



MATERIAALIEN JA KÄYTTÖOLOSUHTEIDEN HUOMIOINTI KORJAUSHITSAUS- JA MUUTOSTÖISSÄ ÖLJYNJALOSTAMOLLA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2024

Joona Jokela

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

DI Antti Martikainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Joona Jokela

Materiaalien ja käyttöolosuhteiden huomiointi korjaushitsaus- ja muutostöissä öljynjalostamolla

Konetekniikan diplomityö

2024

97 sivua, 29 kuvaa, 12 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastajat: Apulaisprofessori Tuomas Skriko

DI Antti Martikainen

Avainsanat: korjaushitsaus, painelaite, hitsausmetallurgia, öljynjalostus, materiaalitekniikka

Tämän työn tavoitteena oli selvittää materiaalien ja käyttöolosuhteiden vaikutukset korjaushitsauksien ja muutostöiden toteuttamiseen öljynjalostamolla. Tavoitteeseen sisältyi myös kohdeyrityksen spesifikaatioiden päivitys sekä suositukset niihin.

Öljynjalostuksessa käytettävät painelaitteet ja putkistot altistuvat olosuhteille, joissa esiintyy laajasti erilaisia vauriomuotoja. Painelaitteiden ja putkistojen korjaushitsauksia ja muutostöitä ohjaavat painelaitedirektiivi ja muut standardit sekä spesifikaatiot, joiden ymmärrys ja soveltaminen käytäntöön vaativat ammattitaitoa. Painelaitteiden ja putkistojen korjaushitsaukset ja muutostyöt ovat aina yksilöllisiä kohteita, joiden suunnitteluun on syytä varata riittävästi aikaa, jotta varmistutaan laitteen eheyden laadusta korjaustyön jälkeen.

Työn teoriaosuudessa avattiin kattavasti työssä tutkittujen käyttöolosuhteiden ja virtaavien aineiden vaikutusta korjaushitsauksien ja muutostöiden suorittamiseksi. Lisäksi teoriaosuudessa avattiin kattavasti tutkittujen materiaalien hitsausta ja mitä asioita on kunkin materiaalin osalta huomioitava, jotta hitsausliitokset ovat laadukkaasti tehtyjä ja täyttävät alan standardit sekä vaatimukset. Teoriaosuudessa käytettiin alana viimeisimpiä standardeja, tieteellisiä tutkimuksia sekä kohdeyrityksen sisäisiä dokumentteja ja tutkimuksia.

Työn tuloksena esitettiin kohdeyrityksen spesifikaatioihin päivityksiä sekä tarkennuksia. Lisäksi työn tuloksena esitettiin myös tämän tutkimustyön jatkamista muille kohdeyrityksen yksiköille sekä materiaaleille, joita ei tässä työssä käsitelty.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Joona Jokela

Consideration of materials and operating conditions in repair welding and modifications in an oil refinery

Master's thesis

2024

97 pages, 29 figures, 12 tables and 5 appendices

Examiners: Associate professor Tuomas Skriko

M.Sc. (Tech.) Antti Martikainen

Keywords: welding repair, pressure equipment, welding metallurgy, oil refining, material science

The aim of this work was to investigate the effects of materials and operating conditions on the performance of repair welding and modification work in an oil refinery. The objective also included updating and recommending technical specifications for the target company.

Pressure equipment and pipelines used in the oil refining industry are exposed to a wide range of damage conditions. Repair welding and modification of pressure equipment and piping is governed by the Pressure Equipment Directive and other standards and specifications, the understanding and practical application of which requires professional skills. Welding repairs on pressure equipment and piping is always an individual project, and sufficient time should be allowed for planning to ensure the quality of the integrity of the equipment after repair.

The theoretical part of the thesis comprehensively opened the impact of the operating conditions and flow medias studied in the thesis for repair welding. In addition, the theory section comprehensively covered the welding of the materials studied and what issues need to be considered for each material to ensure that welds are of high quality and meet industry standards. The theoretical part was based on the latest standards and scientific studies.

As a result of this work, updates, and recommendations to the technical specifications of the target company were presented. In addition, it was also recommended for the continuation of this research work for other units of the target company and for materials not covered in this research.

KIITOKSET

Tämä diplomityö on tehty UPM Lappeenrannan biojalostamolle ja haluankin kiittää kohdeyritystä tämän työn mahdollistamisesta. Hyvällä yhteistyöllä ja loistavien kollegoiden ympäröimänä kirjoittaminen saatiin päätökseen, vaikka välillä on pää kolmantena jalkana hoidettu muita käynnissä olevia investointeja tai kiireisiä korjauksia biojalostamolla. Mutta, kuten kaikki hyvä loppuu aikanaan – niin tämäkin työ tuli päätökseen. Erityismaininnat ansaitsevat työn ohjaaja Markus Varis sekä kollegani Henri Taina sparrauksesta ja kannustuksesta.

Konetekniikan maisterivaiheen opinnot sujuivat Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston kurssien parissa vauhdikkaasti ja muodostimme muiden JEDI-etäopiskelijoiden kanssa tiiviin ryhmän kurssien suorittamiseksi. Tästä pyyteettömät kiitokset kaikille opiskelukavereille, jotka tähän tiiviiseen porukkaan kuuluivat – he sen tietävät. Iso tuki opiskelujen aikana oli myös yliopiston jääkiekkoyhteisö Parru HT, jonka kautta on löytynyt useita elämänmittaisia ystävyysuhteita. Lisäksi haluan kiittää kaikkia yliopiston professoreita ja muita henkilökuntaan kuuluvia, jotka mahdollistavat laadukkaat opinnot vuodesta toiseen myös meille, jotka suorittavat maisterivaiheen opintoja etänä muiden töiden ohessa.

Suurimmat kiitokset kuuluvat puolisolleni Heidille, ilman hänen tukeansa ei tämä diplomityö olisi valmistunut ajallaan kaiken muun harrastamisen sekä töiden ohella. Lisäksi isot kiitokset kuuluvat myös perheelleni sekä läheisille ystäville, jotka saivat ajatukset välillä muualle, kun sitä eniten kaipasi.

Lappeenrannassa, huhtikuussa 2024

Joona Jokela

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

P_d	suunnittelupaine	bar
P_s	suurin sallittu käyttöpaine	bar
Q	lämmöntuonti	kJ/mm
R_e	myötölujuus	N/mm ²
T_{min}	suunnittelulämpötila, minimi	°C
T_{max}	suunnittelulämpötila, maksimi	°C
T_s	pitolämpötila	K
σ_a	Aksiaalinen jännitys	N/mm ²
σ_t	Tangentiaalinen jännitys	N/mm ²

Lyhenteet

Al	Alumiini
API	American Petroleum Institute
ASCC	Emäksien aiheuttama jännityskorroosio
ASME	American Society of Mechanical Engineers
C	Hiili
CEV	hiiliekvivalentti
CH ₄	Metaani
CO	Hiilimonoksidi
CO ₂	Hiilidioksidi
Cr	Kromi

Cr _{eq}	kromiekvivalentti
DEA	Dietanoliamiini
DGA	Di-glykoliamiini
DIPA	Di-isopropyliamiini
DT	rikkova aineenkoetus
H	Vety
HAZ	hitsausliitoksen muutosvyöhyke
HIC	Vedyn aiheuttama halkeilu
ISO	International Organization for Standardization
K _{TH}	jännitysintensiiteettikertoimen kynnysarvo
MDEA	Metyyli dietanoliamiini
MEA	Monoetanoliamiini
Mo	Molybdeeni
MT	magneettijauh tarkastus
NACE	National Association of Corrosion Engineers
Nb	Niobi
NDT	rikkomaton aineenkoetus
NoBo	ilmoitettu laitos
PH	esilämmitys
pH	positiivisten vetyionien aktiivisuus liuoksessa
Ni _{eq}	nikkeli-ekvivalentti
Ni	Nikkeli
PMÖ	puhdistettu mäntyöljy
PREN	korroosionkestävyyden kvantitatiivinen kattavuus

PT	tunkeumanestetarkastus
PWHT	hitsauksen jälkilämpökäsittely
RCA	juurisyyanalyysi
RMÖ	raakamäntyöljy
RT	radiografinentarkastus
S	Rikki
SOHIC	Jännityssuuntautunut vedyn aiheuttama halkeilu
SSC	Sulfidijännityskorroosio
Ti	Titaani
UT	ultraäänitarkastus
V	Vanadiini
W_{cr}	kromin painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta
W_{Mo}	molybdeenin painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta
W_N	typen painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta
WPQR	hitsausohjeen hyväksymispöytäkirja
WPS	hitsausohje
W_w	volframin painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja rajaus	10
1.2	Tutkimusongelmat, -kysymykset ja -metodit.....	11
1.3	UPM Lappeenrannan biojalostamo	12
1.3.1	Tutkittavat yksiköt, olosuhteet ja materiaalit.....	15
2	Painelaitteisiin liittyvät lainsäädännöt, standardit ja määräykset	17
2.1	Painelaitteiden lainsäädäntö ja vaatimustenmukaisuus.....	17
2.2	Painelaitedirektiivi	18
2.3	Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus	19
2.4	Painelaitteiden hankinta ja käyttö	20
2.5	Painelaitteiden korjaushitsaus- ja muutostyöt.....	21
2.6	Laitoksen tekniset spesifikaatiot ja muut ohjaavat standardit.....	23
3	Korjaushitsaus- ja muutostyöt materiaali sekä virtaava aine huomioiden	24
3.1	Korjaushitsaus- ja muutostöiden suorittaminen sekä laatu yleisesti	25
3.2	Vety, vetyrikas kaasu ja neste – materiaalit ja hitsattavuus	26
3.2.1	Austeniittiset 300-sarjan teräkset.....	29
3.2.2	Seostamattomat teräkset ja niukkaseosteiset CrMo-teräkset	37
3.2.3	Nikkelipohjaiset superseokset.....	45
3.3	Prosessikaasu – materiaalit ja hitsattavuus	49
3.3.1	Kuumalujat ja tulenkestävät teräkset	50
3.4	Laiha ja rikas amiini – materiaalit ja hitsattavuus.....	56
3.4.1	Hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset	61
3.4.2	Austeniittiset, ferriittiset ja martensiittiset ruostumattomat teräkset	63
4	Teknisten spesifikaatioiden nykytilan kartoitus	68
4.1	Spesifikaatioiden kuvaukset, sisältö ja vertailu	68

4.2	Suosituksset ja päivitykset spesifikaatioihin	72
4.2.1	I6-sarjan spesifikaatiot.....	72
4.2.2	I17-sarjan spesifikaatiot.....	75
5	Korjaushitsauksien ja muutostöiden suunnittelu ja toteutus käyttökohde huomioiden	79
5.1	CASE 1: PSA-säiliöiden painerungon kehäliitosten korjaushitsaus	80
5.2	CASE 2: Syötön tulistimien 1 ja 2 korjaushitsaus	83
6	Tulokset, niiden analysointi ja jatkotutkimusaiheet	88
6.1	Aiempiin tutkimuksiin vertailu	88
6.2	Työn reliabiliteetti ja validiteetti	88
6.3	Avaintulokset	89
6.4	Jatkotutkimusaiheet.....	89
6.4.1	Muut kohdeyrityksen kriittiset kohteet sekä mahdolliset uudet investoinnit	90
6.4.2	Koekappaleohjelman suunnittelu korjaushitsauksien arviointiin	90
7	Johtopäätökset ja yhteenveto	91
	Lähteet	93

Liitteet

Liite 1. ASME Section IX P-numerointi ja materiaalit

Liite 2. ASME B31.3 taulukko 331.1.3 (PWHT)

Liite 3. EN 13480-4 taulukko 9.14.1-1 (PWHT)

Liite 4. NACE MR0175 H₂S ympäristössä suositellut korroosionkestävät seokset

Liite 5. NACE MR0175 H₂S ympäristön aiheuttamat vauriot sallituille materiaaleille

1 Johdanto

Kohdeyrityksen laitos on luokiteltu jatkuvan käytön ja korkean riskin laitokseksi. Laitoksella on laitteita, jotka sisältävät vettä, nestemäisiä ja kaasumaisia hiilivetyjä, höyryä ja kemikaaleja korkeissa paineissa sekä lämpötiloissa. Olosuhteet aiheuttavat laitteistoille ominaista kulumista ja sitä kautta tarkastettavia sekä korjattavia kohteita. Tämän takia laitokselle on suunniteltu 4 vuoden välein suoritettavaksi laajempi seisokki – ajanjakson määrittelee hyvin pitkälti laitoksen painelaitteiden eräänntyvät määräaikaistarkastukset. 4 vuoden välein tehtävät tarkastukset vaativat yhteensä n. 40–45 vuorokauden tuotantokatkon laitokselle, jolloin suoritetaan muitakin suurkorjauksia, huoltotoimenpiteitä ja investointiprojekteja määräaikaistarkastuksien lisäksi. Lisäksi laitoksella suoritetaan n. 12–18 kuukauden välein myös lyhyempiä huoltopysäytyksiä, jolloin suoritetaan pääosin katalyyttienvaihto laitoksen reaktoriosuudelle. Nämä huoltopysäytykset vaativat yhteensä n. 8–12 vuorokauden tuotantokatkon – riippuen tehtävistä huoltotoimenpiteistä ja vaihdettavista katalyyteista.

Kohdeyrityksen pitkien käyntijaksojen, prosessin luonteen ja lyhyiden seisontajaksojen vuoksi, on erittäin tärkeää turvallisuuden sekä laitoksen käyttövarmuuden kannalta suorittaa tarvittavat korjaushitsaus- ja muutostyöt painelaitteille sekä putkistoille mahdollisimman laadukkaasti huomioiden standardit, määräykset, olosuhteet ja materiaalit. Näillä toimenpiteillä mahdollistetaan pitkä käyttöikä ja sitä kautta kustannustehokas laitteiden käyttö öljynjalostamolla.

1.1 Tutkimuksen tausta, tavoitteet ja rajaus

Työssä arvioidaan käyttöolosuhteen vaikutuksia valittuihin materiaaleihin ja sitä, miten olosuhde ja valitut materiaalit vaikuttavat korjaushitsaus- ja muutostöiden suunnitteluun sekä toteutukseen vaatimusten mukaisesti. Lisäksi työssä arvioidaan öljynjalostusteollisuuden yleisimpiä materiaalisuosituksia käyttöolosuhte huomioiden ja niitä verrataan UPM:n valintoihin. Tämän työn tulokset hyödynnetään UPM Lappeenrannan biojalostamolla teknisten spesifikaatioiden sisällössä ja määrittelyksissä tekemällä niihin päivityksiä, tarkennuksia sekä rajauksia, jotka koskevat vain kohdeyrityksen tilannetta. Tällä hetkellä laitoksen teknisissä spesifikaatioissa ei ole otettu kantaa riittävällä laajuudella korjaushitsauksien ja -

muutostöiden toteuttamiseksi laadukkaasti huomioiden käyttöolosuhde ja kohteen materiaalit sekä niiden yhteisvaikutus työn laatuun. Tämä mahdollistaa esimerkiksi kriittisten virheid^{en} tekemisen erilaisissa olosuhteissa, jotka näkyvät suoraan laitoksen käyttövarmuudessa ja korjaushitsaus- sekä muutostöiden laadussa.

Tutkimuksen tavoitteena on, että kohdeyrityksen teknisiin spesifikaatioihin laaditaan tarkennuksia, jotka ottavat huomioon käyttöolosuhteen vaikutukset korjaushitsaus- ja muutostöiden toteuttamiseen. Työn tuloksena päivitetään laitoksen spesifikaatioihin huomioita korjaushitsaus- ja muutostöiden toteuttamiseksi.

Työstä rajataan pois kaikki kohdeyrityksen tarkemmat prosessiolosuhteet ja tarkemmat prosessikuvaukset. Työn tavoitteiden ja tuloksien saavuttamiseksi työn kirjallisuuskatsauksessa keskitytään ainoastaan kohdeyrityksessä esiintyviin kriittisiin virtaaviin aineisiin ja olosuhteisiin, joiden perusteella etsitään kirjallisuudesta tietoja korjaushitsaus- että muutostöiden toteuttamiseksi huomioiden käyttöolosuhteet ja valittu materiaali. Kirjallisuuskatsauksen aikana kerättyjä tietoja verrataan kohdeyrityksen teknisiin spesifikaatioihin ja CASE-esimerkkien avulla pyritään avaamaan nykytilaa ja mahdollisia tulevissa korjaushitsauksissa sekä muutostöissä huomioon otettavia asioita.

1.2 Tutkimusongelmat, -kysymykset ja -metodit

Tämän työn toteuttamisen jälkeen tutkimuskysymyksiin tulisi olla vastaukset, ehdotukset ja ratkaisu. Tämän työn tutkimuskysymyksenä ovat:

- Mitkä ovat materiaalien ja käyttöolosuhteiden vaikutukset korjaushitsaus- ja muutostöiden suorittamiseksi?
- Millä keinoilla ja toimenpiteillä korjaushitsaus- ja muutostöiden toteuttamisen laatua voidaan parantaa?
- Miten otetaan huomioon aiheeseen liittyvät tekniset spesifikaatiot, standardit ja määräykset?

Tutkimusmetodeina käytetään kirjallisuuskatsausta, asiantuntijalausuntoja, kokemuksia laitoksen historian perusteella, sekä jo tapahtuneita vikaantumisia ja niiden juurisyitä, jotka on tutkittu. Tämä tutkimus koostuu kahdesta erillisestä osuudesta, jotka ovat työn teoriaosuus

sekä työn kokeellinen osuus. Kirjallisuuskatsauksessa keskitytään öljynjalostusteollisuudessa esiintyviin virtaaviin aineisiin, vikaantumismuotoihin ja niiden hallintaan sekä korjaushitsaus- ja muutostöiden vaatimustenmukaisuuteen. Kirjallisuutta etsitään käyttäen tieteellisiä lähteitä ja pyritään mahdollisuuksien mukaan käyttämään alle 10 vuotta vanhoja tieteellisiä tutkimuksia, raportteja, kirjallisuutta sekä määräyksiä ja standardeja.

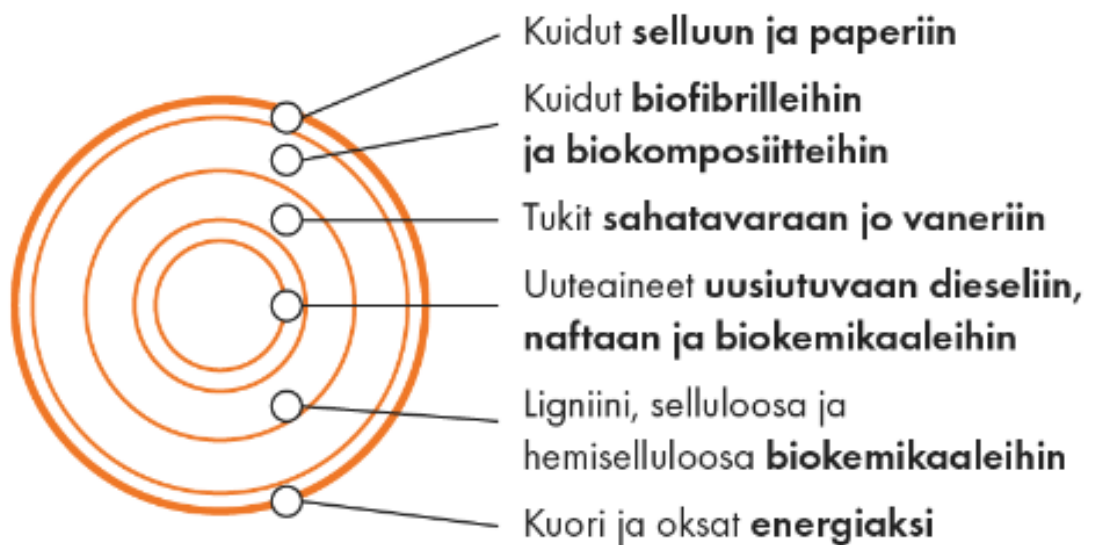
Teoriaosuuden tulokset pyritään varmentamaan peilaten saatuja tietoja kohdeyrityksen historiaan ja tietämykseen sekä käyttämällä erilaisia asiantuntijoita tiedon varmentamiseksi. Asiantuntijoita tässä tutkimuksessa ovat kohdeyrityksen henkilöstö, ilmoitettu laitos (Notified Body) ja kohdeyrityksen käyttämät asiantuntijapalvelut. Kun verrataan teoriaosuuden tuloksia kohdeyrityksen nykytilaan, voidaan tulokset varmentaa käyttämällä laitoksen prosessidataa, historiatietoja, tehtyjä tutkimuksia ja juurisyyanalyysseja sekä asiantuntijoiden haastatteluita ja käytyjä keskusteluja.

1.3 UPM Lappeenrannan biojalostamo

UPM Lappeenrannan biojalostamo on vuonna 2015 käyttöön otettu 1. kaupallisen mittakaavan puupohjainen biojalostamo maailmassa. Biojalostamon päätuotteina ovat puupohjainen uusiutuva UPM BioVerno -diesel ja -nafta. Kehittyneiden biopolttoaineiden avulla vähennetään liikenteen päästöjä Suomessa, Skandinaviassa sekä EU:n maissa. Naftaa käytetään mm. raaka-aineena tarramateriaaleissa sekä elintarviketeollisuuden pakkauksissa. UPM Lappeenrannan biojalostamon vuosituotantokapasiteetti on 130 000 tonnia kehittyneitä biopolttoaineita vuodessa. (UPM Biopolttoaineet 2023a.)

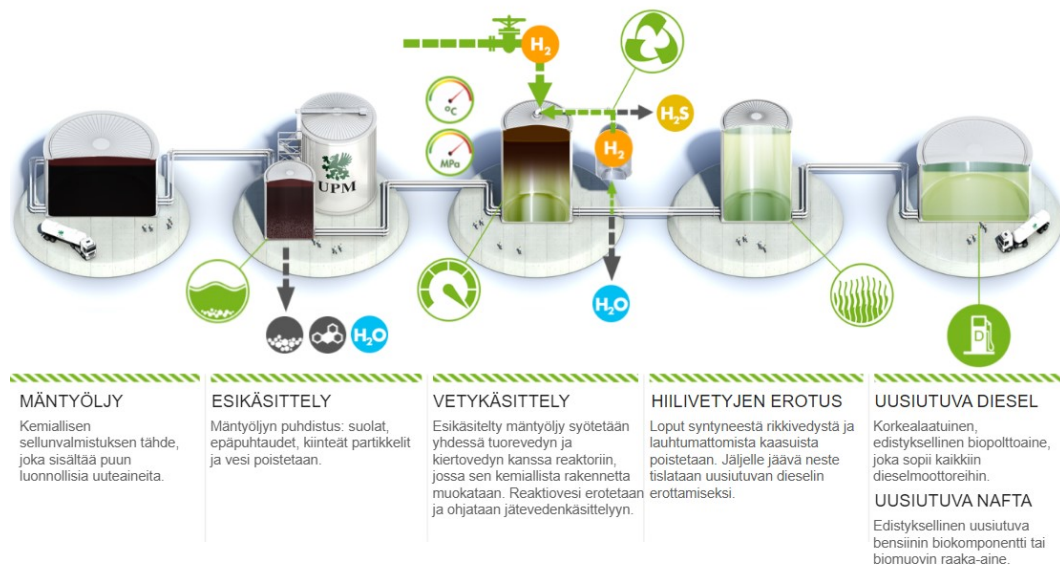
Biojalostamo sijaitsee Lappeenrannassa UPM Kaukaan biometsteollisuuden integraatissa. Integraatin alueella sijaitsee myös saha, sellu- ja paperitehtaat, joiden lisäksi alueella on myös UPM:n Pohjois-Euroopan tutkimuskeskus, joka keskittyy kuituraaka-aineiden ja paperin sekä sellun, biopolttoaineiden ja biokemikaalien valmistusprosessien kehittämiseen. (UPM Kaukas 2023.)

Biojalostamon pääraaka-aineena toimii raakamäntyöljy (RMÖ), joka on sellun tuotantoprosessin tähdevirta. Sellunvalmistusprosessissa syntyy tähdevirtoja n. 2 % ja tähän osuuteen kuuluu raakamäntyöljy. Kuvassa 1 on kuvattuna puun kokonaisvaltainen hyödyntäminen Kaukaan integraatissa sekä muissa UPM:n tehtaissa. (UPM Biopolttoaineet 2023b.)



Kuva 1. Puun kokonaisvaltainen hyödyntäminen UPM:n tehtailla (UPM Biopolttoaineet 2023b).

UPM BioVerno -dieselin ja -naftan tuotantoteknologia on kehitetty UPM:n omassa tutkimuskeskuksessa Kaukaalla yhteistyössä Haldor Topsoen kanssa. Tuotantoprosessi päävaiheet (kuva 2) ovat esikäsitteily, vetykäsitteily ja tislauk. (UPM Biopolttoaineet 2023a.)



Kuva 2. UPM BioVerno – dieselin ja -naftan tuotantoprosessi (UPM Biopolttoaineet 2023a).

Sellutehtaiden tuotantoprosessin tähteenä syntyvä raakamäntyöljy (RMÖ) syötetään biojalostamolla esikäsitteilyyn, jossa raakamäntyöljy muokataan vetykäsittely-yksikköön soveltuvaksi. Esikäsitteilyssä raakamäntyöljystä poistetaan vesi, tärpättijakeet ja muut hivenaineet, jotka ovat ei-toivottuja yhdisteitä vetykäsittelyn katalyyttisessä osassa. Esikäsitteilyssä tapahtuva puhdistus tehdään erittäin matalassa paineessa ja korkeassa lämpötilassa, joka perustuu haihdutukseen – ilman kemiallisia reaktioita.

Syöttöaineen käsittelyn jälkeen puhdistettu syöteaine syötetään yhdessä siihen sekoitetun kiertoöljyn kanssa biojalostamon vetykäsittely-yksikköön, jossa puhdistetun mäntyöljyn (PMÖ) ja kiertoöljyn kemiallista rakennetta muokataan erittäin korkeassa paine- ja lämpötilatasossa. Vetykäsittelyn reaktoriosaan syötetään samanaikaisesti myös vetylaitokselta tuleva vetypitoinen korkeapaineinen kiertokaasu. Syöttöaineen kemiallisen rakenteen ensimmäisessä vaiheessa syötöstä poistetaan mm. fosforia, piitä, metalleja ja muita aineita, jotka ovat katalyyttistä reaktiota vahingoittavia aineita. Tämän jälkeen syöttöaine syötetään sarjassa toimiviin vedytysreaktoreihin, jotka poistavat happea, orgaanista rikkiä ja typpeä sekä parantavat lopputuotteen kylmäominaisuuksia. (UPM sisäinen dokumentti 2017.)

Vetykäsittely-yksikön jälkeen reaktiossa syntynyt tuote jäädytetään. Jäähdytyksen jälkeen jäädytetty tuotevirta jaetaan kolmeen faasiin: kaasu- hiilivety- ja vesifaasiin, joista

hiilivetyfaasi ohjataan prosessin tislausosaan. Tislausosuudessa erotellaan hiilivetyfaasista bionafta ja biodiesel omiksi tuotteiksi, jonka jälkeen tuote on valmiina markkinoille. (UPM sisäinen dokumentti 2017.)

Lisäksi prosessiin liittyy myös muita tukevia apuprosesseja esiteltyjen pääprosessien lisäksi, joilla rikastetaan prosessin ja syötteen kulkua, ominaisuuksia ja käyttöolosuhteita. Muita prosessiyksiköjä ovat mm. amiinijärjestelmä, kuumaöljyjärjestelmä, vetylaitos ja erinäinen määrä erilaisia hyödyke-, vesienkäsittely- ja turvajärjestelmiä.

1.3.1 Tutkittavat yksiköt, olosuhteet ja materiaalit

Työn tavoitteiden saavuttamiseksi työ on rajattu taulukon 1 mukaisille prosessialueille ja virtaaville aineille. Taulukossa esitetyt tiedot ja materiaalit on tehty biojalostamon putkisto- ja painelaitetarkastusluetteloa sekä UPM teknisiä spesifikaatioita I6.1 ja I6.3 mukaillen. Taulukossa esitettyjen virtaavien aineiden ja materiaalien mukaan on rajattu myös kirjallisuuskatsauksessa käsitellyt asiat korjaushitsaus- ja muutostöiden suorittamiseksi huomioiden virtaava aine sekä materiaali.

Taulukko 1. Tutkittavat yksiköt, virtaavat aineet ja materiaalit (mukaillen UPM sisäisiä dokumentteja 2023).

Yksikkö	Virtaavat aineet	Käytetyt materiaalit (EN)
Vetykäsittely (korkeapaine osuus PN160- 250), aluetun- nus 6453	VETYRIKAS NESTE (PVR)	304L (1.4307) 316L (1.4404) DUPLEX 2205 (1.4462) 321 (1.4541) ALLOY 625 (2.4856)
	VETYRIKAS KAASU (GVR)	P235GH (1.0345) 316L (1.4404) 321 (1.4541) 10CrMo9-10 (1.7380) X11CrMo5 (1.7362)
	VETY (GVE)	P235GH (1.0345)

Taulukko 1 jatkuu. Tutkittavat yksiköt, virtaavat aineet ja materiaalit (mukailten UPM sisäisiä dokumentteja 2023).

Yksikkö	Virtaavat aineet	Käytetyt materiaalit (EN)
Amiini (PN40-160), aluetunnus 6455	VETYRIKAS KAASU (GVR)	P235GH (1.0345)
	VETY (GVE)	P235GH (1.0345)
	LAIHA AMIINI (EKA)	P235GH (1.0345) 304L (1.4307)
	RIKAS AMIINI (ERA)	P235GH (1.0345) 304L (1.4307) 316L (1.4404)
Vetylaitos (PN40-63), aluetunnus 3552	KUUMA PROSESSIKAASU (GHH)	13CrMo4-5 (1.7335)
	VETYRIKAS KAASU (GVR)	16Mo3 (1.5415) 321 (1.4541) 10CrMo9-10 (1.7380) ALLOY 800 (1.4876) ALLOY 800HT (1.4859)

2 Painelaitteisiin liittyvät lainsäädännöt, standardit ja määräykset

Painelaitteella tarkoitetaan painelaitelain 1144/2016 mukaan:

- 1. painelaitteella säiliötä, putkistoa ja muuta teknistä kokonaisuutta, jossa on tai johon voi kehittyä ylipainetta, sekä painelaitteen suojaamiseksi tarkoitettuja teknisiä kokonaisuuksia;*
- 2. aluksen painelaitteella painelaitetta, joka on asennettu tai tarkoitettu asennettavaksi alukseen tai joka on tarkoitettu aluksen käyttämiseksi; aluksen painelaitteena ei kuitenkaan pidetä kaasusäiliöaluksen lastisäiliötä;*
- 3. sotilaspainelaitteella yksinomaan sotilaalliseen käyttöön tarkoitettua puolustusvoimien painelaitetta sekä painelaitetta, joka on tarkoitettu puolustusvoimien aluksen käyttämiseksi; sotilaspainelaitteena ei kuitenkaan pidetä sotilasilma-aluksen painelaitetta.*

2.1 Painelaitteiden lainsäädäntö ja vaatimustenmukaisuus

Suomessa painelaitteiden vaatimustenmukaisuutta ohjaa lainsäädäntö, johon kuuluvat: painelaitelaki 1144/2016, valtioneuvoston asetus painelaitteista 1548/2016, valtioneuvoston asetus yksinkertaisista painesäiliöistä 1550/2016, valtioneuvoston asetus painelaiteturvallisuudesta 1549/2016, asetus kattilalaitosten käytön valvojien pätevyyskirjoista 891/1999 sekä aerosoliasetus 1433/1993 (Tukes 2023a).

Painelaitteita löytyy teollisuudesta, työpaikoilta sekä myös kotitalouksista. Painelaitteiden käyttöön liittyvät mahdolliset merkittävät henkilö-, ympäristö- tai omaisuusvahinkojen vaarat. Suomessa painelaitteiden suunnittelua, valmistus ja käyttöä ohjataan painelain avulla. Painelaitelain tarkoituksena on, että laitteiden käyttö olisi turvallista koko niiden elinkaaren ajan. (Tukes 2023a.)

Painelaitteiden vaatimustenmukaisuuden ja turvallisuuden varmistamiseksi tarkastuslaitoksilla on iso rooli niiden varmistamisessa yhdessä käyttäjien kanssa. Tarkastuslaitos on

yleisesti mukana painelaitteiden vaatimustenmukaisuuden arvioinnissa ja tekee painelaitteille mm. käyttöönotto-, ja määräaikaistarkastuksia. (Tukes 2023a.)

Tukes, eli turvallisuus- ja kemikaalivirasto on painelaitesäädösten valvontaa suorittava viranomainen. Tukes valvoo käyttäjien painelaitteiden turvallisuutta mm. painelaiterekisterin avulla (Tukes 2023a).

2.2 Painelaitedirektiivi

Euroopan Unionissa painelaitteiden yhdenmukaisuus suunnittelun, valmistuksen ja vapaan liikkuvuuden osalta on määritetty erilaisten direktiivien avulla. Direktiivejä ovat painelaitedirektiivi, yksinkertaiset painesäiliöt -direktiivi sekä aerosolidirektiivi. Kansallisella tasolla säädetään painelaitteiden käytöstä. Tarkastusvelvoitteet käyttöä koskevien säädösten osalta koskevat painelaitteita, jotka voivat käytöllään aiheuttaa vaaraa käyttöarvojen ja / tai käyttökohteen vuoksi. (Tukes 2023a.)

Esimerkiksi painelaitedirektiiviä 2014/68/EU sovelletaan kaikkiin laitteisiin ja kokoonpanoihin, joiden suurin sallittu käyttöpaine (P_S) on yli 0,5 bar. EU:n direktiivin mukaisia painelaitteita ovat kaikki paineastiat, putkistot, turvalaitteet ja painelaitteet, jotka täyttävät ehdon. (European Agency for Safety and Health at Work 2023.)

Direktiivissä määritellään painelaitteille tavoitteet ja vaatimukset, jotka laitteiden on valmistushetkellä täytettävä ennen kuin niitä voidaan markkinoilla saattaa. Direktiivi koskee kaikkia valmistajia, jotka valmistavat painesäiliöitä, lämmönvaihtimia, kattiloita, teollisuusputkia, höyrystimiä ja tulistimia sekä muita turvalaitteita tai painelaitteita. Valmistajat ovat vastuussa direktiivin noudattamisesta ja huolehtivat, että kaikki tuotteet tarkastetaan ennen markkinoille saattamista vaatimusten osalta. Lisäksi valmistajat toimittavat laitteiden mukana aina kaikki tarvittavat tiedot. Painelaitteiden on oltava turvallisia, täytettävä vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt ja niissä on oltava asianmukainen CE-merkintä ja muut tiedot. (European Agency for Safety and Health at Work 2023.)

2.3 Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus

Painelaitteiden suunnittelu ja valmistus edellyttävät valmistajaltaan, että valmistaja osaa ja toimii painelaitesäädösten mukaisesti ja osaa ottaa huomioon säädösvaatimukset, joita se asettaa. Suunnittelun ja valmistuksen selkärankana toimii:

- a. Painelaitteiden luokittelu
- b. Tekniset asiakirjat painelaitteiden osalta ml. riskien arviointi
- c. Turvallisuusvaatimukset, jotka ovat olennaisia laitteessa
- d. Moduulit, eli vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyt (Tukes 2023b.)

Painelaitteiden ja erilaisten laitekokonaisuuksien valmistukseen ja suunnitteluun on laadittuna yhdenmukaistettuja EN standardeja, joiden mukaan valmistettuna laitteen oletetaan kohtaavan standardin vaatimat turvallisuusvaatimukset standardin liitteen ZA mukaisesti. Vaativien painelaitteiden suunnittelun ja valmistuksen osalta niiden vaatimustenmukaisuuden arviointiin osallistetaan myös ilmoitettu laitos. Tämä koskee painelaitteita, joiden PED-luokka on II – IV. Luokitteluun vaikuttavat mm. tyyppi, sisältö ja suureet (lämpötila, paine jne.). (Tukes 2023b.)

Ilmoitettuna laitoksena vaatimustenmukaisuuden arvioinnissa voi toimia ne, jotka ovat jäsenvaltion Euroopan komissiolle ilmoittamia tahoja. Laitokset, joilla tämä kyseinen pätevyys löytyy, ovat listattuna komission NANDO-tietokantaan. (Tukes 2023b.)

Säädösten ja määräysten mukaisesti suunnitellut ja valmistetut painelaitteet CE-merkitään valmistajan toimesta. CE-merkinnällä valmistaja ilmoittaa, että painelaite tai kokonaisuus on suunniteltu sekä valmistettu ohjeiden ja säädösten mukaisesti noudattaen vaadittuja turvallisuusvaatimuksia ja/tai vaatimustenmukaisuuden arviointimenettelyä. (Tukes 2023b.)

Tukes valvoo markkinavalvonnan avulla markkinoilla ja käytössä olevia painelaitteita sekä kokonaisuuksia. Valvonnan tarkoituksena on varmistaa, että ko. laitteet ovat vaatimusten ja säädösten mukaisia, eivätkä vaaranna turvallisuutta, terveyttä tai omaisuutta. (Tukes 2023b.)

2.4 Painelaitteiden hankinta ja käyttö

Painelaitteiden hankinnassa on otettava huomioon monta eri säädösvelvoitetta, jotka koskevat suunnittelua, valmistusta ja asennusta sekä sijoittamista, käyttöönottoa ja käyttämistä käyttökohteessa. Alla lueteltuna asioita, joita on otettava huomioon:

- a. Toimittajan asiantuntemuksen varmistaminen ja osaamisen todentaminen mm. yrityksen referenssit ja taloudelliset tiedot
- b. Tilausdokumentaation tekeminen huolellisesti (tietoinen siitä, mitä tilataan ja missä aikataulussa)
- c. Toimitettavan kokonaisuuden määrittäminen (rajapinnat selkeät jne.)
- d. Laitoskokonaisuuksien huomiointi (kuka tekee ja mitä)
- e. Suunnittelussa ja valmistuksessa käytettävät standardit (ASME, EN, API, AD2000 jne. – eroavaisuudet)
- f. Valmistuksen aikainen tarkastus, käytettävä moduuli
- g. Lainsäädäntövelvoitteet mm. kemikaali- tai maakaasuputkistoissa
- h. Suunnitteluvaiheen ja riskienarvioinnin aikana tiivis yhteistyö toimittajan ja tilaajan kesken
- i. Toimittajan riittävät valmiudet mm. laadukkaan työn tekemiseksi (esim. auditointi)
- j. Koekäytön, painekokeen valvominen (lainsäädännön noudattaminen tilaajan lakien mukaisesti)
- k. Käyttölainsäädännön mukaisesti painelaitteet siirtyvät tilaajalle painelaitteen ensimmäisestä määräaikaistarkastuksesta, koska sen mukaan ensimmäinen määräaikaistarkastus ja sen teettäminen on painelaitteen omistajan tai haltijan vastuulla. Jos koetarkastusajankohta on siirretty sopimuksessa laitostoimittajan vastuulle, on siihen kiinnitettävä sopimuksen teossa huomiota ja kirjattava se tarkasti ylös. (Tukes 2023c.)

Lisäksi painelaitteiden hankinnassa on otettava huomioon mm. toimitettavista asiakirjoista sopiminen jo sopimuksen tekovaiheessa ja kirjattava ne sopimukseen ylös aikatauluineen sekä vaatimuksineen. Painelaitedirektiivin soveltamisohjeesta H-03 löytyy tietoa sopimusvaraisten painelaitteasiakirjojen toimituksesta. (Tukes 2023c.)

Painelaitteiden hankinnan ja laadukkaan työn toteamiseksi on myös huolehdittava riittävästä toimitusvalvonnasta. Toimitusvalvonnan ajankohdat ja vastuuhenkilö voidaan sopia myös jo sopimuksen teko vaiheessa. Toimitusvalvonnan tarkoituksena on varmistaa sopimukseen kuuluvien painelaittevelvoitteiden toteutumisesta (mm. tarkastukset, käyttöönotto, tarkastuslaitos, dokumentaatio, materiaalit jne.). (Tukes 2023c.) Kun painelaite on kaikkien säädösten sekä velvoitteiden mukaisesti toimitettuna tilaajalle ja käyttöönotettu on muistettava omistajan ja haltijan velvollisuudet:

- a. Sijoitussuunnitelman hyväksyntä
- b. Rekisteröi uusi painelaite Tukesin painelaiterekisteriin
- c. Painelaitteelle on nimitettävä käytönvalvoja, jolla on oltava pätevyys siihen
- d. Määräaikaistarkastuksista huolehtiminen ja niiden suorittaminen hyväksytyyn tarkastuslaitoksen tekemänä
- e. Jos muutoksia tapahtuu, niin ilmoita niistä välittömästi Tukesille esimerkkinä painelaitteen poistaminen rekisteristä (Tukes 2023d.)

2.5 Painelaitteiden korjaushitsaus- ja muutostyöt

Painelaitteiden korjaushitsaus- ja muutostöiksi on rajattu ne työt, joissa painelaitteen paineenkestoon vaikuttavaa materiaalia hitsataan, lämpökäsitellään tai vaikutetaan muulla tavoin materiaalin ominaisuuksiin kyseisessä käyttökohteessa. (Tukes 2023e.)

Korjaus- ja muutostöistä on säädetty painelaitelain (1144/2016) 76 §:ssä ja painelaiteturvallisuudesta annetun valtioneuvoston asetuksen (1549/2016) 17 §:ssä tietyt reunaehdot. Velvoitteet on määritetty painelaitteiden omistajille ja haltijoille sekä korjaushitsaus- ja muutostöitä suorittaville toiminnanharjoittajille. Velvoitteissa on kuitenkin annettu reunaehdoja tiettyjen raamien sisäpuolella, jolloin esimerkiksi korjaushitsauksien laajuus sekä kiireellisyys ohjaa toimintaa oikeaan suuntaan. (Tukes 2023e.)

Kuten mainittu, uusien painelaitteiden ja kokonaisuuksien suunnitteluun, valmistukseen sekä vaatimustenmukaisuuden arviointiin on sovellettava valtioneuvoston asetusta painelaitteista (1548/2016) eli painelaitedirektiiviä (PED 2014/68/EU). Joissakin tapauksissa painelaitteen korjaus- ja muutostyötkin velvoittavat käyttämään painelaitteasetusten soveltamista, esimerkkinä, jos laitteen käyttötapaa tai tarkoitusta muuten merkittäväällä tavalla suunnittelusta (Tukes 2023e). Korjaus- ja muutostöiden vaiheet voidaan määrittellä lyhyesti näin:

- a. Määrittelyvaihe korjaus- ja muutostöille:
 - a. Laaditaan suunnitelma ja hyödynnetään aina mahdollisuuksien mukaisesti alkuperäisiä dokumentteja, suunnitelmia ja hitsausohjeita, joiden perusteella kootaan ja laaditaan tarvittava dokumentaatio sekä piirustukset.
- b. Hankintavaihe korjaus- ja muutostöille:
 - a. Sopimuksen laatiminen toimittajan kanssa, sopimuksessa sovitaan tärkeimmät asiat teknisestä erittelystä – hintaan sekä toimitusaikatauluun ja toimitettaviin dokumentteihin tiettyjen määriteltyjen standardien ja velvoitteiden mukaisesti.
- c. Suunnitteluvaihe korjaus- ja muutostöille:
 - a. Korjaus- ja muutostyön tarkka suunnittelu, tarkistetaan painelaitteen luokitukset, käytettävät materiaalit, hitsaajien ja hitsausmenetelmien pätevöinnit, laaditaan tarvittavat tekniset dokumentit, tehdään korjaussuunnitelma ja hyväksytetään se tarvittaessa tarkastuslaitoksella.
- d. Toteutusvaihe korjaus- ja muutostöille:
 - a. Kun tehdään muutos- tai korjaustöitä PED-luokan II – IV painelaitteille on ilmoitettava tarkastuslaitokselle, joka valvoo muutostyön toteuttamisen noudattamista hyväksytyyn suunnitelman mukaisesti, johon kuuluvat mm. NDT-tarkastukset, tarkastukset työn ja dokumenttien osalta sekä tarvittavat pöytäkirjat ja todistukset. CE-merkintää ei tule korjaus- tai muutostöihin.
- e. Asiakirjojen laadinta ja tarkastusvaihe korjaus- ja muutostöille:
 - a. Muutos- tai korjaustyön toteuttava yritys laatii työstä vaatimustenmukaisuusvakuutuksen ja kokoaa kaikki tekniset asiakirjat yhteen. Sopimusvaiheessa

sovitut dokumentit luovutetaan painelaitteen omistajalle ja dokumentit liitetään ko. painelaitteen painelaitekirjaan. (Tukes 2023e.)

2.6 Laitoksen tekniset spesifikaatiot ja muut ohjaavat standardit

UPM:llä on määritettynä erilaisia teknisiä spesifikaatioita käyttökohteen ja esimerkiksi jonkin tietyn laitetypin mukaan. Teknisillä spesifikaatioilla pyritään tarkentamaan standardien ja määräysten lisäksi kohdeyrityksen laitoksen ominaisuuksien vaikutusta kunkin painelaitteen ja/tai putkiston valmistukseen. UPM:n teknisissä spesifikaatioissa on viittauksia yleisiin alan standardeihin mm. American Petroleum Institute (*API*), American Society of Mechanical Engineers (*ASME*). UPM Biojalostamon I-spesifikaatioihin kuuluvat ja tässä työssä käsiteltävät tekniset spesifikaatiot ovat:

- I6 Piping
 - o I6.1 Piping Class Selection
 - o I6.2 Valve Selection Table
 - o I6.3 Pipe Classes
 - o I6.4 Manual Valves and Accesories
 - o I6.7 Piping construction
 - o I6.8 Alt Piping Materials
 - o I6.9 Safety Valves
- I17 Static Equipment
 - o I17.1 Pressure Equipment
 - o I17.2 Shell and Tube HXs
 - o I17.3 Atmospheric Vessels
 - o I-17.4 WET-H₂S or Amine Service
 - o I17.5 Air Cooled HXs

3 Korjaushitsaus- ja muutostyöt materiaali sekä virtaava aine huomioiden

Öljynjalostus- ja kemianteollisuudessa on laaja valikoima erilaisia syövyttäviä ympäristöjä, lämpötilat ja paineet ovat korkeita ja niiden yhteisvaikutuksena myös erilaisia vikaantumismuotoja esiintyy laajasti riippuen mm. käyttökohteen ominaisuuksista ja valituista materiaaleista. Monet korroosionmuodoista sekä vikaantumismekanismeista ovat tyypillisiä ainoastaan öljy- ja kemianteollisuuden ympäristöissä, joka tekee materiaalivalinnoista ja kohteiden elinkaarenhallinnan hallinnasta sekä korjaushitsauksien suorittamisesta laadukkaasti haastavaa. (Bahadori 2014, s. 4.)

Painelaitteiden ja putkistojen korjaushitsaus- ja muutostöiden suunnittelussa, arvioinnissa ja toteutuksessa on otettava aina huomioon tapauskohtaisesti kohteen mahdolliset vauriot, olosuhteet, virtaava aine, laitteen tai laitteiston materiaalit, rakenne ja materiaalin paksuus sekä korjausmenetelmät. Näitä arvioitaessa on otettava huomioon lainsäädäntö ja sen asettamat vaatimukset, joiden vaatimusten mukaan mahdolliset korjaushitsaus- ja muutostyöt on suoritettava. Lisäksi on olemassa standardeja ja laitoskohtaisia spesifikaatioita sekä määräyksiä, jotka tarkentavat vaatimuksia tietyiltä osin esimerkiksi väliaineen, painetason ja lämpötilan sekä materiaalien perusteella.

Esimerkiksi API 582 *Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries* sisältää yleisesti tietoa kemia-, öljy-, ja kaasuteollisuudessa tehtäviin korjaushitsaus ja muutostöihin konepajoilla sekä kenttäolosuhteissa seuraavilta osin:

1. Painetta sisältävät rakenteet, kuten säiliöt, lämmönvaihtimet, putkistot, tulistimet, lämpöpintaputket, ja näihin hitsattavat varusteet
2. Painetta sisältävät varusteet mm. hitsattavat mittayhteet, istutukset ja muutokset
3. Prosessilaitteiden kiinteät sisäosat, niiden rakenteelliset osat sekä niiden hitsauskorjaus ja muutostyöt
4. Muut laitteet ja komponentit soveltuvin osin (API 582 2019, s. 9.)

3.1 Korjaushitsaus- ja muutostöiden suorittaminen sekä laatu yleisesti

Standardin SFS 3052:2020 mukaan korjaushitsauksella tarkoitetaan vian tai vaurioituneen tuotteen korjaamista hitsaamalla. Korjaushitsauksen kanssa yhteistä on yleensä myös termi asennushitsaus, jota standardissa kuvataan yleensä asennus-, eli ts. käyttöpaikalla suoritettavaan hitsaukseen. Tuotteella voidaan tarkoittaa konetta, laitetta, rakennetta tai mitä tahansa komponenttia, joka on vaurioitunut ja menettänyt toimintakykynsä. Yleisesti ottaen korjaushitsauksia pidetään kaikista haastavimpina hitsauksina suorittaa johtuen monista eri muuttujista, joihin voi vaikuttaa esimerkiksi hankalat tai vaikeat olosuhteet, ympäristö, käyttökohde tai korjattavan vaurion laatu. (Hitsaustekniikka 5/2021, s. 1.)

Korjaushitsauksien ja mahdollisten muutostöiden suunnittelu esimerkiksi painelaitteille aloitetaan tyypillisesti vaurion jo tapahduttua, vaikka korjauskohde olisi vielä ei-turvallisessa tilassa. Ensimmäisenä on tärkeää, että ymmärretään vaurion tyyppi ja syyt, jotta korjauksella on onnistumisen edellytykset. Vaurion tunnistamiseen voidaan käyttää esimerkiksi juurisyyanalyysia, Root Cause Analysis, eli RCA-menetelmiä. Kun vaurion syyt ovat selvillä, niin voidaan aloittaa korjaushitsauksen suunnittelu kokoamalla kasaan alkuperäisistä dokumenteista esimerkiksi hitsausohjeet, piirustukset ja aineistodistukset, jotta voidaan arvioida rakenteen materiaalia, kovuutta, koostumusta ja lämpökäsittelytilaa. Jos on mahdollista suorittaa rikkovaa aineenkoetusta vaurioituneesta kappaleesta ennen korjauksen toteutusta, niin korjauksella on vielä paremmat edellytykset onnistua laadukkaasti.

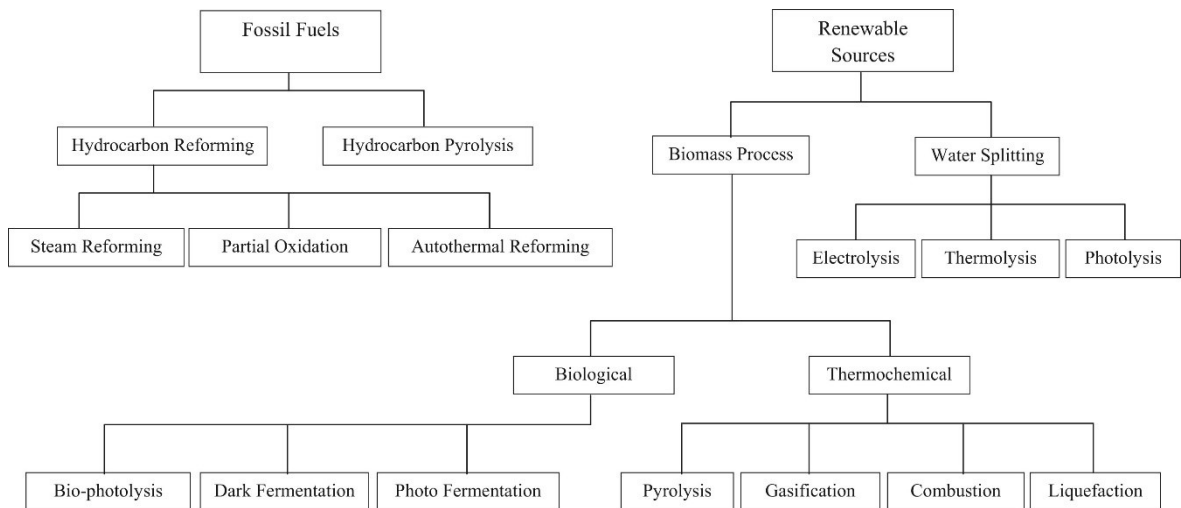
Korjaushitsaus- ja muutostöitä suunnitellessa on aina pidettävä mielessä seuraavat kysymykset:

- Tarvitseeko vikaa korjata? Onko vian tyyppi ja luonne korjattavissa? Lisääkö korjaushitsaus uuden vauriotyyppin muodostumista?
- Pitäisikö korjaushitsaus tai muutostyö korvata kokonaan uudella laitehankinnalla?
- Onko korjaushitsaus tai muutostyö kustannustehokkaampi vaihtoehto? Myös elinikäkustannusten osalta?
- Mikä on työn aikataulu? Onko mahdollista vaihtaa laite tai komponentti uuteen?
- Täyttääkö korjaushitsaus tai muutostyö lain ja standardien vaatimustenmukaisuuden? (Hitsaustekniikka 5/2021, s. 1.)

3.2 Vety, vetyrikas kaasu ja neste – materiaalit ja hitsattavuus

Vety (H) molekyylinä tarjoaa laajat käyttömahdollisuudet monilla eri teollisuudenaloilla mm. raaka-aineena, polttoaineena, energian kantajana sekä energian varastoinnissa. Normaalisissa ilmanpaineissa vety esiintyy värittömänä, hajuttomana ja mauttomana. Vety on tulenarka ja ilmaa kevyempi kaasu ja se esiintyy luonnossa kaksiatomisena molekyylinä, H_2 (International Energy Agency 2023.)

Vedyn valmistus voidaan jakaa pääosin kahteen eri tasoon, kuten kuvassa 3 on esitettyä – fossiilista lähteistä valmistus ja uusiutuvista lähteistä valmistus:



Kuva 3. Vedyn valmistuksen yleiskatsaus (Nikolaidis, Poullikkas 2017).

Öljynjalostuksessa vedyn päätehtävänä on toimia katalyyttisessä reaktiossa stimuloivana väliaineena kiihdyttämään sekä aktivoimaan jalostusprosessien kemiallisia ketjuja (Reid 2022). Vetyä, vetyrikasta kaasua ja nestettä esiintyykin öljynjalostuksessa monissa eri prosesseissa mm. hydrokrakkauksen yhteydessä, kun syötteen kemiallista rakennetta muokataan.

Vedyn käytön ja sitä kautta tuotannon tarve on lisääntynyt maailmassa viime vuosien aikana reilusti. Vedyn käyttöä lisää jatkuvasti se, että regulaatiot, direktiivit ja muut säädökset asettavat tavoitteita päästöjen vähentämiseksi. Tämä taas on lisännyt merkittävästi vedyn

tuotannon tarvetta teollisuudessa, josta kertoo mm. useammat vetyhankkeet ja investoinnit Suomessakin.

Vety, vetyrikas kaasu ja neste öljynjalostuksessa aiheuttavat käytössä paljon erilaisia vikaantumismuotoja ja sitä kautta myös korjattavaa, johtuen käyttökohteiden monista eri painetasoista sekä lämpötiloista, joissa virtaavana aineena on vety, vetyrikas kaasu tai neste. Materiaalit ovat pääosin hiiliterästä, mutta muitakin materiaaleja löytyy mm. austeniittisia 300-sarjan teräksiä, nikkeliseoksia, duplex-teräksiä ja niukkaseosteisia kromi-molybdeeni-teräksiä.

Esimerkiksi standardit ”ASME B31.12 Hydrogen Pipelines ja API 941 Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants” ottavat kantaa vedyn, vetyrikkaan kaasun tai nesteen käyttökohteiden materiaalivalintoihin. Taulukossa 2 on yleisesti vetykäyttökohteisiin esitetyt soveltuvat materiaalit. Työn tavoitteiden saavuttamiseksi taulukon kaikki materiaalityyppejä ei käsitellä. Ei käsitellyt materiaalit on merkattu harmaalla ja eriytetty taulukkoon 3.

Taulukko 2. Soveltuvat materiaalit vetykäyttökohteissa (mukaiillen ASME B31.12 2019 taulukkoa A-2-1 ja API571 2011).

Materiaali	Vedyn olomuoto		Huomiot
	Kaasu	Neste	
Austeniittiset 300-sarjan teräkset (yli 7 % Nikkeliä)	Soveltuva	Soveltuva	Huomioi martensoituminen matalassa jännityslämpötilassa myötörajan yläpuolella
Seostamattomat teräkset ja niukkaseosteiset kromi-molybdeeni-teräkset	Soveltuva	Ei soveltuva	Liian hauras kryogeeniseen käyttöön
Nikkelipohjaiset superseokset (Inconel, Monel, Hastelloy jne.)	Ei soveltuva	Soveltuva	Herkkä vetyhaurastumiselle (kts. API 571)

Taulukko 3. Ei käsiteltävät materiaalit vetykäyttökohteissa (mukaiillen ASME B31.12 2019 taulukkoa A-2-1 ja API571 2011).

Materiaali	Vedyn olomuoto		Huomiot
	Kaasu	Neste	
Titaani ja titaaniseokset	Soveltuva	Soveltuva	-
Alumiini ja alumiiniseokset	Soveltuva	Soveltuva	-
Nikkeliteräkset (2.25 %, 3.5 %, 5 % ja 9 % Nikkeliä)	Ei soveltuva	Ei soveltuva	Sitkeys ominaisuudet heikkenevät vetykäyttökohteissa
Kupari ja kupariseokset (Bronssi, messinki, kuparinikeli jne.)	Soveltuva	Soveltuva	-
Pallografiittivalurauta, valurauta	Ei soveltuva	Ei soveltuva	Ei sallittu vetykäyttöön

Kuten taulukoista nähdään, vetykäyttöön soveltuvia materiaaleja on laajasti. Onkin erittäin tärkeää, että ymmärretään valita käyttökohteeseen parhaiten soveltuva materiaali, joka täyttää mm. käyttäjän, standardien ja lakien vaatimukset esimerkiksi turvallisuuden, hinnan, käytettävyyden sekä elinikäkustannuksien osalta.

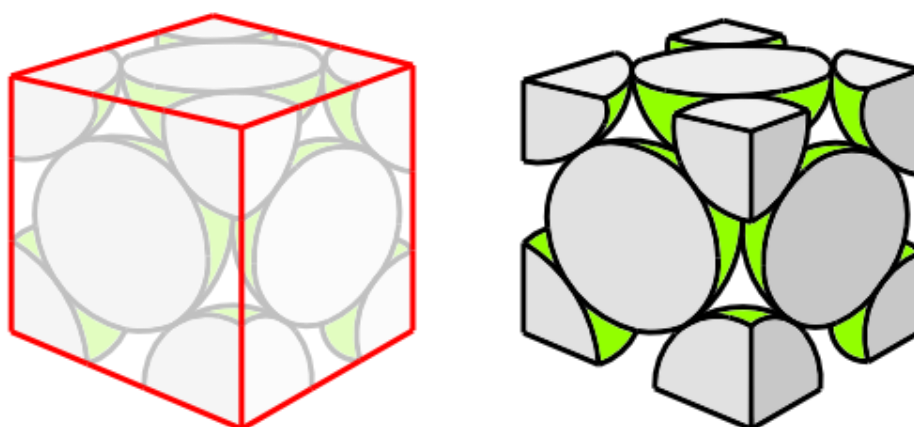
Uuden vetytalouden ja siihen liittyvän tarvittavan infrastruktuurin myötä, uskotaan, että nykyisiä painelaitteita ja putkistoja on operoitava ympäristöissä, joiden syklinen kuormitus ylittää nykyiset käytetyt toimintatavat. Uusien teknologioiden kehittyessä, nykysovelluksissa käytetyt painelaitteet ja putkistot voivat joutua uudelleen käytettäväksi ympäristöön, joissa käyttöolosuhteet ovat täysin erilaisia ja niistä ei juurikaan ole käyttökokemuksia, jotta voitaisiin olla varmoja, että valitut materiaalit ovat soveltuvia vetykäyttöön. (ASME B31.12 2019.)

Vaikka erilaisten teräslajien koostumuksen ja mikrorakenteen vaikutusta esimerkiksi vetyhaurastumiseen ei ole täysin selvitetty, on monesta teollisuudessa jo käytetystä materiaalista olemassa dataa materiaalivalintojen tueksi vetykäyttöön. Olemassa olevilla ja jo tutkituilla tiedoilla voidaan esittää selkeitä suuntauksia, jotka auttavat oikean materiaalin valinnassa vetykäyttökohteisiin. Yleisin ja paljon tutkittu suuntaus on, että materiaalin alttius vetyhauraudelle kasvaa perusmateriaalin lujuusarvojen kasvaessa. Tutkimuksista voidaan todeta, kun materiaalin myötölujuus R_e kasvaa, niin jännitysintensiiteettikertoimen kynnyсарvo K_{TH} pienenee. Eli toisin sanoen määritettäessä soveltuvaa materiaalia käyttökohteeseen – on

määritettävä sallitun myötölujuuden ala- sekä yläraja, jotta voidaan hallita vetyhaurauden syntymistä perusaineeseen. (ASME B31.12 2019.)

3.2.1 Austeniittiset 300-sarjan teräkset

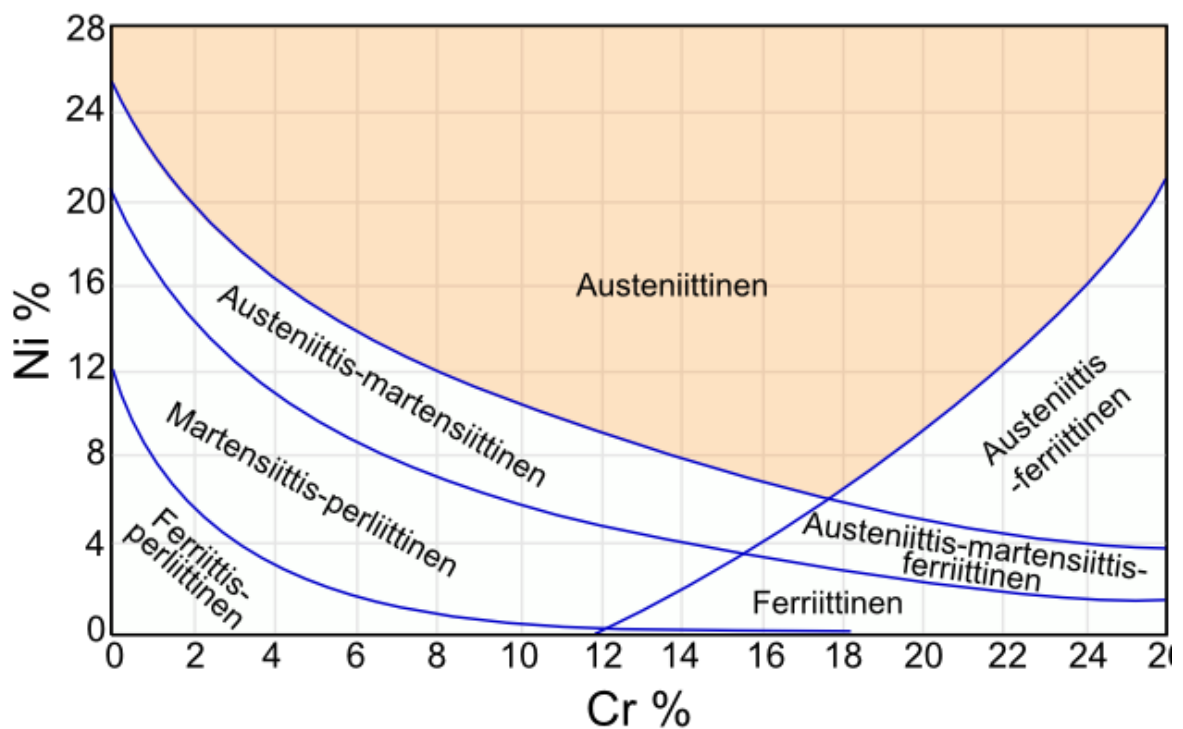
Austeniittisiä 300-sarjan teräksiä ovat esimerkiksi 304 (1.4301), 316L (1.4404) ja 321 (1.4432) ruostumattomat teräkset. Austeniittisiä teräksiä käytetään teollisuudessa useissa käyttökohteissa, joissa esiintyy hapettavia happoja ja korroosiota. Korkeat kloridipitoisuudet sekä rikki-, suola- ja fluorivetyhappo ovat austeniittiselle teräkselle haitallisia. Käyttökohteen lämpötilalla on myös suuri vaikutus esiintyviin vikaantumisiin – esimerkiksi yli 60 °C asteen lämpötilassa voi pienetkin kloridipitoisuudet aiheuttavat jännityskorroosiota, joka on vauriomuotona vaikea löydettävä perinteisin NDT-menetelmin. ASME B31.12 mukaan austeniittiset 300-sarjan teräkset soveltuvat kaasua sekä nestettä sisältäviin vetykohteisiin hyvin, koska austeniittinen teräs on rakenteeltaan pintakeskinen kuutiollinen, eli PKK kiderakenne. Kiderakenteensa vuoksi rakenne vastustaa hyvin vetyhaurautta, koska vetyatomi ei pääse diffusoitumaan niin helposti teräksen hilarakenteeseen (ASME B31.12 2019.). PKK-kiteen yksikkökoppi atomit muodostavat kuution, jonka nurkissa sijaitsee 1/8 atomi ja jokaisella tahkolla taas 1/2 atomi, jotka yhteensä muodostavat neljä atomia per yksikkökoppi (kuva 4). Austeniittisen teräksen kiderakennetta voidaan kutsua myös tiivispakkaushilarakenteeksi, koska tämän tiiviimmin atomit eivät voi järjestyä. (Korhonen 2013.)



Kuva 4. Austeniittisen teräksen pintakeskinen kuutiollinen PKK kiderakenne (Korhonen 2013).

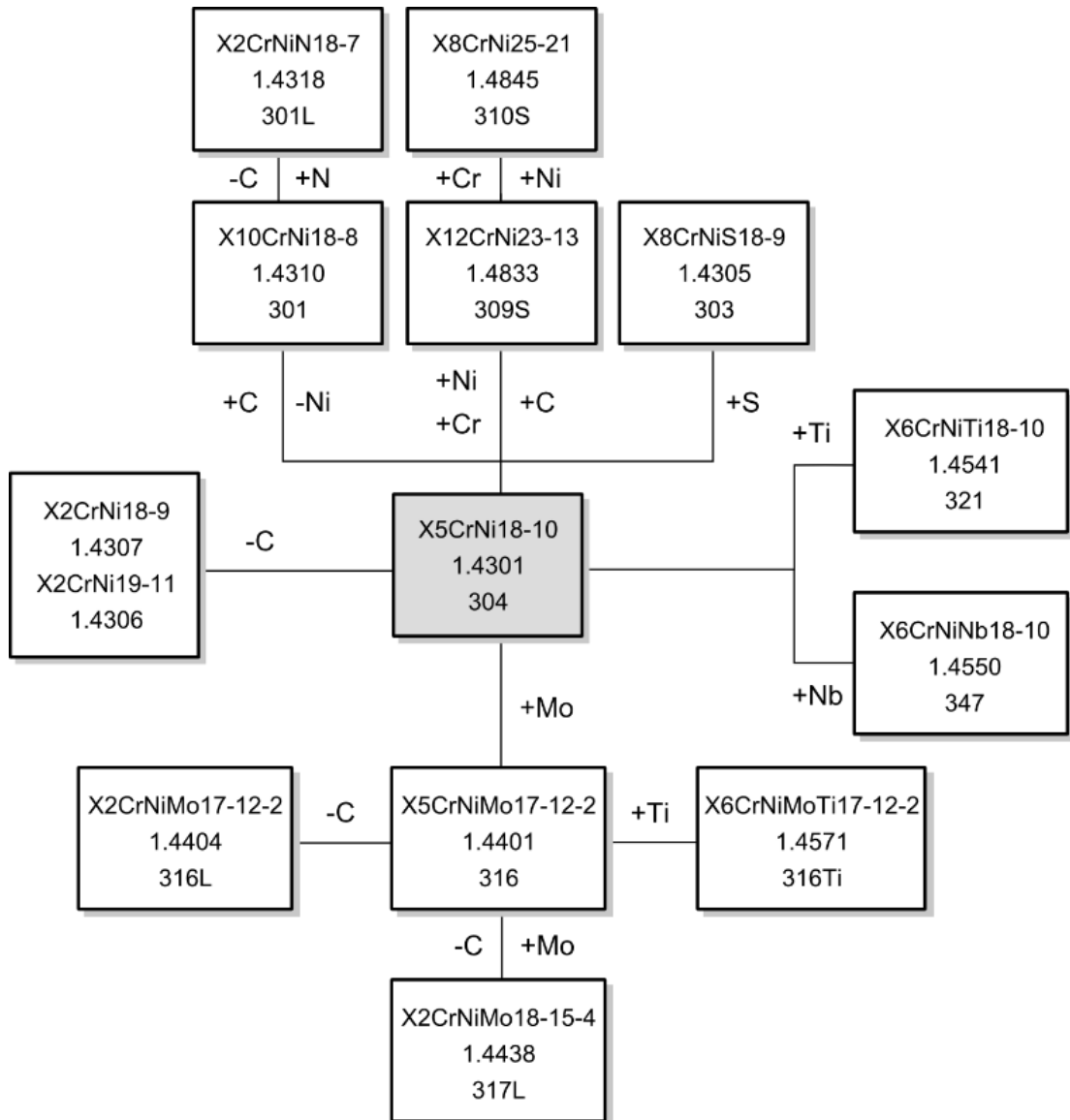
Austeniittisilla teräksillä on erinomaiset sitkeysominaisuudet yhdistettynä myös kohtalaisiin lujuusominaisuuksiin, siitä syystä austeniittiset teräkset ovatkin ruostumattomista teräslajeista eniten käytettyjä. Muita ruostumattomia teräksiä ovat mm. ferriittiset, austeniittis-ferriittiset, eli duplex-teräkset sekä martensiittiset ruostumattomat teräkset. (Koivisto, Laitinen, Niinimäki, Tiainen, Tiilikka, Tuomikoski, 2014.)

Austeniittiset 300-sarjan teräkset ovat hyvin hitsattavia teräksiä, ja ne ovat hitsattavissa lähes kaikilla hitsausmenetelmillä. Lämpölaajenemiskerroin on n. 50 % suurempi verrattuna hiili-teräksiin, joka on otettava huomioon austeniittisiä teräksiä hitsattaessa, eli ts. hitsatessa on syytä huomioida jännityksien sekä mahdollisten vääntymisien syntyminen esimerkiksi rakenteisiin. Austeniittisiksi teräksiksi luokitellaan teräkset, jotka sisältävät vähintään 17 % kromia (Cr) ja 7 % Nikkeliä (Ni), joista nikkelseostus muuttaa kiderakenteen kokonaan austeniittiseksi. (Koivisto ym., 2014). Kun nikkelseostus nousee yli 7 %, on teräksiin myös yleensä sekoitettuna molybdeeniä, jolloin puhutaan ns. haponkestävistä laaduista. Kuvasta 5 nähdään, millä kromi-nikkeli-seosalueilla on austeniittinen rakenne. (Korhonen 2013.)



Kuva 5. Seosainepitoisuuksien Ni ja Cr vaikutus mikrorakenteeseen (Korhonen 2013).

Teknologioiden ja valmistusmenetelmien kehittyessä on myös austeniittisia teräksiä kehitetty runsaasti. Kuvassa 6 on esitettyä yleisimpien 300-sarjan austeniittisten terästen laatuja. Erilaisia seosaineita lisäämällä voidaan muuttaa austeniittisia teräksiä moneen käyttökohteeseen soveltuvaksi esimerkiksi sitkeys tai kuumalujuus arvoja parantamalla.



Kuva 6. Austeniittisten 300-sarjan terästen yleisimpiä laatuja (Korhonen 2013).

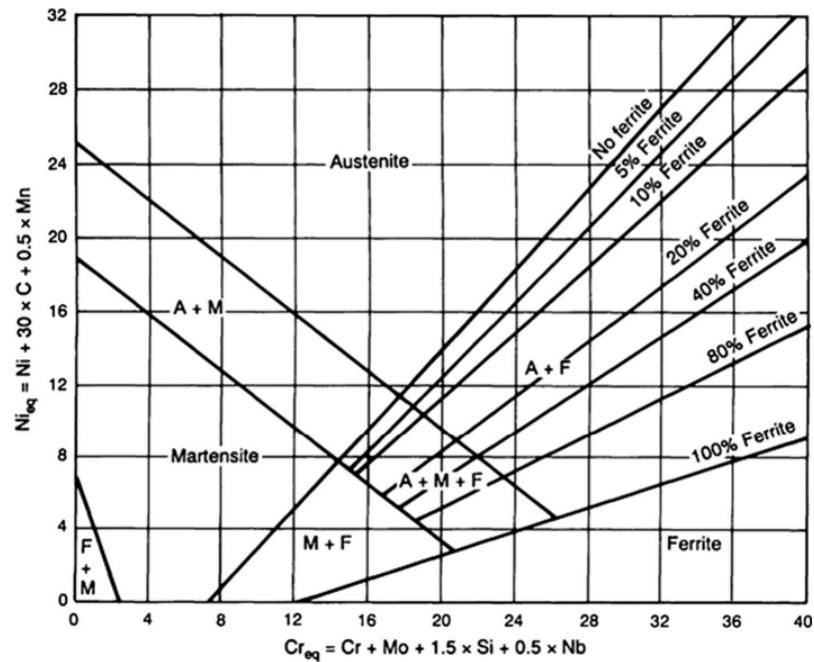
Taulukossa 4 on esitetty seosaineita, joita pääasiassa käytetään austeniittisten teräslaatujen seostamiseen sekä mikä niiden vaikutus on hitsattavuuteen ja materiaalin ominaisuuksiin.

Lisäksi taulukkoon on lisätty muitakin huomioita, jotka vaikuttavat teräksen mm. ominaisuuksiin ja hitsaukseen, jotka on syytä ottaa huomioon.

Taulukko 4. Seosaineiden vaikutus austeniittisten terästen ominaisuuksiin (mukailtu Korhonen 2013; Lepola & Ylikangas 2021; Outokumpu 2017).

Seosaine	Lujuus	Sitkeys	Kuumalujuus	Hitsattavuus	Huomiot ominaisuuksiin
Nikkeli (<i>Ni</i>)	+	+	+	+	Nikkeli parantaa sitkeysominaisuuksia, lisää lujuutta ja karkaisusyvyyttä. Yli 7% nikkeli-seostus tekee ruostumattomasta teräksestä austeniittisen PKK-kiderakenteen
Kromi (<i>Cr</i>)	+	-	+	-	Kromi parantaa teräksen vetolujuutta ja kovuutta, samalla heikentäen sitkeyttä. Kromi seosaineena muodostaa hapen ympäröimänä teräkseen korroosiolta suojaavan oksidikerroksen
Molybdeeni (<i>Mo</i>)	+	-	+	-	Molybdeeni parantaa lujuutta ja yhdessä kromiseostuksen kanssa se parantaa myötölujuutta sekä virumislujuutta. Austeniittisissä teräksissä molybdeeni lisää riskiä sekundaarisienfaasien muodostumiselle
Titaani (<i>Ti</i>)	+	+/-	+	-	Titaaniseostuksen käyttö parantaa lujuuden ja painon suhdetta sekä se ehkäisee raerajakorroosion herkkyyttä. Hitsattaessa titaania tai titaaniseoksia vaatii suojakaasun ohjaukseen tarkkuutta, koska titaani reagoi ilman hapen, typen ja vedyn kanssa yli 300 °C lämpötiloissa
Niobi (<i>Nb</i>)	+	+	+	+	Niobi parantaa lujuutta ja lämmönkestoa. Austeniittisissä teräksissä niobilla on tarkoitus pienentää raerajakorroosion syntymistä
Hiili (<i>C</i>)	+	-	+	-	Hiili seosaineena vaikuttaa laajasti teräksen ominaisuuksiin. Hiilipitoisuutta kasvattaessa teräksen lujuus ja karkaistavuus paranevat. Hitsattavuus on parhailaan hiilipitoisuuden ollessa alle 0,25 %

Austeniittisten 300-sarjan terästen hitsauksen hitsimetallin mikrorakenteen arvioinnissa voidaan käyttää apuna Schaeffler-kaaviota (kuva 7) sekä muita konstitutiivisia kaavioita, kuten WRC-92 ja DeLong-kaaviot, jotka kaikki perustuvat kromi- ja nikkeli-ekvivalenttien laskentaan.

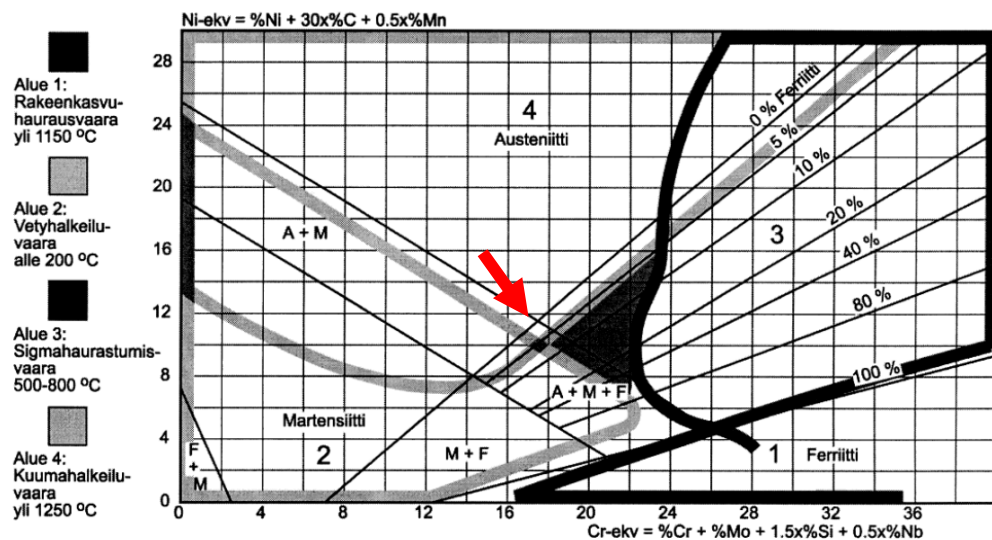


Kuva 7. Schaeffler-kaavio kromi- ja nikkeli-ekvivalenttien laskentaan (Brandt & Schön 2017).

Kaavioilla, kuten Schaeffler voidaan kuvata alkuaineiden vaikutusta hitsimetalliin syntyvään mikrorakenteeseen. Kaavio vaak-akselilla ferriittia suosivat aineet, eli ts. kromi-ekvivalentti = Cr_{eq} ja pysty-akselilla austeniittia suosivat aineet, eli ts. nikkeli-ekvivalentti = Ni_{eq} . Kaaviot ovat pääosin laadittu kaarihitsaukseen, mutta niitä voidaan hyödyntää muillakin hitsausmenetelmillä. On kuitenkin syytä muistaa, että kaavioiden antamat ferriittipitoisuusarvot ovat likimääräisiä – riippuen esimerkiksi hitsauksessa käytetyistä lämmöntuonnin arvoista. (Lukkari & Kyröläinen & Kauppi Osa 2B 2019, s. 28.)

Schaeffler-kaavion pohjalta on muodostettu muitakin kaavioita, kuten Bystram-kaavio (kuva 8). Bystram-kaaviolla arvioidaan ruostumattomien terästen hitsausliitoksen ominaisuuksia. Kaavioon on merkittynä alueet, joilla on mahdollista esiintyä ruostumattomien

terästen peruskoostumusalueille tyypillisiä ongelmia, kun teräksiä hitsataan tai muutoin muokataan. Austeniittiset 300-sarjan teräkset ovat yleisesti ottaen hyviä hitsattavia eikä niissä esiinny haurastumis- tai korroosio-ongelmia. Tämä voidaan nähdä myös Bystram-kaaviosta (kuva 8), jossa 5–10 % ferriittifaasia sisältävässä pienessä kolmiossa kuvan keskellä ei ole lainkaan haurausilmiöitä. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 28.)



Kuva 8. Bystram-kaavio hitsausliitoksen ominaisuuksien arviontiin (Lukkari ym. Osa 2B 2019).

Kaavioon on valittuna hitsausongelmista seuraavat haurausilmiöt, jotka voivat esiintyä hitsauksen aikana tai hitsauksen jälkeen:

1. Ferriitin rakeenkasvu
2. Martensiittihauraus
3. Sigmahauraus
4. Kuumahalkeilu (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 29).

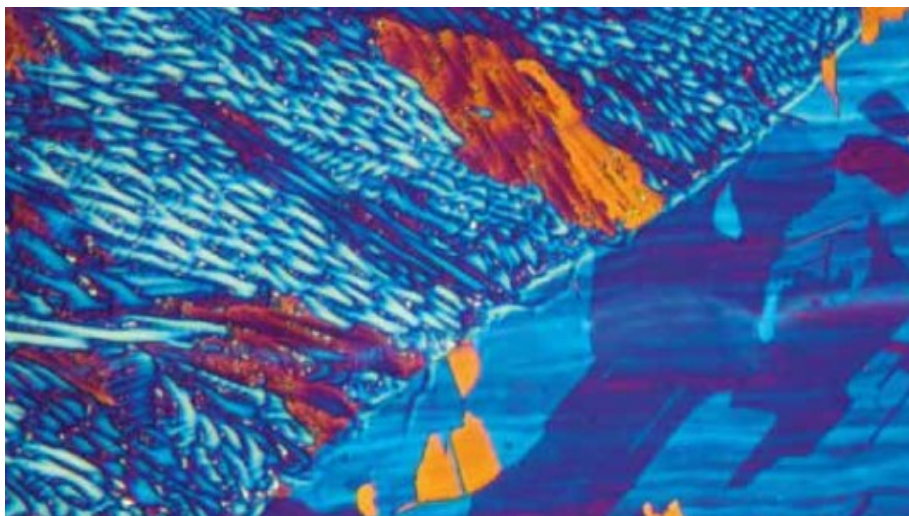
Erityisesti lisäaineen valintaan Bystram-kaaviosta on hyötyä, jos lisäaineella pyritään saamaan hitsimetalliin syntyvä mikrorakenne mahdollisimman hyväksi käyttökohde huomioiden. Joskus joudutaan esimerkiksi tekemään kompromisseja lisäaineen osalta, jos halutaan varmistaa hitsausliitoksen sitkeys. Näissä tapauksissa lisäaine joudutaan seostamaan

poikkeavalla tavalla perusaineeseen nähden. Joissakin käyttökohteissa lisäaineen valinnalla pyritään taas varmistamaan hitsausliitoksen korroosionkesto, jolloin lisäaineeksi valikoituu enemmän seostettu lisäaine sisältäen enemmän kromia ja molybdeeniä. Lisäaineiden valinnassa auttavat standardit, kuten SFS-EN ISO 3581 ja SFS-EN ISO 14343. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 29.)

Austeniittisia teräksiä hitsattaessa on huomioitava erityisesti rakenteen herkistyminen lämpötiloissa 500–850°C, joten hitsauksen aikana on varmistuttava, että jäähtyminen on riittävän nopea tämän alueen yli. Herkistyminen on kuitenkin hitsausteknisesti vältettävissä helposti, kun se tiedostetaan. Mainitulla lämpötila-alueella rakenteessa olevat kromi ja hiili saavuttavat liikkuvuuden, joka mahdollistaa kromikarbideiden muodostumisen. Kromikarbideit pääsevät tuolloin kerääntymään raerajoille, jolloin raerajojen ympäristöön muodostuu kromiköyhiä alueita, minkä takia nuo alueet menettävät korroosionkestokyvyn. Raerajakorroosion takia austeniittinen rakenne tuhoutuu hyvin nopeasti. Herkistymisen välttämiseksi on huomioitava seuraavat asiat:

1. Perusaineen ja valitun lisäaineen vapaan hiilen määrän kontrollointi. Eli ts. käytetään vähähiilisiä (rajoitettuja) perus- ja lisäaineita. Esimerkiksi 316L tai stabiloituja laatuja austeniittisista teräksistä, kuten 321 tai 347, jossa hiili on sidottu esimerkiksi titaani- tai niobikarbideihin.
2. Vahvasti kromilla seostettujen terästen käyttö niin, että kromikarbideiden vähentymisen raerajoilla ei aiheuta ongelmia ruostumattomuudelle = kromiseostus alle 18 %.
3. Teräksen jälkihehkutus hitsauksen jälkeen alueelle 1050–1100 °C pitoaika 10–30 minuuttia, jonka jälkeen vesisammutus. Tällä tavoin kromikarbideit liukenevat takaisin rakenteen matriisiin. (Impomet Oy 2020.)

Yleisempänä ilmiönä austeniittisia teräksiä hitsattaessa on hitsin kuumahalkeilu, kuten Bystram-kaaviossa on esitetty. Standardin SFS-EN 1011-3 liitteen A mukaan hitsauksessa on huomioitava, että on riittävän matala lämmöntuonti, mikä pienentää hitsauksesta johtuvia muodonmuutoksia, kuumahalkeiluja, herkistymistä ts. raerajakorroosiota ja metallien välisen yhdisteiden erkaantumista. Kuvassa 9 on esitetty tyypillinen austeniittisen teräksen mikrohiekkuva.



Kuva 9. Tyypillinen mikrohiekuva austeniittisen teräksen hitsausliitoksesta, jossa oikealla hitsin muutosvyöhyke eli HAZ (Heat Affected Zone) ja vasemmalla hitsimetalli (Outokumpu 2020).

Esikuumennusta ei austeniittisten terästen hitsauksessa tulisi käyttää, koska se lisää herkästi lämmöntuontia rakenteeseen. Yleisenä nyrkkisääntönä on, että austeniittisiä teräksiä hitsattaessa lämmöntuonti, eli Q tulisi olla alle 2.5 kJ/mm . Täysin austeniittisissä tai esimerkiksi titaani- tai niobistabilisoiduissa teräksissä vastaava arvo tulee olla alle 1.5 kJ/mm , jotta voidaan varmistua, ettei kuumahalkeilua pääse syntymään. Hitsauksen aikana on huomioitava mm. puhtaus hitsattavissa kappaleissa sekä hitsiaineessa, epäpuhtaudet edesauttavat kuumahalkeilun syntymistä. Myös liian suurella hitsausnopeudella voidaan edesauttaa kuumahalkeilua, joten hitsausnopeuden ja hitsausvirran valintaan on syytä panostaa, että sulan muoto on edullinen kuumahalkeilun kannalta. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 53.)

Hitsauksen jälkeistä jälkilämpökäsittelyä (vedynpoistohehkutus) ei suositella standardien ASME B31.3 taulukon 331.1.1 ja EN 13480-4 taulukon 9.14.1-1 mukaan austeniittisille 300-sarjan teräksille (ASME B31.3 P-numeroluokan 8 materiaalit). Kuitenkin, jos WPS, eli hitsausohje vaatii jälkilämpökäsittelyn ko. luokan materiaalille niin se on tehtävä. P-numeroluokkaan 8 kuuluvat Cr-Ni-teräkset sekä 200- ja 300-sarjan austeniittiset teräkset. (ASME B31.3 2019.) P-numeroiden kategorisointi esitettyä liitteessä 1. PWHT taulukot esitetty liitteissä 2 ja 3.

3.2.2 Seostamattomat teräkset ja niukkaseosteiset CrMo-teräkset

Seostamattomia ja niukkaseosteisia kromi-molybdeeni-teräksiä käytetään laajasti teollisuuden erilaisissa vetykäyttökohteissa. Materiaalina seostamattomia ja niukkaseosteisia kromi-molybdeeni-teräksiä suositellaan käytettäväksi vain käyttökohteissa, joissa vety esiintyy pääosin ainoastaan kaasumaisena, eli nestettä sisältävissä käyttökohteissa näillä materiaaleilla ei ole onnistumisen edellytyksiä. Suositeltuja seostamattomia ja niukkaseosteisia teräslajeja vetykäyttökohteissa ovat esimerkiksi:

1. Seostamattomat teräkset:

- a. ASME B31.12 mukaan suositellut seostamattomat tai hiiliteräslajit vetykäyttöön ovat ASTM A106 Grade B (vastaava kuin EN P235GH) ASTM A53 Grade B ja API 5L X42 sekä X52 (vastaava kuin EN P355N) luokassa PSL2, mikä määrittää materiaalille tiukempia vaatimuksia mm. kemiallisen koostumuksen ja mekaanisten ominaisuuksien osalta

2. Niukkaseosteiset kromi-molybdeeni-teräkset:

- a. Niukkaseosteisia kromi-molybdeeni-teräksiä, joita voidaan käyttää vetyä sisältävissä käyttökohteissa ovat mm. niukkaseosteiset kromi-molybdeeni-teräkset, kuten EN 10CrMo9-10 1.7380 tai EN 1.7335 13CrMo4-5 (ASME B31.12 2019.)

Seostamattomia ja niukkaseosteisia CrMo-teräksiä valittaessa vetykohteisiin on syytä katsoa läpi erilaisten standardien vaatimuksia esimerkiksi materiaalien hitsaukseen ja käyttökohteeseen liittyen. Soveltuvia standardeja ovat mm. ASME B31.12, NACE MR0103, API 582, API 934, API 941 ja API 941-C.

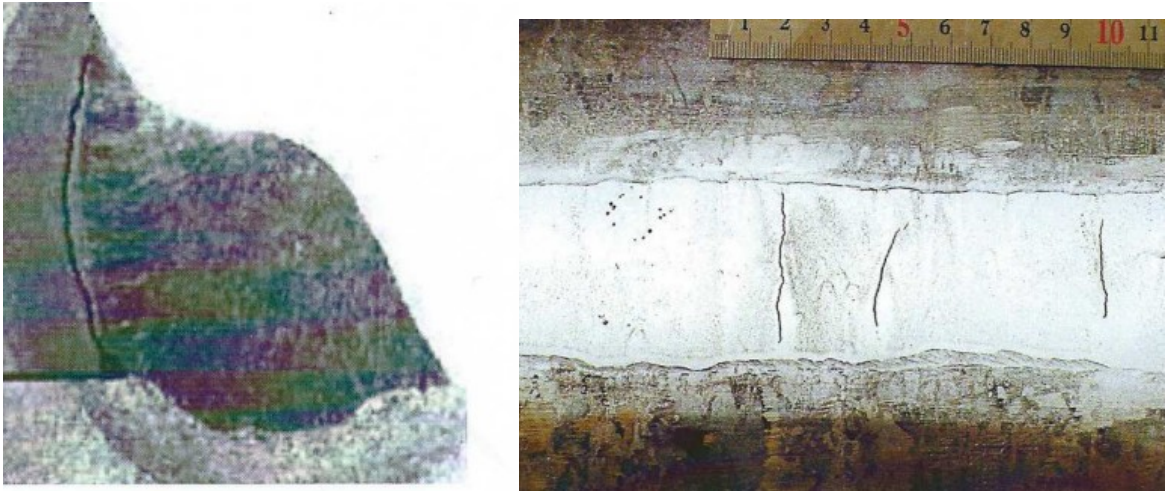
Vetykäyttökohteissa on käytetty seostamattomia teräksiä menestyksekkäästi kohteissa, joissa lämpötilat ovat alle 221 °C sekä vedyn osapaine pysyy alle 6.9 bar täysin puhtaassa vetykäytössä. Nämä arvot eivät kuitenkaan aina kuvaa täyttä totuutta kohteesta, on tutkittu, että seostamattomissa teräksissä on esiintynyt vetyhaurautta kohteissa, joissa käyttöarvot ovat alle sallittujen rajojen, mutta materiaali on esimerkiksi karkaistu tai lähellä jännitystilan maksimiarvoja (API 941 2016). Lisäksi seostamattomat teräkset toimivat myös niissä kohteissa hyvin, joissa voi esiintyä kaasumaisen vedyn mukana pienenä pitoisuuksina

esimerkiksi rikkivetyjä ja jos lämpötilat pysyvät alle 165 °C sekä virtaavassa aineessa ei esiinny juurikaan klorideja, jotka ovat haitallisia seostamattomille teräksille aiheuttaen korroosiota sekä muita haitallisia vauriomuotoja. (ASME B31.12 2019.)

Niukkaseosteisia kromi-molybdeeniseostettuja teräksiä käytetään vetykäyttökohteissa, joissa niiltä vaaditaan hyvää kuumalujuutta ja korroosionkestävyyttä verrattaessa esimerkiksi seostamattomiin teräksiin. Niukkaseosteisten kromi-molybdeeni-teräksien ominaisuuksia voidaan parantaa seostusta lisäämällä. Kromi (Cr) lisää materiaalin korroosionkestoa ja hapettumisenkestävyyttä ja Molybdeeni (Mo) kuumalujuutta sekä virumisen kestokykyä. Tyypillisesti vetykäyttökohteissa käytetään materiaalina esimerkiksi 10CrMo9-10 korkean lämpötilan, eli ts. kuumalujaaterästä, joissa seostuksen lisääminen parantaa kuumankeston ominaisuuksia sekä hapettumisenkestoa. (Hitsaustekniikka 2/2012, s. 22.)

Nykyään näiden CrMo-teräksien rinnalla käytetään paljon myös vanadiinilla (V) seostettuja versioita, joissa on paremmat lujuusarvot, parempi kestävyys korkeapaineista ja lämpötilaista vety-ympäristöä vastaan, parempi kestävyys ruostumattoman pinnoitteen palonalaista halkeilua vastaan, jonka vety voi aiheuttaa sekä korkeampi sietokyky päästöaurautta vastaan. Näitä CrMoV-teräksiä ovat mm. EN 13CrMoV9-10 1.7703 tai 12CrMoV12-10 1.7767. (Lukkari ym. osa 2A 2019, s. 178.)

Seostamattomien sekä niukkaseosteisten (ts. ferriittisten) terästen hitsattavuutta voidaan arvioida esimerkiksi vetyhalkeamistaipumuksen kautta. Vetyhalkeamista käytetään laajalti erilaisia nimityksiä, joita ovat mm. vetyhalkeama, karkenemishalkeama, kylmähalkeama ja viivästynyt halkeama. Halkeiluilmiön syntyyn johtavasta tapahtumasta käytetään nimityksiä vetyhalkeilu tai kylmähalkeilu, joista molemmat tarkoittavat samanlaista vauriotyyppiä hitsausliitoksessa; halkeamat hitsausliitokset muutosvyöhykkeellä HAZ:ssa sekä halkeamat hitsiaineessa (kuva 10). (Lukkari ym. osa 2A 2019, s. 6.)



Kuva 10. Vasemmalla vetyhalkeama HAZ:ssa ja oikealla hitsiaineessa (Lukkari ym. osa 2A, 2019).

Vetyhalkeilun syynä on yleisesti hitsisulaan joutunut vety sekä martensiitin muodostuminen hitsausliitokseen. Materiaalin taipumusta vetyhalkeiluun voidaan arvioida sen hiilipitoisuudella ja hyvänä sääntönä on, että hitsattavuus on hyvä, jos $C \leq 0,18 \%$. Vetyhalkeilun taipumusta voidaan arvioida esimerkiksi IIW (International Institute of Welding) -kaavan avulla.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (\%) \quad (1)$$

Seostamattomien teräksien hitsattavuutta pidetään hyvänä, jos CE on alle 0,40 %. Jos CE ylittää arvon 0,40 %, mutta pysyy alle 0,45 %, niin terästä on hyvä hitsata niukkavetyisillä lisäaineilla. CE-arvon ylittäessä arvon 0,45 % tarvitaan materiaalille esikuumennusta, eli PH:ta (Pre-Heating). (Impomet Oy 2020.)

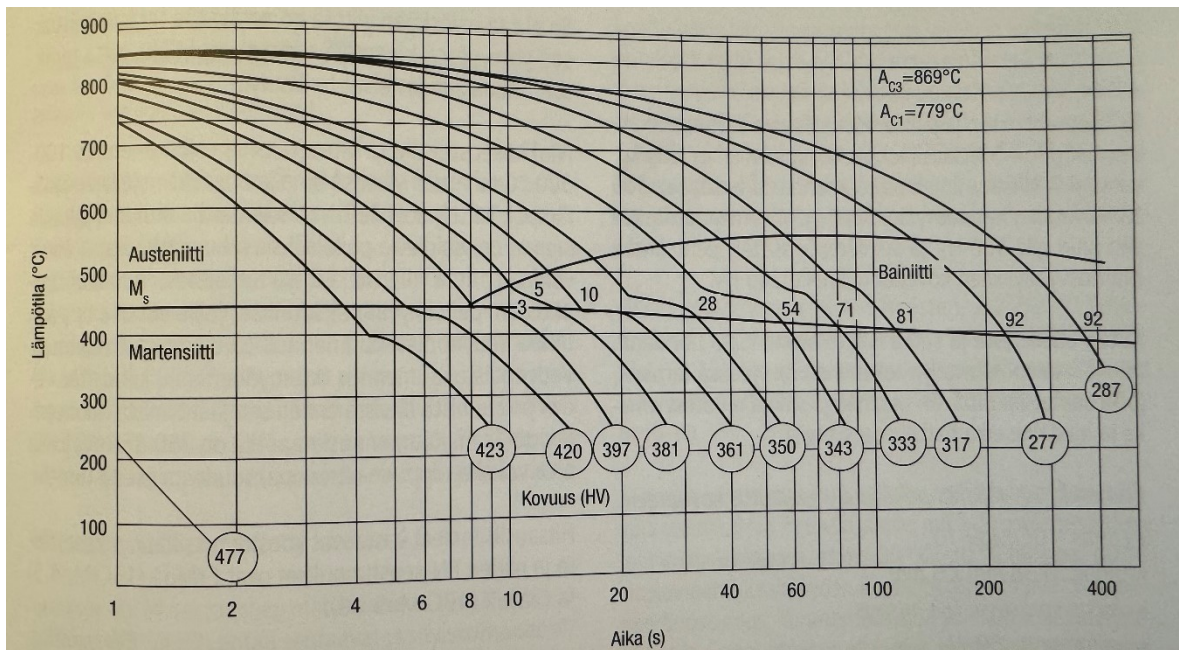
Seostamattomien sekä niukkaseosteisten terästen hitsauksen osalta CE-arvon, eli hiiliekvivalentin kasvaessa materiaalin hitsaaminen vaikeutuu ja on syytä arvioida erilaisten keinojen käyttämistä vetyhalkeilun estämiseksi. Herkkyyttä vetyhalkeiluun voidaan hallita:

1. Valitsemalla niukkahiilisiä teräksiä ja lisäaineita, eli ts. määrittää hiilipitoisuuksille tarkat rajat ja valvoa niitä

2. Alentamalla hitsauksen jäähtymisnopeutta, jotta martensiitin muodostuminen vähennee merkittävästi. Jäähtymisnopeuden vähentämiseksi on muutamia keinoja:
 - a. Suorittamalla esikuuminen sekä jälkilämpökäsittely, eli vedynpoistohehkuus heti hitsaus suoritteen jälkeen
 - b. Hitsattaessa käyttämällä isoa hitsaustehoa (tässä on kuitenkin vaarana kuumahalkeilu hitsissä sekä rakeenkasvu, joka aiheuttaa rakenteeseen haurautta)
3. Vedyn pääsyn estäminen hitsisulaan
 - a. Niukkavetyiset hitsauslisäaineet tai kuivat emäksiset hitsauspuikot ja hitsirailon liitoksien ja kappaleiden puhtaus
4. Suorittamalla hitsaus alilujalla ja pehmeällä lisäaineella, jos kappaleen lujuusvaatimukset sen sallivat
5. Suorittamalla hitsaus austeniittisella lisäaineella. (Impomet Oy 2020.)

Erityisesti niukkaseosteisia CrMo-teräksiä hitsattaessa on syytä kiinnittää huomiota materiaalin karkenevuuteen, eli materiaalin taipumusta muuttua jäähtyessä martensiittiseksi. Niukkaseosteiset kromi-molybdeeni-teräkset muodostavat yleisesti HAZ:n alueelle kovan ja hauraan bainiittisi-martensiittisen tai martensiittisen mikrorakenteen. Tämän takia on yleisesti suositeltu, että CrMo-teräksiä hitsattaessa suoritetaan PH ja PWHT hitsausliitokselle. Karkenevuus riippuu teräksen pääosin materiaalin seostuksesta, mitä korkeampi hiilipitoisuus ja/tai muiden seosaineiden määrä, sitä helpommin materiaali karkenee. Hitsausliitoksen ja sen muutosvyöhykkeen karkenevuus esimerkiksi CrMo-teräksiä hitsattaessa riippuu materiaalin hiilipitoisuudesta, seosaineiden määrästä sekä hitsausliitoksen $t_{8/5}$ -ajasta, eli hitsausliitoksen jäähtymisnopeudesta. (Lukkari ym. osa 2A 2019, s. 182.)

Niukkaseosteisten CrMo-teräksien käyttäytymistä sekä hitsattavuutta voidaan arvioida jatkuvan jäähtymisen S-käyrien, eli CCT-diagrammien avulla (kuva 11). S-käyrästä voidaan tulkita hitsauksen aikana syntyviä mikrorakenteita ja kovuuksia eri hitsausliitoksen jäähtymisnopeuksilla. (Lukkari ym. osa 2A 2019, s. 183.)



Kuva 11. CCT-diagrammi 10CrMo9-10 teräkselle (Lukkari ym. osa 2A 2019).

ASME B31.3 ja EN 13480-4 standardien mukaan hitsauksen jälkeinen jälkilämpökäsittely, eli ts. vedynpoistohehkutus on suoritettava seostamattomille ja niukkaseosteisille kromi-molybdeeni-teräksille taulukon 5 mukaisesti.

Taulukko 5. Hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely (mukailtu ASME B31.3 2019 taulukkoa 331.1.1 ja EN 13480-4 2020 taulukkoa 9.14.1-1).

Materiaali	Pitolämpötila-alue	Alle 50 mm materiaali-paksuus	Yli 50 mm materiaali-paksuus
Seostamattomat hiiliteräokset (P-numeroluokka 1)	595–650 °C	1 tunti / 25 mm, HUOM! pitoaika 15 min minimissään	2 tuntia + 15 minuuttia jokaisen 25 mm jälkeen, jotka ylittävät 50 mm
Niukkaseosteiset kromi-molybdeeni-teräokset (P-numeroluokka 5A ja 5B)	675–750 °C	1 tunti / 25 mm, HUOM! pitoaika 15 min minimissään	2 tuntia + 15 minuuttia jokaisen 25 mm jälkeen, jotka ylittävät 50 mm

Hodgsonin, Dain ja Lippoldin tutkimuksen mukaan seostamattomien terästen ja niukkaseosteisen CrMo-terästen hitsauksen jälkeiseen lämpökäsittelyyn on käytettävä Hollomon-Jaffe, eli ts. Larson-Miller-kaavaa, minkä avulla tulkitaan hitsauksesta johtuvien lämpösykliä vaikutusta materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Hollomon-Jaffe parametri voidaan laskea kaavalla,

$$P = T_s * (20 + \lg * t) 10^{-3} \quad (2)$$

jossa;

- P = Hollomon-Jaffe parametri
- T_s pitolämpötila Kelvineinä
- t pitoaika tunteina
- \lg logaritminen kymmenkantafunktio (Hodgson & Dain & Lippold 2015.)

Tutkimuksessa on esitetty, että käsiteltävien materiaalien käyttäminen kohteissa, joissa esiintyvät esimerkiksi rikkivetyä ja vetyä herkistävät erityisesti niukkaseosteisen CrMo-terästen hitsausliitoksen lämpövaikutusalueen esimerkiksi SSC:lle (jännityskorroosiolle). Käyttämällä Hollomon-Jaffe-kaavaa ja arvioimalla parametri standardin EN 13445 taulukon 11.1–1 mukaan ehkäistään materiaalin vaurioitumista mainituissa olosuhteissa. PWHT:n jälkeen on syytä varmistaa NACE MR0175 tai ISO 15156 mukaan materiaalin ja hitsausliitoksen kovuudet. Kovuudet eivät saa ylittää arvoa 22 HRC niukkaseosteisilla CrMo-teräksillä ja seostamattomilla teräksillä arvoa 17 HRC. (Hodgson & Dain & Lippold 2015.)

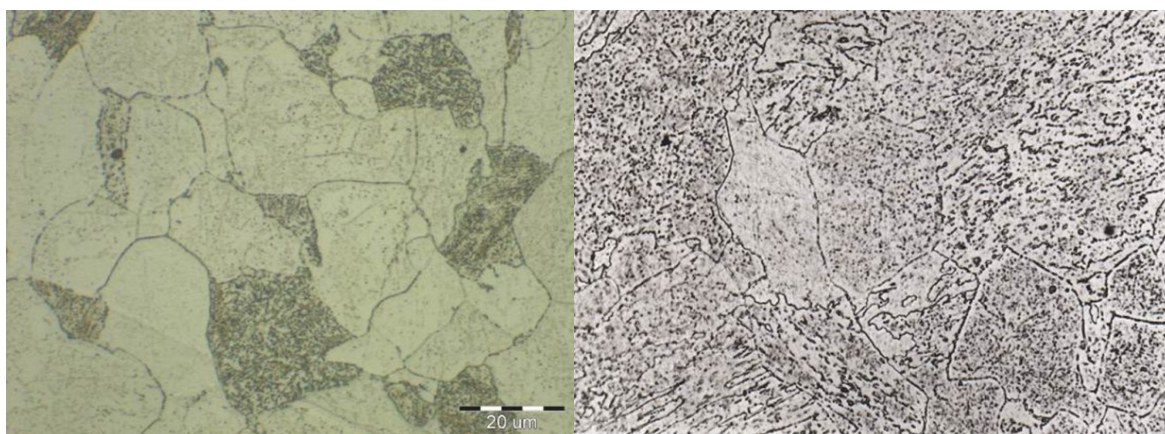
Michel, Bursak ja Vojtko ovat tutkineet niukkaseosteisten CrMo-terästen mikrorakenteen ja ominaisuuksien muutosta suhteessa käyttöikänsä. Tutkimuksessa käytetty materiaali oli 10CrMo9-10, josta testattiin myös kemiallinen koostumus (taulukko 6).

Taulukko 6. Testatun kappaleen kemiallinen koostumus (Michel ym., 2011).

Materiaali	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
CrMo-teräs	0.11	0.46	0.24	2.06	0.96	0.005
	0.13	0.48	0.27	2.19	1.02	0.02

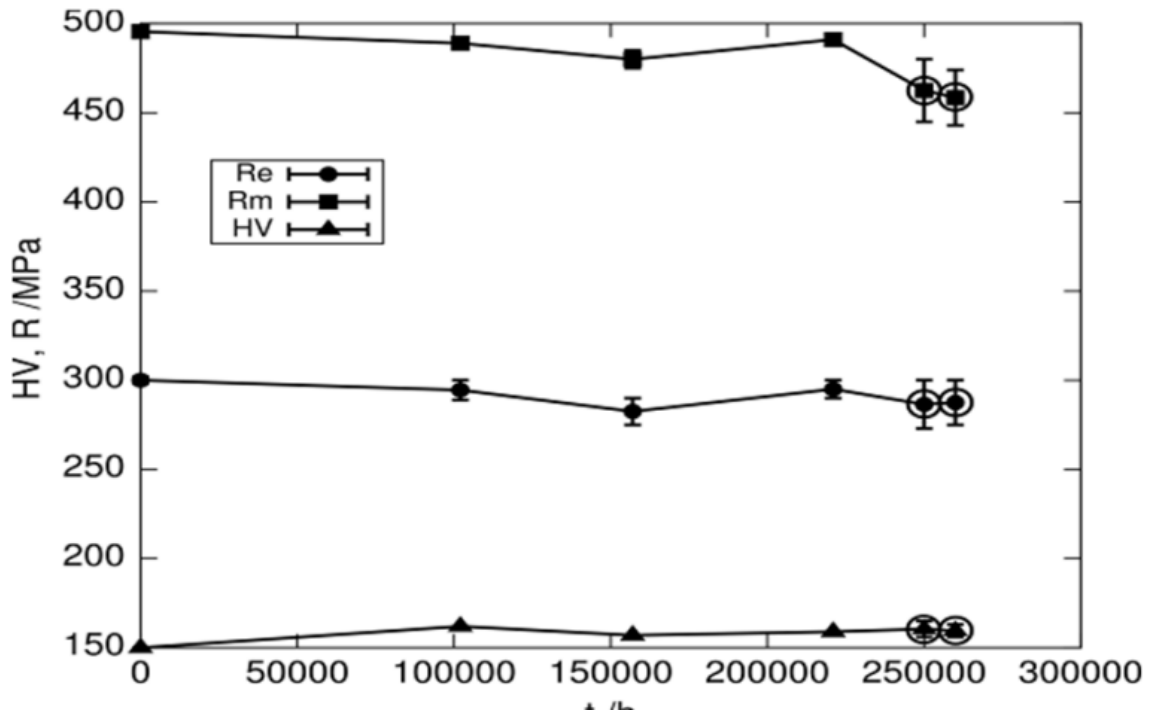
Testattu kappale oli altistettuna 530 °C:n käyttölämpötilassa, virtaavana aineena vetyrikas kaasu ja laskennallinen jännitystilalla kappaleen sisällä oli 46.5 N/mm². Koekappale oli valmistettu putkesta, jonka halkaisija oli 335.6 millimetriä ja seinämäpaksuus 41 millimetriä. (Michel ym., 2011, s. 58.)

Tutkimuksen mukaan koekappaleessa havaittiin suhteessa käyttöikäen muutoksia mikrorakenteessa, jotka varmistettiin ottamalla mikrohiökokeet kappaleesta tietyn käyttöiän mukaan. Koekappaleesta otettiin toimitustilassa (normalisoitu ja päästöehkutettu) mikrohie, joka oli pääosin ferriittis-perliittinen. Valitun toimitustilan tarkoituksena on pitää CrMo-teräs mahdollisimman stabiilina. 102 000 käyttötunnin jälkeen kappaleen mikrorakenne oli hieman muuttunut. Mikrorakenne oli edelleen ferriittis-perliittinen, mutta pitkä altistuminen korkealle lämpötilalle on aiheuttanut perliittilamellien pilkkoutumisen ja karbidien palloutumisen (kuva 12). (Michel ym., 2011, s. 59.)



Kuva 12. Vasemmassa reunassa toimitustilassa oleva 10CrMo9-10, oikealla 102 000 h käytön jälkeen lämpötilassa 530 °C (Michel ym., 2011).

Michel ym. tutkimuksen mukaan materiaalissa ei havaittu muita muutoksia mikrorakenteen muutoksen lisäksi. Kuvassa 13 on esitetty kovuus ja lujuus arvojen muutos käyttäjästä 0 h ikään 260 000 h (Michel ym., 2011, s. 61).

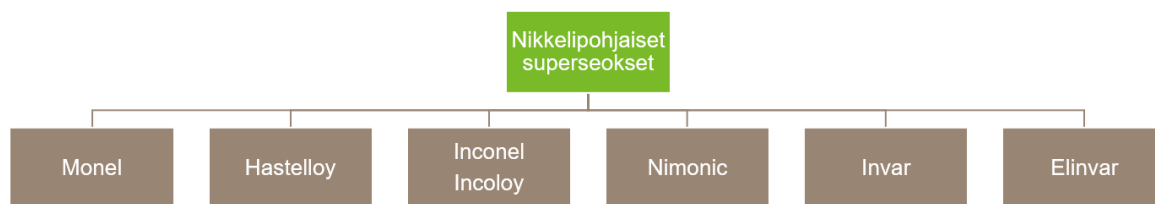


Kuva 13. Kovuus ja lujuus arvojen muutokset 10CrMo9-10 teräksessä käyttäjästä mukaan (Michel ym., 2011).

Korjaushitsauksien ja muutostöiden kannalta tutkimuksen tuloksista ei voi tehdä päätelmiä vaikuttaako mikrorakenteen muutos niiden suorittamiseen laadukkaasti. Jos korjaushitsaus ja muutostöitä suorittaessa on mahdollisista, niin ottamalla koekappale laitteesta tai sen osasta, voidaan esimerkiksi mikrohie- tai laboratoriotutkimuksilla varmistaa hitsattavan kappaleen ominaisuudet. Öljynjalostamoilla, joissa on käytössä paljon rekisterissä olevia paineastioita ja laitteita on lähtökohtaisesti ko. paineastian painelaitekirjassa, niin kattavat tiedot käytetyistä materiaaleista, että korjaushitsauksien ja muutostöiden suunnittelu voidaan tehdä jo hyvin laadukkaasti ennen työn aloitusta jo suunnitteluvaiheessa.

3.2.3 Nikkelipohjaiset superseokset

Nikkelipohjaisia superseostettuja teräksiä (kuva 14) valitaan yleensä painelaitteisiin, joissa tarvitaan korkeaa korroosionkestävyyttä, korkeaa sitkeyttä ja mekaanisia ominaisuuksia kuten virumisen ja eroosion kestävyys, lisäksi materiaaleilla on korkea lämpötilan sietokyky. Nikkelipohjaiset superseokset on seostettu yli 50 % nikkellillä. Nikkeliseostetut teräkset voidaan jakaa karkeasti kahteen eri luokkaan, kiinteät liuosvahvistetut ja saostuskarkaistut. Liuosvahvistettujen seosten etuna on paremmat lujuus arvot sekä paranneltu hitsattavuus ja saostuskarkaistuilla seoksilla etuna on korkeampi materiaalin myötöraja. (Nickel Alloys 2022.)



Kuva 14. Nikkelipohjaisia superseoksia (mukailtu Sashank & Rajakumar & Karthikeyan & Nagaraju 2020).

Vetykäytössä nikkelipohjaisia superseoksia suositellaan ASMEB31.12 mukaan ainoastaan kohteisiin, joissa virtaava aine esiintyy pääosin nestemäisenä, eli esimerkiksi vetyrikkaana nesteinä. Kaasumaisissa olosuhteissa nikkelipohjaiset superseokset ovat alttiita vetyhauraudelle, johtuen materiaalin hilytyypistä. Nikkelipohjainen superseos on rakenteeltaan austeniittinen pintakeskinen kuutiohila, eli tiivispakkaushila. Hilytyypin suurimpaan tyhjiin tilaan mahtuva pallon halkaisija on 41,1 % koko hilan atomin halkaisijasta, joka mahdollistaa rakenteelle helpon seostuksen. (Koivisto ym., 2014, s. 188.)

Nikkelipohjaisten superseosten eri ominaisuuksia voidaan parantaa seostamalla nikkelin lisäksi muitakin seosaineita. Lisää seostamalla yleensä saadaan perusmateriaalin

ominaisuuksia mm. lujuuden, sitkeyden tai hitsattavuuden osalta parannettua, mutta se myös monesti tekee materiaalista haastavamman kohteen korjaushitsaus- ja muutostöiden suorittamiselle. Taulukossa 7 on esitettyinä muutamia seosaineita ja niiden ominaisuuksia. (Sashank ym., 2020.)

Taulukko 7. Erilaisia ominaisuuksia seosaineen mukaan (Sashank ym., 2020).

Seostus (Nikkelin lisäksi)	Ominaisuudet
+Alumiini, Titaani	Lämpötilankestokyky nousee
+Kromi, Rauta, Molybdeeni, Volframi, Tantaali	Korkeat mekaaniset ominaisuudet mm. lujuus ja sitkeys
+Boori, Hiili, Zirkonium	Virumisenkestokyky nousee
+Alumiini, Kromi, Tantaali	Hapettumisenkestokyky nousee

Nikkelipohjaisten superseosten hitsattavuuden pääongelmat liittyvät kuumahalkeiluun ja kiteytymiseen, jotka voivat kehittyä rakeiden poikittaissuunnassa muodostaen rakenteeseen vaarallisia mikrohalkeamia. Nestemäiset faasit ovat yleisiä raerajoilla, riippuen miten kuumahalkeilua esiintyy. Lisäksi faasien muodostumiseen vaikuttaa myös metallin kutistuminen hitsauksen aikana, kun se jäähtyy. (Sashank ym., 2020.)

Yleisesti nikkelipohjaiset superseokset ovat hyvin hitsattavia ja niillä on erittäin hyvä kyky vastustaa halkeilua, eli ts. suuri murtolujuus. Hitsausprosessina TIG-hitsaus on paras vaihtoehto nikkelipohjaisille materiaaleille. TIG-hitsauksella on mahdollisuus välttää mm. kuumahalkeilua käyttämällä hitsausprosessin aikana esimerkiksi nestemäistä tyyppiä jäähdytykseen. Nestemäinen tyyppi pienentää lämmöntuonnin vaikutusalueita HAZ:n alueella huomattavasti ja parantaa hitsauksen laatua. On myös tutkittu, jos hitsaus suoritetaan TIG-hitsaamalla käyttäen pulssia, on materiaalin jäähtymisnopeus parempi muodostuvan mikrorakenteen kannalta. Yleisesti on aina suositeltavaa käyttää mahdollisimman pientä lämmöntuontia sekä välipalkkolämpötilaa hitsatessa, jolla estetään hitsauksen huonolaatuisuus esim. halkeamien osalta. (Sashank ym., 2020.)

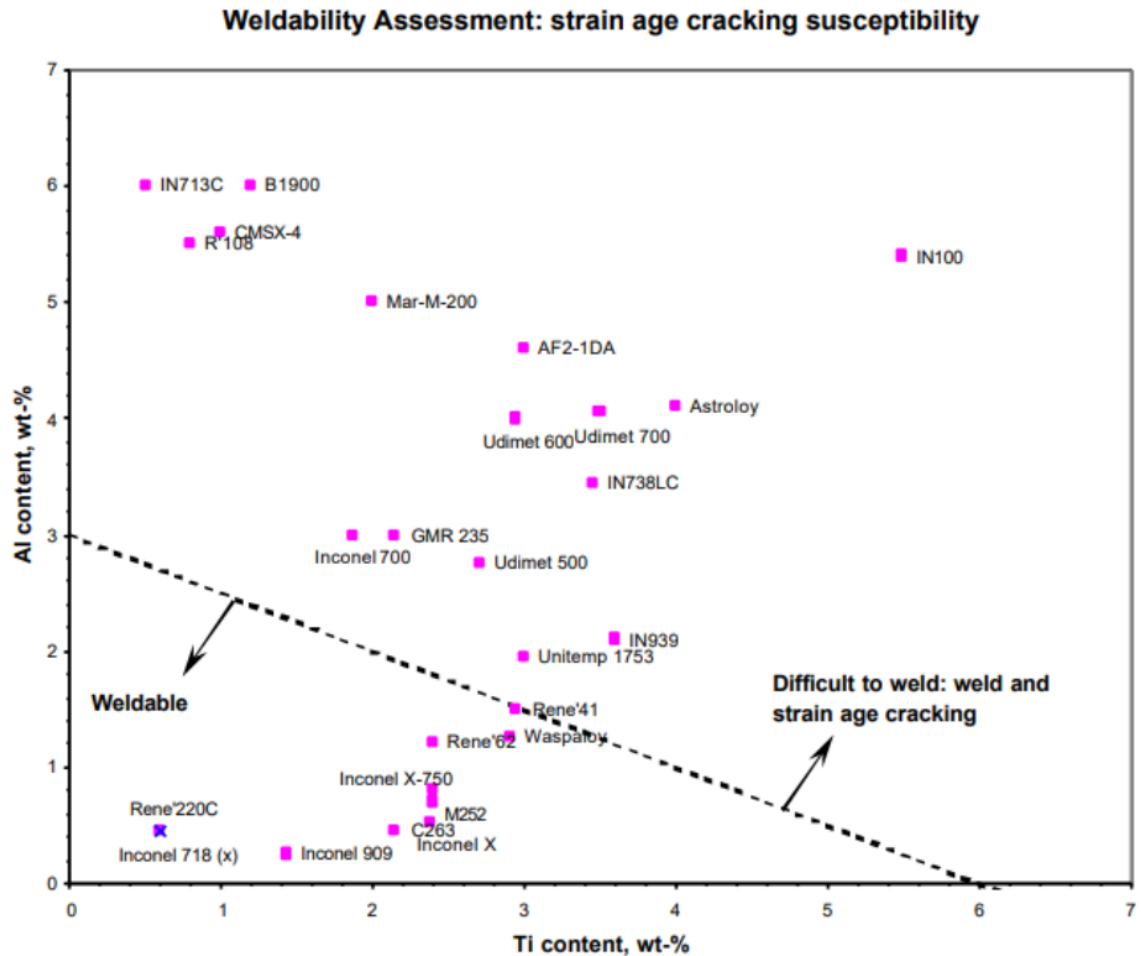
Hitsatessa nikkelipohjaisia superseoksia on lisäaineeksi valittava aina vastaavaa tai ”jalompaa” kuin hitsattava perusaine. Käytettävä lisäaine vaihtelee myös riippuen siitä, onko kappaleen käyttölämpötila yli 800°C vai alle. Nikkelillä on korkea lämpölaajenemiskerroin ja

se on yksi syy, miksi nikkelpohjaisia lisäaineita käytetään myös useasti muiden terästen tai vaativien kohteiden hitsaukseen, joissa halutaan vähentää ja/tai välttää hitsausliitosten ja HAZ:n jäännösjännityksiä sekä rasituksia. (Sashank ym., 2020.)

Hitsatessa nikkelpohjaisia superseoksia on huomioitava erityisen tarkkaan hitsauksen puhdistus hitsausprosessin aikana. Suurimmat laatuongelmat johtuvat yleisesti siitä, kun hitsausprosessista löytyy epäpuhtauksia kuten hiiltä, happea tai rikkiä, jotka ovat kaikki haitallisia hitsausprosessin aikana. (Sashank ym., 2020.) Lisäksi hitsausvirheitä ja muita metallurgisia ongelmia tulee mm. seuraavista asioista:

1. Huokokset, jotka ovat kaasukuplia hitsissä ja ne aiheutuvat hitsin sisään sulkeutuneista kaasuista. Syitä voi olla mm. epäpuhtaudet, kosteus, liian nopea hitsin jäähdytyminen, suotaumat tai suuri rikkipitoisuus
2. Alttius korkean lämpötilan haurastumiselle rikin ja muiden epäpuhtauksien vaikutuksesta
3. Halkeilu hitsauspalossa liian suuresta lämmöntuonnista tai liiallisesta hitsausnopeudesta / virrasta johtuen
4. Jännityskorroosiohalkeilu käyttökohteessa hitsauksen jälkeen (Nickel Alloys 2022.)

Nikkelpohjaisten superseosten hitsattavuutta ja herkkyyttä ikääntymisen aiheuttamalle halkeilulle arvioidaan yleisesti vertaamalla alumiini- ja titaaniseosten kokonaispainoprosenttia seostuksessa. Onkin yleistä, että nikkelpohjaisia superseoksia pyritään tilamaan tietyin rajoituksin Al ja Ti-pitoisuuksien osalta, että materiaalin hitsattavuus olisi paras mahdollinen sekä herkkyyys ikääntymisen aiheuttamalle halkeilulle mahdollisimman pieni. Kuvassa 15 on esitetty kuvaaja, joista voidaan tarkastaa materiaalin hitsattavuutta Al ja Ti-pitoisuuksien osalta. (Henderson 2004.)



Kuva 15. Hitsattavuuden arviointitaulukko joillekin nikkeli-pohjaisille superseoksille (Henderson 2004).

Kriittisenä arvona hitsattavuudelle pidetään 4 % alumiini- ja titaaniseostuksien yhteispainoprosenttia ja tätä enemmän seostettuja pidetään lähes mahdottomina hitsattavina. Tämä on vain yksi arviointitapa hitsattavuuteen, mutta nyrkkisääntönä hyvinkin toimiva ja paljon käytetty edelleen valmistavassa teollisuudessa. Jos perusmateriaalin alumiini- ja titaanipitoisuudet ovat lähellä kriittistä rajaa (molemmiin puolin), on oltava erityisen huolellinen hitsattaessa – erityisesti lämmöntuonin, jäähditysnopeuksien sekä raekokojen suhteen. (Henderson 2004.)

Muita huomioitavaa nikkeli-seosten hitsauksessa:

- Puhtaus, puhtaat hitsattavat pinnat ja hitsauslisäaineet. Oksidikerrokset on huolellisesti poistettava ja huolehdittava siitä, että hitsiaineeseen ei pääse haurastuttavia

aineita. Pelkkä harjaus ei riitä oksidin poistamiseen. Tämän johtuu siitä, että nikkelioksidi sulaa vasta $> 2000^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, ja sen joutuminen hitsiin aiheuttaa liitosvirheitä

- Nikkelisula on jäykkäjuoksuista, ja täten haasteellisempaa hitsata. Tämän takia virtaa ja samalla lämmöntuontia lisätään usein liikaa, joka lisää huokoisuutta hitsissä, kun hitsisula ylikuumenee ja hitsiaineen deoksidointiaine kaasuuntuu. Materiaaleille suositellaan alhaista lämmöntuontia ja koska sula on jäykkäjuoksuista, on railojen oltava tilavia
- Tunkema on usein hyvin pieni. Tunkeumaa perinteisesti kasvatetaan lisäämällä virran voimakkuutta, mutta tämä ei ole suositeltavaa nikkeliseosten kanssa sillä vastaan tulee edellisessä kohdassa kerrottu ongelma

ASME B31.3 ja EN 13480-4 standardien mukaan hitsauksen jälkeinen jälkilämpökäsittely, eli ts. vedynpoistohehkutus on suoritettava nikkelipohjaisille superseoksille vain niissä tapauksissa, jos WPS sen vaatii. Eli näissä tapauksissa on suoritettava aina erillinen arviointi jälkilämpökäsittelyn tarpeelle.

3.3 Prosessikaasu – materiaalit ja hitsattavuus

Prosessikaasulla tarkoitetaan tässä työssä syttyvää, räjähdysaltista ja kuumaa kaasuvirtaa, joka pitää sisällään n. 50 % vetyä (H_2), n. 30 % vettä (H_2O), n. 10 % hiilimonoksidia (CO) ja n. 5 % hiilidioksidia (CO_2) sekä metaania (CH_4). Prosessikaasuja esiintyy öljynjalostuksessa esimerkiksi reformoinnin yhteydessä. Käyttökohteiden takia prosessikaasuja esiintyy monella erilaisella seostuksella sekä monessa erilaisessa käyttöolosuhteessa. Tässä työssä prosessikaasua käsitellään korkean lämpötilan ($+800^{\circ}\text{C}$) omaavana virtaavana aineena, koska korotetuissa lämpötiloissa olevien materiaalien valinta, korjaushitsaus- ja muutostyöt kattavat tiedoiltaan myös mm. alemmissa käyttölämpötiloissa käytetyt kuumalujat teräkset.

Olosuhteista ja virtaavasta aineesta johtuen, korkeanlämpötilan teräksiä hitsatessa on syytä huomioida esimerkiksi esilämmityksen ja hitsauksen jälkeisen lämpökäsittelyn tarve. Prosessikaasun sisällön takia (H_2) korkeanlämpötilan teräksien (esim. EN 13CrMo4-5) korjaushitsauksia ja muutostöitä on syytä suunnitella huolellisesti ennen toteutusta. Korjaussuunnitelma sisältäen tarvittavat tiedot hitsaus-, lämpökäsittely- ja tarkastusohjeineen

voidaan valmistella hyvissä ajoin ennen korjauksen toteuttamista. Korjaushitsaukset voivat olla kenttäolosuhteissa haastavia toteuttaa, josta hyvänä esimerkkinä toimii kohteet, joissa vaaditaan esilämmitystä ja korjaushitsaus tulisi suorittaa esim. laitteen sisällä. Joissakin tapauksissa on jouduttu turvautumaan palopukujen ja paineilmalaitteiden käyttöön, että hitsaus on voitu suorittaa turvallisesti altistamatta ketään vaarallisille olosuhteille.

3.3.1 Kuumalujat ja tulenkestävät teräkset

Korkean lämpötilan teräksien ts. kuumalujien- ja tulenkestävien teräksien määritelmänä voidaan pitää teräksiä, joiden käyttölämpötilat ylittävät 540°C asteen rajan. Valittaessa oikeaa kuumalujaa tai tulenkestävää materiaalia käyttökohteeseen on valinnan perustuttava käyttökohteen vaatimiin lämpötiloihin, kemiallisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin sekä myös hankintahintaan ja toimitusaikaan. (Simic & Alil & Martinovic & Vlahovic & Savic & Husovic 2020.)

Ominaisuuksista tärkeimmät korkean lämpötilojen teräksien osalta ovat:

- Kuumalujuus, joka ominaisuutena tarkoittaa kestävyyttä virumista vastaan
- Hilseilynkestävyys ts. tulenkestävyys, joka ominaisuutena tarkoittaa kestävyyttä hapettumista vastaan (Kauppi 2013.)

Ominaisuuksista puhuttaessa, puhutaan ns. kuumalujista teräksistä (creep resistant steels) ja tulenkestävistä teräksistä (heat resistant steels). Kuumalujat teräkset ovat käyttölämpötilassa 300–650°C, jolloin kuumien kaasujen aiheuttama hapettuminen ei ole vielä kovin voimakasta. Tulenkestäviä teräksiä käytetään taas yli 650°C asteen lämpötiloissa aina n. 1200°C asteeseen asti, mutta tulenkestäviä teräksiä käytetään harvoin lujuutensa puolesta esim. kovia rasituksia kestävässä kohteissa tai paineastioissa. (Kauppi 2013.)

Standardissa SFS-EN 10028-2 on määriteltyinä kuumalujat teräkset (16 kpl) ja standardissa SFS-EN 10095 on määriteltyinä tulenkestävät teräkset sekä nikkelseokset (25 kpl), lisäksi standardin 10095 mukaan myös standardien 10088-1 ja 10028-7 teräkset 1.4512, 1.4000, 1.4016, 1.4509, 1.4510, 1.4590, 1.4006, 1.4301, 1.4541, 1.4941, 1.4950, 1.4951 ja 1.4362 ovat soveltuvia tulenkestäviksi teräksiksi. (Kauppi 2013.)

Tulen- ja hilseilynkestävien terästen kemiallisen koostumuksen takia niiden pinnalle tuleva hilse hidastaa seosaineiden diffuusion syntymistä oksidikerroksessa, joka suojaa terästä haettumiselta (Kauppi 2013). Taulukossa 8 on esitetty erilaisia korkean lämpötilan teräksiä ja niiden lämpötila rajoja sekä huomioita hitsattavuuteen.

Taulukko 8. Korkean lämpötilan teräksiä ja ominaisuuksia (mukailtu standardeista SFS-EN 10028-2 2017 ja SFS-EN 10095 2001).

Luokka	Kaupalliset esimerkit	Lt. °C (max)	Huomiot hitsaukseen
Kuumalujat teräkset	P235GH, P265GH, P355GH, 18MnMo4-5, 20MnMoNi4-5, 115NiCuMoNb5-6-4, 13CrMoSi5-5, 10CrMo9-10, 112CrMo9-10, X12CrMo5, 13CrMoV9-10, 12CrMoV12-10, X10CrMoVNB9-1	300–650°C	CEV, hitsin vetytitoisuus, CCT-diagrammin käyttö hitsin arviointiin, lämmöntuonti, esilämmitys ja hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely
Ferriittiset tulenkestävät teräkset	X10CrAlSi7 X10CrAlSi13 X10CrAlSi18 X10CrAlSi25 X18CrN28 X3CrAlTi18-2	800°C 850°C 1000°C 1150°C 1100°C 1000°C	Iskusitkeys, vetyhauraus, austeniittinen lisäaine (jos ei rikkiä), muuten ferriittinen tai ferriittis-austeniittinen lisäaine (pintapalko), hehkutus 700–800°C, esilämmitys ja hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely
Austeniittiset tulenkestävät teräkset	X8CrNiTi18-10 X15CrNiSi20-12 X9CrNiSiNc21-11-2 X12CrNi23-13 X8CrNi25-21 X15CrNiSi25-21 X12NiCrSi35-16 X10NiCrAlTi32-21 X6NiCrNbCe32-27 X25CrMnNiN25-9-7 X6CrNiSiNc19-10 X6NiCrSiNc35-25 X10NiCrSi35-19 X10NiCrSiNb35-22	850°C 1000°C 1150°C 1000°C 1050°C 1150°C 1100°C 1100°C 1150°C 1150°C 1050°C 1170°C 1100°C	Herkistyminen lämpötiloissa 500–850°C Riittävän nopea jäähtyminen (t8/5) Riittävän matala lämmöntuonti Puhtaus sekä hitsausnopeuden ja virran suhde, hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely

Taulukko 8 jatkuu. Korkean lämpötilan teräksiä ja ominaisuuksia (mukailtu standardeista SFS-EN 10028-2 2017 ja SFS-EN 10095 2001).

Luokka	Kaupalliset esimerkit	Lt. °C (max)	Huomiot hitsaukseen
Ferriittis-austeniittiset tulenkestävät teräkset	X15CrNiSi25-4	1100°C	Lämmöntuonti (ferriittipitoisuus) Yliseostettu nikkeli lisäaineena, esilämmitys ja hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely
Superseokset ts. tulenkestävät nikkeli-seokset	NiCr15Fe	1150°C	Lämmöntuonti kuumahalkeiluriskin sekä korroosionkeston takia, hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely
	NiCr20Ti	1150°C	
	NiCr22Mo9Nb	1000°C	
	NiCr23Fe	1200°C	
	NiCr28FeSiCe	1200°C	

Ferriittisten terästen suuren kromipitoisuuden vuoksi mikrorakenne on erittäin ferriittinen. Hilseilyn kestävyyttä korkeissa lämpötiloissa voidaan parantaa seostamalla piitä sekä alumiinia. Ferriittisten terästen ominaisuutena on se, että ne kestävät hyvin rikkipitoisia kaasuja, mutta toisaalta niiden virumisen kestävyys korkeassa lämpötilassa on heikompi, jos verrataan austeniittisiin tulenkestäviin. Joillakin lämpötila alueilla ferriittisissä teräksissä voi esiintyä haurautta, jonka vuoksi teräs muodostuu kylmähauraaksi. Käyttölämpötilan ollessa yli 900°C asteen, tapahtuu ferriittisissä teräksissä huomattavaa rakeenkasvua, joka myös haurastuttaa terästä. Haurauden vuoksi on esim. korjaushitsausten aikana vältettävä rasiuksia ja iskuja rakenteeseen. (Kauppi 2013.)

Ferriittis-austeniittisten terästen etuna, johtuen nikkeliseostuksesta, on se, että niillä on ferriittisten sekä austeniittisten terästen ominaisuuksia. Ferriittis-austeniittisillä teräksillä on parempi kylmämuovattavuus, sitkeys, hitsattavuuden ominaisuudet ja parempi kuumaalijuus kuin puhtaasti ferriittisellä rakenteella. Erona puhtaasti austeniittisten terästen ominaisuuksiin, niillä on kuitenkin hieman pienempi kuumaalijuus, jonka lisäksi rakeenkasvun aiheuttama hauraus on siirtynyt hieman korkeampiin lämpötiloihin, mutta etuna on taas parempi kestävyys rikkipitoisiin kaasuihin verrattuna puhtaasti austeniittisiin. (Kauppi 2013.)

Austeniittisillä teräksillä on nikkelipitoisuuden vuoksi täysin austeniittinen mikrorakenne, jolle on ominaista hyvä kuumaalijuus sekä sitkeys. Altistuminen haurastumiselle on huomattavasti pienempi kuin ferriittisillä teräksillä. Hilseilynkestävyys näillä teräksillä on

hapettavassa atmosfäärissä todella hyvä, mutta toisaalta austeniittiset teräkset eivät sovellu rikkipitoisten kaasujen kanssa samaan käyttökohteeseen. Austeniittisilla teräksillä on hyvät kylmämuovaus ominaisuudet ja teräs on hyvin hitsattavissa lähes kaikilla hitsausmenetelmillä. (Kauppi 2013.) Sandvik suosituksen mukaan, jos austeniittisiä esimerkiksi Alloy 800HT (UNS08811) käytetään >800 °C käyttölämpötilassa – on lisäaineen valinnassa oltava erityisen tarkka. Suosituksena on, että lisäaineena käytetään taulukossa 9 esitettyjä lisäaineita käyttölämpötilan mukaan.

Taulukko 9. Suositellut lisäaineet Alleiman 2019 (ent. Sandvik) mukaan Alloy 800 HT:lle.

Hitsausmenetelmä	< 800 °C	> 800 °C
TIG/GTAW tai MIG/GMAW	ISO 18274 S Ni 6082/AWS A5.14 ERNiCr-3	ISO 18274 S Ni 6617/AWS A5.14 ERNiCrCoMo-1
MMA/SMAW	ISO 14172 E Ni 6182/AWS A5.11 ENiCrFe-3	ISO 14172 E Ni 6117/AWS A5.11 ENiCrCoMo-1

Kuumalujien terästen osalta hitsattavuutta arvioidaan usein seostuksen kautta. Kun teräksen seostus kasvaa, niin hitsattavuus ilman erilaisia varmistavia toimenpiteitä heikkenee. Toimenpiteinä voidaan pitää esim. esikuumennusta, lämmöntuonnin rajoittamista, jälkikuumennusta ja jälkilämpökäsittelyä. Seostuksen vaikutusta kuvataan hiiliiekvivalentin avulla (CE, CEV, C-eqv, C_{eqv} ja CE-IIW). Yleisesti käytetyin sekä tunnetuin on ns. IIW:n kaava hiiliiekvivalentin laskentaan, kuten jo aiemmin jo esitetty (1)

Mitä korkeampi CEV-luku kaavasta saadaan, sitä karkenevampi teräs on. Suuretta käytetään hitsattavuuden ja esikuumennuslämpötilan arviointiin. Teräksen karkenevuus tarkoittaa, että vetyhalkeiluvaara rakenteessa on korkeampi muutos- eli HAZ-vyöhykkeellä sekä itse hitsiaineessa. Karkenemisestä johtuvaa vetyhalkeilua voidaan estää esikuumentamalla hitsattava kappale. Hyvänä raja-arvona voidaan pitää CEV-arvoa 0,40 %, kun tuo arvo ylitetään, on kappale esikuumennettava. Hitsattavuus voidaan kuitenkin todeta vain rajoitetusti joidenkin kuumalujien materiaalien osalta CEV-luvun avulla:

- CEV alle 0,40 %
 - o Erittäin hyvä hitsattavuus
- CEV välillä 0,40 % - 0,50 %

- Hyvä hitsattavuus (huomioitava mm. esikuumennus, hitsin vetypitoisuus, lämmöntuonti, jäykkyys ja materiaalipaksuus)
- CEV yli 0,50 %
 - Rajoitettu hitsattavuus (huomioitava mm. esikuumennus, hitsin vetypitoisuus, lämmöntuonti, jäykkyys ja materiaalipaksuus). (Lukkari ym. Osa 2A 2019, s. 181.)

Useat kuumalujat teräkset kuitenkin ylittävät reilusti raja-arvot, joten hiiliekvivalentin käyttö ei enää niille sovellu, vaan niiden hitsattavuuden arvioinnissa on otettava huomioon mm. esikuumennus, hitsin vetypitoisuus, lämmöntuonti, materiaalin jäykkyys ja -paksuus sekä käytettävät hitsauslisäaineet sekä -prosessit. (Lukkari ym. Osa 2A 2019, s. 182.)

Ferriittisiä tulenkestäviä teräksiä hitsattaessa noudatetaan yleisesti samoja periaatteita kuin muiden ferriittisten korroosionkestävien terästen kanssa. Ferriittisten tulenkestävien terästen kiderakenteen vuoksi (tilakeskinen kuutiollinen rakenne, TKK) on niillä samoja periaatteita hitsauksessa kuin niukkaseosteisillakin teräksillä. Hitsauksessa on huomioitava mm.

- Iskusitkeydessä esiintyvä sitkeähaaras transitioilämpötila
- Alttius vetyhauraudelle
- Martensiitin syntymisestä johtuva hauraus
- Raerajakorroosio (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 29.)

Yleensä ferriittisiä tulenkestäviä teräksiä hitsatessa suositaan austeniittisiä lisäaineita hitsiaineen suuremman sitkeyden takia. Austeniittisellä hitsiaineella varmistetaan korroosionkesto hitsiaineessa, sen suuremman kromipitoisuuden ansiosta. Jos taas hitsattavan kappaleen käyttöolosuhde on rikkiptoinen, on hitsaukset suoritettava ferriittisellä tai ferriittis-austeniittisellä lisäaineella. Raerajakorroosiota parannetaan yleisesti käyttäen hitsauksen jälkeistä hehkutusta lämpötiloissa 700–800°C. Lisäksi hehkutus parantaa muutosvyöhykkeen ja perusainetta vastaavan hitsiaineen sitkeyttä ja poistaa tai vähentää jäännösjännityksiä hitsausvyöhykkeeltä. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 52.)

Ferriittis-austeniittisiä tulenkestäviä teräksiä hitsattaessa on käsitelty standardin SFS-EN 1011-3 liitteessä C. Standardin mukaan ferriittis-austeniittisten tulenkestävien teräksien hitsattavuutta on paranneltu, jos verrataan perinteisiin duplex-teräksiin optimoimalla ferriitin

ja austeniitin seosmäärät typpiseostuksella. Näitä teräksiä hitsattaessa ei suositella hitsausta ilman lisäaineita eikä myöskään esikuumennusta. Pientä esikuumennusta (lue: kosteudenpoistohehkutus alle 100°C) voidaan suorittaa. Lämmöntuonti hitsattaessa ferriittis-austeniittisiä teräksiä on todella tarkka. Liian pieni lämmöntuonti johtaa liian suureen jäähtymisnopeuteen, joka aiheuttaa liian korkean ferriittipitoisuuden hitsinvyöhykkeelle ja mikrorakenteeseen. Liian suuri lämmöntuonti johtaa metallien välisten yhdisteiden erkaantumiseen. Ferriitti-austeniittisiä tulenkestäviä teräksiä hitsatessa käytetään lisäaineena yliseostettua nikkeliä, jolla varmistetaan oikea sekä soveltuva mikrorakenne hitsiaineeseen. Hitsauksen jälkeistä lämpökäsittelyä (PWHT) ei ole tarpeen tehdä ferriittis-austeniittiselle tulenkestäville teräksille. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 54.)

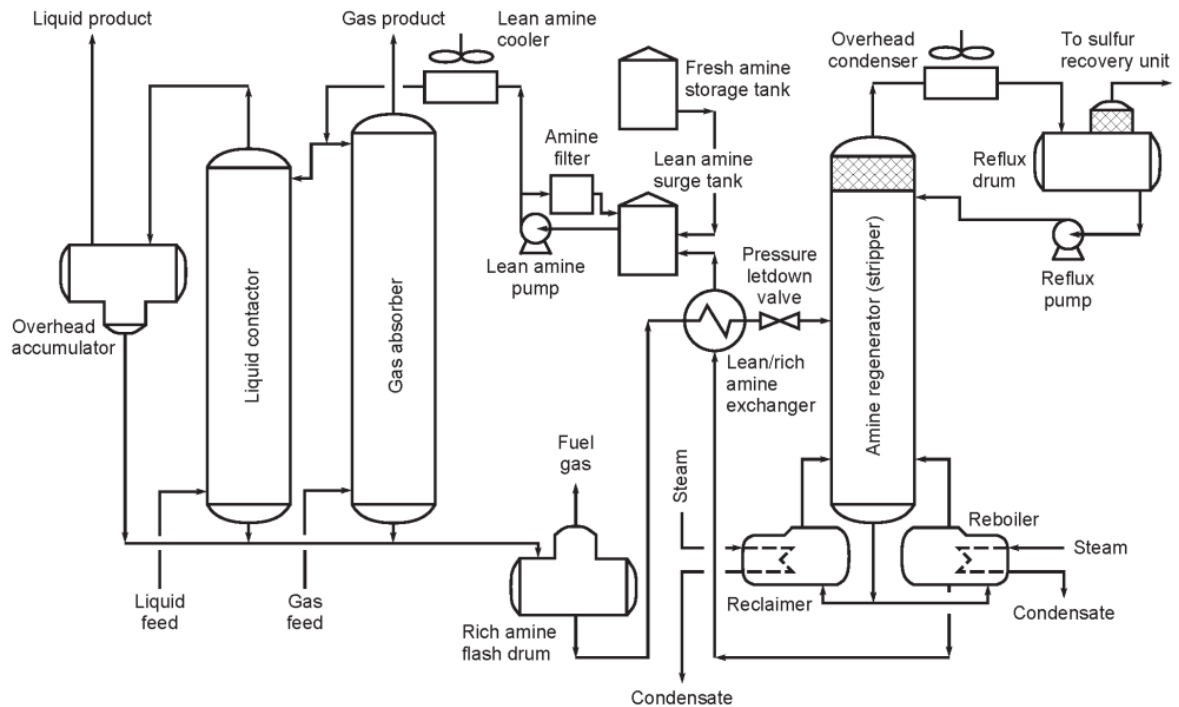
Austeniittisiä tulenkestäviä teräksiä hitsattaessa on huomioitava erityisesti rakenteen herkistyminen lämpötiloissa 500–850°C, joten hitsauksen aikana on varmistettava, että jäähtyminen on riittävän nopea tämän alueen yli. Standardin SFS-EN 1011-3 liitteen A mukaan hitsauksessa on huomioitava, että on riittävän matala lämmöntuonti, mikä pienentää hitsauksesta johtuvia muodonmuutoksia, kuumahalkeiluja, herkistymistä ts. raerajakorroosiota ja metallien välisten yhdisteiden erkaantumista. Esikuumennusta ei austeniittisten tulenkestävien terästen hitsauksessa tulisi käyttää, koska se lisää herkästi lämmöntuontia rakenteeseen. Hitsauksen aikana on huomioitava mm. puhtaus hitsattavissa kappaleissa sekä hitsiaineessa, epäpuhtaudet edesauttavat kuumahalkeilun syntymistä. Myös liian suurella hitsausnopeudella voidaan edesauttaa kuumahalkeilua, joten hitsausnopeuden ja hitsausvirran valintaan on syytä panostaa, että sulan muoto on edullinen kuumahalkeilun kannalta. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 53.)

Superseoksia, eli ts. tulenkestäviä nikkelseoksia hitsattaessa – muistuttaa hitsaus monella tapaa austeniittisten terästen hitsausta. Erona niihin nikkelseosten lämpölaajenemiskerroin on kuitenkin huomattavasti pienempi, jopa lähellä hiiliteräksiä, joten hitsauksesta johtuvat muodonmuutokset eivät ole niin suuria. Nikkelseosten hitsauksessa on huomioitava tarkasti lämmöntuonti kuumahalkeiluriskin sekä korroosionkeston takia, seostuksesta ja materiaalista riippuen on lämmöntuonti Q yleensä välillä 1–2 kJ/mm ja hitsipalkojen välinen välipalkolämpötila n. 100–150°C. Huomioitavaa on myös nikkelioksidin muodostuminen hitsattavan komponentin pintaan, joka aiheuttaa herkästi huokoisuutta hitsiin. Epäpuhtauksien (mm. S, P ja Pb) muodostuminen hitsin raerajoille aiheuttaa jähmettymishalkeilua ja erkautumiset

(Cr-C, Mo-C, Mo-Si) 500–700°C lämpötiloissa aiheuttavat korroosionkeston alenemista sekä lisäksi halkeilua hitsissä sekä HAZ:ssa. (Lukkari ym. Osa 2B 2019, s. 54.)

3.4 Laiha ja rikas amiini – materiaalit ja hitsattavuus

Amiiniyksiköitä esiintyy pääosin erilaisissa öljynjalostuksen- ja petrokemianteollisuuden laitoksissa. Amiiniyksiköiden pääasiallinen tehtävä on poistaa prosessin hiilivetyvirroista happamia komponentteja, kuten rikkivetyä (H_2S), hiilidioksidia (CO_2) ja muita epäpuhtauksia prosessin kannalta käyttämällä puhdistuksessa erilaisia alkyylimiamiineja (van Roij 2021). API 945 standardin mukaan amiinikäytöksi lasketaan kaikki kohteet, joissa virtaavan aineen mukana esiintyy vähintään 2 painoprosenttiyksikköä amiinia vesipohjaisessa liuoksessa. Laihaksi amiiniksi luokitellaan yleisesti amiini-vesiliuokset, jotka pitävät sisällään jonkin verran rikkivetyä ja/tai hiilidioksideja. Rikkaaksi amiiniksi luokitellaan taas amiini-vesiliuokset, jotka pitävät sisällään huomattavan määrän rikkivetyä ja/tai hiilidioksideja. Kuvassa 16 on esitettyä tyypillinen amiiniyksikön prosessikuvaus. (API 945 2022.)



Kuva 16. Tyypillinen prosessikuvaus amiiniyksiköstä (API 945 2022).

Tyypillisesti käytettyjä vesiliukoisia amiineja, joita käytetään prosessivirtojen puhdistukseen ovat:

1. Monoetanoliamiini MEA
2. Dietanoliamiini DEA
3. Metyylidietanoliamiini MDEA
4. Di-isopropyliamiini DIPA
5. Di-glykoliamiini DGA

Materiaaleihin liittyvät ongelmat amiiniyksiköissä voidaan jakaa karkeasti kahteen pääkategoriaan:

- Ympäristön aiheuttamat halkeilut
- Korroosion aiheuttamat vauriot (API 945 2022.)

Kahdesta pääkategoriasta ympäristön aiheuttamaa halkeilua ei esiinny kohteissa, joissa prosessivirrassa on ainoastaan puhdasta amiini-vesiliuosta, eli ts. siellä ei esiinny rikkivetyä tai hiilidioksidia. Laihaa ja rikasta amiini-vesiliuosta esiintyvissä kohteissa ympäristön aiheuttamat halkeilut voidaan jakaa vielä neljään erilaiseen vauriomuotoon. (API 945 2022.)

1. Sulfidijännityskorroosio (SSC, Sulfide Stress Cracking)
2. Vedyn aiheuttama halkeilu (HIC, Hydrogen Induced Cracking)
3. Jännityssuuntautunut vedyn aiheuttama halkeilu (SOHIC, Stress-oriented Hydrogen Induced Cracking)
4. Emäksien aiheuttama jännityskorroosio (ASCC, Alkaline Stress Corrosion Cracking) (API 945 2022.)

API 945 mukaan vauriomuodoista SSC, HIC ja SOHIC esiintyvät pääosin rikkaan amiini-vesiliuoksen sovelluksissa, jotka pitävät sisällään märkää rikkivetyä. Erityisesti alueet, joilla on korkeat kovuusarvot ovat erityisen alttiita näille vauriomuodoille, joten korjaushitsauksissa ja muutostöissä on huomioitava sallitut kovuusraajat hitsin eri alueille. (API 945 2022.)

Emäksien aiheuttamaan jännityskorroosiota ASCC:tä esiintyy ainoastaan laihan amiini-vesiliuoksen sovelluksissa, joissa jännitykset ovat korkeita sekä lämpötilat hieman

korkeampia. Erityisesti ASCC:tä voi esiintyä erilaisissa jännityskeskittymissä sekä laitteiden epäjatkuvuuskohdissa, kuten hitsausliitokset, liitososat ja yhteen sekä korvakkeet. (API 945 2022.)

Korroosion aiheuttamia vaurioita esiintyy laihaa ja rikasta amiini-vesiliuosta sisältävien kohteiden hiiliteräsosuuksilla. Amiini itsessään ei aiheita korroosiota tai korroosionmuotoja. Yleisesti korroosion esiintyminen hiiliteräksissä johtuu happamista kaasuista, kuten rikkivety tai hiilidioksidi. Korroosiota aiheuttavat myös esimerkiksi epästabiliitit suolat (HSS, heat stable salt) järjestelmässä, jotka pääsevät muodostumaan, kun amiini reagoi muiden happamien komponenttien seurauksena. Yhdessä H₂S ja CO₂ kanssa HSS vauriomuotona voi muodostaa kuvan 17 kaltaisia vaurioita laitteistoon, jotka ovat korjattavissa ainoastaan vaihtamalla komponentti tai vaurioitunut osa uuteen.



Kuva 17. HSS kertymien aiheuttamaan korroosiota amiinijärjestelmässä H₂S ja CO₂ sisältävässä amiini-vesiliuos kohteessa (UPM Biopolttoaineet sisäinen dokumentti 2024).

Pääosin amiiniyksiköissä on käytetty hiiliteräksiä ja joissakin tapauksissa esimerkiksi austeniittisia ruostumattomia teräksiä materiaaleina. Lisäksi voidaan käyttää mm. duplex-teräksiä. Materiaalit ovat toimivia käyttökohteissaan, jos ymmärretään esiintyvien virtaavien aineiden vaikutukset esimerkiksi vauriomekanismeittain. Tähän auttaa yleensä riittävän

kattavat prosessimittaukset ja -data, näytekerrokset sekä niiden analysointi, jotta vältetään isoilta korjaushitsauksilta ja/tai muutostöiltä.

Standardin API 945 ”Avoidin Environmental Cracking in Amine Units” mukaan kaikissa amiiniyksiköiden korjaushitsauksissa amiinijäämät ja epäpuhtaudet on poistettava huolellisesti käsiteltäviltä pinnoilta. Puhdistukseen riittää yleensä huuhtelu runsaalla vesimäärällä, mutta joissakin tapauksissa voidaan käyttää esimerkiksi emäksisiä pesuaineita, jonka jälkeen huuhtelu vedellä ja huolellinen kuivaus esimerkiksi tyvellä. Puhdistuksen jälkeen suoritetaan yleensä vaurioiden tarkastus esimerkiksi tunkeumanesteellä tai ultraäänellä. (API 945 2022, s. 14.)

Korjaushitsauskohteiden hiomisen sekä valmistelujen jälkeen suositellaan, että arvioidaan vedynpoistohehkutuksen (eng. hydrogen bakeout) tarvetta käyttökohteessa. API 945 mukaan erityisesti rikasta amiini vesiliuosta sisältävissä kohteissa vedynpoistohehkutus on tarpeen. Pääosin kaikki korjauskohteet on syytä esilämmittää esimerkiksi standardin API 510 tai API RP582 vaatimusten mukaisesti. Lisäksi API 945 mukaan kaikki korjaushitsauskohteet ovat syytä jälkilämpökäsitellä, koska PWHT on käyttökokemusten perusteella tehokain keino halkeilun ja/tai vauriomuotojen syntymisen ehkäisemiseksi – varsinkin korjaushitsaus ja muutoskohteissa. Jos korjattava laite tai komponentti on alkuperäisin hitsausohjeen mukaisesti jälkilämpökäsitelty, niin PWHT suoritetaan aina korjaushitsauksen jälkeen. Muutoin PWHT:n tarve arvioidaan tapauskohtaisesti. PWHT:n jälkeen tarkastus esimerkiksi UT:llä tai Fluoresoivalla magneettijauh tarkastuksella (vain ferromagneettiset materiaalit). (API 945 2022, s. 15.)

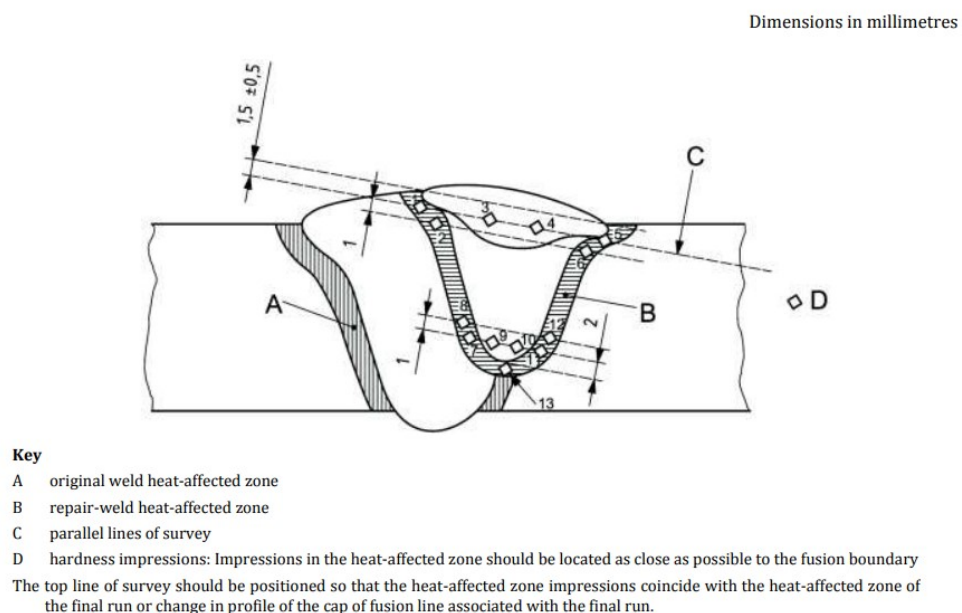
Standardissa NACE MR0175/ISO 15156-2:2025 on otettu kantaa oikean materiaalin valintaan esimerkiksi vauriomuodon, käyttöolosuhteen H₂S-pitoisuuden, pH-arvon ja lämpötilan osalta. Standardi on jaettu kolmeen eri osioon, joissa on kuvattuna erilaisia vaatimuksia mm. materiaalien valinnan ja korjaushitsauskohteiden osalta:

1. Yleiset vaatimukset materiaalin hankintaan, valintaan, hitsaukseen ja hitsauksen laatuun H₂S ja CO₂ ympäristöissä
 - a. Olosuhteet, vaatimukset, lämpötila, paine ja niiden vaikutus valintaan
 - b. Hitsauksen laadun kontrollointi, esimerkiksi tarvittavat pätevyyydet ja tarkastukset

- c. Kovuusarvot ja niiden testaus sekä hyväksyntä erilaisille hitsiliitoksille ml. korjaushitsaukset (kuva 18)
- d. Muut määritykset mm. suunnittelun, tarkastuksen ja laskennan sekä hyväksymisrajojen osalta (NACE MR0175 2009.)

2. Hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset

- a. Tähän materiaalityyppiin kuuluvien materiaalien sallitut toimitustilat
- b. Kovuusarvot ja niiden testaus sekä hyväksyntä standardin NACE MR0175 taulukon A.1 mukaan
- c. PWHT:n tarve ja lämpötilarajat (min. 620 °C)
- d. Sallitut lisäaineet ja niiden koostumus
- e. Sallitut pintakäsittelyt ja pinnoitusmenetelmät
- f. Tarvittavat jännityksenpoistohehkutukset ja sen rajat
- g. Muut määritykset mm. suunnittelun, tarkastuksen ja laskennan sekä hyväksymisrajojen osalta (NACE MR0175 2009.)



Kuva 18. Hitsiliitoksien kovuusarvojen mittaus korjaushitsauksien ja osittain tunkeutuneiden hitsiliitosten osalta (NACE MR0175).

3. Korroosionkestävät teräkset ja muut seokset

- a. Sallitut kovuusarvot korroosion kestävien terästen sekä muiden seosten osalta
- b. PREN-arvon, eli Pitting Resistance Equivalent Number määrittely. Arvolla arvioidaan korroosionkestävyyden kvantitatiivinen kattavuus määritettyihin olosuhteisiin
- c. Materiaalin hankinta, määrittely, vaatimukset mm. SSC, SCC vauriomuotojen testauksen ja hyväksymisen osalta
- d. Sallitut materiaaliluokat standardin NACE MR0175 liitteen A listan A.1.1 mukaan (tämän työn liitteessä 4 listattuna kaikki materiaaliryhmät)
 - i. Seostuksen määrittely ja mahdolliset rajaukset virtaavan aineen, H₂S osapaineen, lämpötilan, kloridi- ja rikkipitoisuuden perusteella
- e. Sallitut pintakäsittelyt ja pinnoitusmenetelmät
- f. Muut määrittelyt mm. suunnittelun, tarkastuksen ja laskennan sekä hyväksymisrajojen osalta (NACE MR0175 2009.)

3.4.1 Hiiliteräkset ja niukkaseosteiset teräkset

Laihaa ja rikasta amiinivesiliuosta sisältävissä käyttökohteissa, joissa materiaalina hiiliteräs tai esimerkiksi niukkaseosteinen CrMo-teräs on standardien NACE RP0472-2000, MR0175 ja MR0103 mukaan huomioitava korjaushitsaus- ja muutostöissä seuraavat asiat:

1. Materiaaliseostuksen, lämpökäsittelyn, hitsausmenetelmän ja PWHT:n vaikutus hitsimetallin, perusaineen ja HAZ:n kovuuteen sekä laatuun
2. Kovuusarvot, niiden rajat ja vaikutus esim. hitsaukseen laatuun sekä onnistumiseen
3. Hitsausmenetelmän hyväksyntäpöytäkirjan kovuustestit erilaisille hitsausliitoksille, tarpeen vaatiessa esituotannolliset kokeet ennen hyväksyntää
4. Jännösjännitysten kontrollointi hitsausliitoksessa ja korjaushitsauksissa (NACE RP0472 2000, MR0175 2009 ja MR0103 2010.)

Valittaessa hiiliteräksiä laihaa tai rikasta amiinivesiliuosta sisältävään käyttökohteeseen on huomioitava, että materiaalin hiilipitoisuuden painoprosentti ei saa ylittää arvoa 2 % eikä mangaani arvoa 0.25 %, seostuksessa ei myöskään sallita lyijyä, seleeniä tai rikkiä, jotka parantavat materiaalin koneistettavuutta ja työstettävyyttä. Lisäksi hiiliteräksiä ja niukkaseosteisia teräksiä suositellaan käytettäväksi ainoastaan seuraavilla lämpökäsittelymenetelmillä:

- Kuumavalssattu (ainoastaan hiiliteräkset)
- Hehkutettu
- Normalisoitu
- Normalisoitu ja karkaistu
- Normalisoitu, karkaistu ja nuorutettu
- Austenitoitu ja nuorutettu (NACE MR013 2010.)

Kovuusarvojen osalta hiiliterästen ja niukkaseosteisten terästen on noudatettava taulukon 10 arvoja kaikilta mittauksilta. Kovuusmittaukset suoritetaan standardin NACE MR0175/ISO 15156-2:2025 ohjeen, eli standardin ISO 6507-1 mukaan. Standardissa on määritettynä kaikille erilaisille hitsausliitoksille mittauksen suoritustapa. Suosituksena on, että 5 % kaikista hitsausliitoksista mitataan jälkilämpökäsittelyn jälkeen. Lisäksi perusaineen on täytettävä myös kovuusrajat, joten mittaukset myös perusaineen osalta suoritettava. (NACE MR0103 2010 ja NACE MR0175 2005.)

Taulukko 10. Kovuusrajat hiiliteräksille ja niukkaseosteisille teräksille (mukailtu standardin NACE MR0103 taulukko 2, materiaaliluokat ASME IX (Liite 1) taulukon mukaan).

Materiaali	Sallittu maksimi kovuus (HV)
Luokat 1, 2, 3 ja 4	215 HV
Luokat 5A, 5B ja 5C (huom. pl. 9Cr-1Mo-V-seokset)	225 HV
Luokka 5B poikkeus (9Cr-1Mo-V-seokset)	238 HV
Luokat 6 ja 7	225 HV
Luokat 10A, 10B, 10C, 10F	215 HV
Luokka 11	215 HV

Materiaaliluokat 1, 2, 3 ja 4 eivät tyypillisesti vaadi hitsauksen jälkeistä jälkilämpökäsittelyä. Tarve on kuitenkin arvioitava aina tapauskohtaisesti erityisesti korjaushitsauksia ja muutostöitä suunniteltaessa. Muille materiaaliluokille suositellaan PWHT:tä minimilämpötilassa 620 °C pitoaikana minimissään 15 minuuttia alle 50 mm materiaalipaksuuksilla. Hitsauksen jälkeistä jännityksenpoistohehkutusta suositellaan tehtäväksi kaikille materiaaliluokille, jos niitä kylmämuokataan tai niihin kohdistuu suoria voimia esimerkiksi viereisestä hitsauskorjauskohteesta. Jännityksenpoistohehkutus suoritetaan vähintään lämpötilassa 595 °C. (NACE MR 0175 2005.)

Käytetään hyväksytyjä hitsausmenetelmiä, joissa HAZ:n kovuusprofiili on mitattu alle sallittujen rajojen. Jos mahdollista korjaushitsaus ja muutostöitä suorittaessa, niin varmistetaan kovuudet esituotannollisella kokeella ennen varsinaisen menetelmäkokeen hyväksymistä. (NACE RP0472 2000.)

3.4.2 Austeniittiset, ferriittiset ja martensiittiset ruostumattomat teräkset

Austeniittisten, ferriittisten ja martensiittisten ruostumattomien terästen osalta korjaushitsauksissa sekä muutostöissä on huomioitava seuraavat asiat, kun virtaavana aineena on laiha tai rikas amiinivesiliuos:

1. Hitsausliitoksen, perusaineen ja HAZ:n halkeilunkestävyysominaisuuksien arviointi
2. Hitsausprosessin ja oikeiden lisäaineiden valinta käyttökohteeseen perustuen faktoihin sekä käyttäjäkokemuksiin mm. hitsausasento ja olosuhde huomioiden, jotta hitsausliitoksesta saadaan mahdollisessa korjaushitsaustapauksessa mahdollisimman juoheva
3. Hitsausohjeessa, eli WPS:ssä on oltava huomioituna vähintään yksi näistä seikoista:
 - a. Standardin NACE MR0175 liitteen A materiaaliryhmän vaatimukset mm. kovuuskokeiden, halkeilunkestävyyden tai PREN-arvon osalta
 - b. Hitsausliitoksen halkeilunkestävyyden hyväksyntä standardin NACE MR0175 liitteen B mukaisesti
 - c. Dokumentoitu kenttäkokemus vastaavasta korjaushitsauskohteesta samoilla materiaaleilla ja virtaavilla aineilla (NACE MR0175 2005.)

Austeniittisten, ferriittisten ja martensiittisten ruostumattomien terästen hitsausliitoksen, perusaineen ja hitsausliitoksen lämpövaikutusalueen halkeilunkestävyysominaisuuksien arviointi suoritetaan aina ennen korjaushitsausta tai muutostyötä aloittaessa. Halkeilunkestävyyttä voidaan arvioida esimerkiksi mahdollisten koepalojen avulla, jotka testataan laboratoriossa standardin NACE MR0175 liitteen B mukaan:

- SSC:n, eli sulfidijännityskorroosionkestokyky käyttölämpötilassa
- SCC:n, eli jännityskorroosionkestokyky suunnitellussa maksimi käyttölämpötilassa ilman rikkivetyä

Lisäksi tapauskohtaisesti on syytä arvioida myös lisävaatimuksien tarvetta testauksille. Lisävaatimuksia ovat tyypillisesti sulfidijännityskorroosionkestokyky keskiarvolämpötiloissa, kun SSC:n ja SCC:n välinen ero on epäselvä ja jännityskorroosionkestokyky, kun olosuhteeseen lisätään pieniä pitoisuuksia esim. rikkivetyä. Taulukossa 11 on esitetty esiintyviä primäärisiä, eli todennäköisiä ja sekundäärisiä, eli mahdollisia vauriomuotoja austeniittisille, ferriittisille ja martensiittisille ruostumattomille teräksille.

Taulukko 11. Vauriomuodot laiha ja rikas amiinivesiliuos-käyttökohteissa (mukailtu standardin NACE MR0175 2005 taulukko B.1).

Materiaali	Potentiaalien vauriomuoto amiinivesiliuos sovelluksissa, joissa esiintyy esim. määrittää rikkivetyä			Huomiot
	SSC	SCC	HIC/SOHIC	
Austeniittiset ruostumattomat teräkset	S	P	S	Kylmämuovatut seokset sisältävät martensiittia, joten voivat olla alttiita myös SSC ja/tai HIC/SOHIC
Ferriittiset ruostumattomat teräkset	P	-	P	-
Martensiittiset ruostumattomat teräkset	P	S	P	Seokset, joiden seostuksessa on nikkeliä ja molybdeeniä voivat olla alttiita SCC:lle riippumatta jäännös austeniitin määrästä
P = primäärinen, ensisijainen vauriomuoto S = sekundäärinen, mahdollinen vauriomuoto				

Austeniittisia, ferriittisiä ja martensiittisiä ruostumattomia teräksiä hitsattaessa yhtenä tärkeänä kriteerinä korjaushitsauksen tai hitsauksen onnistumiseksi on huomioitava, että WPQR:ssä on hyväksyttynä materiaalin yleiset vaatimukset, halkeilunkestävyys, kovuusarvot ja PREN-arvon määrittely. Ennen varsinaisen korjaushitsauksen tai muutostyön aloittamista nämä on hyväksyttävä standardin NACE MR0175 liitteiden A ja B mukaan. Liitteessä A määritetään seuraavat asiat:

1. Sallitut materiaaliseokset ja rajat seostukselle mm. martensiittisten osalta seostus ei saa sisältää lyijyä, seleeniä tai rikkiä sekä austeniittisten osalta seosainepitoisuudet ovat rajoitettu painoprosenttiyksikköinä: C 0.10 max., Cr 16.0 min., Ni 8.0 min., Mg 2.0 max., N 2.0 max., Si 0.045 max. ja S 0.04 max.
2. Materiaalien sallitut toimitustilat: ferriittiset ja martensiittiset ainoastaan normalisoituna ja austeniittiset liuos hehkutettuina tai kuumavalssattuina
3. Kovuusarvot sekä käyttöolosuhteen rajat taulukon 12 mukaisesti, kovuusmittaukset oltava alle sallitun rajan kaikilta mittapisteiltä (perusaine, lämpövaikutusalue ja hitsiliitos). (NACE MR0175 2005 liite A.)

Taulukko 12. Sallitut kovuusraajat sekä olosuhteiden vaatimukset ferriittisille, martensiittisille ja austeniittisille ruostumattomille teräksille (mukailtu standardin NACE MR0175 2005 liitteen A tietoja).

Materiaali	Lämpötila max. (°C)	H₂S osapaine max. (bar)	Kloridipitoisuus max. (mg/l)	pH	Sallittu kovuus max. (HV)
Austeniittiset ruostumattomat	60	1	-	-	230 HV
Ferriittiset ruostumattomat	Jollei H ₂ S osapaine tai pH arvot ylity, ei rajoitusta	0.1	Jollei H ₂ S osapaine tai pH arvot ylity, ei rajoitusta	≥3.5	250 HV
Martensiittiset ruostumattomat	Lämpötilan tai kloridipitoisuuden yhdistelmät hyväksyttäviä	0.1	Lämpötilan tai kloridipitoisuuden yhdistelmät hyväksyttäviä	≥3.5	230 HV

4. PREN-arvon määrittäminen hitsattavalle materiaalille. PREN-arvolla määritetään korroosionkestävien materiaalien pistekorroosionkestokykyä, joka perustuu alkuaineiden Cr, Mo, W ja N seospitoisuuksiin materiaalin kokonaiskoostumuksessa

PREN-arvon laskenta:

$$F_{\text{PREN}} = W_{\text{Cr}} + 3,3(W_{\text{Mo}} + 0,5W_{\text{W}}) + 16W_{\text{N}} \quad (3)$$

jossa,

W_{Cr} = kromin painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta

W_{Mo} = molybdeenin painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta

W_{W} = volframin painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta

W_{N} = typen painoprosenttiosuus kokonaiskoostumuksesta

PREN-arvon rajat ovat esitettyinä standardin NACE MR0175 liitteen A taulukoissa D.1 – D.12. Samoissa taulukoissa on esitettyinä mm. seosainepitoisuuksien tarkat rajat esimerkiksi hankintaa varten. (NACE MR0175 2005, s. 69–82.)

Laihaa ja rikasta amiinivesiliuosta sekä rikkivetyä ja klorideja sisältävissä käyttökohteissa, joissa on käytetty austeniittisia, ferriittisiä ja martensiittisiä ruostumattomia on hitsauksessa huomioitava seuraavia asioita:

1. Austeniittiset ruostumattomat teräkset
 - a. Lämpövaikutusalueen kovuusarvot eivät saa ylittää sallittuja perusaineen maksimikovuuksia hitsauksen jälkeen
 - b. ”L-sarjan” lisäaineet, eli austeniittiset hitsauslisäaineitten osalta hiilen painoprosenttipitoisuus < 0,03 %
 - c. Jo hitsatut kappaleet voidaan korjaushitsata, jos korjaushitsaus täyttää hitsausmenetelmää koskevat vaatimukset (NACE MR075 2005, liite A s. 18.)

2. Ferriittiset ruostumattomat teräkset

- a. Hitsausliitosten ja hitsien halkeilunkestävyysominaisuuksia on noudatettava NACE MR0175 kohdan 6.2.2 mukaan
- b. Jos mahdollista, niin ennen hitsausohjeen hyväksyntää tehdään esituotannollinen koe, jossa varmistetaan hitsausliitoksen kovuudet. Yksikään kovuusarvo ei saa ylittää arvoa 250 HV (NACE MR0175 2005, liite A s. 27.)

3. Martensiittiset ruostumattomat teräkset

- a. Hitsausliitosten ja hitsien halkeilunkestävyysominaisuuksia on noudatettava NACE MR0175 kohdan 6.2.2 mukaan
- b. Lämpövaikutusalueen kovuusarvot alle perusaineen sallittujen maksimiarvojen sekä lisäksi hitsimetallin kovuus ei saa ylittää lisäaineen kovuuden enimmäisrajaa
- c. Martensiittisille ruostumattomille teräksille on tehtävä PWHT vähintään 621 °C (NACE MR0175 2005, liite A s. 33.)

Yleisesti käytettävien lisäaineiden osalta on suositeltavaa varsinkin korjaushitsauksissa käyttää yliseostettuja lisäaineita, jotta varmistetaan hitsausliitoksen korroosionkestävyydestä sekä mekaanisista ominaisuuksista. Esimerkiksi kromia lisäämällä saadaan hitsausliitoksen pinnalle muodostuvasta oksidikerroksesta paksumpi ja suojaavampi. Lisäksi yliseostamalla varsinkin korjaushitsauskohteissa ehkäisee perusaineen ja hitsimetallin ”sekoitumista”, joka johtaa seosaineiden heikentymiseen. Yliseostus varmistaa, että vaaditussa kohteessa säilyvät halutut koostumukset sekä ominaisuudet, jotta voidaan olla varmoja korjaushitsauksen onnistumisesta. (Stones 2023.)

4 Teknisten spesifikaatioiden nykytilan kartoitus

UPM Lappeenrannan biojalostamon tekniset spesifikaatiot ovat pääosin luotu vuoden 2019 aikana. Spesifikaatioiden luomisen jälkeen niihin on tullut päivityksiä ja viimeisimmät versiot eivät ole tällä hetkellä biojalostamon dokumenttienhallintajärjestelmässä M-Filesissa. Tekniset spesifikaatiot revisoidaan tämän työn jatkotoimenpiteenä ”L-versioiksi”, eli toisin sanoen Lappeenrannan laitoksen versioiksi ja samalla näihin spesifikaatioihin lisätään tässä työssä löydettyjä päivityksiä sekä muutoksia mm. korjaushitsauksien suorittamiseen liittyen. Osasta spesifikaatioista on tällä hetkellä luotuna myös ”R-versio”, jotka toimivat biopolttoaineiden kasvuhankkeen, eli mahdollisen Rotterdamin jalostamon spesifikaatioina. Samoja spesifikaatioita ei lähtökohtaisesti voida hyödyntää molemmissa laitoksissa, johtuen mm. erilaisista olosuhteista, materiaaleista ja laitekannasta.

Tällä hetkellä spesifikaatioissa on esitettyä paljon tietoa ja viittauksia erilaisiin standardeihin liittyen materiaalien hitsauksiin, seostuksiin, käyttöolosuhteisiin, tarkastuksiin sekä muihin vaatimuksiin. Seuraavassa osiossa on avattuna lyhyesti kunkin käsitellyn spesifikaation sisältö sekä käyttötarkoitus ja tämän osin jälkeen on kunkin spesifikaation osalta esitetty suositellut päivitykset, joita tulisi ottaa huomioon sekä lisätä nykyisiin spesifikaatioihin.

4.1 Spesifikaatioiden kuvaukset, sisältö ja vertailu

Seuraavissa osioissa on lyhyesti avattuna jokaisen spesifikaation kuvaus ja sisältö. Lisäksi osiossa on riippuvuuksien vertailua spesifikaatioiden välillä.

I6 Piping

Biojalostamon putkistostandardi I6 määrittelee virtaavat aineet ja niiden lyhenteet, putkiston ja niihin liittyvien venttiilien materiaalit sekä niiden valinnan. Lisäksi spesifikaatiossa on määritetty yleisesti käytettävät laippatyypit sekä tiivistetyypit. Tarkempia vaatimuksia esimerkiksi hitsaukseen on esitetty muissa I6-sarjan spesifikaatioissa esimerkiksi virtaavan aineen tai materiaalin perusteella.

I6.1 Piping Class Selection

Biojalostamon putkistoluokan valintataulukko on määritetty spesifikaatioksi I6.1. Spesifikaatiossa on määritetty putkistoluokan valinta virtaavan aineen perusteella. Lisäksi taulukossa on määritetty esimerkiksi lämpötilarajat, valintakriteerit, soveltuvat materiaalit ja tiivistetyypit sekä lisävaatimukset mm. vety- ja amiinikäyttöön.

I6.2 Valve Selection Table

Biojalostamon venttiilivalintaluettelo on määritetty spesifikaatioksi I6.2. Spesifikaatiossa on määritetty venttiilityypin valintaan kriteeristö. Luettelossa on kuvattu esimerkiksi venttiilityppi, UPM mukainen koodi venttiilityypille, virtaava aine ja valintakriteerit, käytettävät tiivistetyypit sekä mm. lisävaatimuksia mm. materiaalien tai venttiilin sisäosien suhteen.

I6.3 Pipe Classes

Biojalostamon käytössä olevat putkiluokat ovat määritettynä spesifikaatioksi I6.3. Spesifikaatio pitää sisällään kaikki biojalostamolla käytössä olevat putkiluokat. Putkiluokissa on määriteltynä kyseiseen luokkaan soveltuvat putket ja putkenosat mittoineen sekä materiaaleineen. Putkiluokka valitaan aina virtaavan aineen, olosuhteiden, paineen ja lämpötilan perusteella.

I6.4 Manual Valves and Accessories

Biojalostamolla käytössä olevat prosessiventtiilit ja murtolevyt ovat määritettynä spesifikaatioksi I6.4. Spesifikaatiossa on määritettynä vaatimuksia mm. venttiilien merkinnöille, tiivistys- ja asennustyypeille, käytettäville tiivisteille ja laippatyypeille. Dokumentissa on viittauksia myös muihin sisäisiin spesifikaatioihin kuten I6.3 ja I6.7, jotka ottavat kantaa mm. hitsauksiin ja niiden suorittamiseen.

I6.7 Piping construction

Biojalostamon putkistojen valmistus-, asennus- ja tarkastusvaatimukset ovat määritettynä spesifikaatioksi I6.7. Spesifikaatiossa on vaatimuksia mm. hitsaukseen, hitsauksen laadunhallintaan, hitsauslisäaineisiin, hiiliterästen hitsaukseen rikkivetyä, amiinia tai emäksiä sisältäviin kohteisiin, niukkaseosteisten CrMo-terästen hitsaukseen, austeniittisten ruostumattomien terästen hitsaukseen, duplex-terästen hitsaukseen ja nikkeli pohjaisten seosten hitsaukseen. Lisäksi spesifikaatiossa on vaatimuksia myös materiaaleihin, niiden käsittelyyn,

varastointiin ja tunnistamiseen (PMI) sekä asennukseen mm. erilaisia dokumenttivaateita tarkastuksien ja asennuksien osalta.

I6.8 Alternative Piping Materials

Biojalostamon putkistospesifikaation lisäksi on määritettyä spesifikaatio I6.8, jossa on määritetty ei-harmonisoitujen materiaalien hankintaan, valmistukseen, hitsaukseen ja asennukseen sekä tarkastukseen lisävaatimuksia, jos materiaali poikkeaa lain, säädäntöjen, standardien tai laitospkohtaisten spesifikaatioiden vaatimuksista esimerkiksi kemiallisen koostumuksen tai vaatimuksen osalta. Poikkeavat materiaalit on hyväksyttävä kirjallisesti ja lisäksi tehtävä erillinen materiaalin arviointi (Particular Material Appraisal, PMA), jotka NoBo hyväksyy käytettäväksi.

I6.9 Safety Valves

Biojalostamon käytössä olevat varoventtiilit ovat määritettyä spesifikaatioksi I6.9. Spesifikaatiossa on määritettyä vaatimuksia varoventtiilien suunnitteluun, merkintään, asennus- ja tiivistystyyppiin, materiaaleihin ja tarkastuksiin. Dokumentissa on viittauksia myös muihin sisäisiin spesifikaatioihin kuten I6.3 ja I6.7, jotka ottavat kantaa mm. hitsauksiin ja niiden suorittamiseen.

I17 Static Equipment

Biojalostamon staattisten laitteiden vaatimuksia on määritettyä spesifikaatiossa I17. Tämä spesifikaatio määrittää staattisten laitteiden osalta yleisiä vähimmäisvaatimuksia mm. laite-tunnusten merkkauksesta sekä dokumenttivaateista. Tarkempia vaatimuksia on esitettyä muissa I17-sarjan spesifikaatioissa esimerkiksi laitetypin tai virtaavan aineen mukaan.

I17.1 Pressure Equipment

Biojalostamon painelaitteiden vaatimukset ovat määritettyä spesifikaatiossa I17.1. Tässä spesifikaatiossa on määritettyä vaatimukset painelaitteiden suunnitteluun, suunnittelun perusteisiin, materiaaleihin ja niiden valintaan, valmistukseen, hitsaukseen ja siihen liittyviin huomioihin mm. erilaisten materiaalien osalta, lämpökäsittelyyn, välipalkkolämpötiloihin, NDT-tarkastuksiin, painetestauksiin ja dokumentaatioon.

I17.2 Shell and Tube Heat Exchangers

Biojalostamon vaippa- ja tuubilämmönvaihtimien vaatimukset ovat määritettynä spesifikaatiossa I17.2. Tässä spesifikaatiossa on painelaitespesifikaation I17.1 ja I17 lisäksi määritettynä erityisiä vaatimuksia vaippa- ja tuubilämmönvaihtimien valmistukseen. Vaatimuksia ovat mm. tuubi-tuubilevy hitsauksien suorittaminen laadukkaasti ja lämpöpintaputkien mankelointi tuubilevyyn.

I17.3 Atmospheric Vessels

Biojalostamon paineettomien säiliöiden vaatimukset ovat määritettynä spesifikaatioksi I17.3. Tässä spesifikaatiossa on mm. vaatimuksia ja ohjeita paineettomien ($P_d \leq 500$ mbar(g)) säiliöiden valmistukseen, suunnitteluun, hitsaukseen ja muihin asioihin. Pääosin spesifikaatiossa on viittauksia ja lainauksia muihin biojalostamon spesifikaatioihin kuten I17 ja I17.1.

I17.4 WET-H₂S or Amine Service

Biojalostamolla olevien laitteiden ja komponenttien vaatimukset, jotka ovat märkä rikkivety tai amiinikäyttökohteissa ovat määritettynä spesifikaatioksi I17.4. Tässä spesifikaatiossa on erityisiä vaatimuksia, joita tulee noudattaa, jos laite tai komponentti tulee märkää rikkivetyä tai amiinia sisältävään käyttökohteeseen. Vaatimuksia ovat mm. hiiliterästen ja CrMo-terästen kovuudet hitsien ja HAZ:n sekä perusaineiden osalta sekä esimerkiksi PWHT lämpötilarajat hitsauksen jälkeen.

I17.5 Air Cooled Heat Exchangers

Biojalostamon ilmajäähdyttimien vaatimukset ovat määritettynä spesifikaatioksi I17.5. Spesifikaatiossa on vaatimuksia mm. ilmajäähdyttimien valmistukseen, suunnitteluun ja hitsaukseen. Vaatimuksia ovat esimerkiksi päätykammioiden tyyppi, tulpan konstruktio esim. vetykäyttöön. Hitsauksen vaatimuksia ovat mm. lämpöpintaputkien hitsaustapa päätykammioon.

4.2 Suositukset ja päivitykset spesifikaatioihin

Kohdeyrityksen spesifikaatioiden osalta suositellaan, että työssä käsiteltävät spesifikaatiot päivitetään selkeämpiin ”sarjoihin”, eli I6-sarjan alle päivitetään kaikki I6-alkuiset spesifikaatiot ja I17-sarjan alle vastaavasti I17-alkuiset. Suosituksen jälkeen spesifikaatioiden ylläpito ja päivitys on nykytilaan verrattuna yksinkertaisempaa sekä tehokkaampaa. Tällä hetkellä spesifikaatioissa on puutteita sekä ristiriitoja toistensa kanssa. Suosituksen sisältö kuvattuna tämän osion lopussa.

Spesifikaatioiden selkeyttämisen yhteydessä spesifikaatioihin päivitetään tämä työn jatko-toimenpiteenä kaikki erilaisiin materiaaliryhmiin ja olosuhteisiin liittyvät asiat, joita nykyisissä spesifikaatioissa ei ole otettuna huomioon. Pääpainona päivitysten tekemisessä on keskittyä korjaushitsauksien laadukkaaseen suorittamiseen ja mitä asioita on otettava huomioon esimerkiksi vety- tai amiinikäyttökohteissa.

Lisäksi suositellaan, että kohdeyrityksessä määritetään selkeät vastuuhenkilöt jokaisen spesifikaation päivitykselle ja ylläpidolle, jotta kaikki mahdolliset tulevat päivitykset tai korjaukset, jotka vaikuttavat spesifikaation sisältöön tulevat päivitetyiksi.

Tällä hetkellä tilanne spesifikaatioiden osalta on se, että esimerkiksi päivitettyjä materiaaleja sekä putkiluokkia ei ole viety nykyisiin spesifikaatioihin ja esimerkiksi putkiluokkia puuttuu kokonaan kohdeyritykseltä. Suosituksena on, että kaikki puuttuvat dokumentit lasketaan suunnittelutoimiston toimesta uudestaan, jotta olemassa olevien laitteiden mahdolliset korjaushitsaus ja muutostyöt ovat helppoja toteuttaa standardien ja lakien vaatimusten mukaisesti turvallisesti sekä kustannustehokkaasti hektisessä tuotantoympäristössä.

4.2.1 I6-sarjan spesifikaatiot

Seuraavassa osiossa on käsitelty I6-sarjan spesifikaatioiden suositeltavat päivitykset.

I6 Piping

Biojalostamon putkistospesifikaatioon I6 suositellaan päivitettäväksi kaikki puuttuvat käytössä olevat putkiluokat, joita kohdeyrityksen laitoksen olemassaolon aikana on tullut. Lisäksi suositellaan, että spesifikaatiosta poistetaan kaikki tarkemmat selitykset esimerkiksi materiaalien ja venttiilien valintoihin liittyen. I6 spesifikaatiossa näytetään ainoastaan

viittaukset muihin, joiden perusteella valinnat suoritetaan sekä käytössä olevat putkiluokat ja poistetut tai ei käytössä olevat putkiluokat poistetaan spesifikaatiosta. I6 spesifikaation tarkoituksena on toimia ylätasen ohjeistuksena putkistoon liittyvissä hankinnoissa ja valinnoissa suunnittelun tukena.

I6.1 Piping Class Selection

Biojalostamon putkistoluokkien ja materiaalien valintataulukon I6.1 suositellaan päivitettäväksi jokaisen virtaavan aineen perään maksimikäyttölämpötila sekä PED:n mukainen virtaavan aineen luokitus. Lisäksi jokaisen virtaavaan aineeseen suositellaan päivitettäväksi myös kaikki ne materiaalityypit, joita kohdeyrityksellä on käytössä. Esimerkiksi laihan ja rikkaan amiinivesiliuoksen sovelluksiin austeniittiset ruostumattomat ja hiiliteräkset. Lisäksi suositellaan, että päivityksen aikana valintakriteerit päivitetään ja huomioidaan lisätään tietoja mm. valintakriteereistä, jos vety- tai amiinikäyttökohde (kuva 19).

Note 1.	
Hydrogen (H₂) service	
Partial pressure of hydrogen is over 0,5 MPa and total pressure over 1 MPa.	- Mark "H ₂ service" in PI-diagrams, isometrics and piping list - See specification I-6.7 for inspection scope and material requirements.
Note 2.	
Amine service	
Either lean amine or rich amine.	- Mark "Amine service" in PI-diagrams, isometrics and piping lists. - API RP 945 requirements - See specification I-6.7 for inspection scope and material requirements. - Perform PWHT for carbon steel pipe classes

Kuva 19. Huomioista esimerkkiviittaus putkistoluokkien valintataulukosta (UPM sisäinen dokumentti 2024).

I6.2 Valve Selection Table

Biojalostamon venttiilivalintaluetteloon I6.2 suositellaan päivitettäväksi ainoastaan kohdeyrityksen Lappeenrannan yksikön venttiilien valintakriteeristö ja mitä venttiilityyppiä voidaan käyttää missäkin olosuhteessa. Lisäksi valintataulukon suositellaan päivitettäväksi kaikki putkiluokat ja niiden suunnitteluarvot kullekin virtaavalle aineelle sekä samat

huomiot viittauksina kuten putkistoluokkien ja materiaalien valintataulukoissakin I6.1. Esimerkiksi märkää rikkivetyä sisältäviin kohteisiin kirjataan huomioihin samat viittaukset kuin I6.1 spesifikaatiossakin.

I6.3 Pipe Classes

Biojalostamon käytössä oleviin putkiluokkien spesifikaatioon I6.3 suositellaan päivitettäväksi kaikki käytössä olevat putkiluokkaspesifikaatiot, EN 13480-3 mukaiset komponenttienlaskentaan liittyvät perusteet ja natiivitiedostot itse putkiluokista. Lisäksi suositellaan, että luodaan kokonaan yksi yltäason I6.3 spesifikaatiodokumentti, johon on ryhmitelty hiiliteräksiset putkiluokittain, ruostumattomat teräkset putkiluokittain ja muut lajit putkiluokittain. Näin putkiluokkien ylläpito on helpompaa jatkossa ja kaikki käytössä olevat putkiluokat löytyvät yhdestä dokumentista.

I6.4 Manual Valves and Accessories

Biojalostamon käytössä olevien prosessiventtiilien spesifikaatioon I6.4 suositellaan päivitettäväksi materiaalien- ja venttiilienvalintataulukoiden viittaukset ja huomiot. Lisäksi suositellaan, että spesifikaatioon päivitetään lisävaatimuksia mm. venttiilien korjaushitsauksien suorittamiseksi esimerkiksi hitsausdokumentaation osalta. Lisäksi päivityksiä sekä tarkennuksia suositellaan korkeanpaineluokan käsiventtiilien vaatimuksille mm. materiaalien ja hitsauksien laadunvalvonnan suhteen.

I6.7 Piping construction

Biojalostamon putkistojen valmistus-, asennus- ja tarkastusvaatimusten spesifikaatioon I6.7 suositellaan päivitettäväksi lisävaatimuksia korjaushitsauksien ja hitsauksien suorittamiseksi vetykäytössä, amiinikäytössä ja kuumissa kohteissa tässä työssä käsiteltyjen materiaaliluokkien mukaisesti. Esimerkiksi vetykäyttökohteissa hitsatessa austeniittisia ruostumattomia teräksiä on huomioita rakenteen herkistyminen, eli ts. t8/5 lämpötila-alue, amiinikäyttökohteissa huomioitavaa on mm. kovuus- ja puhtausvaatimukset hitsattaville kappaleille erityisesti korjaushitsauksissa ja kuumissa prosessikaasua sisältävissä kohteissa on huomioitava esimerkiksi lämmöntuonti ja hitsauksen jälkeinen lämpökäsittely CrMo-teräksiä hitsatessa.

Lisäksi spesifikaatioon suositellaan lisättäväksi yksi osio pelkästään korjaushitsauksien suorittamiselle, jossa käsiteltäisiin yleisellä tasolla vaatimukset korjaushitsauksille. Tämän

spesifikaation liitteeksi suositellaan päivitettäväksi tai luotavaksi myös seuraavia dokumentteja: käytettävät kiinnitystarvikkeet ja niiden vaatimukset, loppudokumentaation kansilehti (PSK:n mukainen), minimivaatimukset NDT-tarkastuksille putkiluokittain ja painekokeisiin painekoearvot putkiluokittain.

I6.8 Alternative Piping Materials

Biojalostamon harmonisoimattomien materiaalien spesifikaatioon I6.8 suositellaan päivitettäväksi materiaalien osalta tiukempia vaatimuksia mm. toimitustilojen, kovuusrajojen ja kemiallisen koostumuksen osalta. I6.8 spesifikaatiota käytetään ainoastaan niissä tapauksissa, kun poiketaan putkiluokan materiaaleista tai osista. Näitä tapauksia esiintyy yleisesti ainoastaan yllättävissä korjaushitsaus tapauksissa, joten suosituksena on, että harmonisoimattomien materiaalien osalta on mahdollisimman selkeät ja tiukat vaatimukset. Lisäksi suositellaan, että spesifikaatioon lisätään lyhyt viittaus korjaushitsauksien suorittamiseen ja mitä se vaatii, jos harmonisoimattomia materiaaleja käytetään (PMA, NoBon hyväksyntä ym.).

I6.9 Safety Valves

Biojalostamon käytössä olevien varoventtiilien spesifikaatioon I6.9 suositellaan päivitettäväksi samat viittaukset sekä määritykset kuten spesifikaatioon I6.4 esimerkiksi korjaushitsauksien osalta.

4.2.2 I17-sarjan spesifikaatiot

Seuraavassa osiossa on käsitelty I17-sarjan spesifikaatioiden suositeltavat päivitykset.

I17 Static Equipment

Biojalostamon staattisten laitteiden spesifikaatioon I17 suositellaan päivitettäväksi kaikki staattisiin laitehankintoihin liittyvät ylätasen ohjeet ja viittaukset, joiden avulla staattisten laitteiden hankintaan, suunnitteluun ja käyttöön sekä ylläpitoon liittyvät asiat selviävät mahdollisimman kattavasti. Näitä ylätasen ohjeita voivat olla esimerkiksi materiaalinvalintaan liittyvät ohjeet ja viittaukset sekä staattisten laitteiden dokumentaation vaatimukseen liittyvät ohjeistukset. Lisäksi tähän spesifikaation suositellaan liitteeksi selkeä tiedosto, jossa on ohjeet laiteryhmittäin esimerkiksi laitekilpien kokoon ja käytettävään fonttiin.

I17.1 Pressure Equipment

Biojalostamon painelaitteiden spesifikaatioon I17.1 suositellaan päivitettäväksi kaikki tässä työssä esitetyt huomiot virtaavien aineiden ja materiaalien osalta erityisesti korjaushitsauksien ja muutostöiden osalta. I17.1 pitäisi noudatella hyvin samanlaista linjaa kuin putkistojen vastaava spesifikaatio I6.7, joten myös tähän spesifikaatioon suositellaan tarkennettavaksi korjaushitsaukset ja muutostyöt materiaaliryhmittäin. Tällä hetkellä spesifikaatiossa on jo määritettynä mm. hitsauksien vaatimuksia, kun valmistetaan uutta painelaitetta, mutta niissä ei ole otettu kantaa mahdolliseen prosessiolosuhteeseen.

Suosituksena on, että korjaushitsauksien ja muutostöiden huomiointi yhdessä virtaavan aineen kanssa eriytetään kokonaan yhdeksi osioksi spesifikaatioon ja siihen lisätään tässä työssä käsitellyt asiat. Kuvassa 20 esitetty nykyinen rakenne, johon lisäykset ja päivitykset tehdään tämän työn jatkotoimenpiteenä. Esimerkiksi kohtaan materiaalit lisätään puuttuvia materiaaleja ja päivitetään nykyisten materiaalien osalta vaatimuksia tietyille prosessiolosuhteille ja kohdan ”Welding” alle lisätään korjaushitsauksien ja muutostöiden suoritukseen olennaiset seikat, joita tämän työn teoriaosuudessa on esitetty. Näitä suosituksia ovat mm. nikkelpohjaisten superseosten Al- ja Ti-yhteispainoprosenttien vaikutukset korjaushitsaukseen ja CrMo-terästen korjaushitsauksessa huomioitavat asiat kuten kovuusarvot ja hitsausliitoksen jälkilämpökäsittely.

5.7	MATERIALS	6
5.7.1	Carbon Steels	8
5.7.2	CrMo Steels	8
5.7.3	Austenitic Stainless Steels	8
5.7.4	Austenitic-Ferritic Stainless Steels (Duplex Steels)	8
5.7.5	Highly Alloyed Austenitic Stainless Steels	9
5.7.6	Nickel Based Alloys	9
5.7.7	Nozzles and Flanges	9
5.7.8	Bolts and Nuts	9
5.7.9	Gaskets	9
6	MANUFACTURING	9
6.1	GENERAL	9
6.2	WELDING	10
6.2.1	Welding Documentation	10
6.2.2	Welding CrMo alloyed Carbon Steels	11
6.2.3	Welding Austenitic-Ferritic Stainless Steels (Duplex)	11
6.2.4	Welding Austenitic Stainless Steels	11
6.2.5	Welding Highly Alloyed Austenitic Stainless Steels	12
6.2.6	Welding Nickel Alloys	12
6.2.7	Welding Dissimilar Metal Welds	12
6.2.8	Weld Overlay (WOL)	12
6.2.9	Clad Plates	12
6.3	HEAT TREATMENTS	12
6.4	PRE-HEATING AND INTERPASS TEMPERATURES	13
6.5	NONCONFORMITIES, DEVIATIONS AND REPAIRS IN MANUFACTURING	13

Kuva 20. Painelaitespesifikaation sisällysluettelo, johon päivitykset tehdään (UPM sisäinen dokumentti 2024).

Lisäksi suositellaan, että spesifikaatiosta I17.1 muokataan I17-sarjan spesifikaatioiden ”master”, jossa on kaikki ohjeistus mm. hitsaus- ja materiaalivaatimusten sekä NDT-tarkastusten osalta. Näin spesifikaatioiden ylläpito on tulevaisuudessa helpompaa, kun asiat ovat esitettynä yhdessä dokumentissa selkeästi.

I17.2 Shell and Tube Heat Exchangers

Biojalostamon käytössä olevien vaippa- ja tuubilämmönvaihtimien spesifikaation I17.2 suositellaan päivitettäväksi vain näihin laitetyppeihin kuuluvat detaljitiedot, kuten putkilämmönvaihtimen suunnitteluun, mitoitukseen ja detaljihitsauksiin liittyvät tiedot. Kaikki yleinen asia korjaushitsauksiin, hitsauksiin ja materiaaleihin suositellaan päivitettäväksi ainoastaan spesifikaatiossa ”I17.1 Pressure Equipment”. I17.2 suositellaan pidettävän ainoastaan vaippa- ja tuubilämmönvaihtimiin keskittyvänä spesifikaationa ja esimerkiksi aina korjaushitsauksia tai muutostöitä suorittaessa näihin laitetyppeihin liittyen seurattaisiin spesifikaation I17.1 ohjeistuksia ja tarkennukset pidettäisiin spesifikaatiossa I17.2.

I17.3 Atmospheric Vessels

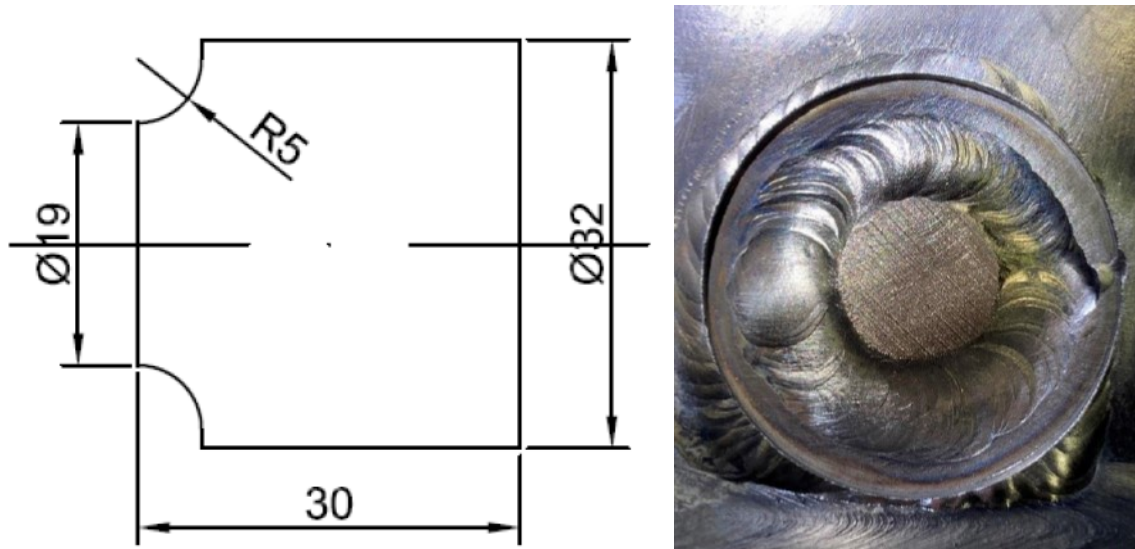
Biojalostamon käytössä olevien paineettomien säiliöiden spesifikaatioon I17.3 suositellaan päivitettäväksi ainoastaan säiliöihin liittyvät detaljit mm. valmistukseen, dokumentaatioon ja tarkastukseen liittyvistä asioista. Muutoin spesifikaatiossa viitataan ainoastaan muihin, kuten I17 ja I17.1, joissa otetaan kantaa mm. hitsausten suorittamiseen ja vaatimuksiin kullakin materiaalityypillä eri olosuhteissa.

I17.4 WET-H₂S or Amine Service

Biojalostamon käyttökohteisiin, jotka sisältävät märkää rikkivetyä tai amiinia on tehty tarkentava spesifikaatio I17.4 Tähän suositellaan päivitettäväksi myös tässä työssä käsiteltyjen virtaavien aineiden detaljivaikutukset kullekin materiaaliryhmälle. Esimerkiksi austeniittisten ruotumattomien terästen korjaushitsauksissa huomioitavat asiat laihaa tai rikasta aminivesiliuosta sisältävissä käyttökohteissa tai kuumalujien ja tulenkestävien teräksien korjaushitsauksissa huomioitavat asiat esimerkiksi kuumissa prosessiolosuhteissa. Lisäksi suositellaan päivitettävän myös vetykäyttökohteiden huomioid mm. hiiliterästen ja nikkelipohjaisten superseosten osalta tähän spesifikaatioon.

I17.5 Air Cooled Heat Exchangers

Biojalostamon ilmajäädyttimien I17.5 spesifikaatiosta suositellaan poistettavan kaikki jo I17.1 ja I17 spesifikaatiossa esitetyt vaatimukset ja ohjeet. Tässä spesifikaatiossa käsitellään ainoastaan ilmajäädyttimiin liittyvät detaljit mm. suunnittelun, valmistuksen ja tarkastusten osalta. Lisäksi suositellaan, että tähän spesifikaatioon päivitetään vaatimuksia ja esimerkkejä mm. vuotavien lämpöpintaputkien ja päätykammioiden välisiin korjaushitsauksiin esimerkiksi detaljikuvalla vaaditusta lämpöpintaputken tulpasta ja tulpan viisteen muodosta sekä mitoituksista, jotta voidaan varmistua riittävästä a-mitasta hitsausliitokselle haastavien korjaushitsauksien aikana (kuva 21).



Kuva 21. Kokemusperäisten ohjeistuksien tarkennusta spesifikaatioon (UPM sisäinen dokumentti 2024).

5 Korjaushitsauksien ja muutostöiden suunnittelu ja toteutus käyttökohde huomioiden

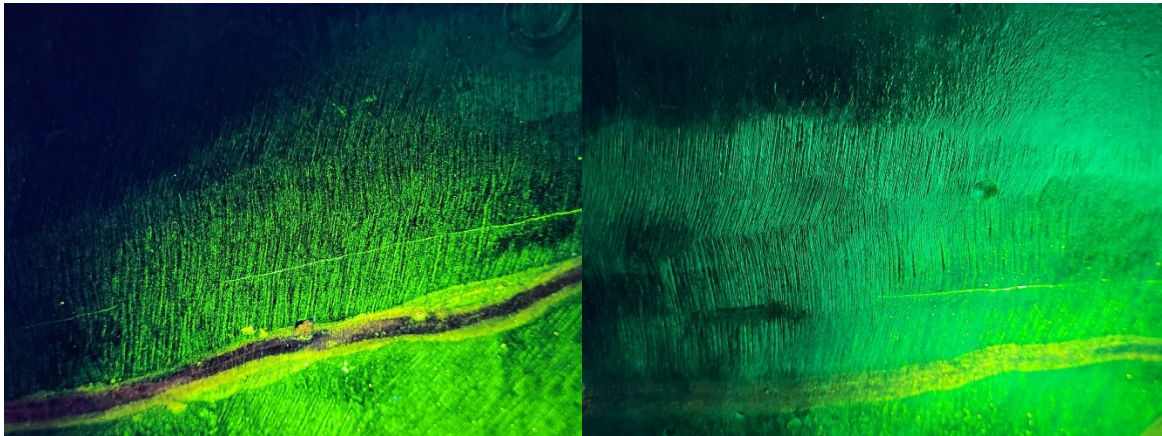
Korjaushitsauksien ja muutostöiden suunnittelu ja toteutus käyttökohde huomioiden on pääosin kohdeyrityksen laitoksen luonteen takia mahdollista ainoastaan pitkien huolto- tai tarkastusjaksojen aikana, jolloin laitoksen tuotanto on pysäytetty töiden ajaksi. Sen syyn takia on tärkeää, että korjaushitsauksien suunnittelun ja toteutuksen tueksi kohdeyrityksen spesifikaatioiden lähtötiedot ja esimerkiksi vaatimukset hitsauksiin, kovuuksiin ja vaadittaviin lämpökäsittelyihin ym. tietoihin on riittävän kattavasti sekä laadukkaasti kuvattuna, jotta korjaushitsauksen suorittaminen hektisessä työympäristössä lyhyen ajan aikana on mahdollista suorittaa mahdollistaen mahdollisimman turvallinen tuleva ajojakso laitteella.

Yleisesti ottaen tilaajalla ei ole riittävästi tietotaitoa tai mahdollisuutta pitää vaadittavaa ammattitaitoa esimerkiksi hitsausteknillisiin asioihin, jotta voitaisiin olla varmoja, että ilman spesifikaatioiden detaljeja päivityksiä saataisiin yhtä laadukkaita korjaushitsauksia tai voitaisiin laadukkaasta hankkia uusia laitteita. Monesti hektisissä tuotantolaitoksissa henkilöstöllä ei ole vaadittua käytännön kokemusta hitsaustekniikan detaljeihin, joten esimerkiksi korjaushitsauksien työnsuorittajalle, hitsausinsinöörille ja ilmoitetulle laitokselle jää suuri vastuu korjaushitsauksen laadukkaasta suorittamisesta.

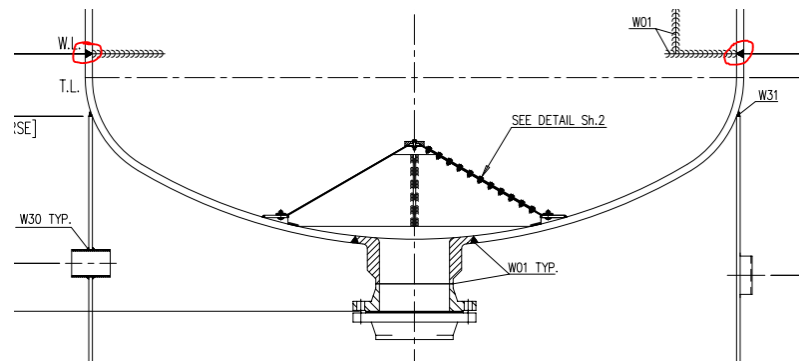
Spesifikaatioilla, jotka ovat riittävän kattavia virtaavien aineiden, olosuhteiden, materiaali- ja hitsausteknillisiin asioiden sekä detaljien osalta on tilaajan helppo etsiä tietoja, jotka on juuri suunniteltu tai otettava huomioon kohdeyrityksen laitoksella ja käytetyillä materiaaleilla. Yhteistyössä työn suorittajan henkilöstön ja ilmoitetun laitoksen asiantuntijoiden kera tilaaja voi tuoda oman ammattitaitonsa korjaushitsauksien suunnitteluun ja toteutukseen esimerkiksi näiden spesifikaatioiden ja prosessiosaamisen osalta – näin saadaan varmasti paras lopputulos laitoksen elinkaaren sekä turvallisuuden kannalta. Seuraavien CASE-esimerkkien avulla on kuvattuna muutamia haasteellisia korjaushitsauksia ja niiden toteutumista käytännössä, jossa joutuu monesti soveltamaan erityisesti saatavilla olevien materiaalien ja osien suhteen, jolloin tietotaito hitsauksien suorittamisesta laadukkaasti esimerkiksi eri materiaalivaihtoehdoilla tai osilla lisää merkittävästi laitteiden korjaushitsauksien onnistumisen mahdollisuutta laadukkaasti.

5.1 CASE 1: PSA-säiliöiden painerungon kehäliitosten korjaushitsaus

Kohdeyrityksen PSA (Pressure Swing Adsorption) säiliöillä 1–5 havaittiin edellisten määräaikaistarkastuksien perusteella säiliöiden vaippalevyjen ja päätykuppien istutuksissa sekä valmistuksen aikaisissa kehäliitosten hitsauksissa liitosvikaa, jotka yhteisvaikutuksena dynaamisen kuormituksen takia muodostivat hitsisulan ja perusaineen välille säröjä, joiden syvyydet vaihtelivat 4–6 mm välillä (kuvat 22 ja 23). Säiliöissä 1–5 sisältönä on pääosin täysin puhdas vety ja säiliöiden tilavuus on n. 32,5 m³, suunnittelupaine P_{\min} 0 bar ja P_{\max} 20 bar, suunnittelulämpötila T_{\min} -40 °C ja T_{\max} 50 °C ja PED-luokka IV sekä säiliön vaipan materiaalina P355NH, eli paineastiahiiliteräs, joka on normalisoitu.



Kuva 22. PSA-säiliöiden vaippalevyjen ja päätykupprien hitsausliitosten säröt (UPM sisäinen dokumentti 2024).



Kuva 23. Vaippalevyn ja päätykupin välinen hitsausliitos (UPM sisäinen dokumentti 2024).

Korjaushitsauksien suunnittelu aloitettiin löydettyjen tarkastustulosten perusteella. Suunnitelmat tehtiin siten, että korjaukset noudattavat painelaitedirektiivin PED 2014/68/EN ja valtioneuvosten asetusta VNA 1549/2016 §17 sekä soveltavat moduulia G vaatimustenmukaisuuden arviointiin.

Korjaussuunnitelman teko aloitettiin NDT-tulosten ilmenemisen jälkeen. NDT-tarkastukset toteutettiin säröjä pois hiomalla ja tekemällä tunkeumaneste tarkastus (PT) hionnan jälkeen. Kun PT:llä ei näyttämiä havaittu hionnan jälkeen, niin rakenteen eheys todettiin fluorisoivalla magneettijauhetaarkastuksella (MT). Korjaussuunnitelman suunnitteluun liittyivät tilaaja, urakoitsijan edustajat ja ilmoitettu laitos (NoBo). Tässä tapauksessa korjaussuunnitelma piti sisällään:

1. Korjaussuunnitelma sisältäen kohteen ja työn kuvaus sekä lyhyt työohjeistus
2. Piirustukset sisältäen laitteen alkuperäiset hitsausohjeet ja mahdolliset levityskuvat osista
3. Hitsausohjeet sisältäen esilämmityksen vaatimukset ja tarkat välipalkkolämpötilat, asennot, käytettävät lisäaineet, liitosmuodot ym. hitsaukseen liittyvät tiedot
4. Menetelmäkokeen pöytäkirjat hitsausohjeesta
5. Lisäaineiden todistukset
6. Hitsaajien pätevyystodistukset
7. NDT-tarkastajien pätevyystodistukset
8. NDT-tarkastusraportit
9. Vaatimustenmukaisuusvakuutus ja -todistus

Korjaussuunnitelman hyväksynnän jälkeen aloitettiin korjaushitsauksen suorittaminen ohjeiden mukaisesti. Säröt täyttöhitsattiin TIG-hitsausmenetelmällä ja lisäaineena käytettiin ESAB OK Tigrod 13.09 (W2Mo) hitsauslankaa, joka on Mo-seosteinen lisäaine kuuma-lujien tai vastaavien terästen hitsaukseen. Lisäaine valittiin, jotta varmistuttiin mekaanisten vaatimusten toteutumiseksi käyttökohteessa huomioiden dynaaminen kuormitus. Korjaushitsauksien jälkeen laitteiden eheys todettiin laajoilla NDT-tarkastuksilla, joilla korvattiin vesipainekoe. Vesipainekoe päätettiin korvata, koska yksikään särö ei ollut alle

rakenteen laskennallisen minimipaksuuden ja ylimääräiset kuormittavat tekijät näin isoille säiliölle haluttiin minimoida.

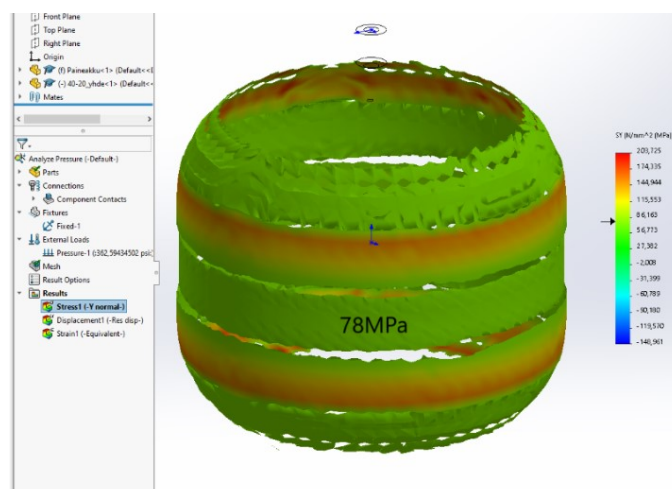
Kohde oli siinä mielessä erikoinen korjaushitsattava, koska paineastia on mitoitettu dynaamiselle kuormitukselle, eli käytännössä käyttökohteessa on syklinen painekuormitus käytön aikana. Tämä asetti omat vaatimukset korjaushitsauksen laatuvaatimuksille, ettei vastaavia säröjä pääsisi enää tulevaisuudessa syntymään. Täyttöhitsauksesta pyrittiin tekemään mahdollisimman juoheva vaippalevyyn ja päätykuppiin verrattaessa, jotta syklisen kuormituksen aiheuttamat jännitykset eivät keskittyisi jännityskeskittymiksi hitsausliitosten kohdille – vaan vaippalevyn keskikohdan molemmin puolin kuten normaalisti paineastioissa, joissa on tasainen paine (kuva 24). Paineastioiden kalvojännitykset voidaan perinteisesti laskea:

$$\text{Tangentiaalinen jännitys: } \sigma_t = \frac{p^*(r+\frac{t}{2})}{t} \quad (4)$$

$$\text{Aksiaalinen jännitys: } \sigma_a = \frac{p^*(r+\frac{t}{2})}{2*t} \quad (5)$$

jossa,

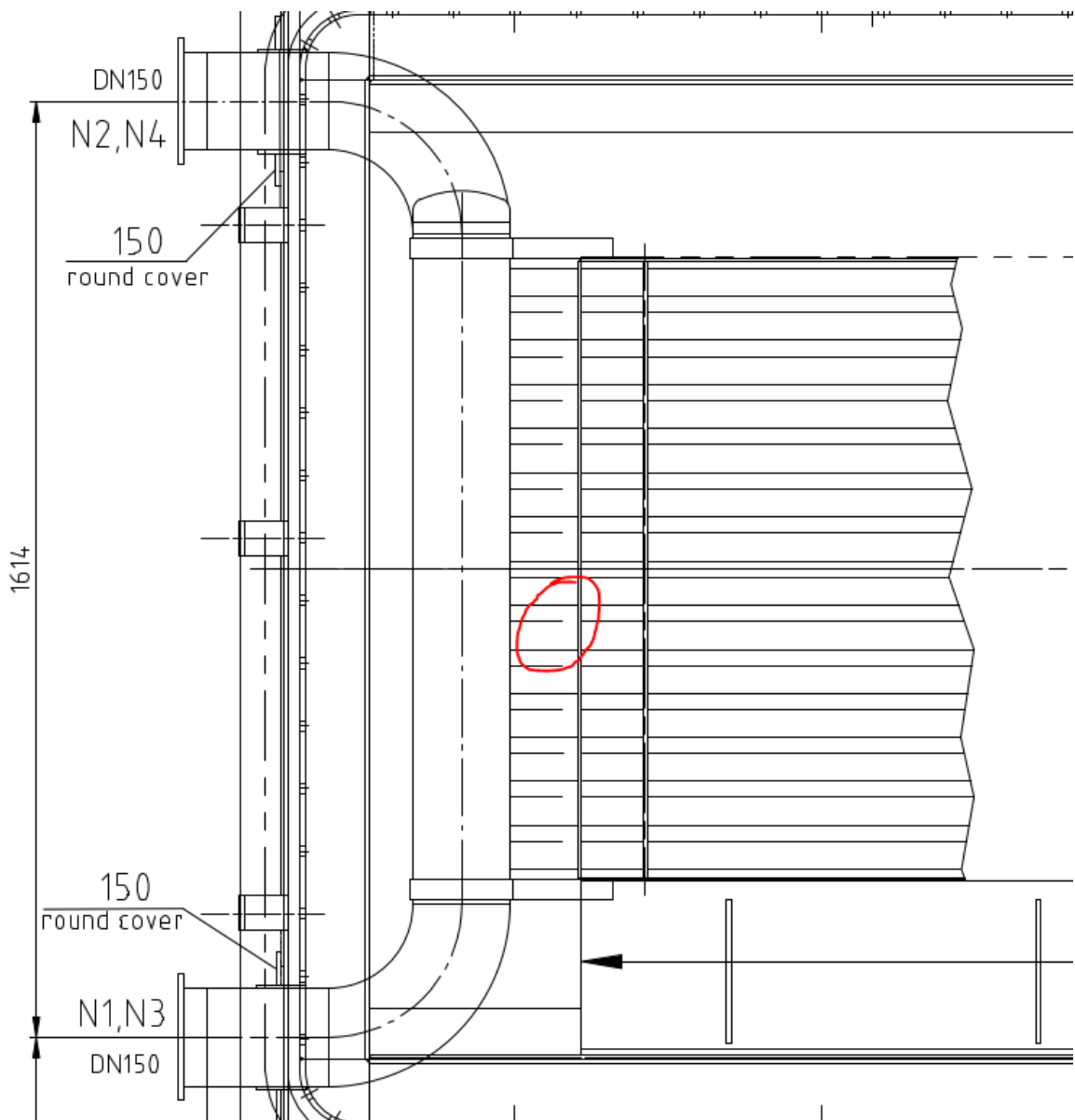
t = seinämän paksuus (mm), p = paine (bar) ja r = paineastian sisäsäde (mm)



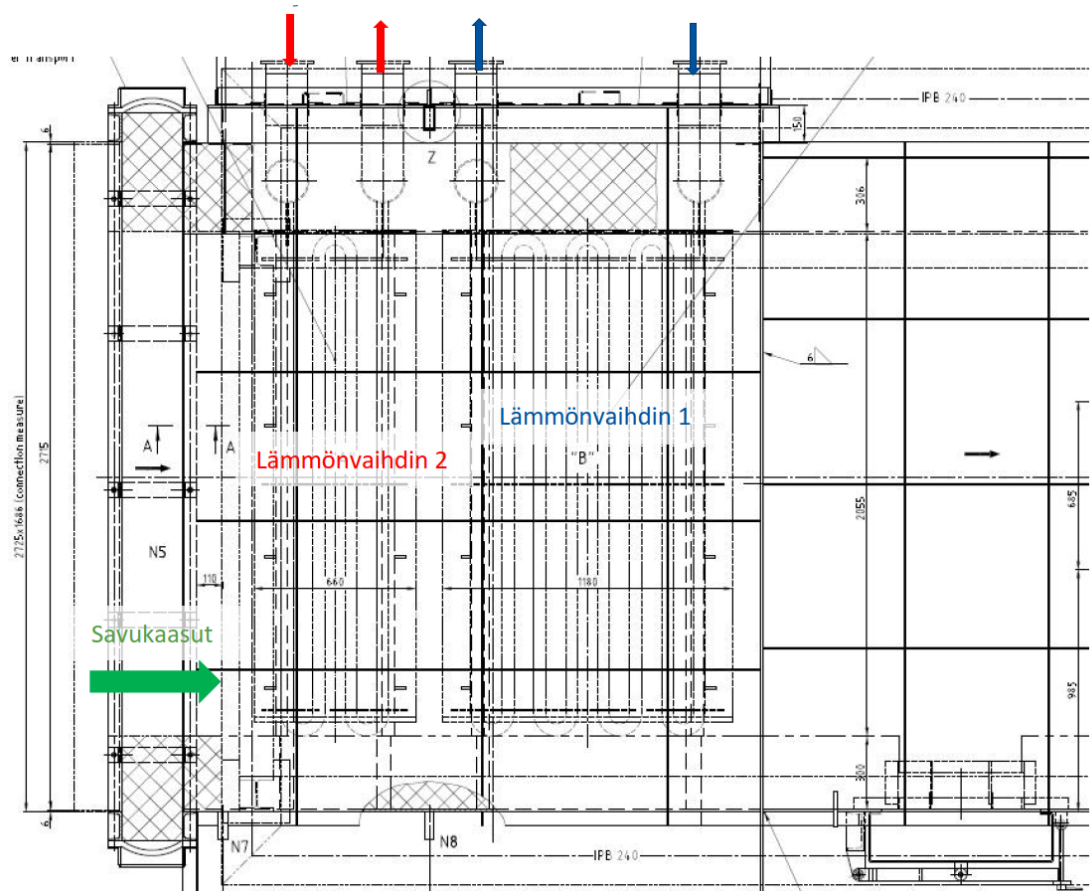
Kuva 24. Esimerkki FEM-mallista paineastian staattisen kuorman jännityskeskittymistä (Saimaan Ammattikorkeakoulu, elementtimenetelmät 2018).

5.2 CASE 2: Syötön tulistimien 1 ja 2 korjaushitsaus

Kohdeyrityksen syötöntulistimilla 1 ja 2 havaittiin syöttökaasuvuoto. Vuoto paikannettiin tulistimeen 1 jättopuolelle lämpöpintaputkien ja kollektorin väliseen yhdysputkeen (kuva 25). Korjaushitsaus mielessä kohteet sijaittivat haastavassa paikassa savukaasukanavan sisällä ja rakenne ei ollut purettavissa ilman mittavia tulitöitä paikan päällä (kuva 26).

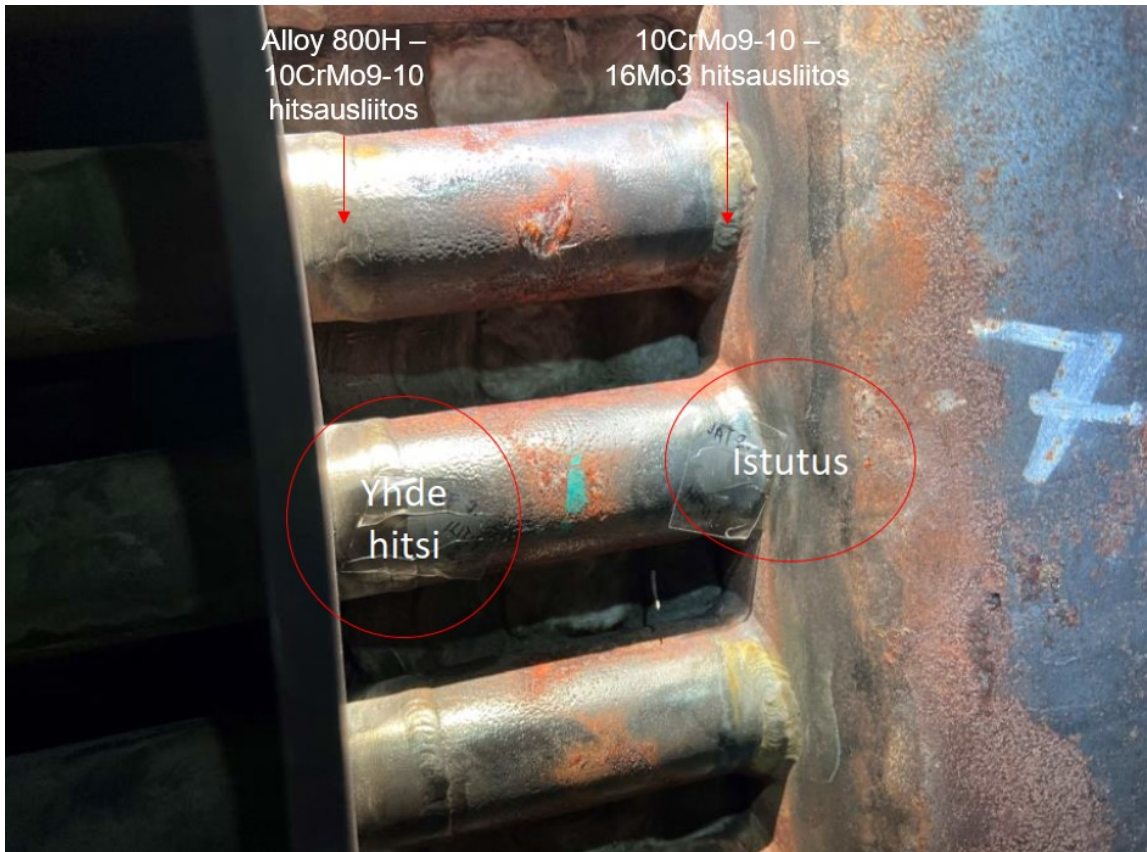


Kuva 25. Syöttökaasuvuoto tulistimella 1 (UPM sisäinen dokumentti 2024).



Kuva 26. Savukaasukanava, jossa tulistimet sisällä (UPM sisäinen dokumentti 2024).

Syötöntulistimien sisältönä on pääosin maakaasu ja höyry (nk. syöttökaasu). Tulistimien tilavuus on 215 litraa ja 370 litraa sekä vastaavasti lämpöpinta-alat $18,1 \text{ m}^2$ ja $35,8 \text{ m}^2$. Tulistimien suunnittelupaine $P_{\min} -0,1 \text{ bar}$ ja $P_{\max} 26 \text{ bar}$, suunnittelulämpötila $T_{\min} 10 \text{ °C}$ ja $T_{\max} 960 \text{ °C}$ ja PED-luokka IV sekä materiaalina käytetty 16Mo3 (kollektori), 10CrMo9-10 (kollektori – lämpöpintaputket välinen liitoskappale) ja Alloy 800H (lämpöpintaputket) (kuva 27).



Kuva 27. Tulistimen lämpöpintaputkien ja tukin rakenne (UPM sisäinen dokumentti 2024).

Korjaushitsaus aloitettiin purkamalla savukaasukanavan katto- ja seinärakenteista levymateriaaleja pois korjauksen edestä. Kun korjauskohteet olivat täysin luokse päästävissä, niin vaurioitunut tulistin paketti nostettiin ulos savukaasukanavasta ja tarkastettiin. Tarkastuksissa havaittiin useassa Alloy 800H ja 10CrMo9-10 välisissä sekaliitoksissa säröjä. Tarkastusmenetelmiä käytettiin visuaalista tarkastusta, pintatarkastusta ja jäljenne- sekä kovuusmittauksia. Lisäksi vaurioituneille osille suoritettiin myöhemmin tarkempi ainetta rikkova tutkimus, jotta vastaavat virheet voitaisiin jatkossa välttää. Vaurioituneet hitsit päätettiin poistaa kokonaan ja hitsata uudestaan.

Korjaushitsauksien suunnittelu aloitettiin heti vauriokohdan löydyttyä tarkastustulosten perusteella. Suunnitelmat tehtiin siten, että korjaukset noudattavat painelaitedirektiivin PED 2014/68/EN ja valtioneuvoston asetusta VNA 1549/2016 §17 sekä soveltavat moduulia G vaatimustenmukaisuuden arviointiin.

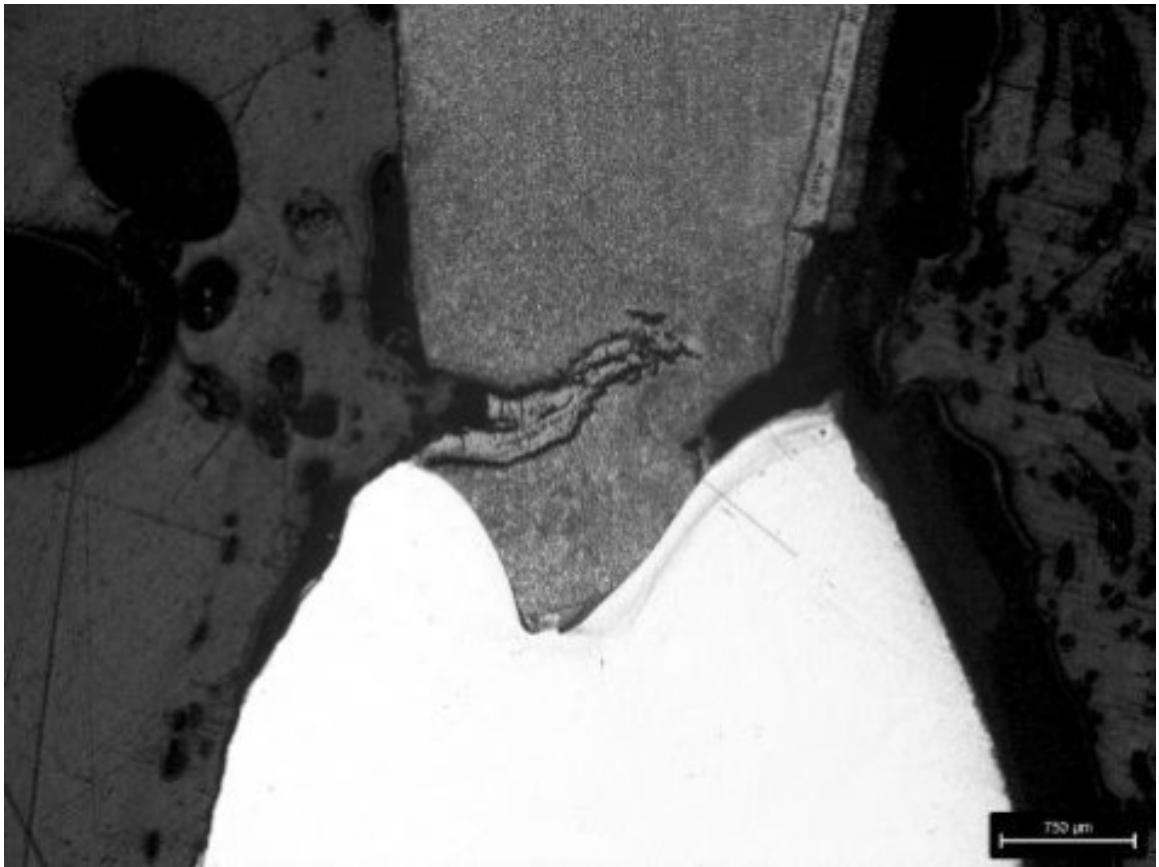
Korjaussuunnitelman suunnitteluun liittyivät tilaaja, urakoitsijan edustajat ja ilmoitettu laitos (NoBo). Korjaussuunnitelman hyväksymisen jälkeen poistettiin kaikki vaurioituneet hitsausliitokset ja osat korvattiin vastaavilla sekä hitsattiin alkuperäisen valmistajan hitsausohjeen mukaisesti. Lisäksi vaurioituneelle puolelle lisättään uusille 10CrMo9-10 ja Alloy 800H välisille hitsausliitoksille myöstö, koska vaurioselvityksen mukaan HAZ:n suuret ko-
vuusarvot ovat edesauttaneet virumisvaurion sekä säröjen syntymistä hitsausliitoksessa. Hitsauskorjauksen laatu varmistettiin työn valmistumisen jälkeen 100 % RT- ja PT-tarkastuksin. Lisäksi suoritettiin painekoe vedellä VNA1549/2016 § 12 mukaisella paineella, joka tässä tapauksessa oli 34 bar. Tulistimiin liittyvien prosessiputkistojen hitsausliitosten tarkastus korvattiin NDT-menetelmin, koska vesipainekokeen suorittaminen oli teknisesti haastavaa (ei laippapareja, iso kokonaisuus).

Myöhemmin tehdyissä ainetta rikkovissa tutkimuksissa huomattiin, että Alloy 800H ja 10CrMo9-10 välisissä eripariliitoksissa oli havaittavissa pitkiä 10CrMo9-10 puoleisella sularajalla kulkevia säröjä. 16Mo3 ja 10CrMo9-10 välisissä eripariliitoksissa ei havaittu metallurgisia ongelmia, mutta näissä havaittiin hitsauksen aikaista sovitussvikaa sekä reunahaavoja (kuva 28).



Kuva 28. Reunahaavaa hitsausliitoksessa (UPM sisäinen dokumentti 2024).

Lopputuloksena todettiin, että vaurion on aiheuttanut viruminen ja virumista oli kiihdyttänyt hitsausliitoksen sularajalla tapahtunut hiilen diffuusio hitsimateriaaliin, joka on heikentänyt huomattavasti 10CrMo9-10 ja Alloy 800H välisiä hitsausliitoksia kollektorin – lämpöpinta-putkien – väliputkien välissä. 10CrMo9-10 ja Alloy 800H välisestä eripariliitoksesta poikkileikkaus esitetty kuvassa 29, jossa näkyy myös yksi vuodon aiheuttaneista säröistä.



Kuva 29. Poikkileikkaus 10CrMo9-10 ja Alloy 800H välisestä eripariliitoksesta (UPM sisäinen dokumentti 2024).

6 Tulokset, niiden analysointi ja jatkotutkimusaiheet

Painelaitteiden ja putkistojen korjaushitsaus ja muutostöiden suorittaminen laadukkaasti hektisessä ympäristössä on vaativaa työtä, johon vaaditaan paljon eri ammattialojen osaajia niin tilaajan, kuin toimittajankin puolelta. Painelaitedirektiiviin liittyy paljon säädöksiä sekä standardeja, joita on noudatettava esimerkiksi korjaushitsauksia suorittaessa. Lisäksi erityisesti öljynjalostuksen laitoksilla on omia laitoskohtaisia spesifikaatioita ja ohjeita, joita tässäkin työssä on käsitelty.

6.1 Aiempiin tutkimuksiin vertailu

Työn tuloksena saatiin laaja katsaus työssä rajattujen materiaalien ja käyttöolosuhteiden huomiointiin korjaushitsauksia ja muutostöitä tehdessä. Tuloksena kohdeyrityksen spesifikaatioihin saatiin laaja katsaus tehtäviä päivityksiä sekä tarkennuksia. Lisäksi tätä työtä tehdessä omaa ammattiosaamista sekä alan tietoutta tuli paljon lisää, joka edesauttaa painelaitteisiin ja putkistoihin liittyvien materiaalien ja käyttöolosuhteiden ymmärrystä, niin lakien ja standardien näkökulmasta, kuin laitoksen detaljitietojen ja korjaushitsauksien näkökulmasta.

Tässä työssä tutkittujen asioiden osalta ei vastaavia tutkimuksia työtä tehdessä löytynyt. Joko aiemmat tutkimukset liittyivät käyttöolosuhteiden ja materiaalien vikaantumismuotoihin tai pelkästään jonkin materiaalin hitsaukseen – eikä niissä ollut huomioitu käyttöolosuhdetta.

6.2 Työn reliabiliteetti ja validiteetti

Työn reliabiliteetti pystyttiin varmistamaan saatujen tutkimus- ja kokemusperäistentulosten perusteella esimerkiksi korjaushitsaus CASE-esimerkkien avulla. Teoriaosuudessa esitettyjen tietojen ja CASE-esimerkkien avulla voitiin varmentaa työn luotettavuus ja objektiivisuus.

Työn validiteetin varmistamisen osalta työssä on pyritty käyttämään mahdollisimman uusia lähteitä mm. tutkimustöiden osalta. Standardien, säädösten ja lakien osalta on myös käytetty aina viimeisimpiä versioita, joita on ollut saatavilla. Tämän työn lukemalla pystyy kohdeyrityksen kunnossapidon henkilöstöä opastamaan mahdollisimman nopeasti korjaushitsauksien ja muutostöiden vaatimuksiin – ilman pitkää työhistoriaa öljynjalostamolta. Validiteetti on todennettu oikeiden lähteiden käyttämisellä, varmistamalla tehtyjen tutkimuksien alkuperä ja todentamalla kohdeyrityksessä tehtyjen tutkimusten alkuperä sekä paikkansapitävyys. Tehdyt tutkimustulokset sekä käytettyjen lähteiden tiedot olivat keskenään vertailukelpoisia, joten validiteetti voitiin varmentaa myös tätä kautta.

6.3 Avaintulokset

Tämän työn avaintuloksena voidaan pitää kattavaa selvitystä kohdeyrityksen spesifikaatioiden osalta sekä työn tuloksena suoritettavien päivitysten sekä tarkennusten tuominen laitoksen spesifikaatioihin. Teoriaosuuden aineiston tai hitsaukseen liittyvien asioiden tai detaljien osalta ei läpimurtoa löytynyt, vaan asiat ovat olleet jo tiedossa ennen tämän työn toteutusta. Tässä työssä yhdistettiin käyttöolosuhteeseen ja hitsaustekniikkaan liittyviä asioita sekä miten ne vaikuttavat toisiinsa, jos joudutaan suorittamaan painelaitteille tai putkistoille korjaushitsauksia tai muutostöitä. Tätä voidaan pitää myös työn yhtenä avaintuloksena.

6.4 Jatkotutkimusaiheet

Tämän tutkimuksen aikana nousi esille kaksi potentiaalista jatkotutkimusaihetta: kaikkien muiden prosessissa esiintyvien kriittisten väliaineiden ja materiaalien vaikutus korjaushitsauksien ja muutostöiden suorittamiseen ja mahdollisten uusien investointien mukana tulevien materiaalien ja materiaalien selvitys sekä vaikutus olemassa oleviin yksiköihin sekä koekappaleohjelman suunnittelu, jolla voidaan entistä paremmin suunnitella mahdollisia korjaushitsauksia eri prosessialueilla sekä materiaaleilla huomioiden käyttökohde, korrosioivat elementit virtauksessa ja käyttötunnit.

6.4.1 Muut kohdeyrityksen kriittiset kohteet sekä mahdolliset uudet investoinnit

Tämän tutkimustyön jatkaminen, jonka aikana tutkittaisiin myös kaikki muut kohdeyrityksen prosessissa esiintyvät kriittiset väliaineet ja materiaalit sekä niihin liittyvät seikat korjaushitsauksiin liittyen, joita ei tässä työssä käsitelty. Lisäksi tutkimusaiheena ehdotetaan mahdollisten uusien investointien olosuhteiden vaikutuksen muutosta nykyisiin laitteisiin ja onko niillä vaikutusta mahdollisesti korjaushitsauksiin tai muutostöihin. Mahdolliset päivitykset suositellaan päivitettäväksi kohdeyrityksen teknisiin spesifikaatioihin, kuten tämänkin työn tulokset.

6.4.2 Koekappaleohjelman suunnittelu korjaushitsauksien arviointiin

Ennakoiva ja suunnitelmallinen kunnossapito-ohjelma on kohdeyrityksen tyyppiselle laitokselle kilpailuetu, jos siihen panostetaan riittävällä tasolla. Jatkotutkimusaiheena ehdotetaan, että kohdeyrityksessä suunniteltaisiin koekappaleohjelma, jonka avulla voitaisiin arvioida mahdollisia tulevia korjaushitsauksia ja niiden suorittamista. Ohjelmassa on arvioitava kaikista kriittisimmät kohteet koko jalostamolta, jonka jälkeen suunnitellaan sinne asennettavat koekappaleet hitsausteknisestä näkökulmasta ajateltuna.

Koekappaleohjelmalla tässä tapauksessa tarkoitetaan kokeellista tutkimusta, johon kuuluu erilaisten kappaleiden ja materiaalien asettaminen alttiiksi erilaisiin prosessiolosuhteisiin. Huomion arvoista on, että kappaleet sekä materiaalit suositellaan suunniteltavan siten, että niihin tehdään hitsausteknisesti erilaisia kokeita, joita ovat esimerkiksi eri hitsausmenetelmän käyttö, PWHT tarve, kappaleiden valmistelu (esilämmitys, railomuoto jne.), erilaiset jännitystilat ja esikuumennus.

Koekappaleita pidettäisiin prosessi ainakin painelaitetarkastuksien syklien ajan, eli 4 vuoden ajojaksoissa, jonka jälkeen niille suoritettaisiin kattavat DT-testaukset ja tuloksia verrattaisiin alkuperäisiin nollapistemittauksiin. Mielenkiintoista olisi esimerkiksi CrMo-terästen mikrorakenteen muutokset kuumissa olosuhteissa suhteessa käyttöikänsä ja sen vaikutus korjaushitsauksen onnistumiseen.

7 Johtopäätökset ja yhteenveto

Työn tarkoituksena oli selvittää materiaalien ja käyttöolosuhteiden vaikutuksia korjaushitsauksien ja muutostöiden suorittamiseen öljynjalostamolla. Työn alussa asetettiin kolme kappaletta tutkimuskysymyksiä, joihin tämän työn aikana etsittiin vastaukset.

Ensimmäiseen ja toiseen tutkimuskysymykseen: ”*Mitkä ovat materiaalien ja käyttöolosuhteiden vaikutukset korjaushitsaus- ja muutostöiden suorittamiseksi? ja millä keinoilla ja toimenpiteillä korjaushitsaus- ja muutostöiden toteuttamisen laatua voidaan parantaa?*” vastattiin tämän työn ensimmäisessä ja toisessa osuudessa. Ensimmäisessä osiossa kuvataan lyhyesti painelaitteisiin liittyvän lainsäädännön keskeisiä asioita, joita tulee huomioida sekä noudattaa, kun suoritetaan korjaushitsauksia tai muutostöitä esimerkiksi rekisterissä oleville paineastioille. Työn toisessa osiossa keskityttiin kirjallisuuskatsauksen muodossa tässä työssä käsiteltäviin materiaaleihin ja käyttöolosuhteisiin. Osion aikana selvitettiin ja tarkennettiin huomioitavia asioita korjaushitsauksia suorittaessa tietyillä materiaaleilla ja tietyissä olosuhteissa. Lisäksi kirjallisuuskatsauksen aikana huomioitiin myös muita seikkoja, joilla on vaikutusta esimerkiksi laitteiden koko elinkaareen. Näitä asioita ovat mm. materiaalien seostukset, toimitustilat ja hyväksyttävät kovuudet, joita kontrolloimalla voidaan parantaa laitoksen elinikää, kustannustehokkuutta ja laitteiden korjauksien laatua.

Viimeinen tutkimuskysymys oli: ”*Miten otetaan huomioon aiheeseen liittyvät tekniset spesifikaatiot, standardit ja määräykset?*”, johon vastattiin työn lopussa kohdeyrityksen spesifikaatioiden suositeltujen päivitysten ja CASE-esimerkkien avulla. Spesifikaatioiden sisältöön tehtiin kattava nykytilan kartoitus työn rajauksien puitteissa. Lisäksi tämän osion loppuksi yhdistettiin kirjallisuuskatsauksessa kerättyjä tietoja ja päivityksiä, joita suositeltiin kohdeyrityksen spesifikaatioihin päivitettäviksi. Osion jälkeen tutkimuskysymyksissä esitettyä asioita ja vastauksia pyrittiin tuomaan käytäntöön esittämällä kahden CASE-esimerkin avulla korjaushitsauksien ja muutostöiden suorittamista käytännössä. CASE-esimerkkien perusteella voitiin todentaa, että yksikään korjaushitsaus tai muutostyö ei ole samanlainen, vaan aina vaaditaan ammattitaitoa, niin tilaajan, kuin toimittajankin puolelta, kun kohteiden korjaushitsauksia suunnitellaan. Aina korjaushitsauksien ja muutostöiden suorittaminen ei ole helppoa, varsinkin hektisessä ympäristössä.

Työn tuloksia tarkastettaessa todettiin, että tässä työssä käsiteltävistä aiheista on syytä tehdä jatkotutkimusaiheita, joita esitettiin kohdeyritykselle. Tärkeimpänä tuloksena havaittiin kuitenkin spesifikaation nykytilan kartoitus ja niihin tehtävien päivitysten merkitys kohdeyritykselle esimerkiksi tulevaisuuden hankintoja ja seuraavia korjaushitsauksia tai muutostöitä ajatellen. Lisäksi työn tärkeänä tuloksena oma ammattitaito sekä ymmärrys lisääntyi, josta on tulevaisuudessa apua niin kohdeyritykselle kuin henkilökohtaiselle ammattiosaamiselle.

Lähteet

American Petroleum Institute. API 571. 2nd Edition 2011. Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. [Viitattu 29.12.2023]. 372 s.

American Petroleum Institute. API 582. 2nd Edition 2019. Welding Guidelines for the Chemical, Oil, and Gas Industries. [Viitattu 28.11.2023]. 40 s.

American Petroleum Institute. API 941. 8th Edition 2016. Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures in Petroleum Refineries and Petrochemical Plants. [Viitattu 28.11.2023]. 56 s.

American Petroleum Institute. API 945. 4th Edition 2022. Avoiding Environmental Cracking in Amine Units. [Viitattu 28.11.2023]. 46 s.

ASME B31.3-2022. Process Piping. ASME Code for Pressure Piping, B31. [Viitattu 18.1.2024]. 587 s.

ASME B31.9-2020. Building Services Piping. ASME Code for Pressure Piping, B31. [Viitattu 28.12.2023]. 86 s.

ASME B31.12-2019. Hydrogen Piping and Pipelines. ASME Code for Pressure Piping, B31. [Viitattu 28.12.2023]. 280 s.

Bahadori, Alireza 2014. Corrosion and Material Selection – A Guide for the Chemical and Petroleum Industries. [E-kirja]. Saatavilla: https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/web/view/khtml/show.v/rcid:kpCMSAGCP5/cid:kt011U89I7/viewerType:khtml/root_slug:corrosion-materials-selection/url_slug:title-page?&page=last&view=collapsed&zoom=1. 533 s.

Brandi, Sergio., Schön, Claudio. 2017. A Thermodynamic Study of a Constitutional Diagram for Duplex Stainless Steels. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.1.2024]. Saatavilla: <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/content/pdf/10.1007/s11669-017-0537-8.pdf>. Ss. 268–275.

European Agency for Safety and Health at Work. 2023. Directive 2014/68/EU - pressure equipment. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 8.11.2023]. Saatavilla: <https://osha.europa.eu/en/legislation/directive/directive-201468eu-pressure-equipment>.

Henderson, Michael. 2004. Nickel Based Superalloy Welding Practices for Industrial Gas Turbine Applications. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.2.2024]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/233484100_Nickel_based_superalloy_welding_practices_for_industrial_gas_turbine_applications. 14 s.

Hitsaustekniikka -lehti 2/2012. [sähköinen kausijulkaisu]. [Viitattu 28.11.2023].

Hitsaustekniikka -lehti 5/2021. [sähköinen kausijulkaisu]. [Viitattu 28.11.2023].

Hodgson, D. K., Dai, T., Lippold, J. C. Transformation and Tempering Behavior of the Heat-Affected Zone of 2.25Cr-1Mo Steel. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.2.2024]. Saatavilla: http://s3.amazonaws.com/WJ-www.aws.org/supplement/WJ_2015_08_s250.pdf. 7 s.

Impomet Oy. Hitsaajan käsikirja 6.1. 2020. Tampereen Offsetpalvelu Oy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.1.2024]. Saatavilla: <https://www.impomet.com/teollisuuden-kunnossapito/hitsaajan-kasikirja>. 180 s.

International Energy Agency 2023. Energy System, Low-Emission Fuels, Hydrogen. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.11.2023]. Saatavilla: <https://www.iea.org/energy-system/low-emission-fuels/hydrogen>.

Kauppi, Timo. 2013. Korkeiden lämpötilojen teräkset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.2.2024]. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/65264/kauppi%20B%2012%202013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. 67 s.

Koivisto, K., Laitinen, E., Niinimäki, M., Tiainen, T., Tiilikka, P., Tuomikoski, J. 2014. Konetekniikan materiaalioppi. 12.–14. painos. Helsinki, Edita. 341 s.

Korhonen, S. 2013 ja 2014. Ruostumattomien terästen laadut – osat 1/6 ja 2/6. [Blogi]. [Viitattu 11.1.2024]. Saatavilla: <http://jetsteeloy.blogspot.com/2013/04/ruostumattomien-terasten-laadut-osa-16.html>

Lepola, Pertti., Ylikangas, Risto. 2021. Hitsaustekniikka ja Teräsrakenteet. Kappale 10. Hitsauksen laatu. Sanoma Pro Oy. 1.–3. painos 2021. Helsinki. 415 s.

Lukkari, J., Kyröläinen, A., Kauppi, T. 2019. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2A: Metallit ja niiden hitsattavuus. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. 230 s.

Lukkari, J., Kyröläinen, A., Kauppi, T. 2019. Hitsauksen materiaalioppi. Osa 2B: Metallit ja niiden hitsattavuus. Suomen Hitsausteknillinen Yhdistys r.y. 220 s.

Michel, Jan., Bursak, Marian., Vojtko, Marek. 2011. MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES DEGRADATION OF CrMo CREEP RESISTANT STEEL OPERATING UNDER CREEP CONDITIONS. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.2.2024]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/268405904_MICROSTRUCTURE_AND_MECHANICAL_PROPERTIES_DEGRADATION_OF_CrMo_CREEP_RESISTANT_STEEL_OPERATING_UNDER_CREEP_CONDITIONS. 62 s.

NACE International. MR0103-2005. Materials Resistant to Sulfide Stress Cracking in Corrosive Petroleum Refining Environments. [Viitattu 16.3.2024]. 20 s.

NACE International. MR0175-2005. Petroleum and natural gas industries – Materials for use in H₂S-containing environments in oil and gas production. [Viitattu 16.3.2024]. 84 s.

NACE International. RP0472-2000. Methods and Controls to Prevent In-Service Environmental Cracking of Carbon Steel Weldments in Corrosive Petroleum Refining Environments. [Viitattu 16.3.2024]. 11 s.

Neste Oil 2013. Yritysinfo – Sanasto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.12.2023]. Saatavilla: <https://web.archive.org/web/20130526000134/http://www.nesteoil.fi/default.asp?path=35,52,62,175>

Nickel Alloys Net. 2022. Welding of Nickel Alloys. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.2.2024]. Saatavilla: <https://www.nickel-alloys.net/article/welding-of-nickel-alloys.html>.

Nikolaidis, Pavlos., Poullikkas, Andreas 2017. A Comparative overview of hydrogen production processes. [E-kirja]. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116305366>. 188 s.

Outokumpu. 2017 edition. Handbook of Stainless Steel. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.1.2024]. Saatavilla: <https://www.outokumpu.com/en/expertise/2021/handbook-of-stainless-steel>. 142 s.

Outokumpu. Welding knowledge guide. A brief guide to welding different stainless steels. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.1.2024]. Saatavilla: <https://www.outokumpu.com/fi-fi/expertise/2021/welding-guide>. 77 s.

Painelaitelaki 1144/2016. 2016. 16.12.2016/1144 Painelaitelaki. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 31.10.2023]. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2016/20161144>.

Painelaitedirektiivin 2014/68/EU (PED) soveltamisohjeet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.11.2023]. Saatavilla: <https://tukes.fi/documents/5470659/6372817/Painelaitedirektiivin+soveltamisohjeet/f503f680-7e9b-40ff-80a0-4b81f5f193bd/Painelaitedirektiivin+soveltamisohjeet.pdf/Painelaitedirektiivin+soveltamisohjeet.pdf?t=1593166894221>.

Reid, Dennis 2022. Hydrogen In Oil Refineries. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.11.2023]. Saatavilla: <https://www.forbes.com/sites/forbesbusinesscouncil/2022/09/08/hydrogen-in-oil-refineries-understanding-the-importance-of-hydrogen-monitoring-and-best-practices/?sh=5b9f7e2943d7>.

Sashank, S., Rajakumar, S., Karthikeyan, R., Nagaraju, D. 2020. Weldability, Mechanical Properties and Microstructure of Nickel Based Super Alloys: a review. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.2.2024]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401040>. 8 s.

SFS 3052. 2020. Hitsaussanasto. Yleistermit. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 122 s. Vahvistettu 25.09.1995.

SFS-EN 10028-2. 2017. Painelaiteteräkset. Levytuotteet. Osa 2: Kuumalujat seostamattomat ja seostetut teräkset. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 56 s. Vahvistettu 04.08.2017.

SFS-EN 10095. 2001. Heat resisting steels and nickel alloys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 37 s. Vahvistettu 13.09.2001.

Simić, Marko., Alil, Ana., Martinović, Sanja., Vlahović, Milica., Savić, Aleksandar and Husović, Tatjana Volkov. 2020. High temperature materials: properties, demands and applications. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.2.2024]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/343249428_High_temperature_materials_properties_demands_and_applications. 12 s.

Stones, Peter. 2023. Welding Filler Metals. Esab. [Blogi]. [Viitattu 20.3.2024]. Saatavilla: <https://stainless-steel-world.net/welding-filler-metals/>.

Tukes 2023a. Painelaitteet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.10.2023]. Saatavilla: <https://tukes.fi/tuotteet-japalvelut/painelaitteet#c648135e>.

Tukes 2023b. Painelaitteen suunnittelu ja valmistus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.10.2023]. Saatavilla: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteen-suunnittelu-javalmistus#c648135e>.

Tukes 2023c. Painelaitteiden hankinta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.10.2023]. Saatavilla: <https://tukes.fi/tuotteet-japalvelut/painelaitteet/painelaitteiden-hankinta>.

Tukes 2023d. Painelaitteen käyttö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.10.2023]. Saatavilla: <https://tukes.fi/tuotteet-japalvelut/painelaitteet/painelaitteen-kaytto>.

Tukes 2023e. Painelaitteiden korjaus- ja muutostyöt. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.10.2023]. Saatavilla: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/painelaitteet/painelaitteiden-korjaus-ja-muutostyot>.

UPM Biofuels 2017. Vetykäsittelyn prosessikuvaus. UPM sisäinen aineisto. [Viitattu 28.10.2023].

UPM Biopolttoaineet 2023a. UPM Biopolttoaineet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2023]. Saatavilla: <https://www.upmbiofuels.com/fi/upm-biopolttoaineet/>.

UPM Biopolttoaineet 2023b. Kohti ilmastoposiitivisuutta. Tähddevirrat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2023]. Saatavilla: https://www.upmbiofuels.com/fi/vastuullisuus/ilmastoposiitivisuus/metsateollisuuden-tahdevirrat/#cid_427188.

UPM Kaukas 2023. UPM Kaukas. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2023]. Saatavilla: <https://www.upmpulp.com/fi/upm-kaukas/>.

Van Roij, Johan. 2021. Corrosion in Amine Treating Units. [E-Kirja]. Saatavilla: https://lut.primo.exlibrisgroup.com/view/action/uresolver.do?operation=resolveService&package_service_id=3447271760006254&institutionId=6254&customerId=6245&VE=tru. 169 s.

Liite 1. ASME Section IX P-numerointi ja materiaalit

P No.	Generic Descriptor
1	Carbon steel, Carbon-Manganese Steel, Carbon-Manganese-Silicon Steel
3	Low Alloy Steel (1/2% Cr-1/2% Mo, C-1/2% Mo)
4	Low Alloy Steel (Cr-Mo typically 1-2%Cr & 1/2%Mo)
5A	Low Alloy Steel (Cr-Mo typically 2-3%Cr & 1/2-1%Mo)
5B	Intermediate Alloy Steel (typically 5-10% Cr and 1%Mo)
5C	Low Alloy Steel (2 1/4 Cr-1Mo-V)
6	Straight Cr, 400 Series, Martensitic Stainless Steel
7	Straight Cr, 400 Series, Ferritic Stainless Steel
8	Cr-Ni, 200 and 300 Series, Austenitic Stainless Steel
9A	upto 2.5% Ni Steels
9B	3.5% Ni Steel
9C	4.5% Ni Steel
10A,B,C,F	Low Alloy Steel
10G	36%Ni Steel
10H	Duplex (UNS S31803) and Super Duplex Stainless Steel (UNS S32750)
10I	High Chromium Stainless Steel
10J	High Cr-Mo Stainless Steel
10K	High Cr-Mo-Ni Stainless Steel
11A	High Strength Low Alloy Steel, 5-9% Nickel Steel
11B	High Strength Low Alloy Steel
15E	Creep strength-enhanced ferritic steel (CSEF) 9%Cr-1%Mo-V (P91), 9%Cr-2W (P92)
21	Commercially Pure Aluminium & Al-Mn Alloys (AA1060, AA1100, AA3003)
22	Al-Mn & Al-Mg Alloys (AA3004,AA5052,AA5154,AA5254,AA5454,AA5652)
23	Al-Mg-Si Alloys (AA6061, AAA6063)
25	Al-Mg Alloys (AA5083,AA5086,AA5456)
31	Cu & Cu Alloys (High Copper Content)
32	Admiralty Brass,Naval Brass, Aluminium Brass, Muntz Metal
33	Cu-Si Alloys
34	Cu-Ni Alloys
35	Al-Bronze Alloys
41	Ni Alloys and Commercially Pure Nickel
42	Ni-Cu Alloys (Monel)
43	Ni-Cr and Ni-Cr-Mo Alloys (Inconels)
44	Mo-Cr-Fe Alloys (Hastelloys)
45	Fe-Ni-Cr-Mo-Cu (Incolloys)
46	Ni-Cr-Si Alloys
47	Ni-Cr-W-Co-Fe-Mo Alloys
51,52,53	Titanium & Titanium Alloys
61,62	Zirconium & Zirconium Alloys

Liite 2. ASME B31.3 taulukko 331.1.1

**Table 331.1.1
Postweld Heat Treatment**

P-No. and Group No. (ASME BPVC, Section IX, QW/QB-420)	Holding Temperature Range, °C (°F) [Note (1)]	Minimum Holding Time at Temperature for Control Thickness [Note (2)]	
		Up to 50 mm (2 in.)	Over 50 mm (2 in.)
P-No. 1, Group Nos. 1-3	595 to 650 (1,100 to 1,200)	1 h/25 mm (1 hr/in.); 15 min min.	2 hr plus 15 min for each additional 25 mm (in.) over 50 mm (2 in.)
P-No. 3, Group Nos. 1 and 2	595 to 650 (1,100 to 1,200)		
P-No. 4, Group Nos. 1 and 2	650 to 705 (1,200 to 1,300)		
P-No. 5A, Group No. 1	675 to 760 (1,250 to 1,400)		
P-No. 5B, Group No. 1	675 to 760 (1,250 to 1,400)		
P-No. 6, Group Nos. 1-3	760 to 800 (1,400 to 1,475)		
P-No. 7, Group Nos. 1 and 2 [Note (3)]	730 to 775 (1,350 to 1,425)		
P-No. 8, Group Nos. 1-4	PWHT not required unless required by WPS		
P-No. 9A, Group No. 1	595 to 650 (1,100 to 1,200)		
P-No. 9B, Group No. 1	595 to 650 (1,100 to 1,200)		
P-No. 10H, Group No. 1	PWHT not required unless required by WPS. If done, see Note (4).		
P-No. 10I, Group No. 1 [Note (3)]	730 to 815 (1,350 to 1,500)		
P-No. 11A	550 to 585 (1,025 to 1,085) [Note (5)]		
P-No. 15E, Group No. 1	705 to 775 (1,300 to 1,425) [Notes (6), (7)]	1 h/25 mm (1 hr/in.); 30 min min.	1 h/25 mm (1 hr/in.) up to 125 mm (5 in.) plus 15 min for each additional 25 mm (in.) over 125 mm (5 in.)
P-No. 62	540 to 595 (1,000 to 1,100)	...	See Note (8)
All other materials	PWHT as required by WPS	In accordance with WPS	In accordance with WPS

GENERAL NOTE: The exemptions for mandatory PWHT are defined in Table 331.1.3.

NOTES:

- (1) The holding temperature range is further defined in para. 331.1.6(c) and Table 331.1.2.
- (2) The control thickness is defined in para. 331.1.3.
- (3) Cooling rate shall not be greater than 55°C (100°F) per hour in the range above 650°C (1,200°F), after which the cooling rate shall be sufficiently rapid to prevent embrittlement.
- (4) If PWHT is performed after welding, it shall be within the following temperature ranges for the specific alloy, followed by rapid cooling:
Alloys S31803 and S32205 — 1020°C to 1100°C (1,870°F to 2,010°F)
Alloy S32550 — 1040°C to 1120°C (1,900°F to 2,050°F)
Alloy S32750 — 1025°C to 1125°C (1,880°F to 2,060°F)
All others — 980°C to 1040°C (1,800°F to 1,900°F)
- (5) Cooling rate shall be >165°C (>300°F)/h to 315°C (600°F)/h.
- (6) The minimum PWHT holding temperature may be 675°C (1,250°F) for nominal material thicknesses [see para. 331.1.3(c)] ≤13 mm (½ in.).
- (7) The Ni + Mn content of the filler metal shall not exceed 1.2% unless specified by the designer, in which case the maximum temperature to be reached during PWHT shall be the lower transformation temperature of the filler metal, as determined by analysis and calculation or by test, but not exceeding 800°C (1,470°F). If the 800°C (1,470°F) limit was not exceeded but the lower transformation temperature of the filler metal was exceeded or if the composition of the filler metal is unknown, the weld must be removed and replaced. It shall then be rewelded with compliant filler metal and subjected to a compliant PWHT. If the 800°C (1,470°F) limit was exceeded, the weld and the entire area affected by the PWHT will be removed and, if reused, shall be renormalized and tempered prior to reinstallation. The lower transformation temperature is the steady-state temperature at which the austenite phase transformation occurs.
- (8) Heat treat within 14 days after welding. Hold time shall be increased by 1.2 h for each 25 mm (1 in.) over 25 mm (1 in.) thickness. Cool to 425°C (800°F) at a rate ≤280°C (≤500°F)/h.

Liite 3. EN 13480-4 taulukko 9.14.1-1

Taulukko 9.14.1-1 Jälkilämpökäsittely (PWHT)



Materiaali-ryhmä ^a	Materiaali	Jälkilämpökäsittely		
		Määräävä seinämänpaksuus w mm	Pitoaika minuuttia	Lämpötila °C
1.1 1.2	Seostamaton teräs kun $ReH \leq 360$ MPa (N/mm ²)	< 35 ^b 35...90	30 w, vähintään 60	550...600 ^c
1.3	Normalisoidut hienoraeteräkset, kun 360 MPa (N/mm ²) < $ReH \leq 460$ MPa (N/mm ²)			550...600 ^b
3.1	Nuorrutettu teräs, kun 360 MPa (N/mm ²) < $ReH \leq 690$ MPa (N/mm ²)	< 15 15...60 > 60	30 2w, vähintään 60 60 + w	550...620 ^{b,d}
4	Matalan vanadiinipitoisuuden Cr-Mo-(Ni)-teräs, kun $Mo \leq 0,7$ % ja $V \leq 0,1$ %	< 20 20...90 > 90	30 w, vähintään 60 40 + w	550...620
5.1	Cr-Mo-teräs $0,75$ % $\leq Cr \leq 1,5$ % ja ilman vanadiinia (esim. 13CrMo4-5)	< 15 15...60 > 60	2w, vähintään 15 2w 60 + w	630...700 ^e
5.2	Cr-Mo-teräs $1,5$ % < $Cr \leq 3,5$ % ja ilman vanadiinia (esim. 10CrMo9-10)			670...730 ^e
5.3	Cr-Mo-teräs $3,5$ % < $Cr \leq 7,0$ % ja ilman vanadiinia (esim. X16CrMo5-1)	Kaikki	2w, vähintään 60	700...750
5.4	Cr-Mo-teräs $7,0$ % < $Cr \leq 10$ % ja ilman vanadiinia (esim. X10CrMo9-1)	< 12 12...60 > 60	30 2,5w, vähintään 60 90 + w	730...780
6.1	Korkean vanadiinipitoisuuden Cr-Mo-(Ni)-teräs, kun $0,3$ % $\leq Cr \leq 0,75$ % (e.g. 14MoV6-3)	< 12 12...60 > 60	30 2,5w, vähintään 60 90 + w	690...730
6.2	Korkean vanadiinipitoisuuden Cr-Mo-(Ni)-teräs kun $0,75$ % < $Cr \leq 3,5$ % (esim. 15CrMoV5-10)			710...740
6.4	Korkean vanadiinipitoisuuden Cr-Mo-(Ni)-teräs kun $7,0$ % < $Cr \leq 12,5$ % (esim. X20CrMoV11-1, X10CrMoVNb9-1)			730...770 ^f
9.1 9.2	Teräs, jossa enintään 8 % nikkeliä	< 20 ^b 20 < 35 ^b 35...90 > 90	30 vähintään 60 w, vähintään 60 40 + 0,5w	530...580

^a Materiaalit, joita tämä taulukko ei kata, vaativat yksityiskohtaista tarkastelua.

^b Näillä seinämänpaksuuksilla PWHT on välttämätön ainoastaan erikoistapauksissa (esim. jännityskorroosio, vetyhauraus, matalat lämpötilat).

^c Materiaalille 16Mo3 lämpötilan pitäisi olla 550 °C ... 620 °C.

^d Nuorrutetut teräkset pitäisi jälkilämpökäsitellä (PWHT) lämpötilassa, joka on enintään 20 °C päästölämpötilaa alempana.

^e  Hitsauksen jälkilämpökäsittelyä ei ehkä tarvita mitoille $d_a \leq 114,3$ mm ja $w \leq 7,1$ mm, kun esikuumennuslämpötila on vähintään 200 °C ja käyttö- (jännityskorroosio, matalat lämpötilat, vetyhauraus jne.) sekä testausolosuhteet (esim. kaasupainekoe, ks. standardin EN 13480-5:2017 kohta 9.3.3 d)) eivät vaadi jälkilämpökäsittelyä .

^f Hitsi on lisäksi välijäähdytettävä ennen PWHT:ä, jotta martensiitiksi muuttumista tapahtuisi.

Liite 4. NACE MR0175 H₂S-ympäristössä sallitut korroosionkestävät seokset

Environmental cracking-resistant CRAs and other alloys (including Table A.1 — Guidance on the use of the materials selection tables)

A.1 General

A.1.1 Materials groups

The materials groups used to list CRAs or other alloys (see 6.1) are as follows:

- austenitic stainless steels (identified as material type and as individual alloys) (see A.2);
- highly alloyed austenitic stainless steels (identified as material types and as individual alloys) (see A.3);
- solid-solution nickel-based alloys (identified as material types and as individual alloys) (see A.4);
- ferritic stainless steels (identified as material type) (see A.5);
- martensitic stainless steels (identified as individual alloys) (see A.6);
- duplex stainless steels (identified as material types) (see A.7);
- precipitation-hardened stainless steels (identified as individual alloys) (see A.8);
- precipitation-hardened nickel-based alloys (identified as individual alloys) (see A.9);
- cobalt-based alloys (identified as individual alloys) (see A.10);
- titanium and tantalum (identified as individual alloys) (see A.11);
- copper, aluminium (identified as materials types) (see A.12).

Subject to A.1.2, A.1.3, A.1.4, and A.1.5 below, the CRAs and other alloys listed in Table A.1 to Table A.42 may be used without further testing for SSC, SCC, and GHSC cracking-resistance within the environmental limits shown.

Information on the use of copper and aluminium alloys is contained in A.12.

A.13 contains recommendations on the use of cladding, overlays, and wear-resistant alloys.

NOTE The materials listed and the restrictions shown are those originally listed in NACE MR0175:2003 (no longer available) except for balloted changes introduced since 2003.

Liite 5. NACE MR0175 H₂S ympäristön aiheuttamat vauriot sallituille materiaaleille

Materials groups of Annex A	Potential cracking mechanisms in H ₂ S service ^{a, b}			Remarks
	SSC	SCC	GHSC	
Austenitic stainless steels (see A.2)	S	P	S	Some cold-worked alloys contain martensite and can therefore be sensitive to SSC and/or HSC.
Highly-alloyed austenitic stainless steels (see A.3)	—	P	—	These alloys are generally immune to SSC and HSC. Low-temperature cracking tests are not normally required.
Solid-solution nickel-based alloys (see A.4)	S	P	S	Some Ni-based alloys in the cold-worked condition and/or aged conditions contain secondary phases and can be susceptible to HSC when galvanically coupled to steel. In the heavily cold-worked and well-aged condition coupled to steel, these alloys can experience HSC.
Ferritic stainless steels (see A.5)	P	—	P	—
Martensitic stainless steels (see A.6)	P	S	P	Alloys containing Ni and Mo can be subject to SCC whether or not they contain residual austenite.
Duplex stainless steels (see A.7)	S	P	S	Cracking sensitivity can be highest at a temperature below the maximum service temperature and testing over a range of temperatures shall be considered.
Precipitation-hardened stainless steels (see A.8)	P	P	P	—
Precipitation-hardened nickel base alloys (see A.9)	S	P	P	Some Ni-based alloys in the cold-worked condition and/or aged conditions contain secondary phases and can be susceptible to HSC when galvanically coupled to steel.
Cobalt-based alloys (see A.10)	S	P	P	—
Titanium and tantalum (see A.11)	See "Remarks" column			Cracking mechanisms depend upon the specific alloy. The equipment user shall ensure appropriate testing and qualification is carried out.
Copper and aluminium (see A.12)	See "Remarks" column			These alloys are not known to suffer from these cracking mechanisms
^a P indicates primary cracking mechanism.				
^b S indicates secondary, possible, cracking mechanism.				