286
	Käsittelyaika (s):	120
HUUHTELU 2	Lämpötila (° C):	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	105
	Käsittelyaika (s):	120
HUUHTELU 3	Lämpötila (° C):	room temp.
	Sähkönjohtavuus (µS/cm):	-
	Käsittelyaika (s):	30
KONVERSIOPINNOITUS	Lämpötila (° C):	room temp.
	Pinnoiteainepitoisuus (til.-%):	6,45
	pH:	6,08
	Käsittelyaika (s):	120
KUIVAUS	Lämpötila (° C):	60
	Kuivausaika (min):	45

MÄRKÄMAALAUUS		
Näyteryhmä:	Kuvaus:	
Vertailuryhmä 1	Raesuihkupuhdistus + Märkämaalaus	
Vertailuryhmä 2	Liutinpyyhintä + Märkämaalaus	
Märkäryhmä 1	Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus	
Märkäryhmä 2	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus	
Märkäryhmä 3	Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus	
MAALAUSTIEDOT:	POHJAMAALAUUS	PINTAMAALAUUS
Tuotantolaitos:	Lainisalo Oy, Ähtäri	Lainisalo Oy, Ähtäri
Päivämäärä:	23.4.2020	24.4.2020
Ilman suhteellinen kosteus (%):	43,4	42,2
Ilman lämpötila (° C):	24,3	24,5
Pinnan lämpötila (° C):	25,2	24,3
Pinnan kastepistelämpötila (° C):	11,1	10,8
Maalauksen kuivaus:	Ilmakuivaus maalausolo-suhteissa.	Ilmakuivaus maalausolo-suhteissa.

LIITE I 3(3) Näytteiden konversiopinnoitusten ja maalauksien prosessidokumentaatio

JAUHEMAALAUUS	
Näyteryhmä:	Kuvaus:
Jauheryhmä 1	Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalaus
Jauheryhmä 3	Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus
Vertailuryhmä 3	Raesuihkupuhdistus + Jauhemaalaus
Vertailuryhmä 4	Liutotinpyyhintä + Jauhemaalaus
MAALAUSTIEDOT:	JAUHEMAALAUUS
Tuotantolaitos:	Lainisalo Oy, Helsinki
Päivämäärä:	24.4.2020
Polttouunin lämpötila (° C):	200
Ratanopeus (m/min):	0,8
Poltto aika (min)	37,5

JAUHEMAALAUUS	
Näyteryhmä:	Kuvaus:
Jauheryhmä 2	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Jauhemaalaus
MAALAUSTIEDOT:	JAUHEMAALAUUS
Tuotantolaitos:	Lainisalo Powder Painting Oü
Päivämäärä:	7.4.2020
Polttouunin lämpötila (° C):	200
Ratanopeus (m/min):	1
Poltto aika (min)	26

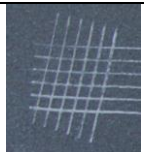
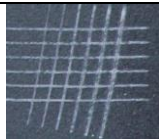
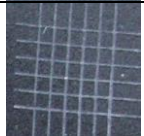
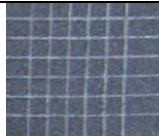
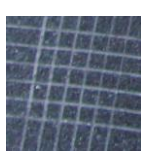
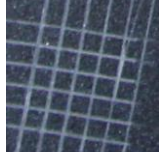
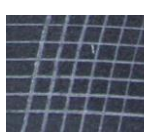
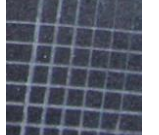
LIITE II 1(2) Näytteiden maalauksien kuivakalvonpaksuuden mittaustulokset ja visuaalisen tarkastelun huomioidut ennen keinoalanhennusta

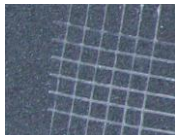
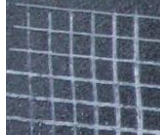
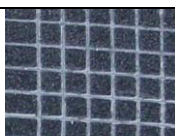
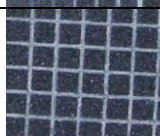
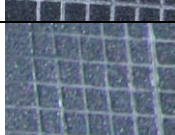
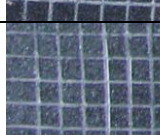
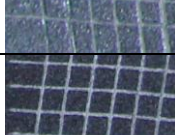
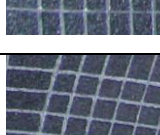
RYHMÄ	Kuvaus	Näytteenro	Alumiiniseos	Mittalukemien määrä [n]	DFT Min. [µm]	DFT Max. [µm]	Average [µm]	Visuaalinen tarkastelu. Havainnot:
Vertailuryhmä 1	Raesuihkupuhdistus + Märkämaalaus	11	EN AW-1050 H14	10,0	148,0	196,0	173,1	Muutama kohtalainen ja muutama hyvin pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		25	EN AW-5754 H22	10,0	131,0	177,0	157,5	Yksi kohtalainen ja muutama hyvin pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		29	EN AW-6060 T6	10,0	135,0	171,0	153,7	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		43	EN AW-6082 T6	10,0	157,0	185,0	174,1	Yksi kohtalainen pinnoitteen visuaalinen virhe.
Vertailuryhmä 2	Liutoinpyyhintä + Märkämaalaus	10	EN AW-1050 H14	10,0	128,0	168,0	145,4	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		24	EN AW-5754 H22	10,0	141,0	187,0	161,9	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		39	EN AW-6060 T6	10,0	138,0	183,0	156,3	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		53	EN AW-6082 T6	10,0	117,0	144,0	132,7	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
Märkäryhmä 1	Zirkoniumkonversio pinnoitus + Märkämaalaus	2	EN AW-1050 H14	10,0	163,0	213,0	186,8	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		2b	EN AW-1050 H14	10,0	171,0	209,0	187,1	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		16	EN AW-5754 H22	10,0	154,0	197,0	181,2	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		16b	EN AW-5754 H22	10,0	173,0	212,0	195,2	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		30	EN AW-6060 T6	10,0	148,0	185,0	164,2	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		30b	EN AW-6060 T6	10,0	146,0	185,0	171,1	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		44	EN AW-6082 T6	10,0	181,0	208,0	192,9	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		44b	EN AW-6082 T6	10,0	174,0	201,0	189,8	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
Märkäryhmä 2	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus	3	EN AW-1050 H14	10,0	156,0	208,0	187,1	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		3b	EN AW-1050 H14	10,0	153,0	191,0	175,6	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		18	EN AW-5754 H22	10,0	184,0	223,0	208,4	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		17	EN AW-5754 H22	10,0	244,0	321,0	279,3	Paksu maalaus, maalikalvossa suuri painauma.
		32	EN AW-6060 T6	10,0	170,0	234,0	210,4	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		32b	EN AW-6060 T6	10,0	194,0	250,0	225,1	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä, levyn toisen puolen maalaus paksu.
		45	EN AW-6082 T6	10,0	190,0	241,0	217,4	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		45b	EN AW-6082 T6	10,0	217,0	289,0	250,2	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
Märkäryhmä 3	Sitaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus	6	EN AW-1050 H14	10,0	140,0	174,0	161,8	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		6b	EN AW-1050 H14	10,0	126,0	152,0	142,1	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		20	EN AW-5754 H22	10,0	169,0	196,0	184,7	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		20b	EN AW-5754 H22	10,0	122,0	148,0	136,1	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		34	EN AW-6060 T6	10,0	149,0	184,0	167,5	Yksi kohtalainen ja muutama hyvin pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		34b	EN AW-6060 T6	10,0	125,0	163,0	146,9	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		48	EN AW-6082 T6	10,0	154,0	187,0	173,6	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		48b	EN AW-6082 T6	10,0	119,0	137,0	127,2	Muutama hyvin pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.

LIITE II 2(2) Näytteiden maalauksien kuivakalvonpaksuuden mittaustulokset ja visuaalisen tarkastelun huomiot ennen keinoivanhennusta

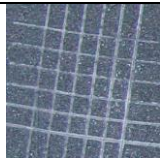
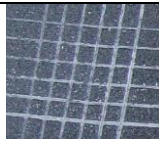
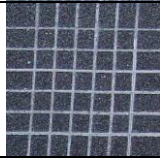
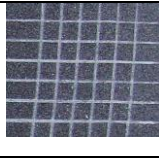
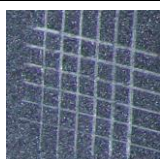
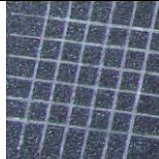
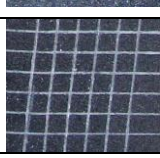
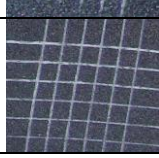
RYHMÄ	Kuvaus	Näyttenro	Alumiiniseos	Mittalukemien määrä [n]	DFT Min. [µm]	DFT Max. [µm]	DFT Average [µm]	Visuaalinen tarkastelu. Havainnot:
Vertailuryhmä 3	Raesuihkupuhdistus + Jauhemaalaus	7	EN AW-1050 H14	10,0	98,2	106,0	103,6	Virheitä ei havaittavissa.
		21	EN AW-5754 H22	10,0	94,8	112,0	103,0	Virheitä ei havaittavissa.
		35	EN AW-6060 T6	10,0	90,2	113,0	100,2	Virheitä ei havaittavissa.
		49	EN AW-6082 T6	10,0	72,2	97,1	79,5	Yksi pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
Vertailuryhmä 4	Liutinpölyhintä + Jauhemaalaus	9	EN AW-1050 H14	10,0	73,5	98,0	85,0	Virheitä ei havaittavissa.
		23	EN AW-5754 H22	10,0	58,2	74,6	65,7	Virheitä ei havaittavissa.
		37	EN AW-6060 T6	10,0	88,9	113,0	99,5	Virheitä ei havaittavissa.
		51	EN AW-6082 T6	10,0	62,8	79,2	72,3	Virheitä ei havaittavissa.
Jauheryhmä 1	Zirkoniumkonversio pinnoitus + Jauhemaalaus	1	EN AW-1050 H14	10,0	142,0	169,0	154,4	Yksi kohtalainen pinnoitteen visuaalinen virhe.
		1b	EN AW-1050 H14	10,0	123,0	146,0	131,1	Virheitä ei havaittavissa.
		8	EN AW-1050 H14	10,0	104,0	130,0	118,1	Virheitä ei havaittavissa.
		15	EN AW-5754 H22	10,0	134,0	152,0	141,6	Virheitä ei havaittavissa.
		15b	EN AW-5754 H22	10,0	129,0	151,0	138,5	Virheitä ei havaittavissa. Ripustusreiän vierässä porausjälki.
		22	EN AW-5754 H22	10,0	112,0	126,0	117,1	Virheitä ei havaittavissa.
		38	EN AW-6060 T6	10,0	121,0	160,0	141,9	Yksi kohtalainen pinnoitteen visuaalinen virhe.
		29b	EN AW-6060 T6	10,0	126,0	161,0	140,7	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		36	EN AW-6060 T6	10,0	155,0	181,0	167,5	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		52	EN AW-6082 T6	10,0	112,0	135,0	122,1	Virheitä ei havaittavissa.
Jauheryhmä 2	Zirkonium-kromikonversio pinnoitus + Jauhemaalaus	43b	EN AW-6082 T6	10,0	128,0	149,0	138,4	Yksi kohtalainen pinnoitteen visuaalinen virhe.
		4	EN AW-1050 H14	10,0	102,0	113,0	106,9	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		4b	EN AW-1050 H14	10,0	84,0	136,0	109,2	Muutama pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		13	EN AW-1050 H14	10,0	84,6	114,0	95,6	Virheitä ei havaittavissa.
		17b	EN AW-5754 H22	10,0	98,7	143,0	123,4	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		18b	EN AW-5754 H22	10,0	77,8	100,0	91,9	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		27	EN AW-5754 H22	10,0	83,5	128,0	106,6	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		31	EN AW-6060 T6	10,0	85,8	99,7	90,6	Virheitä ei havaittavissa.
		31b	EN AW-6060 T6	10,0	96,0	114,0	103,2	Virheitä ei havaittavissa.
		46	EN AW-6082 T6	10,0	105,0	141,0	126,0	Virheitä ei havaittavissa.
Jauheryhmä 3	Silaanikonversio pinnoitus + Jauhemaalaus	46b	EN AW-6082 T6	10,0	104,0	145,0	124,7	Yksi pieni pinnoitteen visuaalinen virhe.
		5	EN AW-1050 H14	10,0	119,0	137,0	129,3	Muutama kohtalainen pinnoitteen visuaalinen virhe.
		5b	EN AW-1050 H14	10,0	118,0	129,0	123,6	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		19	EN AW-5754 H22	10,0	122,0	144,0	133,3	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		19b	EN AW-5754 H22	10,0	137,0	168,0	150,6	Pari hyvin pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.
		33	EN AW-6060 T6	10,0	133,0	172,0	154,4	Virheitä ei havaittavissa.
		33b	EN AW-6060 T6	10,0	121,0	140,0	126,3	Virheitä ei havaittavissa.
		47b	EN AW-6082 T6	10,0	148,0	184,0	160,3	Virheitä ei havaittavissa.
		54	EN AW-6082 T6	10,0	145,0	163,0	151,8	Pari pientä pinnoitteen visuaalista virhettä.

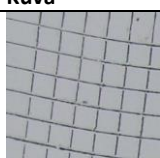
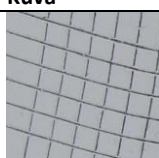

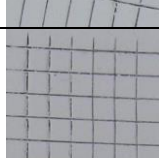
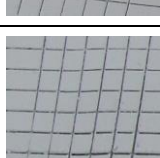
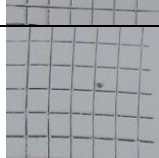
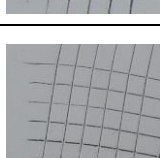
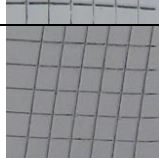
LIITE III 1(3) Hilaristikkokokeen tulokset ennen keinovanhennusta

Märkärühmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näytenro	Alumiiniseos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
2b	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
16b	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
30b	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
44b	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

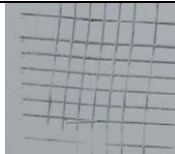



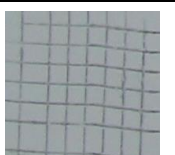
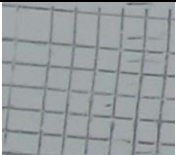


Märkärühmä 2: Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näytenro	Alumiiniseos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
3b	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
17	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
32b	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
45b	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

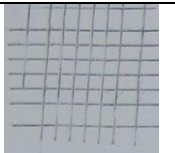
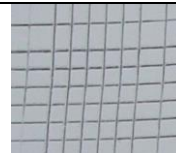
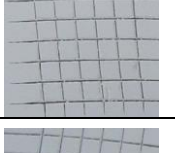
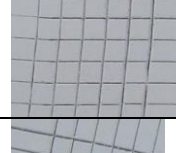
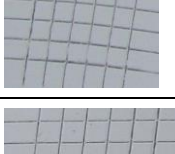
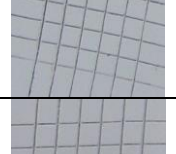
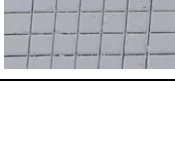
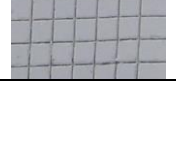
LIITE III 2(3) Hilaristikkokokeen tulokset ennen keinovanhennusta

Märkärühmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiiniseos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
6b	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
20b	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
34b	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
48b	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	




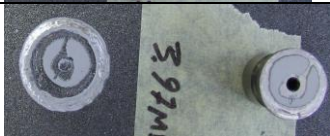

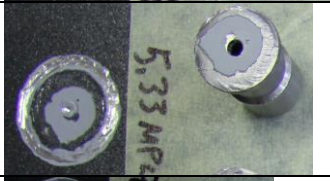


Jauheryhmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiiniseos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
1b	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
15b	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
29b	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
43b	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

LIITE III 3(3) Hilaristikkokokeen tulokset ennen keinovanhennusta









Jauheryhmä 2: Zirkonium-kromi-konversiopinnoitus + Jauhemaalalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näytenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
4b	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
18b	EN AW-5754 H22	2a, 2 mm	0		0	
31b	EN AW-6060 T6	2a, 2 mm	0		0	
46b	EN AW-6082 T6	2a, 2 mm	0		0	

Jauheryhmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näytenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
5b	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
19b	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
33b	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
54	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

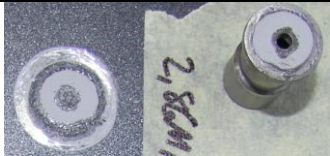
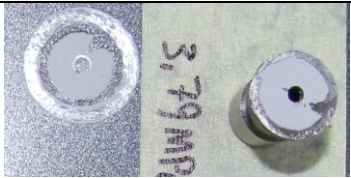

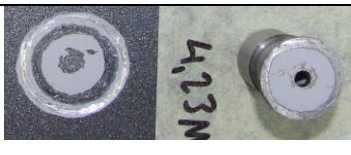


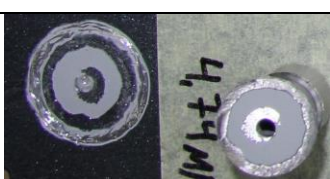

LIITE IV 1(8) Vetokokeen tulokset ennen keinovanhennusta

Märkärühmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [Mpa]	Murtu- matyyppi	Kuva
2b	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	4,37	80 % B, 20 % Y	
		Määrittys 2:	4,17	80 % B, 20 % Y	
16b	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	4,34	60 % B, 40 % Y	
		Määrittys 2:	3,97	50 % B, 50 % Y	
30b	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	5,55	30 %, 70 % Y	
		Määrittys 2:	5,33	40 % B, 60 % Y	
44b	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	4,2	50 % B, 50 % Y	
		Määrittys 2:	5,37	70 % B, 30 % Y	

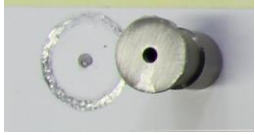
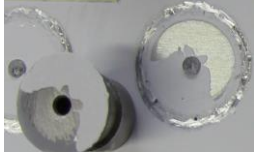
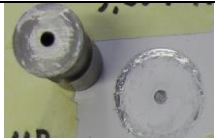


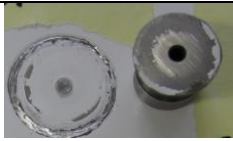

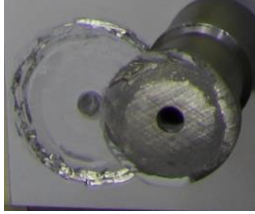
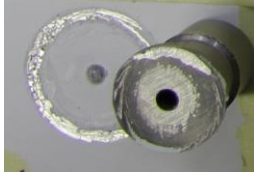
LIITE IV 2(8) Vetokokeen tulokset ennen keino vanhennusta

Märkärühmä 2: Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus					
Näyte-nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolujuus [Mpa]	Murtu-ma-tyyppi	Kuva
3b	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	3,72	80 % B, 20 % Y	
		Määrittys 2:	3,92	80 % B, 20 % Y	
17	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	3,21	50 % C, 50 % Y	
		Määrittys 2:	4,59	70 % B, 30 % Y	
32b	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	4,41	90 % Y 10 % B	
		Määrittys 2:	4,92	70 % Y, 30 % B	
45b	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	3,15	60 % C, 40 % Y	
		Määrittys 2:	4,52	60 % Y, 40 % B	

LIITE IV 3(8) Vetokokeen tulokset ennen keinovanhennusta


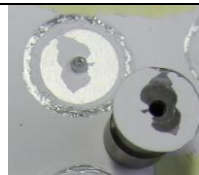
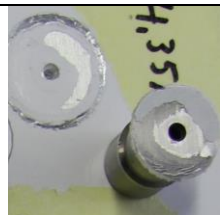
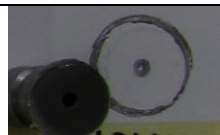

Märkäryhmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolujuus [Mpa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
6b	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	2,86	50 % B, 50 % Y	
		Määrittys 2:	3,79	80 % B, 20 % Y	
20b	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	3,44	60 % B, 40 % Y	
		Määrittys 2:	4,23	60 % B, 40 % Y	
34b	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	6,32	60 % B, 40 % Y	
		Määrittys 2:	6,47	70 % Y, 30 % B	
48b	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	4,74	50 % B, 50 % Y	
		Määrittys 2:	4,03	60 % B 40 % Y	

LIITE IV 4(8) Vetokokeen tulokset ennen keinovanhennusta

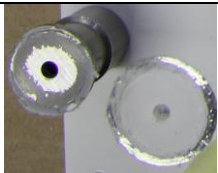

Jauheryhmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [Mpa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
1b	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	1,89	100 % Y	
		Määrittys 2:	5,35	60 % A/B, 40 % Y	
		Määrittys 3:	5,35	100 % Y	
15b	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	2,33	100 % Y	
		Määrittys 2:	8,27	100 % Y	
		Määrittys 3:	8,02	90 % Y, 10 % A/B	
29b	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	4,19	100 % Y	
		Määrittys 2:	12,43	100 % Y	
		Määrittys 3:	10,38	100 % Y	

LIITE IV 5(8) Vetokokeen tulokset ennen keinoivanhennusta


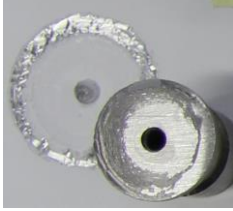

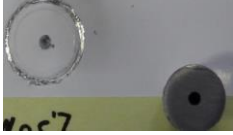

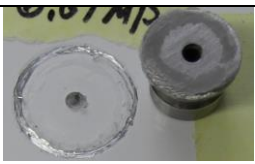
43b	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	4,43	100 % Y	
		Määrittys 2:	9,07	100 % Y	
		Määrittys 3:	11,03	90 % Y, 10 % A/B	

Jauheryhmä 2: Zirkonium-kromi-konversiopinnoitus + Jauhemaalaus					
Näyte-nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu-juus [MPa]	Murtumatyyppi	Kuva
4b	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	3,49	100 % Y	
		Määrittys 2:	5,24	80 % A/B, 20 % y	
		Määrittys 3:	4,35	70 % Y, 30 % A/B	
18b	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	2,40	100 % Y	
		Määrittys 2:	6,54	90 % Y, 10 % A/B	

LIITE IV 6(8) Vetokokeen tulokset ennen keinovanhennusta

		Määrittys 3:	6,57	90 % Y, 10 % A/B	
31b	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	4,48	100 % Y	
		Määrittys 2:	16,32	100 % Y	
		Määrittys 3:	9,13	100 % Y	
46b	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	2,99	100 % Y	
		Määrittys 2:	9,17	100 % Y	
		Määrittys 3:	11,00	80 % Y, 20 % A/B	

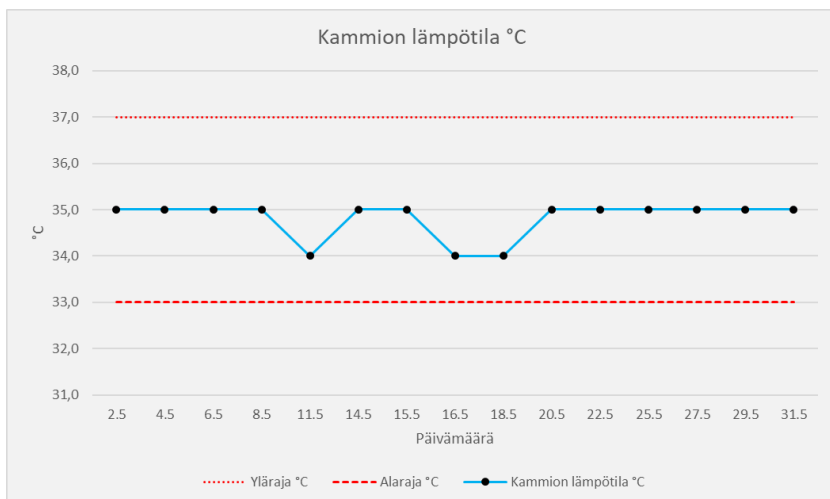
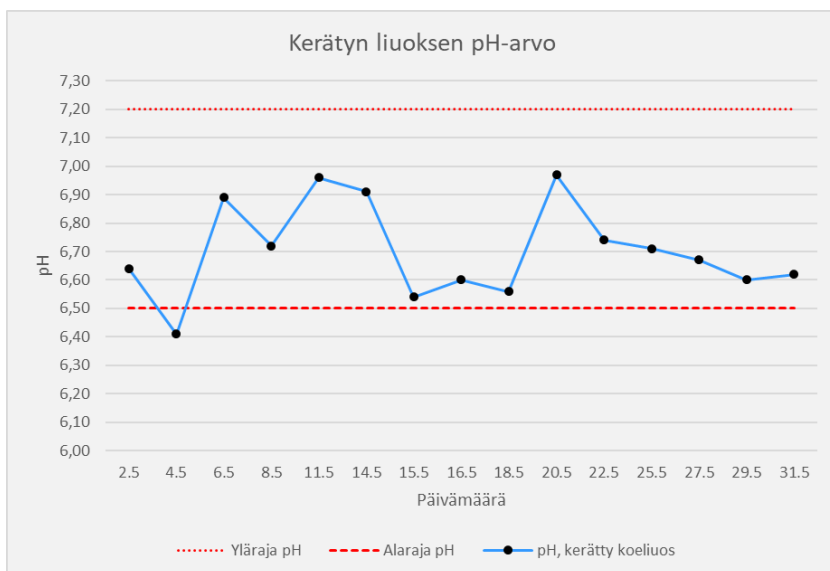
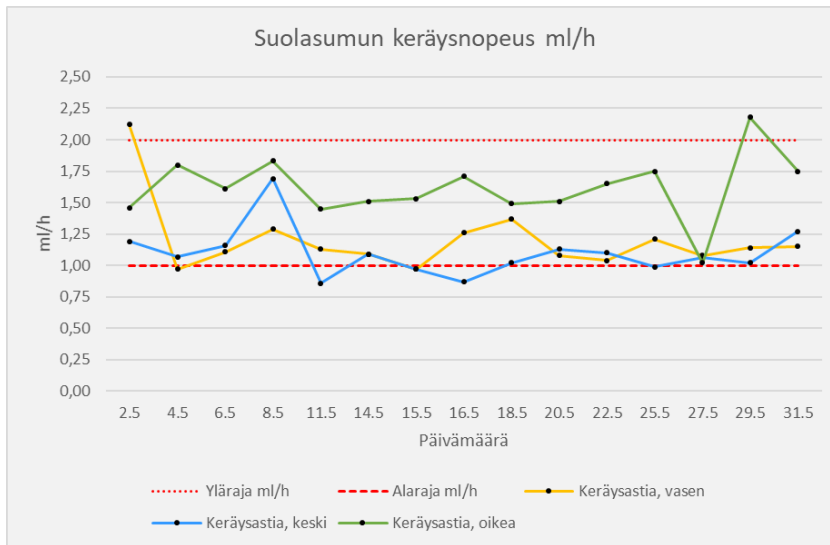
LIITE IV 7(8) Vetokokeen tulokset ennen keinoivanhennusta

Jauheryhmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
5b	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	1,71	100 % Y	
		Määrittys 2:	6,33	100 % Y	
		Määrittys 3:	5,66	100 % Y	
19b	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	2,30	100 % Y	
		Määrittys 2:	6,92	100 % Y	
		Määrittys 3:	6,61	100 % Y	

LIITE IV 8(8) Vetokokeen tulokset ennen keinovanhennusta

33b	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	2,51	100 % Y	
		Määrittys 2:	16,53	100 % Y	
		Määrittys 3:	13,05	90 % Y, 10 % A/B	
54	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	3,21	100 % Y	
		Määrittys 2:	7,77	100 % Y	
		Määrittys 3:	8,02	90 % Y, 10 % A/B	

LIITE V 1(3) Suolasumukammion valvontatiedot ja syövyttävyyden määrittäminen

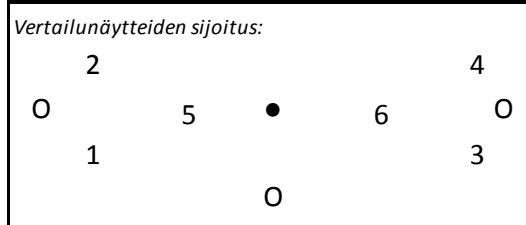


LIITE V 2(3) Suolasumukammion valvontatiedot ja syövyttävyyden määrittäminen

Kammion syövyttävyyden arviointi:

Menetelmä:	Standardin SFS-EN ISO 9227 kohta 7 Kammion syövyttävyyden arviointimenetelmä
Aika:	4.5.2020 – 6.5.2020. Koejakso 48 tuntia.
Vertailunäytteet:	6 kpl 150 x 70 x 1 mm CR4-teräslevyä.
Rasitettu pinta-ala:	0,01094 m ²
Näytteiden käsittely ennen koetta:	Puhdistus etanolilla ja taustapuolen suojaus teipillä.
Näytteiden sijainti kammiossa:	Rasitettava pinta-ala ylöspäin noin 20° kulmassa pystysuorasta. Korkeus suhteessa sumutussuuttimeen vastaava kuin varsinaisilla koekappaleilla.

Suolasumukammio

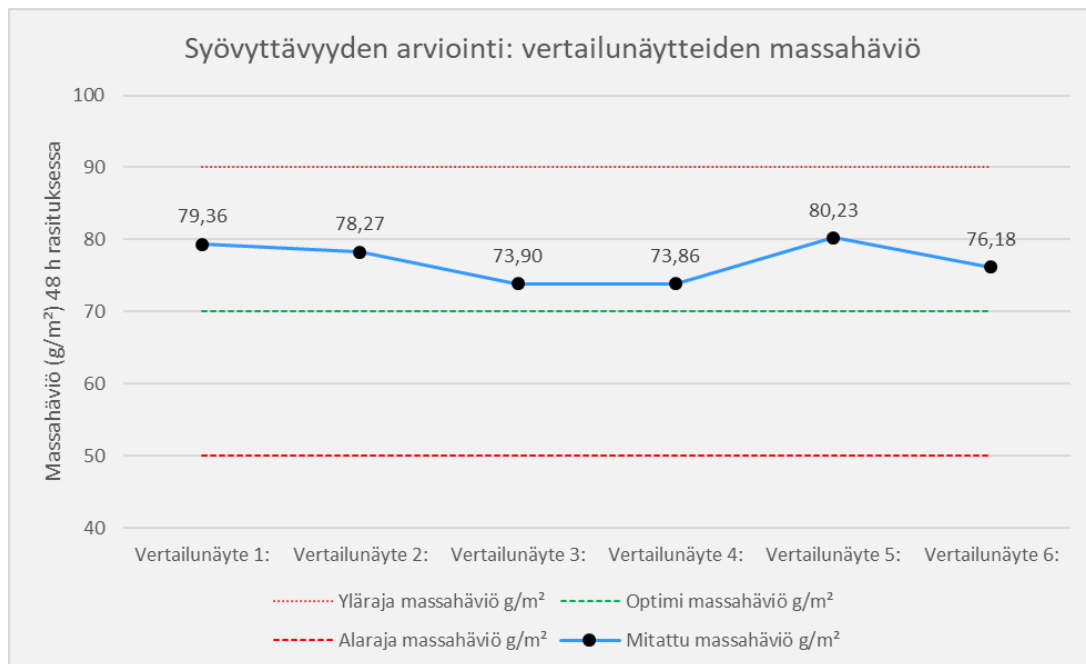


- = sumutussuutin 1 - 6 = Vertailunäytteet
- = keruuastia

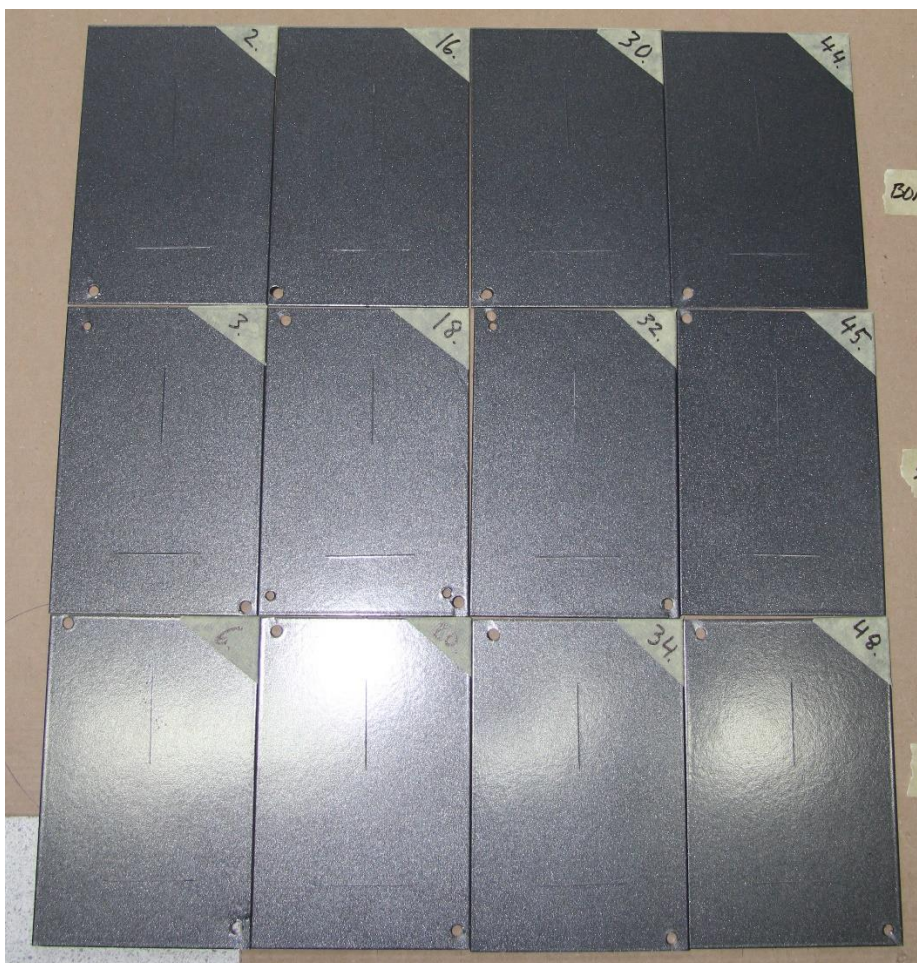
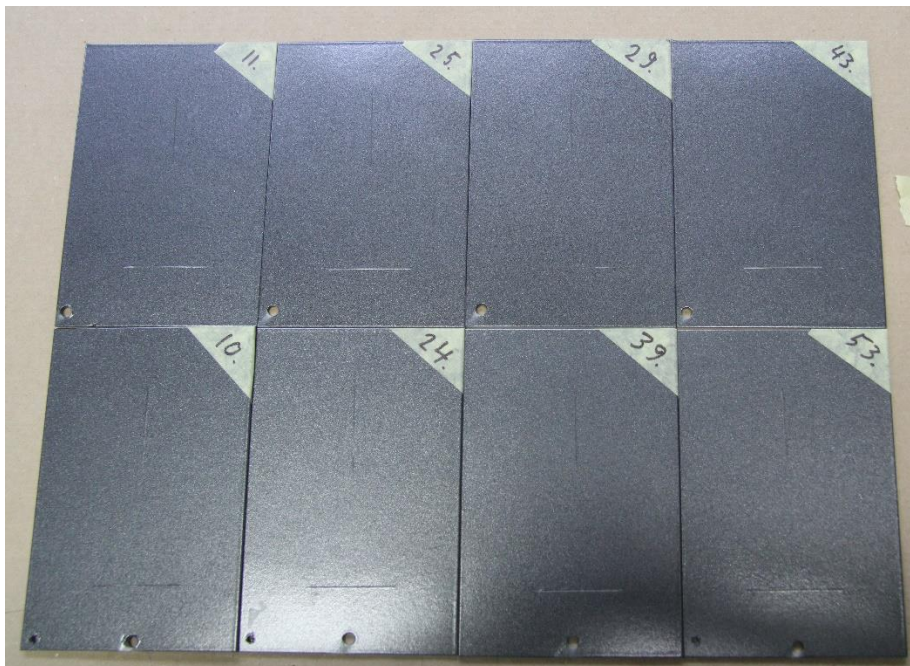
Näytteiden käsittely	
koejakson jälkeen:	Näytteet puhdistettiin kemiallisesti pitämällä niitä 10 minuuttia analyysilaatuisen ammoniumsitraatin ja veden liuoksessa, jonka lämpötila oli 24,2 °C. Tämän jälkeen näytteet huuhdeltiin vedellä ja etanolilla ja kuivattiin.
Tulokset:	

Vertailunäyte nro	Massa ennen rasitusta (g)	Massa 48 h rasituksen jälkeen (g)	Massahäviö (g)	Massahäviö (g/m ²)
Vertailunäyte 1:	88,6710	87,8028	0,8682	79,36
Vertailunäyte 2:	88,5996	87,7433	0,8563	78,27
Vertailunäyte 3:	88,7232	87,9147	0,8085	73,90
Vertailunäyte 4:	88,5513	87,7433	0,808	73,86
Vertailunäyte 5:	87,2878	86,4101	0,8777	80,23
Vertailunäyte 6:	88,8809	88,0475	0,8334	76,18
Keskiarvo:			0,8420	76,97

LIITE V 3(3) Suolasumukammion valvontatiedot ja syövyttävyyden määrittäminen



LIITE VI 1(2) Valokuvat maalatuista näytteistä keinovalaistuksen jälkeen



LIITE VI 2(2) Valokuvat maalatuista näytteistä keino vanhennuksen jälkeen



LIITE VII 1(1) Pinnoitteiden huononemisen arvioinnin tulokset

Näytteryhmä	Näyttenro	Alumiiniseos	SFS EN ISO 4628-2: Rakkuloitu misaste	SFS EN ISO 4628-3: Ruostumisa ste	SFS EN ISO 4628-4: Halkeilemi saste	SFS EN ISO 4628-5: Hiiliseilyaste	Sanallinen tarkennus
Vertailuryhmä 1: SaS + Märkä	11	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	25	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	29	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	43	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Vertailuryhmä 2: Liutinpöyhintä + Märkä	10	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	24	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	39	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	53	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Märkäryhmä 1: Zr- konversio + Märkä	2	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	16	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	30	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	44	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Märkäryhmä 2: Zr-Cr -konversio + Märkä	3	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	18	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	32	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	45	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Märkäryhmä 3: Silaanikonversio + Märkä	6	EN AW-1050 H14	1 (S2)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	Rakkuloituminen havaittavissa vain viiltojen välittömässä läheisyydessä. Etäisyys alle 10 mm viillosta.
	20	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	34	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	48	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Vertailuryhmä 3: SaS + Jauhe	7	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	21	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	35	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	49	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Vertailuryhmä 4: Liutinpöyhintä + Jauhe	9	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	23	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	37	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	51	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Jauheryhmä 1: Zr- konversio + Jauhe	1	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	8	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	15	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	22	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	36	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	38	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
Jauheryhmä 2: Zr-Cr- konversio + Jauhe	52	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	4	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	13	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	17b	EN AW-5754 H22	2 (S2)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	Paikallista rakkuloitumista.
	27	EN AW-5754 H22	2 (S2)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	Paikallista rakkuloitumista.
	31	EN AW-6060 T6	1 (S2)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	Kolme pientä rakkulaa.
Jauheryhmä 3: Silaanikonversio + Jauhe	46	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	5	EN AW-1050 H14	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	19	EN AW-5754 H22	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	33	EN AW-6060 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-
	47b	EN AW-6082 T6	0 (S0)	Ri 0	0 (S0)	0 (S0)	-

LIITE VIII 1(4) Maalin irtoamisen ja korroosion mittaustulokset viillosta

MAALIN IRTOAMINEN VIILLOSTA: PYSTYSUORA VIILTO			Mittau tulokset, mittauspisteet a-f, maalin irtoamisen kokonaisleveys (mm)						Keskimääräinen irtoamisen kokonaisleveys d, (mm)	TULOS	
Näytteryhmä	Näyte nro	Alumiiniseos	a	b	c	d	e	f		Maalin irtoaminen, d, mm	Irtoamisen luonne
Vertailuryhmä 1: SaS + Märkä	11	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	25	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	29	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	43	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Vertailuryhmä 2: Liuotinpyyhintä + Märkä	10	EN AW-1050 H14	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,08	0,5	A/B
	24	EN AW-5754 H22	2,00	2,00	2,00	1,50	0,00	1,00	1,42	0,5	B/C
	39	EN AW-6060 T6	2,50	1,00	1,50	2,50	1,00	1,50	1,67	0,5	B/C
	53	EN AW-6082 T6	1,50	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	1,42	0,5	B/C
Märkäryhmä 1: Zr-konversio + Märkä	2	EN AW-1050 H14	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,5	A/B
	16	EN AW-5754 H22	0,00	0,50	0,50	0,00	1,00	1,50	0,58	0,0	B/C
	30	EN AW-6060 T6	1,00	0,50	0,00	1,00	0,50	0,50	0,58	0,0	B/C
	44	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,25	0,0	B/C
Märkäryhmä 2: Zr-Cr-konversio + Märkä	3	EN AW-1050 H14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,83	0,5	A/B
	18	EN AW-5754 H22	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0	A/B
	32	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,50	0,00	0,50	0,50	0,25	0,0	B/C
	45	EN AW-6082 T6	0,50	2,00	0,50	1,50	0,50	1,50	1,08	0,5	B/C
Märkäryhmä 3: Silaanikonversio + Märkä	6	EN AW-1050 H14	0,00	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,25	0,0	B/C
	20	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,50	0,50	0,50	0,50	0,33	0,0	B/C
	34	EN AW-6060 T6	5,00	0,50	0,00	0,00	0,50	0,50	1,08	0,5	B/C
	48	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	1,50	1,00	0,00	0,00	0,42	0,0	B/C
Vertailuryhmä 3: SaS + Jauhe	7	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	21	EN AW-5754 H22	2,00	1,50	3,00	2,50	2,00	1,50	2,08	1,0	A/B
	35	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	49	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Vertailuryhmä 4: Liuotinpyyhintä + Jauhe	9	EN AW-1050 H14	2,00	1,50	2,00	1,00	2,50	2,50	1,92	1,0	A/B
	23	EN AW-5754 H22	1,00	1,00	1,00	0,50	1,00	3,00	1,25	0,5	A/B
	37	EN AW-6060 T6	10,00	9,00	9,50	10,00	8,00	8,00	9,08	4,5	A/B
	51	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,50	0,33	0,0	A/B
Jauheryhmä 1: Zr-konversio + Jauhe	1	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	8	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	15	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	22	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	36	EN AW-6060 T6	1,00	1,50	0,50	1,00	0,00	0,00	0,67	0,0	A/B
	38	EN AW-6060 T6	3,00	3,50	3,50	3,50	1,00	1,50	2,67	1,0	A/B
Jauheryhmä 2: Zr-Cr-konversio + Jauhe	52	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	4	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,17	0,0	A/B
	13	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,33	0,0	A/B
	17b	EN AW-5754 H22	1,00	1,50	2,50	5,50	1,00	0,00	1,92	1,0	A/B
	27	EN AW-5754 H22	0,50	0,50	2,00	2,50	0,00	0,50	1,00	0,5	A/B
	31	EN AW-6060 T6	12,00	6,00	7,50	6,50	6,00	6,00	7,33	3,5	A/B
Jauheryhmä 3: Silaanikonversio + Jauhe	46	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	A/B
	5	EN AW-1050 H14	4,00	3,50	4,00	4,00	5,00	5,00	4,25	2,0	A/B
	19	EN AW-5754 H22	2,50	4,50	5,00	3,50	6,50	4,00	4,33	2,0	A/B
	33	EN AW-6060 T6	12,50	13,50	13,50	10,50	8,00	8,50	11,08	5,5	A/B
	47b	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Viillon alkuperäinen leveys, w = 0,2 mm. Mittauspisteet a -f: 6, 12, 18, 24, 30 ja 36 mm viillon alkupisteestä.											
Maalin irtoamisen luonne: "A/B" = 1. maalikerros irtoaa alustasta, "B/C" = pintamaali irtoaa pohjamaalista, "- " = irtoamista ei havaittavissa.											

LIITE VIII 2(4) Maalin irtoamisen ja korroosion mittaustulokset viillosta

MAALIN IRTOAMINEN VIILLOSTA: VAAKASUORA VIILTO			Mittaus tulokset, mittauspisteet a- f, maalin irtoamisen kokonaisleveys (mm)						Keskimääräinen irtoamisen kokonaisleveys s _d , (mm)	TULOS	Irtoamisen luonne
Näyteryhmä	Näyte nro	Alumiiniseos	a	b	c	d	e	f		Maalin irtoaminen, d (mm)	
Vertailuryhmä 1: SaS + Märkä	11	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	25	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	29	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	43	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Vertailuryhmä 2: Liuotinpyyhintä + Märkä	10	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	1,00	2,00	0,00	1,50	0,75	0,5	B/C
	24	EN AW-5754 H22	0,00	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	0,75	0,5	A/B
	39	EN AW-6060 T6	3,50	2,50	3,00	2,00	2,00	2,00	2,50	1,0	A/B
	53	EN AW-6082 T6	0,50	1,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,67	0,0	B/C
Märkäryhmä 1: Zr-konversio + Märkä	2	EN AW-1050 H14	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,33	0,0	B/C
	16	EN AW-5754 H22	0,00	0,50	0,50	0,00	1,00	0,00	0,33	0,0	B/C
	30	EN AW-6060 T6	0,50	1,00	1,00	0,50	0,50	0,00	0,58	0,0	B/C
	44	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,08	0,0	B/C
Märkäryhmä 2: Zr-Cr-konversio + Märkä	3	EN AW-1050 H14	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0	A/B
	18	EN AW-5754 H22	1,00	0,00	0,50	1,00	0,50	1,00	0,67	0,0	B/C
	32	EN AW-6060 T6	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0	B/C
	45	EN AW-6082 T6	1,50	1,00	1,00	1,00	0,00	1,00	0,92	0,5	B/C
Märkäryhmä 3: Silaanikonversio + Märkä	6	EN AW-1050 H14	0,00	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,33	0,0	B/C
	20	EN AW-5754 H22	0,50	1,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,33	0,0	B/C
	34	EN AW-6060 T6	0,00	1,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,42	0,0	B/C
	48	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Vertailuryhmä 3: SaS + Jauhe	7	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	21	EN AW-5754 H22	3,50	2,50	2,50	3,00	3,00	3,00	2,92	1,5	A/B
	35	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	49	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Vertailuryhmä 4: Liuotinpyyhintä + Jauhe	9	EN AW-1050 H14	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,33	0,5	A/B
	23	EN AW-5754 H22	2,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,0	A/B
	37	EN AW-6060 T6	1,50	1,50	2,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,5	A/B
	51	EN AW-6082 T6	2,50	0,00	0,00	3,00	6,50	0,50	2,08	1,0	A/B
Jauheryhmä 1: Zr-konversio + Jauhe	1	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	8	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	15	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	22	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	36	EN AW-6060 T6	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,50	0,5	A/B
	38	EN AW-6060 T6	2,50	1,50	2,00	1,50	1,50	1,50	1,75	1,0	A/B
	52	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
Jauheryhmä 2: Zr-Cr-konversio + Jauhe	4	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,08	0,0	A/B
	13	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,17	0,0	A/B
	17b	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	-
	27	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,42	0,0	A/B
	31	EN AW-6060 T6	8,00	4,50	7,00	5,50	7,00	7,00	6,50	3,0	A/B
	46	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	A/B
Jauheryhmä 3: Silaanikonversio + Jauhe	5	EN AW-1050 H14	1,50	1,50	2,50	3,50	3,50	0,00	2,08	1,0	A/B
	19	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	1,50	2,00	1,00	1,50	1,00	0,5	A/B
	33	EN AW-6060 T6	6,00	6,50	10,50	8,00	11,00	5,50	7,92	4,0	A/B
	47b	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,00	0,67	0,0	A/B
Viillon alkuperäinen leveys, w = 0,2 mm. Mittauspisteet a - f: 6, 12, 18, 24, 30 ja 36 mm viillon alkupisteestä.											
Maalin irtoamisen luonne: "A/B" = 1. maalikerros irtoaa alustasta, "B/C" = pintamaali irtoaa pohjamaalista, " - " = irtoamista ei havaittavissa.											

LIITE VIII 3(4) Maalin irtoamisen ja korroosion mittaustulokset viillosta

KORROOSIO VIILLOSTA: PYSTYSUORA VIILTO			Mittaustulokset, mittauspisteet a - f, alustan korroosion kokonaisleveys (mm)						Keskimääräinen korroosion kokonaisleveys s wc (mm)	TULOS
Maalaus	Näyte nro	Alumiiniseos	a	b	c	d	e	f		Korroosio viillosta, c, mm
Vertailuryhmä 1: SaS + Märkä	11	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	25	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	29	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	43	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Vertailuryhmä 2: Liutotinpyyhintä + Märkä	10	EN AW-1050 H14	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,08	0,5
	24	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	39	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	53	EN AW-6082 T6	1,50	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	1,42	0,5
Märkäryhmä 1: Zr- konversio + Märkä	2	EN AW-1050 H14	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,92	0,5
	16	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	30	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	44	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Märkäryhmä 2: Zr-Cr - konversio + Märkä	3	EN AW-1050 H14	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,83	0,5
	18	EN AW-5754 H22	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0
	32	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	45	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Märkäryhmä 3: Silaanikonversio + Märkä	6	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	20	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	34	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	48	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Vertailuryhmä 3: SaS + Jauhe	7	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	21	EN AW-5754 H22	2,00	1,50	3,00	2,50	2,00	1,50	2,08	1,0
	35	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	49	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Vertailuryhmä 4: Liutotinpyyhintä + Jauhe	9	EN AW-1050 H14	2,00	1,50	2,00	1,00	2,50	2,50	1,92	1,0
	23	EN AW-5754 H22	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,50	0,42	0,0
	37	EN AW-6060 T6	9,00	8,00	8,00	8,00	7,50	6,50	7,83	4,0
	51	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Jauheryhmä 1: Zr- konversio + Jauhe	1	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	8	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	15	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	22	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	36	EN AW-6060 T6	1,00	1,50	0,50	1,00	0,00	0,00	0,67	0,0
	38	EN AW-6060 T6	2,50	1,50	2,00	1,50	1,50	1,50	1,75	1,0
Jauheryhmä 2: Zr-Cr - konversio + Jauhe	52	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	4	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,17	0,0
	13	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	1,00	0,00	0,00	1,00	0,33	0,0
	17b	EN AW-5754 H22	0,50	0,50	2,50	5,50	0,50	0,00	1,58	0,5
	27	EN AW-5754 H22	0,50	0,50	2,00	2,50	0,00	0,50	1,00	0,5
	31	EN AW-6060 T6	12,00	6,00	7,50	6,50	6,00	6,00	7,33	3,5
Jauheryhmä 3: Silaanikonversio + Jauhe	46	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	5	EN AW-1050 H14	2,00	1,50	1,00	1,50	2,50	3,00	1,92	1,0
	19	EN AW-5754 H22	1,50	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00	2,42	1,0
	33	EN AW-6060 T6	3,00	4,00	6,00	5,00	4,50	4,00	4,42	2,0
	47b	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0

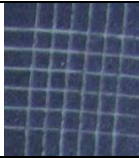
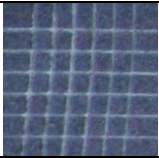
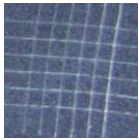
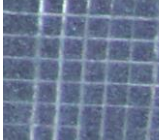
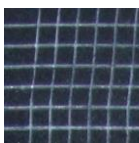
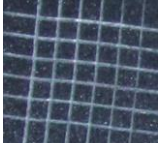
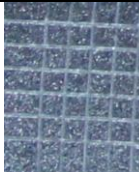
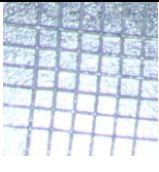
Viillon alkuperäinen leveys, w = 0,2 mm. Mittauspisteet a - f: 6, 12, 18, 24, 30 ja 36 mm viillon alkupisteestä.

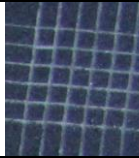
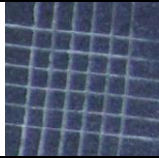
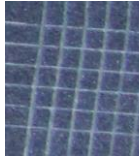
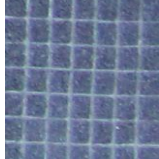
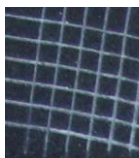
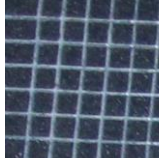
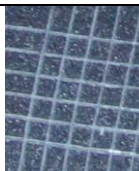
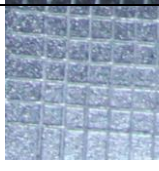
LIITE VIII 4(4) Maalin irtoamisen ja korroosion mittaustulokset viillosta

KORROOSIO VIILLOSTA: VAAKASUORA VIILTO			Mittaustulokset, mittauspisteet a - f, alustan korroosion kokonaisleveys (mm)						Keskimääräinen korroosion kokonaisleveys wc (mm)	TULOS Korroosio
			a	b	c	d	e	f		
Maalaus	Näyte	Alumiiniseos								
Vertailuryhmä 1: SaS + Märkä	11	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	25	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	29	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	43	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Vertailuryhmä 2: Liuotinpyyhintä + Märkä	10	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	24	EN AW-5754 H22	0,00	1,00	1,00	0,50	1,00	1,00	0,75	0,5
	39	EN AW-6060 T6	3,50	2,50	3,00	2,00	2,00	2,00	2,50	1,0
	53	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Märkäryhmä 1: Zr-konversio + Märkä	2	EN AW-1050 H14	0,00	0,50	0,50	0,00	0,50	0,50	0,33	0,0
	16	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	30	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	44	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Märkäryhmä 2: Zr-Cr -konversio + Märkä	3	EN AW-1050 H14	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,0
	18	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	32	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	45	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Märkäryhmä 3: Silaanikonversio + Märkä	6	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	20	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	34	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	48	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Vertailuryhmä 3: SaS + Jauhe	7	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	21	EN AW-5754 H22	2,00	1,50	3,00	2,50	2,00	1,50	2,08	1,0
	35	EN AW-6060 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	49	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Vertailuryhmä 4: Liuotinpyyhintä + Jauhe	9	EN AW-1050 H14	1,00	1,00	1,00	2,00	2,00	1,00	1,33	0,5
	23	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	37	EN AW-6060 T6	1,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,42	0,0
	51	EN AW-6082 T6	2,50	0,00	0,00	4,00	4,50	0,00	1,83	1,0
Jauheryhmä 1: Zr-konversio + Jauhe	1	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	8	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	15	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	22	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	36	EN AW-6060 T6	1,00	1,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,50	0,5
	38	EN AW-6060 T6	2,50	1,50	2,00	1,50	1,50	1,50	1,75	1,0
	52	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Jauheryhmä 2: Zr-Cr -konversio + Jauhe	4	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,08	0,0
	13	EN AW-1050 H14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,08	0,0
	17b	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
	27	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	1,00	0,50	0,50	0,50	0,42	0,0
	31	EN AW-6060 T6	8,00	4,50	7,00	5,50	7,00	7,00	6,50	3,0
	46	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
Jauheryhmä 3: Silaanikonversio + Jauhe	5	EN AW-1050 H14	1,50	1,00	1,50	2,00	2,00	0,00	1,33	0,5
	19	EN AW-5754 H22	0,00	0,00	1,50	2,00	1,00	1,50	1,00	0,5
	33	EN AW-6060 T6	8,50	8,50	8,00	6,00	5,50	6,50	7,17	3,5
	47b	EN AW-6082 T6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0

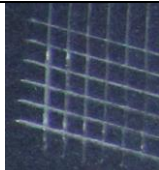
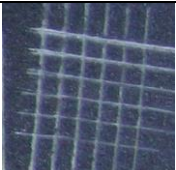
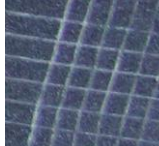
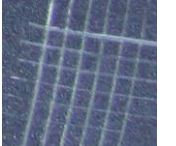
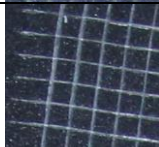
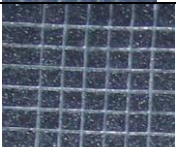
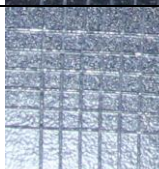

Viillon alkuperäinen leveys, w = 0,2 mm. Mittauspisteet a - f: 6, 12, 18, 24, 30 ja 36 mm viillon alkupisteestä.

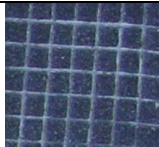
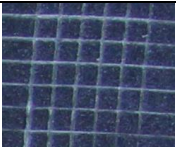
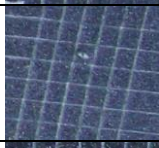
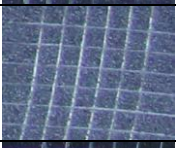
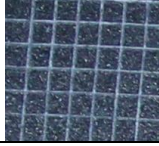
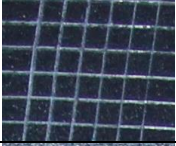
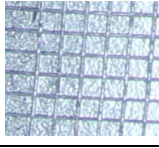
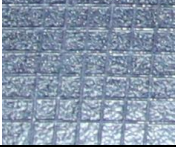
LIITE IX 1(6) Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

Märkäryhmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
2	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
16	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
30	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
44	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

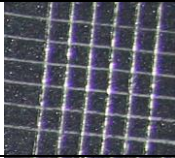
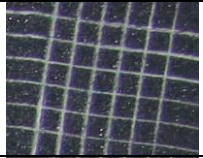
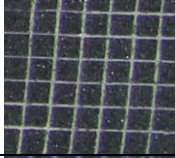
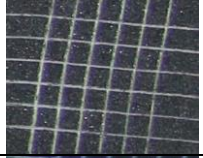
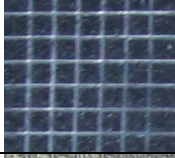
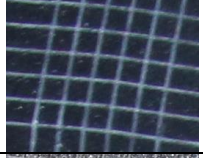
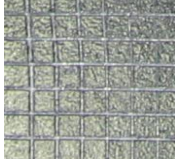
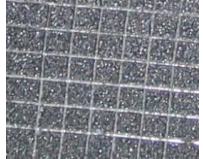
Märkäryhmä 2: Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
3	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
18	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
32	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
45	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

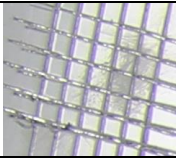
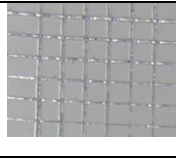
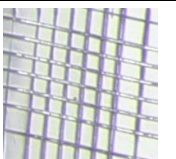
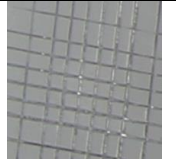
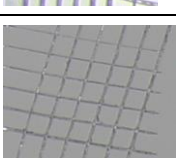
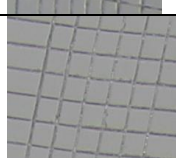
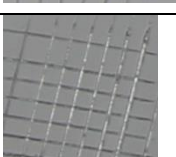

LIITE IX 2(6) Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

Märkärühmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
6	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
20	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
34	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
48	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

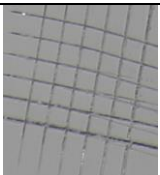
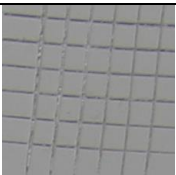
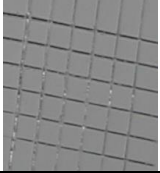



Vertailuryhmä 1: Raesuihkupuhdistus + Märkämaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
11	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
25	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
29	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
43	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

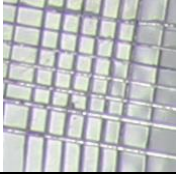
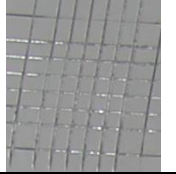
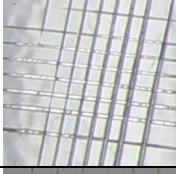

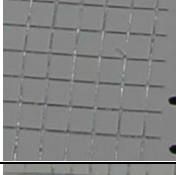
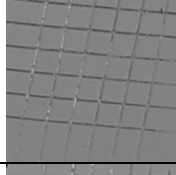
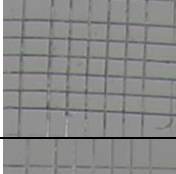
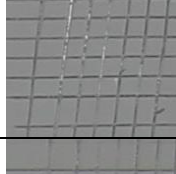
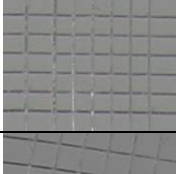
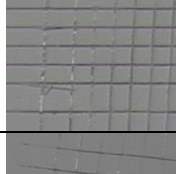
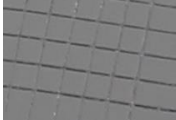
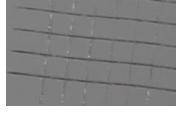
LIITE IX 3(6) Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

Vertailuryhmä 2: Liuotinpuhdistus + Märkämäaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
10	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
24	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
39	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
53	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

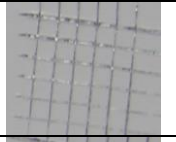
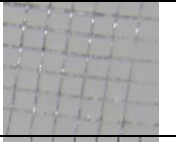



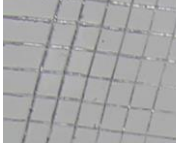


Jauheryhmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
1	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
8	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
15	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
22	EN AW-5754 H22	2a, 2 mm	0		0	

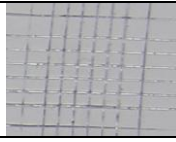
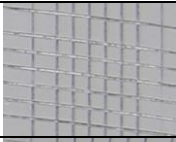
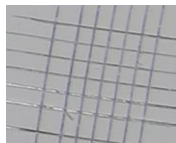

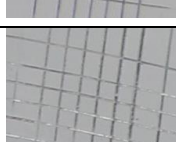
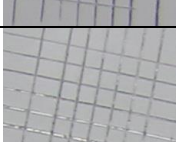

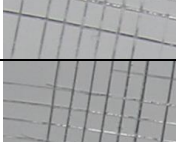
LIITE IX 4(6) Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

36	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
38	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
52	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	


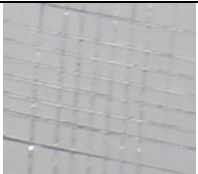


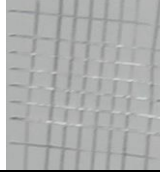
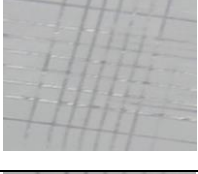


Jauheryhmä 2: Zirkonium-kromi-konversiopinnoitus + Jauhemaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
4	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
13	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
17b	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
27	EN AW-5754 H22	2a, 2 mm	0		0	
31	EN AW-6060 T6	2a, 2 mm	0		0	
46	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

LIITE IX 5(6) Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen



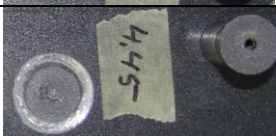





Jauheryhmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näytenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
5	EN AW-1050 H14	2a, 3 mm	0		0	
19	EN AW-5754 H22	2a, 3 mm	0		0	
33	EN AW-6060 T6	2a, 3 mm	0		0	
47b	EN AW-6082 T6	2a, 3 mm	0		0	

Vertailuryhmä 3: Raesuihkupuhdistus + Jauhemaalalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näytenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
7	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
21	EN AW-5754 H22	2a, 2 mm	0		0	
35	EN AW-6060 T6	2a, 2 mm	0		0	
49	EN AW-6082 T6	2a, 2 mm	0		0	




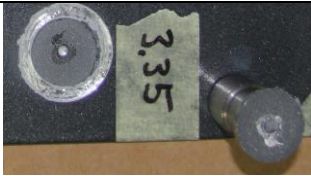


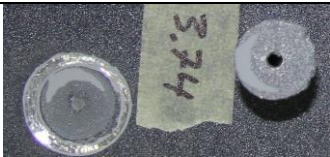
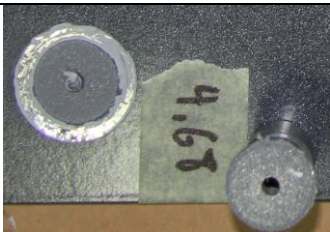
LIITE IX 6(6) Hilaristikkokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

Vertailuryhmä 4: Liuotinpuhdistus + Jauhemaalaus			Leikkaus 1		Leikkaus 2	
Näyttenro	Alumiini-seos	Terä	Luokitus	Kuva	Luokitus	Kuva
9	EN AW-1050 H14	2a, 2 mm	0		0	
23	EN AW-5754 H22	2a, 2 mm	0		0	
37	EN AW-6060 T6	2a, 2 mm	0		0	
51	EN AW-6082 T6	2a, 2 mm	0		0	

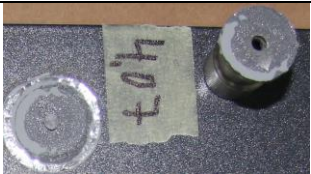


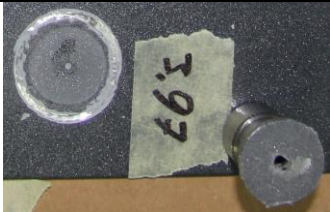

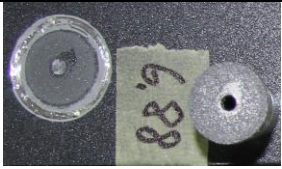
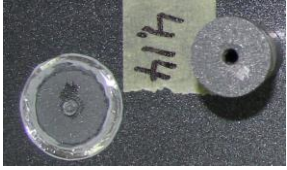

LIITE X 1(13) Vetokokeen tulokset keinovalvonnun jälkeen

Märkärühmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Märkämaalaus					
Näyte-nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolujuus [MPa]	Murtumatyyppi	Kuva
2	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	3,15	70 % C, 20 % B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	3,66	90 % C, 10 % Y/Z	
16	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	4,45	100 % C	
		Määrittys 2:	3,69	90 % C, 10 % Y/Z	
30	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	6,76	100 % C	
		Määrittys 2:	6,43	100 % C	
44	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	3,73	80 % C, 10 % B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	4,14	90 % C, 10 % Y/Z	

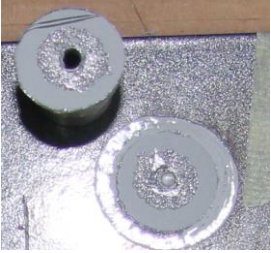
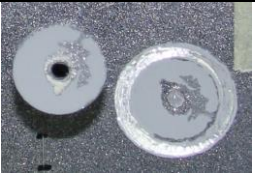

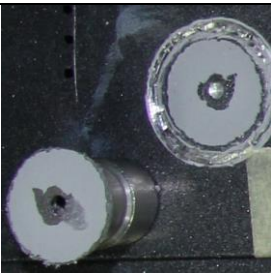
LIITE X 2(13) Vetokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

Märkärühmä 2: Zirkonium-kromikonversiopinnoitus + Märkämaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
3	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	4,31	100 % C	
		Määrittys 2:	2,69	70 % C, 20 % B, 10 % Y/Z	
18	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	3,85	90 % C, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	3,35	90 % C, 10 % Y/Z	
32	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	6,24	90 % C, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	6,64	100 % C	
45	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	3,74	80 % C, 20 % B	
		Määrittys 2:	4,68	100 % C	



LIITE X 3(13) Vetokokeen tulokset keinovalvonnun jälkeen

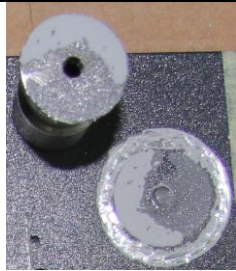
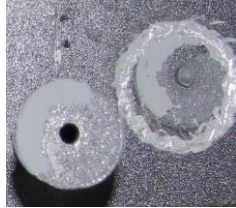
Märkärühmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Märkämaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittäminen	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
6	EN AW-1050 H14	Määrittäminen 1:	4,07	70 % C, 20 % B, 10 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	3,61	80 % C, 10 % B, 10 % Y/Z	
20	EN AW-5754 H22	Määrittäminen 1:	5,08	90 % C, 10 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	3,97	90 % C, 10 % Y/Z	
34	EN AW-6060 T6	Määrittäminen 1:	5,49	90 % C, 10 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	6,88	90 % C, 10 % Y/Z	
48	EN AW-6082 T6	Määrittäminen 1:	4,14	90 % C, 10 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	5,12	100 % C	

LIITE X 4(13) Vetokokeen tulokset keinovalvonnun jälkeen

Vertailuryhmä 1: Raesuihkupuhdistus + Märkämaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittäminen	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
11	EN AW-1050 H14	Määrittäminen 1:	3,31	60 % B, 40 % C	
		Määrittäminen 2:	3,78	70 % C, 30 % B	
25	EN AW-5754 H22	Määrittäminen 1:	5,00	80 % B, 20 % C	
		Määrittäminen 2:	4,37	100 % B	
29	EN AW-6060 T6	Määrittäminen 1:	7,04	100 % B	
		Määrittäminen 2:	7,09	100 % B	

LIITE X 5(13) Vetokokeen tulokset keinoivanhennuksen jälkeen







43	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	4,15	80 % C, 20 % B		
		Määrittys 2:	4,65	70 % C, 30 % B		

Vertailuryhmä 2: Liuotinpuhdistus + Märkämaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
10	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	3,83	60 % C, 40 % B	
		Määrittys 2:	3,42	60 % C, 40 % B	



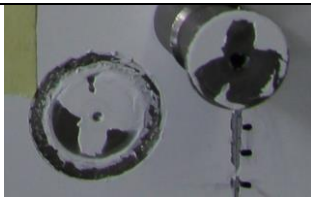
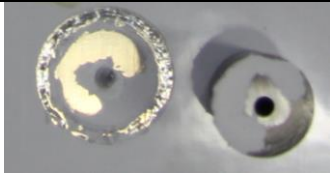
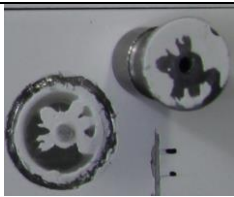


LIITE X 6(13) Vetokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

24	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	4,33	90 % C, 10 % B		
		Määrittys 2:	3,96	60 % C, 40 % B		
39	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	6,96	80 % C, 20 % B		
		Määrittys 2:	7,03	90 % C, 10 % B		
53	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	5,43	50 % C, 50 % B		
		Määrittys 2:	5,12	90 % C, 10 % B		

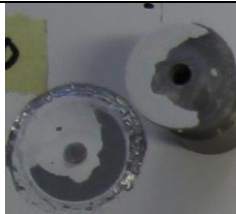


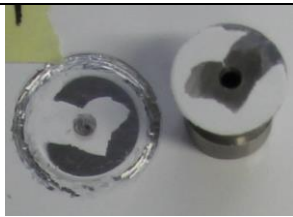
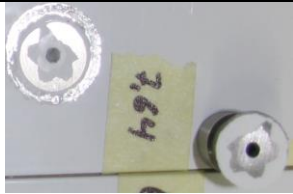
LIITE X 7(13) Vetokokeen tulokset keinovalvonnun jälkeen

Jauheryhmä 1: Zirkoniumkonversiopinnoitus + Jauhemaalauk					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittäminen	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
1	EN AW-1050 H14	Määrittäminen 1:	4,71	80 % Y/Z, 20 % A/B	
		Määrittäminen 2:	5,21	80 % A/B, 20 % Y	
8	EN AW-1050 H14	Määrittäminen 1:	5,75	60 % A/B, 40 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	5,69	50 % A/B, 30 % Y, 20 % Y/Z	
15	EN AW-5754 H22	Määrittäminen 1:	5,55	30 % A/B, 70 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	6,64	80 % Y, 20 % A/B	

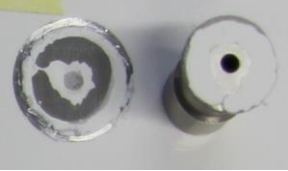
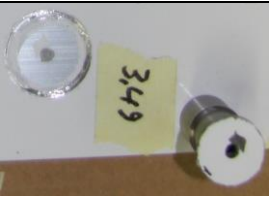
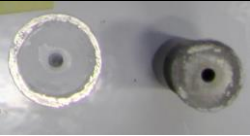

LIITE X 8(13) Vetokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen

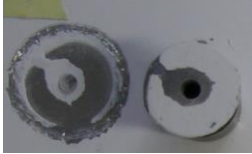
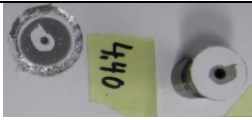

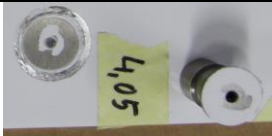
22	EN AW-5754 H22	Määrittely 1:	6,25	60 % Y, 40 % A/B	
		Määrittely 2:	6,27	90 % Y, 10 % / A/B	
36	EN AW-6060 T6	Määrittely 1:	9,33	60 % A/B, 20 % Y/Z, 20 %	
		Määrittely 2:	11,17	70 % Y, 30 % A/B	
38	EN AW-6060 T6	Määrittely 1:	5,80	70 % A/B, 30 % Y	
		Määrittely 2:	10,29	70 % A/B, 30 % Y	
52	EN AW-6082 T6	Määrittely 1:	5,69	60 % A/B, 40 % Y	
		Määrittely 2:	7,93	70 % Y/Z, 20 % Y, 10 % A/B	

LIITE X 9(13) Vetokokeen tulokset keinovalmistuksen jälkeen

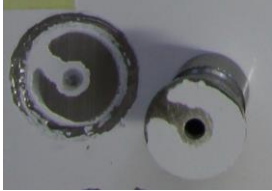
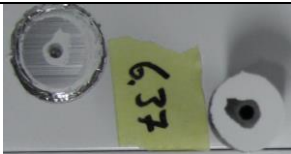


Jauheryhmä 2: Zirkonium-kromi-konversiopinnoitus + Jauhemaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittäminen	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
4	EN AW-1050 H14	Määrittäminen 1:	4,30	50 % A/B, 30 % Y/Z, 20 % Y	
		Määrittäminen 2:	5,01	90 % A/B, 10 % Y/Z	
13	EN AW-1050 H14	Määrittäminen 1:	4,86	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	3,95	90 % A/B, 10 % Y/Z	
17b	EN AW-5754 H22	Määrittäminen 1:	5,94	60 % A/B, 40 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	7,64	60 % A/B, 40 % Y/Z	
27	EN AW-5754 H22	Määrittäminen 1:	5,13	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittäminen 2:	6,62	70 % A/B, 20 % Y, 10 % Y/Z	

LIITE X 10(13) Vetokokeen tulokset keinovanhennuksen jälkeen



31	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	6,54	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	3,49	90 % A/B, 10 % Y/Z	
46	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	10,95	50 % Y/Z, 50 % Y	
		Määrittys 2:	7,92	70 % A/B, 20 % Y, 10 % Y/Z	

Jauheryhmä 3: Silaanikonversiopinnoitus + Jauhemaalauk					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
5	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	4,98	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	4,40	90 % A/B, 10 % Y/Z	
19	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	3,63	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	4,05	90 % A/B, 10 % Y/Z	



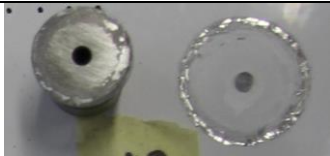
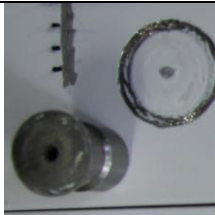

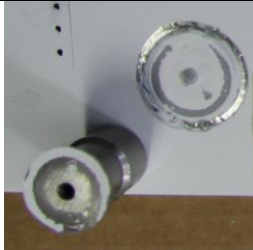
LIITE X 11(13) Vetokokeen tulokset keinovalvannuksen jälkeen

33	EN AW-6060 T6	Määrittely 1:	5,78	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittely 2:	6,37	90 % A/B, 10 % Y/Z	
47b	EN AW-6082 T6	Määrittely 1:	5,02	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittely 2:	5,86	90 % A/B, 10 % Y/Z	


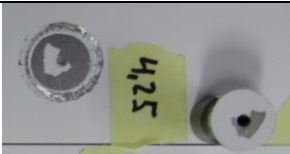
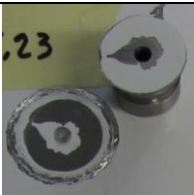
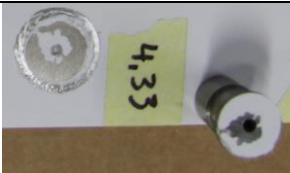
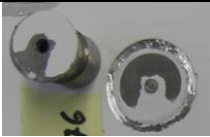


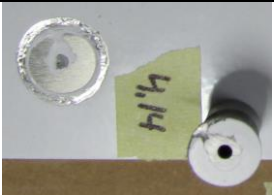
Vertailuryhmä 3: Raesuihkupuhdistus + Jauhemaalaus

Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittely	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
7	EN AW-1050 H14	Määrittely 1:	4,21	70 % Y/Z, 30 % Y	
		Määrittely 2:	5,68	40 % Y, 40 % Y/Z, 20 % A/B	

LIITE X 12(13) Vetokokeen tulokset keinovalmennuksen jälkeen

21	EN AW-5754 H22	Määrittely 1:	7,39	80 % Y/Z, 10 % A/B, 10 % Y		
		Määrittely 2:	6,16	50 % Y, 30 % Y/Z, 20 % A/B		
35	EN AW-6060 T6	Määrittely 1:	15,16	60 % Y/Z, 40 % Y		
		Määrittely 2:	14,00	50 % Y, 50 % Y/Z		
49	EN AW-6082 T6	Määrittely 1:	9,25	60 % Y/Z, 40 % Y		
		Määrittely 2:	8,58	40 % Y/Z, 30 % Y, 30 % A/B		

LIITE X 13(13) Vetokokeen tulokset keinoivanhennuksen jälkeen

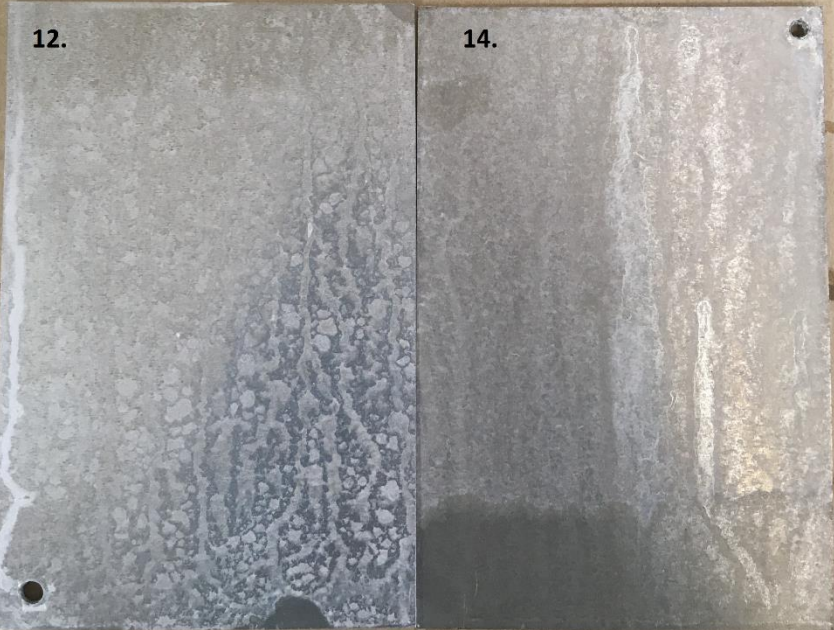
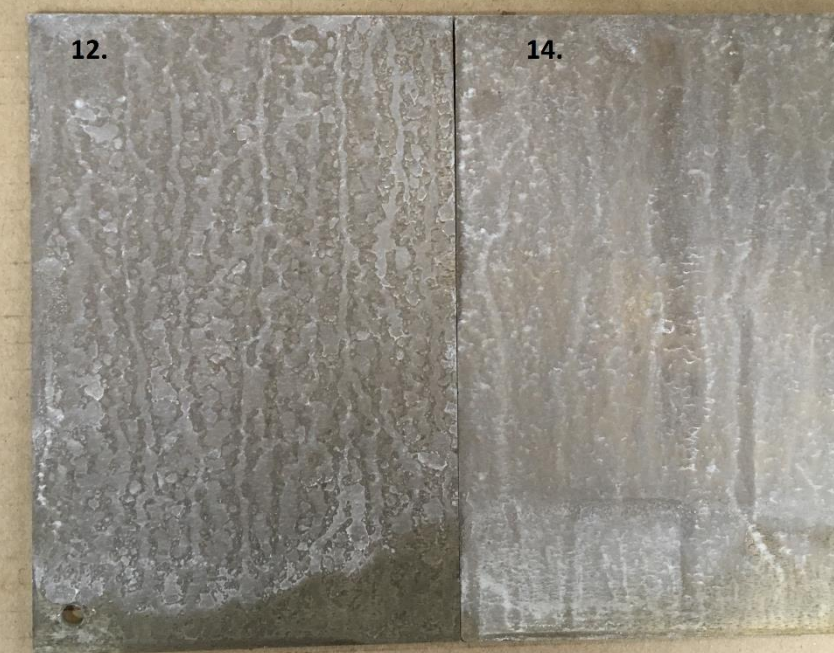
Vertailuryhmä 4: Liuotinpuhdistus + Jauhemaalaus					
Näyte- nro	Alumiiniseos	Määrittys	Murtolu- juus [MPa]	Murtuma- tyyppi	Kuva
9	EN AW-1050 H14	Määrittys 1:	4,30	50 % A/B, 50 % Y/Z	
		Määrittys 2:	4,25	80 % A/B, 20 % Y/Z	
23	EN AW-5754 H22	Määrittys 1:	3,23	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	4,33	80 % A/B, 20 % Y/Z	
37	EN AW-6060 T6	Määrittys 1:	7,76	70 % A/B, 30 % Y/Z	
		Määrittys 2:	5,06	60 % A/B, 40 % Y/Z	
51	EN AW-6082 T6	Määrittys 1:	4,33	90 % A/B, 10 % Y/Z	
		Määrittys 2:	4,14	80 % A/B, 20 % Y/Z	

LIITE XI 1(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset

Näytteryhmä:	Näyte-numero:	Alumiiniseos:	Konversiopinnoitus:	Suojausluokitus Rp	Ulkonäköluokitus RA	Suorituskykyluokitus Rp / RA
Maalaamaton ryhmä 1	14	EN AW-1050 H14	Zirkoniumkonversiopinnoitus	0	0 m A	0 / 0 m A
	28	EN AW-5754 H22		0	0 m A	0 / 0 m A
	42	EN AW-6060 T6		1	1 m A	1 / 1 m A
	56	EN AW-6082 T6		0	0 x A	0 / 0 x A
Maalaamaton ryhmä 2	41	EN AW-6060 T6	Zirkonium-kromikonversiopinnoitus	4	4 s A	4 / 4 s A
	55	EN AW-6082 T6		0	0 x A	0 / 0 x A
Maalaamaton ryhmä 3	12	EN AW-1050 H14	Siltaanikonversiopinnoitus	0	0 m A	0 / 0 m A
	26	EN AW-5754 H22		0	0 m A	0 / 0 m A
	40	EN AW-6060 T6		2	2 s A	2 / 2 s A
	47	EN AW-6082 T6		0	0 m A	0 / 0 m A

Näyte 12: EN-AW 1050 + Silaanikonversiopinnoitus	Näyte 14: EN-AW 1050 + Zirkoniumkonversiopinnoitus	
		Ennen neutraalin suola-sumukokeen aloitusta.

LIITE XI 2(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset


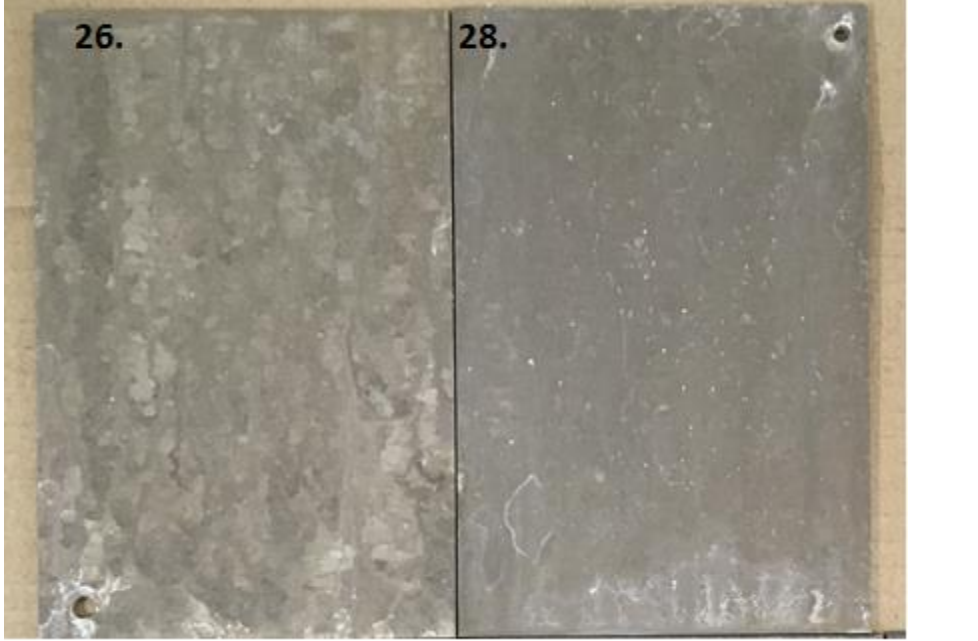
	24 tunnin neutraalin suolasumura- situksen jäl- keen
	168 tunnin neutraalin suolasumura- situksen jäl- keen

LIITE XI 3(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset

	<p>240 tunnin neutraalin suolasumurasiituksen jälkeen.</p>
--	--




Näyte 26: EN-AW 5754 + Silaanikonversiopinnoitus	Näyte 28: EN-AW 5754 + Zirkoniumkonversiopinnoitus	
		<p>Ennen neutraalin suolasumukokeen aloitusta.</p>

LIITE XI 4(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset

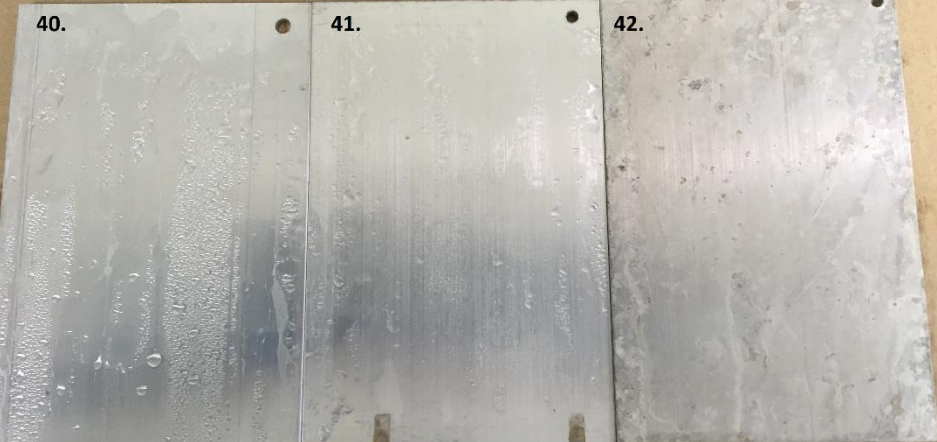
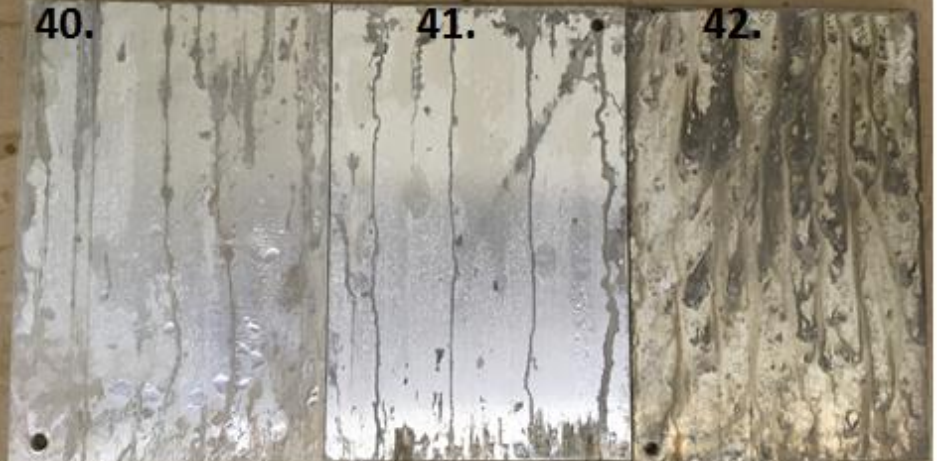

	24 tunnin neutraalin suola- sumurasi- tuksen jäl- keen
	168 tunnin neutraalin suola- sumurasi- tuksen jäl- keen

LIITE XI 5(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset










	<p>240 tunnin neutraalin suola-sumurasi-tuksen jäl-keen.</p>
---	--

Näyte 40: EN-AW 6060 + Silaanikonversiopinnoitus	Näyte 41: EN-AW 6060 + Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus	Näyte 42: EN-AW 6060 + Zirkonium-konversiopinnoitus	
			<p>Ennen neutraalin suola-sumukokeen aloitusta.</p>

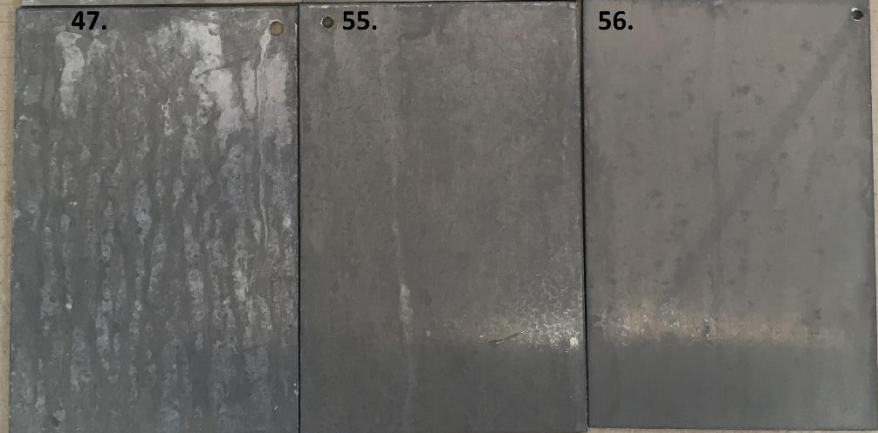
LIITE XI 6(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset

	<p>24 tunnin neutraalin suola-sumuratuksen jälkeen</p>
	<p>168 tunnin neutraalin suola-sumuratuksen jälkeen</p>
	<p>240 tunnin neutraalin suola-sumuratuksen jälkeen.</p>

LIITE XI 7(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset

Näyte 47: EN-AW 6082 + Silaanikonversiopinnoitus	Näyte 55: EN-AW 6082 + Zirkonium-kromi -konversiopinnoitus	Näyte 56: EN-AW 6082 + Zirkonium-konversiopinnoitus	
			Ennen neutraalin suolasumukokeen aloitusta.
			24 tunnin neutraalin suolasumurasituksen jälkeen
			168 tunnin neutraalin suolasumurasituksen jälkeen

LIITE XI 8(8) Maalaamattomien näytteiden arvioinnin tulokset

	240 tunnin neutraalin suolasumura- situksen jäl- keen.
--	--

LIITE XII 1(2) Luettelo diplomityössä käytetyistä aineista ja laitteista

AINEET:

Alkaalinen pesuaine, Zr-konversioprosessi	Bonderite C-AK 1574, Henkel Norden Oy
Pesutensidi, Zr-konversioprosessi	Bonderite C-AD 2000, Henkel Norden Oy
Zirkoniumkonversiopinnoite	Bonderite M-NT 1, Henkel Norden Oy
Alkaalinen pesuaine, Zr-Cr –konversioprosessi	Surtec 061, SurTec Deutschland GmbH
Pesutensidi, Zr-Cr –konversioprosessi	Surtec 086, SurTec Deutschland GmbH
Zirkonium-kromi –konversiopinnoite	Surtec 609 GV, SurTec Deutschland GmbH
Alkaalinen pesuaine, silaanikonversioprosessi	Gardoclean 26, Chemetall AB
Silaanikonversiopinnoite	Oxsilan MM-0706, Chemetall AB
Pesuliuotin	ETAX, Denaturoitu etanoli, Altia Oyj
Suihkupuhdistusrae	Alumiinioksidi EK 100, särmikäs, Rowema Oy
Märkäpohjamaali	Temacoat RM 40, RAL 7040, Tikkurila Oyj
Kovete, pohjamaali:	Hardener 008 5600, Tikkurila Oyj
Ohenne, pohjamaali:	Thinner 1031, Tikkurila Oyj
Märkäpintamaali	Temadur 50, RAL 810-M, Tikkurila Oyj
Kovete, pintamaali:	Hardener 008 7590, Tikkurila Oyj
Ohenne, pintamaali:	Thinner 1048, Tikkurila Oyj
Jauhemaali	Infralit PE 8350-15, RAL 9003, Teknos Oy
Liima, vetokokeet	Permabond Instant Adhesive 798, Perma-
bond Europe	
Suola, neutraali suolasumukoe	Natriumkloridi, laatu Ph. Eur., VWR Chemi-
cals	
pH:n säätäjä, neutraali suolasumukoe	50 % Natriumhydroksidiliuos, analyysilaatu,
Merck	
Vertailunäytteiden puhdistus, suolasumukoe	diammoniumsitraatti, laatu Ph. Eur., Merck

LIITE XII 2(2) Luettelo diplomityössä käytetyistä aineista ja laitteista

LAITTEET

Esikäsittelylinja, Zr-konversioprosessi	Lainisalo Oy, Helsinki
Esikäsittelylinja, Zr-Cr –konversioprosessi	Lainisalo Powder Painting Oü, Iru Küla
Esikäsittelylinja, silaanikonversioprosessi	Lainisalo Oy, Ähtäri
Jauhemaalauslinja, Zr- ja silaanikonversionäytteet	Lainisalo Oy, Helsinki
Jauhemaalauslinja, Zr-Cr –konversionäytteet	Lainisalo Powder Painting Oü, Iru Küla
Märkemaalauslinja,	Lainisalo Oy, Ähtäri
Kuivakalvonpaksuusmittari	Elcometer 456T FNF
Veitsi, viillot	NT Cutter A-400GR
Työntömitta, viillot	Prof digimatic, digitaalinen työntömitta
Hilaristikkoleikkuri, 2 mm leikkaukset	Erichsen modell 295 / II
Hilaristikkoleikkuri, 3 mm leikkaukset	Elcometer 107
Vetolaite	Elcometer 108
Suolasumukammio	Q-Fog CCT 600
Vaaka, suolasumukoe	Digi DS-425
Vaaka, vertailunäytteet	Cahn TA4200
pH-johtokykykymittari	Ezdo 7200
Olosuhtemittari	Elcometer 319 standard