

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

Teknillinen tiedekunta

Konetekniikan koulutusohjelma

BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

**RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET JA NIIDEN SOVELTUVUUS  
KONEPAJAN OHUTLEVYTUOTANTOON**

**STAINLESS STEELS AND THEIR SUITABILITY FOR  
PRODUCTION OF SHEET METAL WORKSHOP**

Valkealassa 11.9.2010

Sami Korhonen

Ohjaaja: Prof. Jukka Martikainen

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO .....	1
1.1 Työn tavoite ja rajaus .....	1
1.2 Yritysesittely .....	1
2 RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET .....	2
2.1 Austeniittiset ruostumattomat teräokset .....	4
2.2 Austeniittis-ferriittiset ruostumattomat teräokset .....	5
2.3 Ferriittiset ruostumattomat teräokset .....	6
2.4 Martensiittiset ruostumattomat teräokset .....	7
3 YRITYKSESSÄ KÄYTETTÄVÄT TYÖMENETELMÄT JA TUOTTEILTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET .....	8
3.1 Terminen ja mekaaninen leikkaus .....	8
3.1.1 Plasmaleikkaus .....	8
3.1.2 Mekaaninen leikkaus .....	9
3.2 Taivuttaminen ja lastuava työstö .....	10
3.2.1 Särmäys .....	11
3.2.2 Pyöritys .....	12
3.2.3 Lastuava työstö .....	13
3.3 Hitsaus .....	13
3.3.1 Plasmahitsaus .....	13
3.3.2 MIG/MAG- ja täytelankahitsaus .....	15
3.3.3 TIG-hitsaus .....	16
3.3.4 Puikkohitsaus .....	17
3.4 Peittäus .....	18
3.4.2 Upotuspeittäus .....	18
3.4.3 Ruiskupeittäus .....	19

3.5 Korroosionkesto ja muut ominaisuudet .....	19
3.5.1 Korroosio-olosuhteet.....	19
3.5.2 Havaitut korroosionmuodot .....	20
3.5.3 Mekaaniset rasitukset.....	22
3.5.4 Valmistettavuus.....	23
4 RUOSTUMATTOMIEN TERÄSLAATUJEN VERTAILU .....	23
4.1 Terminen ja mekaaninen leikattavuus.....	23
4.1.2 Ruostumattomien terästen plasmaleikkaus .....	24
4.1.3 Ruostumattomien terästen mekaaninen leikattavuus .....	24
4.2 MUOKATTAVUUS .....	25
4.2.1 Taivutettavuus .....	26
4.2.2 Lastuttavuus .....	27
4.3 Mekaaninen kestävyys .....	29
4.4 Hitsattavuus.....	31
4.4.1 Austeniittinen perusaine.....	33
4.4.2 Ferriittinen perusaine .....	35
4.4.3 Austeniittis-ferriittinen perusaine .....	39
4.4.4 Martensiittinen perusaine .....	42
4.4.5 Eripariliitokset.....	44
4.5 Korroosionkesto ja peitattavuus.....	45
4.5.1 Korroosionkesto käyttöolosuhteet huomioon ottaen.....	46
4.5.2 Hitsausliitosten korroosioalttius.....	50
4.5.3 Peitattavuus .....	52
4.6 Saatavuus ja hinta.....	53
4.6.1 Eri laatujen saatavuus.....	53
4.6.2 Ruostumattomien terästen hinta .....	55
4.6.3 Valmistuskustannukset.....	56

5 RUOSTUMATTOMIEN TERÄSLAATUJEN SOVELTUVUUS YRITYKSEN TUOTTEISIIN .....	57
5.1 Case 1: Muuntokartio .....	57
5.2 Case 2: Pyöreä kanava .....	59
5.3 Case 3: Kannake.....	60
6 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	61
7 JATKOTOIMENPITEET .....	63
8 YHTEENVETO .....	63

LÄHTEET

LIITTEET

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

%	prosentti
A <sub>5</sub>	tasavenymä
AAF	Alloy Adjustment Factor, seosainelisä
C	hiili
CCT	Critical Crevice Corrosion Temperature, kriittinen rakokorroosiolämpötila
cot $\alpha$	kotangentti kulmasta alfa
CPP	Critical Pitting Potential, kriittinen pistekorrosiopotentiaali
CPT	Critical Pitting Temperature, kriittinen pistekorrootiolämpötila
Cr	kromi
CRE	Crevice Resistance Equivalence, rakokorroosioekvivalentti
Cu	kupari
F	voima
g	gramma
HAZ	Heat Affected Zone, muutosvyöhyke
HB	Brinell-kovuus
HRC	Rockwell-kovuus
KFF	Kaltenhauser Ferrite Factor, Kaltenhauserin ferriittitekijä
kJ/mm	lämmöntuonti hitsauksessa, kilojoulea / millimetri
max	maksimiarvo
min	minuutti
ml	millilitra
mm	millimetri
Mn	mangaani
Mo	Molybdeeni
MPa	megapascal
N	typpi
Nb	Niobi
Ni	nikkeli
°C	celsius-aste
pH	liuoksen happamuusaste
PRE	Pitting Resistance Equivalence, pistekorrosioekvivalentti
r	särmätyn kulman sisäsäde
R <sub>i/s</sub> -suhde	taivutuksen sisäsäteen suhde levyn paksuuteen
R <sub>m</sub>	murtolujuus
Si	pii
t	levyn vahvuus
Ti	Titaani
TTT	Time-Temperature-Transformation diagram, S-käyrä
v <sub>30</sub>	lastuamisnopeus tietyillä parametreillä, jolla lastuava terä kestää 30 min

# **1 JOHDANTO**

Ab Jet-Steel Oy valmistaa ruostumattomia tuotteita jo usean kymmenen vuoden kokemuksella. Tuotteet ovat olleet lähes aina austeniittista ruostumatonta terästä ja tällä hetkellä teollisuudessa siirrytään yhä enemmän muihin laatuihin. Ruostumattomia teräslaatuja on olemassa useita kymmeniä, jopa satoja, ja laatuojen välillä on tietysti suuria eroavaisuuksia niin hinnassa, muovattavuudessa, hitsattavuudessa kuin korroosionkestossakin.

## **1.1 TYÖN TAVOITE JA RAJAUS**

Tämän kandidaatin työn tavoite on kartoittaa, voiko yritys käyttää tuotteissaan jotakin muuta kuin austeniittista ruostumatonta terästä, joka olisi hinnaltaan vakaampaa ja jopa halvempaa valmistuksen vaikeutumatta, saatavuuden huonontumatta tai tuoteominaisuuksien merkittävästi kärsimättä. Selvitystyöllä pyritään myös syventämään yrityksen tietotaitoa erilaisten ruostumattomien terästen ominaisuuksista sekä käytännön sovelluksista.

Tuotteiden kannalta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat hitsattavuus, korroosionkesto ja mekaaninen työstettävyys. Lisäksi materiaalien tulee olla helposti saatavilla. Raportissa tarkastellaan ruostumattomia teräksiä yleisesti sekä pureudutaan jokaisen laadun ominaisuuksiin painottaen yrityksen tarpeita.

## **1.2 YRITYSESITTELY**

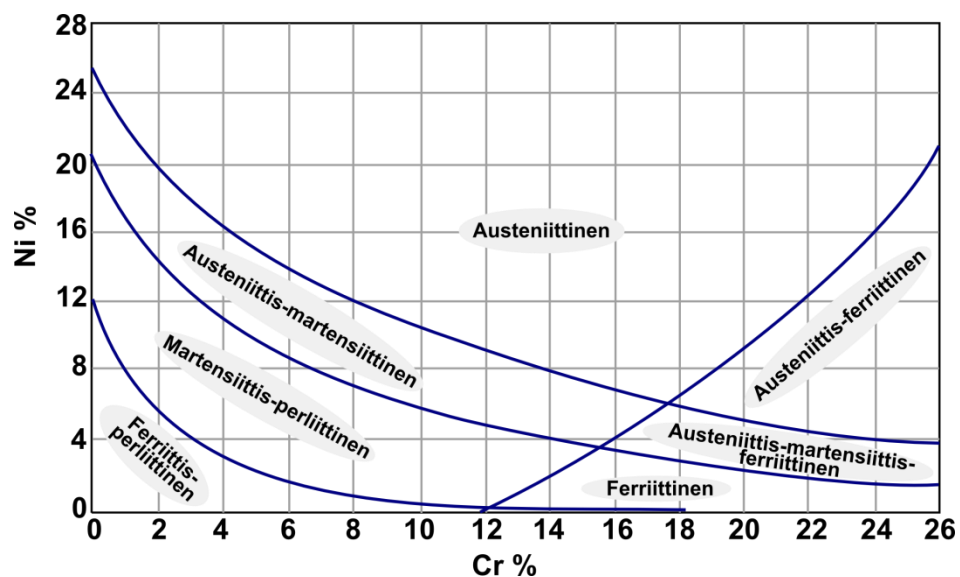
Ab Jet-Steel Oy on Valkealassa sijaitseva hitsaava konepaja, joka on erikoistunut ruostumattomiin ja haponkestäviin teräksiin. Myös alumiinituotteet kuuluvat yrityksen erityisosaamiseen. Yrityksessä työskentelee noin 25 työntekijää täyspäiväisesti. Tuotanto koostuu pääosin ohutlevytuotteiden valmistuksesta ja asennuksesta teollisuuteen. Tuotteet sisältävät usein myös paksumpaa levyä, putkimateriaaleja sekä latta- ja kulmatankoja. Tällä hetkellä ylivoimaisesti suurin osa tuotteista valmistetaan austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä.

## 2 RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Ruostumaton teräs tarkoittaa rautaseosta, johon on seostettu kromia niin paljon, että kromi muodostaa pintaan stabiilin passiivikalvon. Tämä raja on standardin EN 10088-1 mukaan 10,5 %. Lisäksi ruostumattomissa teräksissä on hiiltä vähemmän kuin 1,2 % ja niihin seostetaan yleensä lisäksi nikkeliä, molybdeeniä ja typpiä. Ruostumattomien terästen tärkeimpinä ominaisuuksina voidaan pitää:

- korroosionkestävyyttä
- esteettisyyttä
- palonkestävyyttä
- hygieenisyyttä
- erinomaista paino-lujuus-suhdetta
- täydellistä kierrätettävyyttä.

Ruostumattomia teräslaatuja on olemassa lukematon eri määrä, mutta ne voidaan jakaa neljään eri pääluokkaan: austeniittiset, austeniittis-ferriittiset, ferriittiset ja martensiittiset ruostumattomat teräkset. Joskus luokitteluun lisätään erkautuskarkaistavat ruostumattomat teräkset sekä austeniittiset ruostumattomat mangaaniteräkset. Kuvassa 1 on likimääräiset kromin ja nikkelin seosmäärät ja niiden vaikutuksesta syntyvä mikrorakenne. [3; 14; 18; 19]



Kuva 1. Nikkelin ja kromin vaikutus syntyvään mikrorakenteeseen. [47]

Nykyään ruostumaton teräs on erittäin suosittu rakennusmateriaali, jonka käyttö kasvaa koko ajan pinnoitettujen niukkaseosteisten terästen kustannuksella. Suurin osa, noin 60 %, ruostumattoman teräksen käytöstä keskittyy austeniittisiin laatuihin, joiden saatavuus on ylivertainen muihin laatuihin verrattuna. Lisäksi austeniittiset laadut ovat helpompia ja varmempia hitsata sekä niiden muovattavuus on erinomainen. [5; 19; 55]

Perinteinen austeniittinen ruostumaton teräs sisältää suhteellisen paljon nikkeliä, jonka hinta on vaihdellut viime vuosien aikana rajusti. Nikkelin hintaheilahtelu heijastuu suoraan austeniittisten laatuojen hintaan, joka johtaa esimerkiksi suurien toimitusten tarjouslaskelmien epävarmuuteen. Kuvasta 2 nähdään, että nikkelin hinta on heilahdellut viime vuosien aika rajusti, jopa 24 000 dollaria tonnilta noin vuoden aikana. Korkeimmillaan nikkelin hinta oli vuonna 2007 yli 55 000 dollaria tonnilta. Samaan aikaan kromin hinta pysyi muutaman tuhannen dollarin hintahaarukassa. [5; 35]



Kuva 2. Viimevuosien nikkelin hintaheilahtelu. [35]

Nykyaikainen teknologia ja tietotaito ovat ajaneet esimerkiksi Eurooppalaiset ruostumattoman teräksen valmistajat vahvistamaan myös ei-austeniittisten laatuojen valmistusta ja kehittämistä. Hintapolitiikka on painostanut yrityksiä ympäri maailmaa miettimään materiaaliominaisuuksien todellisen tarpeen ja usein huomataan, että kalliin austeniittisen laadun tilalle voidaan vaihtaa esimerkiksi halvempi ferriittinen tai kohteeseen paremmin sopiva austeniittis-ferriittinen laatu. Austeniittiset laadut ovat usein ylivoimaisia esimerkiksi korroosionkeston suhteen. [6; 35]



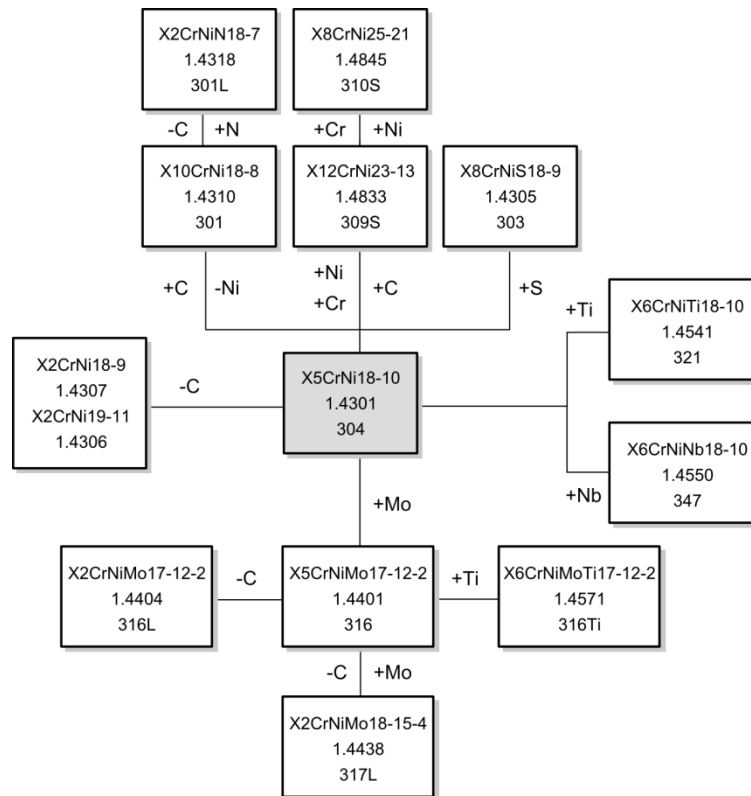
## 2.1 AUSTENIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Austeniittiset laadut sisältävät raudan ja kromin lisäksi nikkeliä. Yleensä niissä on noin 16 % - 20 % kromia, joka suosii ferriittistä kiderakennetta. Kuitenkin tarpeeksi suurella nikkelseostuksella, yli 6 %, teräs saadaan pysymään kokonaan austeniittisena riippumatta lämpötilasta. Austeniittiset ruostumattomat teräkset ovat ylivoimaisesti käytetyin luokka. Se johtuu monesta tekijästä, esimerkiksi:

- hitsaus on helpompaa kuin muiden laatuojen
- muovattavuus erinomainen
- sitkeys pysyy erittäin mataliin lämpötiloihin asti suurena
- saatavuus erinomainen
- korroosionkesto hyvä tai erinomainen
- on totuttu käyttämään austeniittisiä laatuja.

Austeniittisista ruostumattomista teräksistä voidaan nimetä kaksi laatua, joita käytetään enemmän kuin muita: EN 1.4301 (AISI 304) ja EN 1.4436 (AISI 316). Yksittäisistä laaduista on kehitetty seostuksen avulla paremmin tiettyihin sovelluksiin sopivia teräksiä. Esimerkiksi niin sanotut L-laadut (304L ja 316L) on kehitetty hitsauksessa esiintyvän herkistymisen ehkäisemiksi. Muutama vuosi sitten markkinoille ilmestyi yleiseen käyttöön tarkoitettuja vähänikkelisiä austeniittisiä laatuja, joissa austeniitin pisyvyys varmistetaan mangaaniseostuksella. Niiden käytössä on kuitenkin usein ilmennyt ongelmia esimerkiksi korroosionkestävyyden kanssa. On olemassa myös niin sanottuja suprausteniittisiä ruostumattomia teräksiä, joiden korroosionkestominaisuudet ovat erinomaiset. [3; 14; 19; 26; 60]

Austeniittisissa laaduissa on kuitenkin myös huonot puolensa: ne muokkauslujittuvat huomattavan paljon, joten lastuaminen on vaikeaa, ne ovat alttiita jännityskorroosiolle sekä hitsaus aiheuttaa paljon hitsausmuodonmuutoksia. Kuvassa 3 on esitetty miten yleiset austeniittiset laadut eroavat seostukseltaan toisistaan. [15; 60]

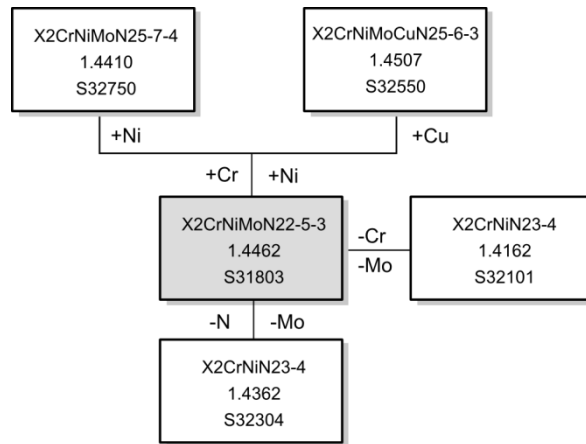


Kuva 3. Austeniittisten laatuojen kehittelypuu. [14]

## 2.2 AUSTENIITTIS-FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Austeniittis-ferritiittisistä teräksistä käytetään yleisemmin nimitystä duplex-teräkset. Ne ovat uusien ruostumattomien terästen ryhmä. Niiden mikrorakenteessa on austeniittia ja ferritiittä, vaihdellen 30–70 %:n välillä. Duplex-terästen käyttö on yleistynyt jonkin verran esimerkiksi pumppujen pesämateriaaleissa ja prosessiteollisuuden säiliöissä, koska niillä on paremmat piste- ja jännityskorroosio-ominaisuudet sekä myös paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin perinteisillä austeniittisilla tai ferritiittisillä ruostumattomilla teräksillä. Uusissa duplex-teräksissä nikkelpitoisuutta on pienennetty, joten ne ovat yleensä myös hyvin kustannustehokas vaihtoehto. [4; 14; 22; 47; 42]

Duplex-terästen käytöllä pyritään yleensä parantamaan rakenteen kestävyyttä vähentäen samalla painoa. Niiden hitsattavuus on hyvä, mutta kuitenkin hieman vaativampaa kuin austeniittisten laatuojen. Kuvassa 4 on kuvattu yleisimpien duplex-terästen kehittelypuu. Yleisimmin käytetty laatu on EN 1.4462. [6; 19]



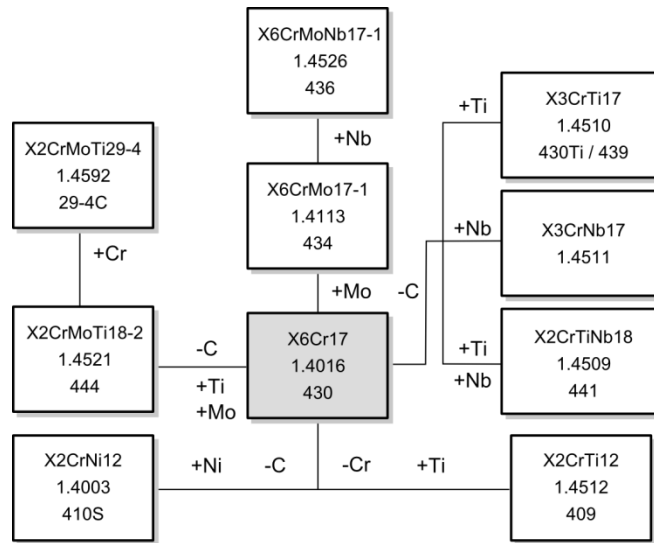
Kuva 4. Austeniittis-ferriittisten laatuojen kehittelypuu. [14]

### 2.3 FERRIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Ferriittiset ruostumattomat teräkset ovat mikrorakenteeltaan nimensä mukaisesti ferriittisiä. Ruostumaton teräs saadaan pysymään ferriittisenä, kun siihen ei seosteta kromin lisäksi nikkeliä (tai seostetaan hyvin vähän, alle 1 %). Yleinen käsitys ferriittisistä laaduista on, että ne ovat heikosti hitsattavia ja niiden hitsauksessa esiintyy runsaasti ongelmia. Eri terästuottajien kehitystyön tuloksena on kuitenkin syntynyt esimerkiksi titaanistabiloituja laatuja, joita voidaan nykyään luotettavasti hitsata. [14; 19; 42; 55]

Ferriittisiä ruostumattomia teräksiä pidetään usein myös korroosionkestävyydeltään suhteellisen heikkoina, mutta tälläkin osa-alueella on saatu kehitystä aikaan. Nykyään on olemassa laatuja, joilla voi olla mahdollisuus korvata yleisimmät austeniittiset laadut. Ferriittisten laatuojen fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet ovat kuitenkin lähempänä hiiliteräksiä kuin austeniittisiä laatuja. Tällä saavutetaan tiettyjä hyötyjä muun muassa muovattavuudessa; esimerkiksi ferriittisten laatuojen syväveto-ominaisuudet ovat paremmat kuin austeniittisillä laaduilla. [3; 5; 27; 42]

Ferriittisiä laatuja käytetään paljon esimerkiksi siltarakenteissa, tavaravaunujen runkorakenteissa ja esimerkiksi julkisten tilojen verhoiluissa. Ajoneuvojen pakoputket ovat myös yleinen käyttökohde. Käytetyin laatu on kromilevyksikin kutsuttu EN 1.4016. Kuvasta 5 nähdään, miten yleisimpien ferriittisten laatuojen seostus on kehittynyt. [27; 29; 58]

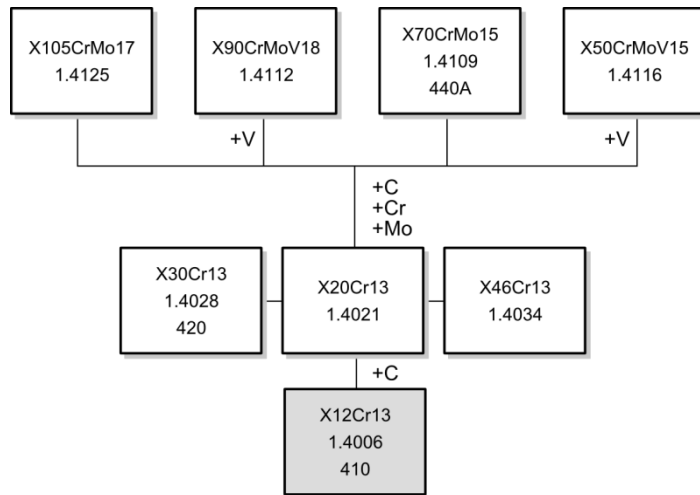


Kuva 5. Ferriittisten laatujen kehittelypuu. [14]

## 2.4 MARTENSIITTISET RUOSTUMATTOMAT TERÄKSET

Martensiittiset ruostumattomat teräkset ovat ainoa ruostumattomien terästen ryhmä, joka on karkaistavissa lämpökäsittelyllä. Niissä käytetään seosaineena pääosin kromia (yleensä noin 13 %), kuten ferriittisissä ruostumattomissa teräksissä, mutta niissä on yleensä myös suhteellisen paljon hiiltä. Martensiittisten laatujen lujuus on yleensä suuri ja ne ovat kovempia kuin muut laadut. Lisäksi ne ovat melko hauraita, joten niiden muovattavuus on suhteellisen heikko. [19; 41; 42]

Martensiittiset laadut voidaan seostuksen mukaan jakaa martensiittisiin ja martensiittis-austeniittisiin laatuihin. Molemmissa kategorioissa seoksilla on omat erityisominaisuudet ja käyttökohteet. Martensiittisiä ruostumattomia teräksiä käytetään esimerkiksi tavallisissa keittiövälineissä, mutta niistä valmistetaan myös erittäin vaativiin olosuhteisiin tarkoitettuja pumppujen ja turbiinien osia sekä esimerkiksi laivan akseleita. Niiden hitsaus on vaikeaa ja vaatii yleensä esi- ja jälkilämpökäsittelyjä. Martensiittisten laatujen kehittelypuu näkyy kuvassa 6. [3; 15; 22]



Kuva 6. Martensiittisten laatuojen kehittelypuu. [14]

### 3 YRITYKSESSÄ KÄYTETTÄVÄT TYÖMENETELMÄT JA TUOTTEILTA VAADITTAVAT OMINAISUUDET

Ab Jet-Steel Oy voidaan luokitella hitsaavaksi konepajaksi. Valmistus koostuu pääosin termisestä ja mekaanisesta leikkaamisesta, pyörityksestä, taivutuksesta ja hitsauksesta. Kappaleet viimeistellään koosta riippuen ruisku- tai upotuspeittaamalla.

Seuraavassa käydään läpi tarkemmin pääasiallisten työmenetelmien periaatteet ja niiden tuomat mahdolliset haasteet valmistuksen sekä materiaalin kannalta.

#### 3.1 TERMINEN JA MEKAANINEN LEIKKAUS

Tuotteiden valmistus aloitetaan yleensä levyosien leikkauksella. Levyt leikataan joko suuntaisleikkurilla tai hienosädeplasmaa käyttäen. Työmenetelmä riippuu leikattavan osan muodosta ja materiaalin paksuudesta. Pitkät tankoaihiot usein sahataan määrämittäisiksi.

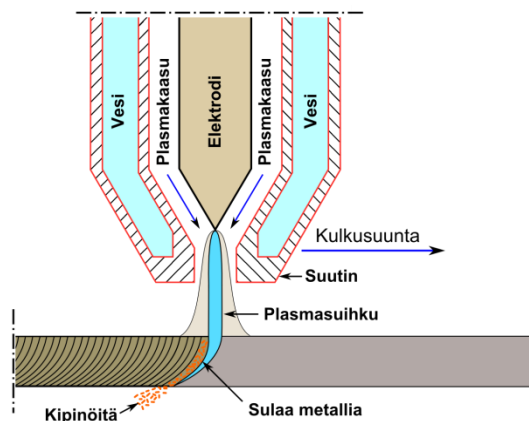
##### 3.1.1 Plasmaleikkaus

Plasmaleikkaus on sulaleikkausmenetelmä, jossa erittäin kuuman plasman lämpöenergian avulla sulatetaan leikattavaan materiaalin railo. Sula materiaali puhalletaan railosta pois plasman kineettisen energian avulla. Perinteinen

plasmaleikkaus on lähinnä karkeiden levyjen leikkausmenetelmä, jota käytetään esimerkiksi telakoilla. Menetelmä ei sovellu ohutlevyjen leikkaukseen huonon leikkausjäljen vuoksi. [40; 59]

Hienosädeplasmaleikkauksessa plasmasuihku keskitetään magneettivoimien tai kaasuvirtauksen avulla, jolloin leikkausrailo on kapeampi ja koko prosessi huomattavasti tarkempi. Sitä käytetään yleensä ruostumattomien terästen, alumiinien ja kuparimetallien leikkaukseen, koska tavallinen polttoleikkaus ei toimi näihin sovelluksiin. Hienosädeplasmaleikkausta käytetään myös ohuille niukkaseosteisille teräksille, koska sillä päästään suurempiin leikkausnopeuksiin kuin polttoleikkauksessa. Hienosädeplasmaleikkauksessa on myös polttoleikkausta pienempi lämmöntuonti, joten se vähentää muodonmuutoksia. [1; 43; 40; 59]

Plasmaleikkaus ei aseta leikattavalle materiaalille kovinkaan paljon rajoitteita, ainoastaan suoja- ja plasmakaasut vaihtelevat materiaalin ja materiaalipaksuuden mukaan. Esimerkiksi ohutta ruostumatonta terästä leikataan yleensä pelkällä paineilmalla, mutta paksuilla levyillä täytyy käyttää apuna tyypeä tai seoskaasua. Kuvassa 7 näkyy plasmaleikkauksen periaate. [40; 59]



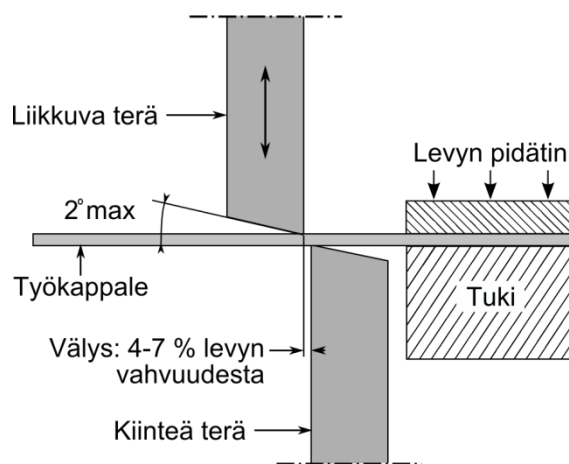
Kuva 7. Plasmaleikkauksen periaate. [14]

### 3.1.2 Mekaaninen leikkaus

Mekaaninen leikkaus on yksi nopeimmista ja helpoimmista tavoista irrottaa levyarkista määräkokoinen pala, liuska, raina tai nauha. Mekaanisen leikkauksen yleisin työväline on suuntaisleikkuri, jolla voidaan tavallisesti leikata materiaaleja aina 15 mm asti.

Muitakin laitesovelluksia on olemassa, esimerkiksi usein levytyökeskuksiin integroitu kulmaleikkuri. [1; 43]

Suuntaisleikkurissa yläterää säädetään materiaalin ja materiaalipaksuuden mukaan. Säädetävissä olevia leikkausparametreja ovat kitakulma, terien leikkausväli sekä yläterän kallistus (yläterän kallistus on kuitenkin yleensä vakio). Materiaalin ominaisuudet vaikuttavat leikkauksessa ilmeneviin ongelmiin: kappaleen kiertymiseen, taipumiseen ja tasokaareutumiseen. Näihin ongelmiin vaikuttaa kuitenkin niin moni muu parametri, että materiaaliominaisuuksien osuus on häviävän pieni. Kuvassa 8 on esitetty mekaanisen leikkauksen periaate. [1; 61]



Kuva 8. Mekaanisen leikkauksen periaate. [14]

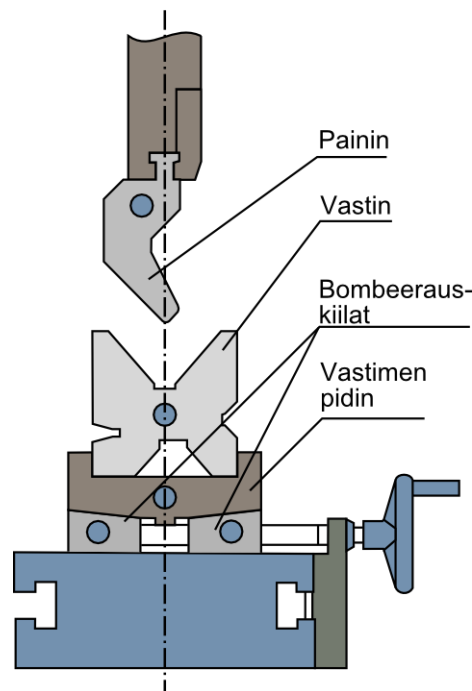
Myös lävistys voidaan luokitella mekaaniseksi leikkaukseksi. Lävistyksessä tietynmuotoisella pistimellä painetaan levyyn reikä. Levy painautuu lävistyksen alussa niin sanottua tyynyä vasten ja kun puristusta jatketaan, levystä leikkautuu pistimen muotoinen kappale irti. Lävistyksessä pistimen ja tyynyn väly määräytyy materiaalin ja sen paksuuden mukaan. [1; 43]

### 3.2 TAIVUTTAMINEN JA LASTUAVA TYÖSTÖ

Leikkauksen jälkeen levyosia yleensä muovataan mekaanisesti. Osia särmätään, pyöristetään sekä usein joudutaan poraamaan tai lävistämään reikiä. Joskus tuotteisiin tehdään myös kierteitä, mutta se on melko harvinaista.

### 3.2.1 Särmäys

Taivuttaminen tarkoittaa levyn tasomaista muovaamista. Kappaleiden taivutukseen on kehitetty useita erilaisia laitteita, esimerkiksi särmäyspuristin ja taivutuskone. Yleisimmin käytetty laite on särmäyspuristin, sillä se on erittäin joustava; siihen on helppo vaihtaa erikokoisia ja -muotoisia teriä sekä särmäyspuristimella voidaan valmistaa hyvin monimuotoisia kappaleita. Lisäksi laitteiden koot ja puristusvoimat vaihtelevat paljon ja niitä saa erilaisilla lisälaitteilla eri tarkoituksiin. Kuvassa 9 on esitetty särmäyksen periaate. [1; 39]



Kuva 9. Särmäyksen periaate. [24]

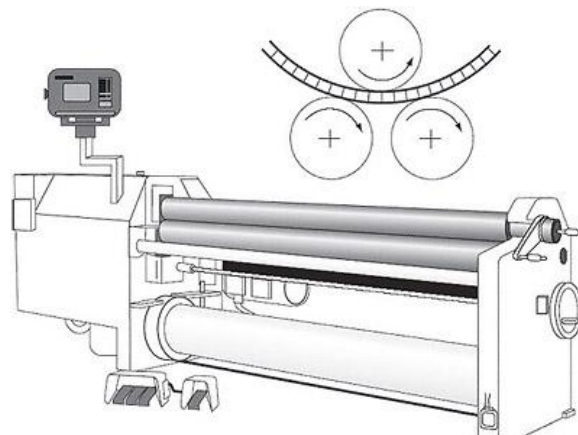
Särmäämisessä taivutus tapahtuu joko vapaana taivutuksena tai pohjaaniskutaivutuksena, joista ensimmäiseksi mainittu on ehdottomasti yleisempi tapa. Vapaassa taivutuksessa levyä taivutetaan kolmen pisteen välissä. Nämä kolme pistettä ovat painimen kärki ja vastimen uran reunapisteet. Särmättävän reunan geometria ei määräydy työkalujen muotojen, vaan työkalujen keskinäisen etäisyyden mukaan. Pohjaaniskutaivutuksessa levy puristetaan muotoiltujen työkalujen väliin. Kappale noudattaa tarkasti työkalujen geometriaa ja menetelmää käytetäänkin tarkkoihin ja korkealaatuisiin taivutuksiin. Voimantarve vapaataivutukseen verrattuna on 3 - 8 - kertainen. [1; 39]



Särmättäessä materiaaliin syntyy kimmoisia ja plastisia muodonmuutoksia. Taivutuskohtaan jää varsinkin vapaassa taivutuksessa sisäisiä jännityksiä, jolloin särmäyksen päätyttyä levyssä tapahtuu niin sanottu takaisinjousto. Takaisinjousto on yksi vaikeimmin hallittava tekijä taivutuksessa ja se aiheuttaa usein mittavirheitä kappaleisiin. Takaisinjouston suuruus määräytyy melkein yksinomaan materiaalin ominaisuuksista; myötölujuuden kasvaessa tai kimmomodulin pienentyessä takaisinjousto kasvaa. Muitakin vaikuttavia parametreja on, esimerkiksi taivutussäteen ja levynpaksuuden välisen suhteen  $r/t$  kasvaessa takaisinjousto kasvaa. [1; 24; 43]

### 3.2.2 Pyöristys

Pyöristyksessä, eli niin sanotussa mankeloinnissa, levyaihiota kuljetetaan telojen välissä, joiden asema toisiinsa nähden on sellainen, että levy taipuu. Yleensä pyöristystä ei tehdä yhdellä ajokerralla, vaan levyä ajetaan useita kertoja telojen välissä. Teloja on yleensä kolme tai neljä kappaletta, mutta erikoissovelluksiakin on olemassa. Kolmetelaisesta mankelista on esimerkki kuvassa 10.



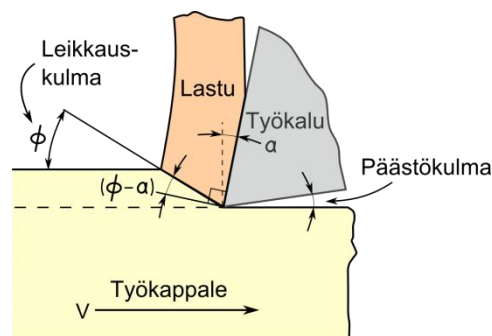
Kuva 10. Hyvin yleisesti käytetty kolmitelainen mankeli. [1]

Pyöristystä voidaan käyttää myös latta- ja kulmatankojen taivutukseen, jolloin käytetään niin sanottua muotorautamankelia. Muotorautamankelilla voidaan helposti valmistaa esimerkiksi erilaisia ja erikokoisia laippoja. Yleensä pyöristyksessä materiaalin muokkausaste jää suhteellisen pieneksi, joten se ei aseta materiaalille paljoakaan vaatimuksia. Erittäin lujien ja kovien materiaalien pyöristyksessä voi kuitenkin syntyä ongelmia. [1; 43]

### 3.2.3 Lastuava työstö

Lastuavalla työstöllä tarkoitetaan kappaleen muokkaamista poistamalla siitä materiaalia lastujen muodossa (kuva 11). Lastuavaksi työstöksi luetaan yleensä sorvaaminen, poraaminen, jyrsiminen ja kierteytys. [1]

Lastuava työstö on yksi valmistustekninen osa-alue, jossa materiaalilla on erittäin suuri merkitys kustannuksiin, työkaluihin ja lopputulokseen. Lastuttavuus riippuu lähes pelkästään materiaalin ominaisuuksista; esimerkiksi erittäin kovien tai merkittävästi muokkauslujittuvien materiaalien lastuaminen on yleensä ottaen hankalampaa kuin esimerkiksi tavallisen niukkaseosteisen teräksen. [33; 60]



Kuva 11. Lastuavan työstön periaate. [43]

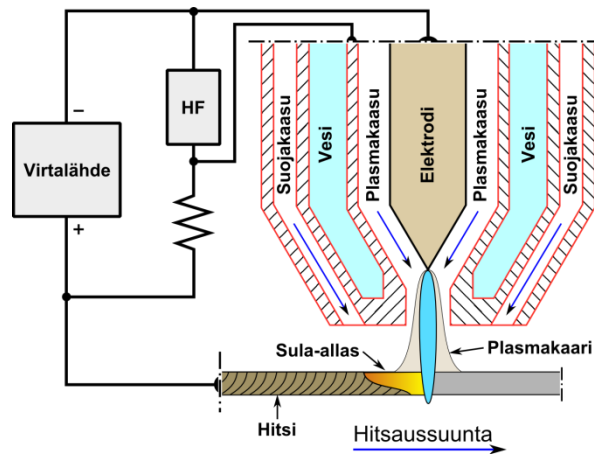
## 3.3 HITSAUS

Melkein kaikkiin yrityksen tuotteisiin käytetään jotakin hitsausmenetelmää. Käytetyimpiä hitsausprosesseja Ab Jet-Steel Oy:ssä ovat mekanisoitu plasmahitsaus ja MIG/MAG-hitsaus, mutta myös TIG- ja puikkohitsaus voivat olla vaihtoehtoisia prosesseja. Jokainen menetelmä on erilainen ja tuo valmistukseen omat hyvät ja huonot puolensa.

### 3.3.1 Plasmahitsaus

Plasmahitsaus on hitsausprosessi, jossa hitsauslämmönlähteenä on pääasiassa valokaaren muodostama plasma. Plasmahitsausprosessissa sähköenergia muutetaan plasmapatsaan kineettiseksi ja termiseksi energiaksi. Valokaari kuroutetaan jäädytetyn suuttimen läpi samalla puhaltaen siihen plasmakaasua. Näin sähköenergia saadaan

siirtymään tehokkaasti plasmakaasuun. Plasmahitsauksen periaate on esitetty kuvassa 12. [16; 36]



Kuva 12. Plasmahitsauksen periaate. [4]

Plasmahitsausta voidaan pitää prosessina, joka sijoittuu teholtaan sädehitsauksen ja tavallisten kaarihitsausprosessien väliin. Vaikka plasmakaaren lämpötila on kuumimmassa kohtaa hyvin korkea, jopa 20 000 °C, pysyy lämmöntuonti perinteisiä menetelmiä pienempänä. Tämä johtuu plasmakaaren keskittyneisyydestä ja yleensä suhteellisen suuresta hitsausnopeudesta. Plasmahitsaus mahdollistaa I-railon käytön suurillakin, jopa 12 mm, materiaalipaksuuksilla. Plasmahitsaus on yleensä mekanisoitua, koska silloin sen edut voidaan hyödyntää parhaiten. [32; 36]

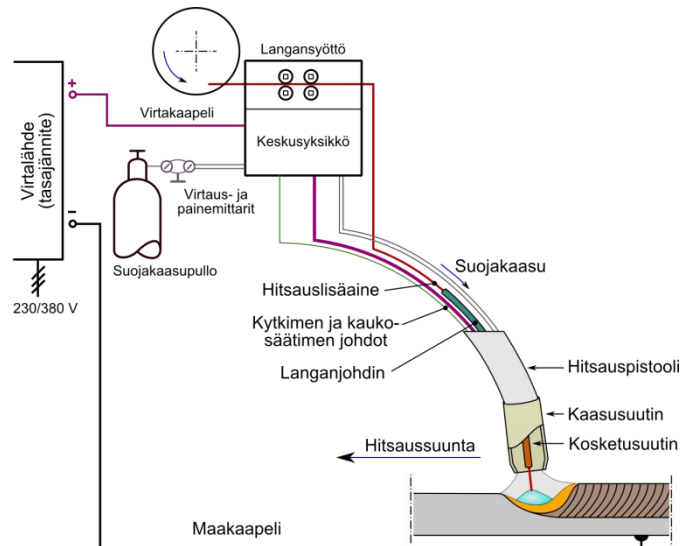
Plasmahitsaus soveltuu melkein kaikkien metallien hitsaukseen, mutta sitä käytetään lähes yksinomaan ruostumattomien terästen hitsaukseen yhdeltä puolelta, koska plasmahitsauksella on siinä saavutettavissa parhaat hyödyt. Sitä käytetään jonkin verran myös niukkaseosteisten terästen sekä vähäisesti myös alumiinin, titaanin ynnä muiden hieman harvinaisempien metallien hitsaukseen. Jos prosessissa käytetään lisäainetta, toimivat perinteiset MIG/MAG-prosessien lisäaineet myös plasmahitsauksessa. [29; 36]

Plasmahitsauksen etuina voidaan pitää erinomaista hitsin laatua, roiskeetonta hitsausta, matalaa ja juohevaa hitsikupua sekä esimerkiksi pieniä muodonmuutoksia. Haittoina voidaan pitää juurikaasun tarvetta sekä varsinkin ohuilla levyillä railon tarkkuutta ja prosessin hygieenisyyttä; hyvin pienet likapartikkelit voivat aiheuttaa hitsin reikiintymisen ja hitsauksen epäonnistumisen. Laitteistojen hankintahinnat ovat myös

hieman korkeammat kuin perinteisillä kaariprosesseilla, koska plasmahitsaus on, kuten jo mainittiin, yleensä mekanisoitu prosessi. [36; 43]

### 3.3.2 MIG/MAG- ja täytelankahitsaus

MIG/MAG- ja täytelankahitsaus ovat kaasukaarihitsausprosesseja, jossa valokaari palaa suojakaasun ympäröimänä lisäainelangan, umpinaisen tai täytelangan, ja perusmateriaalin välissä. MIG-hitsaus on hitsausta inertillä suojakaasulla ja MAG-hitsaus hitsausta aktiivisella suojakaasulla. MIG-hitsausta käytetään yleensä ei-rautametallien hitsaukseen ja MAG-hitsausta teräksiin. Aktiivisena suojakaasuna toimii yleensä hiilidioksidi ja inertti kaasu on puhdasta argonia tai argon-helium-seosta. Kuvassa 13 on esitetty MIG/MAG-hitsauksen periaate. [16; 36; 43]



Kuva 13. MIG/MAG-hitsauksen periaate. [14]

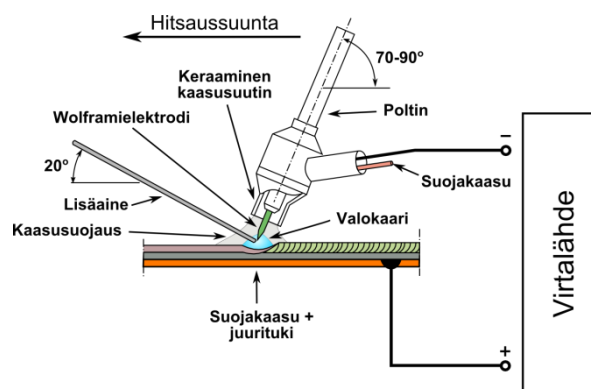
MIG/MAG-hitsaus on saavuttanut suuren suosion nykyaikaisessa hitsausmaailmassa. Sitä käytetään erittäin paljon niin manuaaliseen kuin automatisoituun hitsaukseen, koska lisäaine on jatkuvaa, prosessilla on hyvä tuottavuus, railonvalmistus ei ole kovinkaan tarkkaa sekä prosessilla on erittäin suuri käyttöalue; jopa alle millimetrin ohutlevyistä monien kymmenien millimetrien paksuisiin materiaaleihin. Prosessin heikkoutena voidaan pitää arkuutta vedolle sekä langansyötössä saattaa esiintyä jonkin verran ongelmia lisäaineen pienen halkaisijan vuoksi. MIG/MAG-hitsauksessa on helppo säätää virtaa ja jännitettä sekä niiden mukana tunkeumaa ja kokonaislämmöntuontia. [16; 36]

Nykyään on olemassa hyvin paljon erilaisia prosessivariaatioita, jotka helpottavat hitsaustapahtuman hallintaa. Uudet prosessisovellukset ovat yleensä kylmäkaariprosesseja ja ne vähentävät hitsauksessa syntyviä roiskeita. Ne on usein kehitetty helpottamaan erityisesti ohutlevyjen hitsausta. Näistä esimerkkeinä muun muassa Kemppi Oy:n kehittämä FastROOT™, Cloosin CP (Cold Process), Froniuksen CMT (Cold Metal Transfer) ja Lincolnin STT® (Surface Tension Transfer). Eräänlainen hitsausta helpottava ohjausjärjestelmä on myös ESAB Oy:n kehittämä QSet™, jolla on periaatteessa siirrytty askel lähemmäs adaptiivista prosessia. [12; 17; 20; 56]

MIG/MAG- ja täytelankahitsaus soveltuvat hyvin niukkaseosteisten, seostettujen ja ruostumattomien terästen hitsaukseen sekä alumiinin, kupari- ja nikkeliseosten hitsaukseen. Lisäaineita on nykyään hyvin paljon erilaisia eri metallilaaduille. [16; 36]

### 3.3.3 TIG-hitsaus

TIG-hitsauksessa valokaari synnytetään sulamattoman wolframielektrodin ja työkappaleen väliin. Suojakaasuna käytetään aina inerttiä kaasua, yleensä puhdasta argonia. Valokaaren lämpöenergia sulattaa perusainetta ja hitsauslisäainetta, jos sellaista käytetään. TIG-hitsaus on hyvin rauhallinen ja puhdas hitsausprosessi ja se on yleensä käsinhitsausta. Kuvassa 14 on esimerkki TIG-hitsauksesta käsin. Myös TIG-hitsaus on helposti mekanisoitavissa. [5; 16]



Kuva 14. TIG-hitsauksen periaate. [14]

TIG-hitsaus soveltuu kaikkien hitsattavien metallien hitsaukseen. Ainepaksuudet vaihtelevat noin puolesta millimetristä kuuteen millimetriin. Prosessin terminen hyötysuhde on melko pieni, koska valokaari on laakea eikä sitä kuristeta mitenkään.

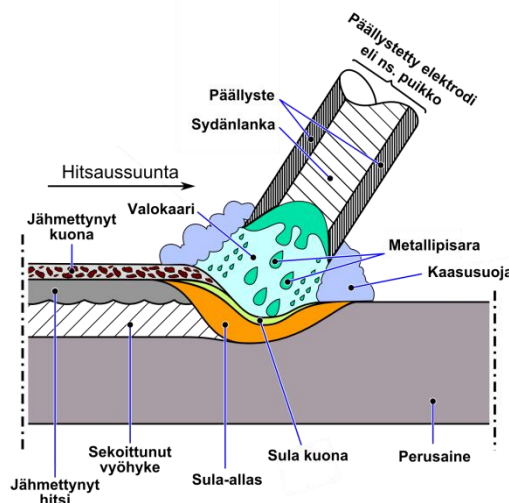
Vaikka terminen hyötysuhde on pieni, lämmöntuonti on yleensä melko suuri johtuen hitaasta hitsausnopeudesta, varsinkin käsinhitsauksessa. [36]

Virtalaji valitaan TIG-prosessissa perusaineen mukaan. Yleensä käytetään tasavirtaa ja – napaa, mutta esimerkiksi alumiinille käytetään vaihtovirtaa, jotta oksidikalvo saadaan puhdistettua + navan vaikutuksella. TIG-hitsausta käytetään ohuiden ruostumattomien terästen hitsaukseen, paksujen kohteiden pohjapalkoihin sekä esimerkiksi kohteisiin, joissa vaaditaan metallurgisesti puhdas hitsi. [16; 43]

Etuja prosessissa ovat muun muassa sulan ja tunkeuman hyvä hallinta, prosessin kätevyys sekä esimerkiksi hyvänmuotoinen ja -laatuinen hitsi. Heikkoutena voidaan pitää hitsausnopeutta sekä sen kautta tulevaa suhteellisen korkeaa lämmöntuontia. [36]

### 3.3.4 Puikkohitsaus

Puikkohitsauksessa valokaari palaa lisäaineen, eli puikon, ja työkappaleen välillä. elektrodina toimiva puikko sulaa hitsaustapahtuman aikana ja se joudutaan vaihtamaan hyvin usein. Sulaessaan puikon päällyste muodostaa suojaavan kaasuatmosfääriin hitsaustapahtumalle, päällyste jähmettyy kuonaksi jäähtyvän hitsin päälle ja suojaa näin metallia hapettumasta (kuva 15). [16; 36]



Kuva 15. Puikkohitsauksen periaate. [28]

Puikkohitsausta käytetään nykyään lähes yksinomaan korjaushitseihin sekä asennustyömaalla tapahtuviin hitsauksiin, koska sen liikuteltavuus on helppoa ja ulottuvuus erinomainen. Lisäksi sitä voidaan käyttää kohteissa, joihin ei esimerkiksi ahtauden takia päästä muilla menetelmillä. Huonon tuottavuuden vuoksi puikkohitsaus

on valmistavissa konepajoissa nykyään kuitenkin vähäistä. Se on hyvin hidasta ja lämmöntuonti kohtalainen, mutta kuitenkin se on korvaamaton menetelmä tietyissä kohteissa. [16; 36]

Puikkohitsaukseen on olemassa satoja eri puikkoja eri metalleille ja erilaisiin kohteisiin. Se soveltuu erinomaisesti kaikenlaisten terästen hitsaukseen sekä sitä käytetään myös ei-rautametalleille, yleensä kupari- ja nikkelseoksille. Myös valurautojen hitsaus on yleensä puikkohitsausta. Sillä on monia etuja, esimerkiksi monipuolisuus ja joustavuus, toimivuus kaikissa olosuhteissa, hyvä hitsin laatu sekä hitsauslaitteiston yksinkertaisuus. Heikkoutena voidaan pitää huonoa mekanisoitavuutta, tuottavuutta sekä lisääneiden arkuutta kosteudelle. [16; 36]

### **3.4 PEITTAUS**

Kuten jo alussa mainittiin, yrityksen tuotteet yleensä peitataan. Suurin osa peittauksesta tapahtuu upotuspeittauksena. Peittaus muodostaa erittäin tärkeän osan tuotteiden viimeistelyä, koska sillä varmistetaan tuotteiden korroosionkestävyys sekä hyvä ulkonäkö.

Peittaus tarkoittaa metallin pinnalle jäävien oksidien ja metallisten epäpuhtauksien poistoa hapolla. Osa epäpuhtauksista liukenee happoon, osa saadaan puhdistettua vedynkehityksen avulla. Peittauhappoina käytetään rikki-, suola-, fosfori-, typpi- ja fluorivetyhappoa sekä näiden seoksia. Peittauksen jälkeen kappaleet pestään huolellisesti ja ne passivoidaan joko erityisellä passivointiliuoksella tai kappaleiden pintaan annetaan muodostua passiivikerros ulkoilmassa. Passivointiliuoksella (yleensä typpihappo-vesi-seos) saavutetaan nopeammin paksumpi suojaava oksidikerros kuin ilmassa tapahtuvalla passivoinnilla. Yleensä peitattaviksi materiaaleiksi luetaan ruostumattomat teräkset sekä alumiinit, mutta myös tavallisia niukkaseosteisia teräksiä peitataan (tosin teräslevyjen valmistuksen aikana). Jokaiselle materiaaliryhmälle on omat peittausaineensa. [13; 53; 59]

#### **3.4.2 Upotuspeittaus**

Upotuspeittauksessa valmistetut rakenteet upotetaan kokonaisuudessaan niin sanottuun happoaltaaseen. Kappaleiden annetaan olla altaassa kymmenestä minuutista muutamaan

tuntiin, riippuen tuotteen materiaalista ja peittausliuoksen väkevyydestä, jonka jälkeen ne pestään huolellisesti. Peittauksen aikana liuosta yleensä kierrätetään pumpuilla ja happoa voidaan myös lämmittää prosessin nopeuttamiseksi. Uputuspeittauksella saavutetaan peittausmenetelmistä paras ja tasaisin laatu, mutta tuotteet on suunniteltava niin, että ne soveltuvat upotuspeittaukseen. [10]

### 3.4.3 Ruiskupeittaus

Ruiskupeittauksessa peittausliuos ruiskutetaan kappaleen pinnalle tasaisesti erikoisvalmisteisilla peittausruiskuilla. Liuoksen annetaan vaikuttaa 15 minuutista pariin tuntiin riippuen peitattavasta materiaalista ja ruiskupeittausaineesta. Lopuksi peittausaine pestään pois ja kappaleet huuhdellaan huolellisesti vedellä. [10]

## **3.5 KORROOSIONKESTO JA MUUT OMINAISUUDET**

Yrityksen tuotteilta vaaditaan tietynlaisia erityisominaisuuksia, jotta ne toteuttavat niille asetetut vaatimukset. Ylivoimaisesti suurin osa tuotteista sijoittuu paperi- tai muuhun teollisuuteen, joissa olosuhteet voivat olla hyvinkin vaihtelevia. Lisäksi tuotteilta vaaditaan nykyajan mukaista korkeaa laatua sekä siistiä ulkonäköä. Tuotteiden on tietysti kestävä myös niihin kohdistuva mekaaninen rasitus sekä ne on pystyttävä valmistamaan tehokkaasti ja taloudellisesti.

Pääasiallinen käyttökohde tuotteille on paperitehtailla olevien paperikoneiden ja niiden lisä- ja apulaitteiden ilmanvaihtokanavat. Kanavat voivat kuljettaa ulkoilmaa sisäänpäin tai sisäilmaa ulospäin. Suuri osa kanavista sijoittuu paperitehtaan sisälle ja osa jopa paperikoneen huuvan sisälle.

### 3.5.1 Korroosio-olosuhteet

Tuotteet joutuvat hyvin eriasteisille korroosio-olosuhteille, kuten edellä mainittiin. Korrosoivat olosuhteet voivat vallita kanavan sisä- tai ulkopuolella. Esimerkiksi kun paperikoneen huuvan sisältä poistetaan kuumaa, kosteaa ilmaa, korroosio vaikuttaa pääasiassa kanavan sisäpintaan. Jos taas tuodaan raitista ilmaa huuvan sisään, korrosoivat olosuhteet vaikuttavat lähinnä kanavan ulkopintaan. Lisäksi kanaviin saattaa



kasautua likaa, joka aiheuttaa suotuisat olosuhteet erilaisille korroosimuodoille. [9; 31; 50]

Lämpötila ja kosteus ovat tärkeimpiä parametreja korroosio-olosuhteiden arviointiin. Käyttökohteessa lämpötila voi vaihdella talven noin  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :sta huuven sisäpuolella olevaan noin  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ :seen. Kosteus voi vaihdella erittäin rajusti riippuen sijaitsevatko kanavat paperikoneen märässä vai kuivassa päässä. Yleensä samaan kanavaverkkoon kohdistuu hyvinkin erilaisia lämpötiloja ja kosteuspitoisuuksia riippuen minkäläisten tilojen läpi kanavat kulkevat. [31; 50]

Paperinvalmistuksessa käytetään hyvin paljon vettä ja erilaisia kemikaaleja, jotka pääsevät höyryinä ja huuruina ilmanvaihtokanaviin ja tiivistyvät niihin. Jo pelkkä suuri kosteus aiheuttaa korroosiolle suotuisat olosuhteet, jonka lisäksi paperikoneen ilmanvaihtokanavissa on yleensä suhteellisen matala pH, koska paperikonevesien pH on matala (4,5 – 6). Kanavat altistuvat pääosin samoille kemikaaleille, joita paperikonevesien mukana kulkeutuu. Näitä ovat esimerkiksi:

- natriumsulfidi ( $\text{Na}_2\text{S}$ )
- natriumsulfaatti ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )
- natriumtiosulfaatti ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )
- natriumkloridi ( $\text{NaCl}$ )
- lipeä ( $\text{NaOH}$ )
- erilaiset sulfidit ( $\text{S}^{2-}$ )
- erilaiset kloridit ( $\text{Cl}^-$ ),

joista kloridit ja natriumtiosulfaatti aiheuttavat eniten ongelmia jo hyvin pieninä pitoisuuksina. [11; 31]

Tarkempia tietoja kanavissa liikkuvista kemikaaleista ei voida tähän kandidaatintyöhön merkitä salassapitosyiden vuoksi. Jokaisessa paperitehtaassa paperinvalmistukseen käytetään tietynlaatuista pastaa, jonka koostumus on liikesalaisuus.

### 3.5.2 Havaitut korroosimuodot

Teollisuuden ilmanvaihtokanavissa on havaittu esiintyvän korroosiota monessa eri muodossa. Yleisimmät korroosimuodot niissä ovat:

- galvaaninen korroosio (ruostumaton teräs jalompi metalli)
- paikallinen korroosio
  - pistekorroosio
  - rako- eli piilokorroosio
- jännitystilän ja korroosion yhteisvaikutus
  - jännityskorroosio
  - korroosioväsyminen
- edellisten yhteisvaikutus. [9; 31; 50]

Lisäksi ruostumattomilla teräksillä esiintyy raerajakorroosiota ja yleistä korroosiota, joka on kuitenkin hyvin vähäistä. Raerajakorroosiossa ruostumaton teräs niin sanotusti herkistyy (esiintyy yleensä hitsatuissa ja lämpökäsitellyissä rakenteissa), jolloin kromi yhdistyy hiilen kanssa kromikarbidiksi ja suotautuu raerajoilla. Tällöin karbidin viereen jää kromiköyhä vyöhyke, joka saattaa syöpyä. Yleisellä korroosiolla tarkoitetaan materiaalin tasaista syöpymistä, esimerkiksi helposti havaittavaa raudan ruostumista. Yleistä korroosiota esiintyy ruostumattomilla teräksillä hyvin harvoin, lähinnä väkevien happojen varastointisäiliöissä. [29; 31]

Galvaanisella korroosiolla tarkoitetaan kahden metallin välisen potentiaalieron aiheuttamaa syöpymistä. Jalompi metalli (suurempi elektrodipotentiaali) toimii tällöin katodina ja epäjalompi metalli anodina, joka syöpyy. Galvaanisen parin syöpymiskäyttäytymistä voidaan arvioida galvaanisen potentiaalisarjan mukaan (liite 1). Sen avulla voidaan päätellä esimerkiksi, että sinkityt ruuvit, aluslevyt ja mutterit syöpyvät käytettäessä niitä kosteissa olosuhteissa ruostumattoman teräksen kanssa. Galvaanista paria voidaan myös hyödyntää korroosionestossa, kuten esimerkiksi laivoissa olevaa sinkkianodia meriolosuhteissa. [31; 62]

Paikalliset korroosioauriot ovat yleisin ja eniten kustannuksia aiheuttava korroosimuoto paperiteollisuudessa. Pistekorroosio syntyy passiivikalvon paikallisesta heikkoudesta tai rikkoutumisesta. Tällöin kloridi-ioni (yleisin pistekorroosion aiheuttaja) pääsee tunkeutumaan metallipinnalle ja syövyttää metallia, jolloin syöpymäkohta varautuu positiivisesti ja imee itseensä lisää kloridi-ioneja. Pistekorroosiota pidetään vaarallisena korroosimuotona, koska käynnistyttyään syöpyminen on kiihtyvää ja sitä ei yleensä havaita kuin vasta syöpymän tunkeuduttua

materiaalin läpi. Pistesyöpyminen ei kuitenkaan usein tunkeudu massiivisten rakenteiden läpi, vaan pysähtyy tiettyyn syvyyteen. [11; 31; 62]

Rakokorroosio voidaan rinnastaa syntymistavaltaan ja etenemiseltään pistekorroosioon, tosin rakokorroosiota esiintyy paljon myös paikoissa, joissa ei ole klorideja. Rakokorroosiolla tarkoitetaan paikallista metallin syöpymistä kahden pinnan välissä, johon ei pääse hapen puutteen vuoksi syntymään suojaavaa passiivikerrosta. Rakokorroosiossa aktiivisen kohdan pinta-alasuhteeseen passiiviin pintaan on hyvin pieni, jolloin syntyy suuri potentiaaliero ja tapahtuu aktiivisen kohdan syöpymistä. Kloridi-ionien läsnäolo kiihdyttää syöpymistä huomattavasti. [31; 62]

Jännityskorroosio ja korroosioväsyminen syntyvät korroosion ja jännityksen yhteisvaikutuksesta. Jännityskorroosiossa materiaaliin syntyy pieniä halkeamia korroosion ja vetojännityksen yhteisvaikutuksesta. Tällöin materiaali voi murtua jo hyvin pienillä, reilusti alle myötörajan olevilla jännityksillä. Jännitykset voivat olla niin sisäisiä, esimerkiksi hitsauksesta tai muokkauksesta aiheutuneita, kuin ulkoisista kuormista johtuvia. Jännityskorroosion aiheuttama murtuma etenee yleensä äkillisinä askelrepeäminä. [31; 62]

Korroosioväsyminen on hieman samankaltainen ilmiö kuin jännityskorroosio, mutta siinä kuormitus on vaihtelevaa. Syöpymät materiaalin pinnalla aiheuttavat vaihtokuormituksen jännityshuippujen kasvun (lovivaikutus), jolloin materiaaliin syntyy helpommin väsymismurtuma. [31; 62]

### 3.5.3 Mekaaniset rasitukset

Kanavat liikuttavat suuria ilmamassoja ja ne joutuvat paineen tai alipaineen alaiseiksi. Niihin ei kuitenkaan oman painon lisäksi kohdistu merkittäviä rasituksia. Yleisin vaurioitumistyyppi kanavissa on tärinän aiheuttamat pienet säröt, jotka ydintyvät hitsien muutosvyöhykkeessä. Nämä säröt saattavat pitkän ajan kuluessa revetä hyvinkin suuriksi ja tehdä kappaleen käyttökelvottomaksi. Särön muodostumista voivat edistää erilaiset korroosionmuodot. [9; 50]

### 3.5.4 Valmistettavuus

Kanavien valmistusprosessi on suhteellisen yksinkertainen, mikä kävi ilmi työmenetelmiä esittäessä. Kanavien valmistettavuuden varmistamiseksi materiaalin tulisi olla:

- leikattavissa mekaanisesti ja termisesti ilman erikoistoimenpiteitä
- helposti taivutettavissa tavallisilla konepajan työvälineillä
- suhteellisen helposti lastuttavissa
- hitsattavissa ilman erikoistoimenpiteitä
- peitattavissa.

Jos materiaali täyttää nämä vaatimukset, voidaan sen todeta soveltuvan hyvin Ab Jet-Steel Oy:n tuotantoprosessiin. [9; 50]

## **4 RUOSTUMATTOMIEN TERÄSLAATUJEN VERTAILU**

Alussa huomattiin, että erilaisia ruostumattomia teräksiä on hyvin paljon eri käyttökohteisiin. Yleensä laatuja välillä on jokin selvä eroavaisuus, jonka avulla sopiva materiaali on suhteellisen helppo kohdentaa tiettyyn käyttökohteeseen. Materiaalien kehittyminen on kuitenkin tehnyt materiaalinvalintaprosessista hieman hankalamman, koska erilaatuisten raaka-aineiden ominaisuudet saattavat olla hyvinkin samanlaiset. Seuraavaksi vertaillaan eri laatuja välisiä eroja yrityksen kannalta tärkeistä näkökulmista.

### **4.1 TERMINEN JA MEKAANINEN LEIKATTAVUUS**

Erilaisten ruostumattomien terästen seosainepitoisuuksissa saattaa olla hyvin suuria eroja. Tämä johtaa laaduissa niin kemiallisiin, mekaanisiin kuin fysikaalisiin eroihin. Erot saattavat korostua joissain työmenetelmissä, mutta joidenkin menetelmien kohdalla edes suurilla eroilla ei ole merkitystä.

#### 4.1.2 Ruostumattomien terästen plasmaleikkaus

Plasmaleikkauksen kannalta seosainepitoisuuksien eroavaisuudet eivät aiheuta ongelmia, vaan plasmaleikkaus on hyvin tunteeton materiaalin laadulle, kuten jo aiemmin mainittiin. Plasmaleikkauslaitteiden valmistajat ilmoittavat leikkausparametritaulukoissaan yleensä vain kohdan ”Stainless Steel”, eikä taulukoissa erotella erilaatuisia ruostumattomia teräksiä. Tästä voitaneen päätellä, että eroavaisuudet eri laatujen plasmaleikkauksessa ovat pieniä. [29; 40]

Plasmaleikkaus aiheuttaa kappaleeseen hyvin korkean paikallisen kuumenemisen, mikä johtaa materiaalin muodonmuutoksiin. Muodonmuutosten suuruutta voidaan arvioida lämmönjohtavuuden ja pituuden lämpötilakertoimen avulla: mitä pienempi lämmönjohtavuus ja mitä suurempi pituuden lämpötilakerroin, sitä suurempia ovat vetelyt. Taulukosta 1 nähdään, että austeniittisissa laaduissa voidaan olettaa suurimmat muodonmuutokset ja ferriittisissä sekä martensiittisissä laaduissa pienimmät. Duplex-teräkset sijoittuvat näiden väliin. Taulukossa on vertailun vuoksi tavallinen hiiliteräs, jonka avulla nähdään, että ruostumattomat teräkset ovat yleisesti ottaen alttiimpia vetelyille. [32]

Taulukko 1. Eri pääluokkien fysikaalisia ominaisuuksia. [32]

Tyyppi	Magneettisuus	Lämmönjohtavuus 20 °C W/Km	Pituuden lämpötilakerroin 20-100 °C 10 <sup>-6</sup> 1/K	Kimmomoduuli 20 °C 10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>	Tiheys 20 °C g/cm <sup>3</sup>	Resistiivisyys 20 °C W mm <sup>2</sup> /m	Jähmettymisalue, jäähdytysnopeus 2,0 °C/s °C
Austeniittinen	ei	13-15	15-17,5	2	7,9-8,0	0,7-1,0	1420-1330
Ferriittinen	on	23-25	10-10,5	2,2	7,7	0,6-0,7	1500-1435
Austeniittis-ferriittinen	on	16	13	2	7,8	0,8	1465-1390
Martensiittinen	on	25	10,5	2,2	7,7	0,6-0,8	1497-1435
Hiiliteräs 0,1 % C	on	52-63	12	2,1	7,8	0,15	1514-1440

#### 4.1.3 Ruostumattomien terästen mekaaninen leikattavuus

Materiaalin mekaanista leikattavuutta arvioidessa huomioidaan yleensä kovuus ja murtolujuus. Yleisesti ottaen kaikki metallit ovat mekaanisesti leikattavissa tiettyyn rajaan asti, eikä laitteita erityisemmin erotella leikattavan materiaalin laadun perustella. Nykyisissä suuntaisleikkureissa terän oikea asemointi (leikkausväli ja kitakulma) käy helposti valitsemalla käyttöpaneelista oikea materiaali ja paksuus, joten levyjen

kovuuden ja murtolujuuden vaihtelu ei aiheuta manuaalisia asetustoimenpiteitä. Laitteissa on yleensä ainakin kolme perusasetusta: alumiini, hiiliteräs ja ruostumaton teräs. Yleisimmin käytetyille suuntaisleikkureille ruostumattomien terästen suurin suositeltu leikkauspaksuus on 12 mm laadusta riippumatta. [1; 43]

Erilaatuisten ruostumattomien terästen mekaanisessa leikkauksessa ei käytännössä ole juurikaan eroa. Ainoastaan laskennalliset leikkausvoimat eroavat kaavan 1 mukaisesti, koska eri laaduilla on erisuuret murtolujuudet. Syntyvä leikkauspinta eroaa laadusta riippuen hieman, mutta siltäkään ei ole yrityksen tuotteiden kannalta merkitystä. Austeniittiset laadut muokkauslujittuvat leikkauksen aikana huomattavasti, joka lisää voimantarvetta. Lisäksi austeniittisten laatuojen plastisesti muokkautunut pinta muuttuu paramagneettisesta magneettiseksi, koska leikkauspintaan syntyy martensiittia. Kaavalla 1 voi laskea teoreettisen leikkausvoimantarpeen saksileikkauksessa. [1]

$$F = \frac{s^2}{2} * \cot \alpha * 0,8 * R_m, \quad (1)$$

jossa  $s$  on levyn paksuus,  $\alpha$  on leikkauskulma ja  $R_m$  on leikattavan levyn murtolujuus. Esimerkkinä eri laatuojen teoreettisesta leikkausvoiman tarpeesta voidaan laskea yleisimpien laatuojen arvot, kun leikkauskulma  $2^\circ$  ja levyvahvuus 8 mm. Murtolujuudet löytyvät taulukosta 2. Kaavan avulla saadaan leikkausvoimiksi

- EN 1.4016 – ferriittinen laatu – voimantarve ~330 kN
- EN 1.4301 – austeniittinen laatu – voimantarve ~380 kN
- EN 1.4462 – duplex-teräs – voimantarve ~470 kN
- EN 1.4021 – martensiittinen laatu – voimantarve ~476 kN.

## 4.2 MUOKATTAVUUS

Muokattavuus on käsitteenä hyvin laaja. Materiaalin muokattavuutta voidaan alustavasti arvioida suoraan sen mekaanisten ominaisuuksien, kuten myötölujuuden, kovuuden ja murtovenymän, avulla. Lukujen perusteella ei kuitenkaan kannata tehdä suoraa johtopäätöksiä, vaan materiaalien lähempi tarkastelu on tarpeen.

Yrityksen tuotteissa olevat materiaalit eivät rasitu äärimmäisille rajoilleen, kuten esimerkiksi syvävedossa tai venytystaivutuksessa, eikä lastuttaessa puhuta esimerkiksi

maksimaalisista lastuvirroista, vaan tässä tapauksessa tuotteiden muokattavuudella tarkoitetaan normaalia särmäämistä, mankelointia, poraamista ja niin edelleen.

#### 4.2.1 Taivutettavuus

Taivutettavuuden arviointiin on olemassa useita erilaisia kokeita ja arvoja. Tavallisen vetokokeen tuloksista parhaiten muovattavuutta voidaan arvioida tasavenymän ja  $r$ -arvon (anisotropiaparametri) perusteella. Näitä arvoja ei kuitenkaan aina ilmoiteta, vaan materiaalin myötöraja, joka on yleensä tiedossa, on myös käyttökelpoinen arvo; mitä pienempi myötöraja, sitä helpompi taivuttaa. Taivutettavuuden arviointiin voidaan lisäksi käyttää kovuutta, joka ilmoitetaan metalleilla yleensä Brinell tai Rockwell -asteikolla; mitä kovempi materiaali, sitä vaikeampi taivuttaa. [39; 54]

Särmättävyyttä arvioidaan usein taivutuskokeen perusteella, jossa materiaali taivutetaan valssaussuuntaan nähden kohtisuorasti  $180^\circ$ . Taivutuskokeessa taivutussäde on nolla tai peruslaaduille yhtä suuri kuin levyn paksuus. Joskus puhutaan myös minimitaivutussäteestä, eli pienimmästä säteestä, jolla levyn särmä ei repeydy. Levyjen särmäyksen yhteydessä esiintyy usein termi takaisinjousto, joka vaikuttaa lähinnä särmäyksen onnistumiseen; mitä pienempi takaisinjousto, sitä helpompi on hallita monimutkaisten tuotteiden särmäminen. [1; 39]

Lisäksi särmättävyyttä voidaan arvioida käytännön kannalta tarvittavan taivutusvoiman avulla, koska taivutusvoima riippuu materiaalista ja käytettävistä työkaluista. Yleensä yrityksen tuotteissa vaaditaan suhteellisen jyrkkiä särmäyksiä ( $R_t/s$  -suhde 1-2), jolloin joudutaan käyttämään mahdollisimman pieniä V-uria. Jos materiaali on hyvin lujaa, saattaa konepajalla olevasta särmäyspuristimesta loppua voima tarvittavan säteen aikaansaamiseksi. Toinen mahdollinen ongelma on työkalujen pintapaineen kesto. Ainoa keino kompensoida tarvittava voima on vaihtaa suurempaan V-uraan, jolloin ei saada välttämättä syntymään vaadittavaa sädettä. [9; 50]

Taulukkoon 2 on koottu ruostumattomien terästen sekä tavallisen hiiliteräksen taivutettavuutta kuvaavia arvoja. Niistä nähdään, että duplex-terästen ja austeniittisten laatuojen monimutkaisten särmäysten hallinta on hankalaa suuren takaisinjouston vuoksi. Ferriittisten laatuojen takaisinjousto on lähempänä hiiliteräksen arvoja eli särmäys on siltä kannalta helpompaa. Martensiittiset laadut eivät ole yleensä tarkoitettu

taivutettavaksi. Voimantarve on austeniittisilla laaduilla ja duplex-teräksillä hieman suurempi kuin ferriittisillä laaduilla johtuen suuresta muokkauslujittumisesta.

Taulukko 2. Eri laatujen taivutettavuutta kuvaavat arvot. [54; 45]

Laatu	Myötölujuus [MPa]	Murtolujuus [MPa]	Murto-venymä	Minimitaivutus-säde (s > 1,0mm)	Takaisin-jousto	Suhteellinen voimantarve
Austeniittinen	250	650	55 %	1 x s	suuri	1
Ferriittinen	300	450	30 %	1 x s	pieni	0,8
Duplex / Lean Duplex	550 / 450	800 / 700	35 %	2,5 x s / 1 x s	suuri	1,5 / 1,25
Martensiittinen	800	1000	15 %	-	-	2

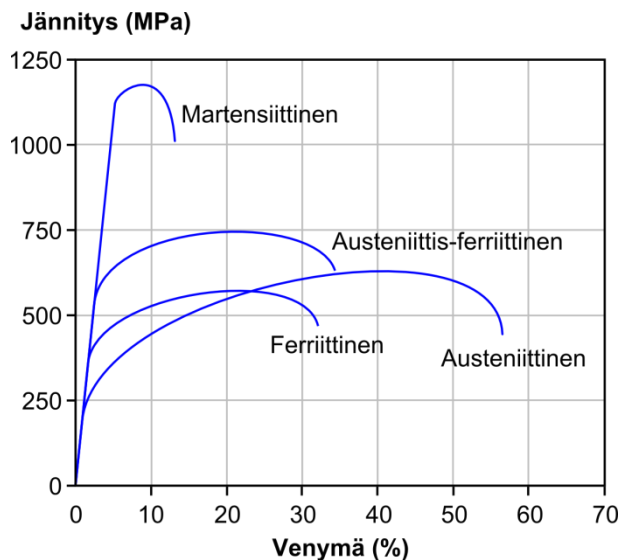
Minimitaivutussäteistä nähdään, että austeniittiset ja ferriittiset laadut ovat hyvin taivutettavissa pienilläkin säteillä ja ne voidaan usein taivuttaa myös nolla-säteellä eli täysin terävällä särmällä. Perinteisillä duplex-teräksillä minimitaivutussäteet ovat hieman suurempia, mutta uusilla vähänikkelisillä laaduilla päästään austeniittisten ja ferriittisten terästen tasolle. Yleisesti voidaan sanoa, että austeniittiset ja ferriittiset laadut sekä duplex-teräkset ovat hyvin taivutettavia, mutta martensiittisten laatujen taivutuksessa syntyy todennäköisesti ongelmia.

#### 4.2.2 Lastuttavuus

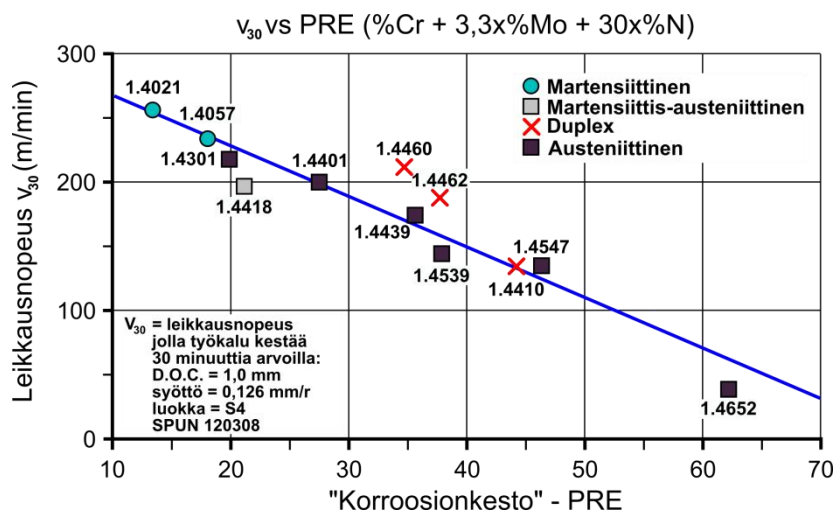
Ruostumattomien terästen lastuamista pidetään yleensä hankalana ja sitä se suurimmaksi osaksi onkin. Austeniittiset laadut muokkauslujittuvat huomattavasti, joten lastuamisarvojen ja käytettävien työkalujen on oltava oikeat. Lastuamisvoiman on todettu korreloivan hyvin materiaalin voima-venymä-käyrän alle jäävän pinta-alan kanssa. Lisäksi yleisemmin lastuttavuuden on osoitettu korreloivan suhteellisen hyvin ruostumattomien teräslaatujen PRE-luvun kanssa. [33; 41; 60]

Kuvassa 16 näkyvät kaikkien neljän pääluokan voima-venymä-käyrät, joiden perustella voidaan tehdä lastuttavuudesta joitakin johtopäätöksiä. Lisäksi kuvassa 17 on esitetty eri laatujen PRE-lukuja suhteessa lastuamisessa käytettävän  $v_{30}$ -luvun kanssa.





Kuva 16. Neljän pääluokan voima-venymäkäyrät. [34]



Kuva 17. Ruostumattoman teräksen lastuttavuus PRE-luvun funktiona. [60]

Ferriittisten terästen myötölujuus on yleensä noin 300 MPa, murtolujuus luokkaa 450 MPa ja murtovenymä ( $A_5$ ) pysyttelee noin 25 %:ssa. Kovuus on hehkutetussa tilassa noin 250 HB. Ferriittiset ruostumattomat teräkset eivät muokkauslujitu kovinkaan paljon, muodostuva lastu on hauras ja sen murtamiseen tarvittava energia pysyy pienenä. Voidaankin yleisesti sanoa, että ferriittisten ruostumattomien terästen lastuaminen ei eroa kovinkaan merkittävästi hiiliterästen lastuamisesta ja usein käytetään samoja työkaluja ja työstöarvoja kuin tavallisille hiiliteräksille. [33]

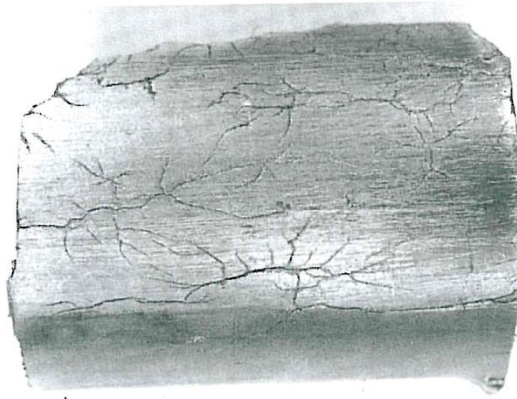
Austeniittisten terästen kovuus sekä myötöraja ovat hieman pienempiä, noin 200 HB ja 250 MPa, kuin ferriittisten laatuojen, mutta murtolujuudet ovat paljon suurempia, noin 650 MPa. Murtovenymä on erittäin suuri, 40 - 60 %, ja austeniittiset laadut muokkauslujittuvat huomattavasti (esimerkiksi 40 % reduktioasteella myötölujuus on jo noin 1000 MPa). Suuresta sitkeydestä ja muokkauslujittumisesta johtuen lastuaminen on hankalaa ja lastun irrottamiseen tarvittava energia suuri. Lisäksi austeniittisilla laaduilla on heikko lämmönjohtavuus, joten lämpö ei pääse johtumaan lastuavasta särmästä kappaleeseen niin tehokkaasti kuin esimerkiksi ferriittisillä laaduilla. [33]

Duplex-teräksien lastuaminen on verrattavissa austeniittisten laatuojen lastuamiseen, koska austeniitti dominoi lastuamistapahtumaa. Duplex-terästen myötö- ja murtolujuudet ovat hieman korkeampia kuin austeniittisilla laaduilla, mutta vastaavasti murtovenymä pysyy pienempänä, joka pienentää lastun irrottamiseen tarvittavaa energiaa. [33]

Martensiittiset laadut ovat usein hyvin lujia, mutta niiden sitkeys on huono ( $A_5$  noin 10 - 15 %). Myötölujuus voi olla hyvinkin suuri, jopa yli 800 MPa. Karkaistuna martensiittiset laadut voivat olla erittäin kovia (60 HRC eli noin 650 HB), mutta pehmeäsihekkutettuina niiden kovuus on ferriittisten laatuojen luokkaa. Martensiittisille laaduille tarvitaan siis suhteellisen suuret lastuamisvoimat, mutta lastut katkeavat kuitenkin helposti, joten niiden lastuaminen on lähes yhtä helppoa kuin ferriittisten laatuojen. [33]

#### **4.3 MEKAANINEN KESTÄVYYS**

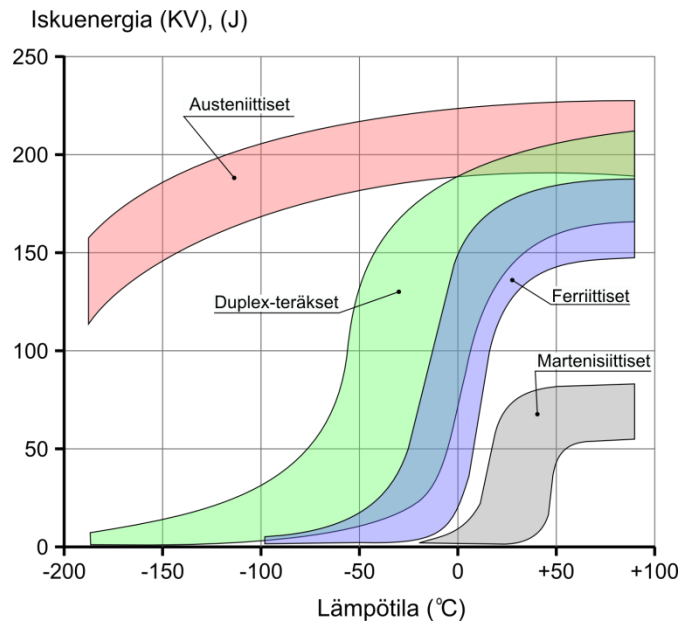
Kanaviin ei kohdistu oman painon lisäksi suuria staattisia rasituksia, kuten jo aiemmin mainittiin, joten eri laatuojen kimmomodulilla, myötö- tai murtolujuudella ei ole merkitystä. Kanavat tai kanavien kannakkeet eivät ole tiettävästi milloinkaan vaurioituneet normaalissa käytössä liian pienen myötölujuuden vuoksi. Tilanteet, joissa kanavat ovat revenneet tai lommahtaneet, johtuvat yleensä asennuksessa tapahtuvista virheistä. Lisäksi yhden mainittavan ongelman muodostavat värinöistä aiheutuvat säröt, jotka yleensä ydintyvät hitsien muutosvyöhykkeeltä. Säröjen muodostumiseen vaikuttaa usein myös korroosion ja jännityksen yhteisvaikutus, jolloin materiaaliin voi syntyä selvä, näkyvä särökenttä (kuva 18). [9; 50]



Kuva 18. Jännityskorroosion aiheuttama säröily ruostumattomassa putkessa. [44]

Materiaalin sopivuutta tuotteeseen ei siis arvioida mekaanisen kestävyuden perusteella, koska voidaan olettaa, että kaikilla ruostumattomilla teräksillä on riittävän suuri myötö- ja murtolujuus (kimmomoduli ei vaihtele paljoakaan eri laatujen välillä). Jännityskorroosioauriot käydään perusteellisemmin läpi kohdassa 4.5.1 Korroosionkesto käyttöolosuhteet huomioon ottaen.

Ainoa ongelma, joka saattaa esiintyä alimmissa käyttölämpötiloissa (noin  $-30^{\circ}\text{C}$ ) on eri laatujen iskutkeys. Kuvasta 19 nähdään, että ei-austeniittisilla laaduilla esiintyy transitiolämpötila, joka voi esiintyä martensiittisillä laaduilla jo huoneenlämpötilassa. Kuvan transitiolämpötila-alueet ovat periaatteellisia, eivätkä välttämättä vastaa uusimpien laatujen ominaisuuksia. Erityisesti hitsatut rakenteet ovat alttiita haurasmurtumille, joten tässä työssä iskutkeyden käsittely keskittyy hitsausliitosten tarkasteluun (käsitellään tarkemmin kohdassa 4.4 Hitsattavuus). Transitiolämpötilaa saadaan laskettua ferriittisissä laaduissa, kun rakenteen hiili- ja tyypipitoisuudet pidetään erittäin alhaisina (esim.  $C + N = \max 0,03 \%$ ). Näitä rajoja on sovellettu useimmissa ferriittisissä laaduissa, jolloin transitiolämpötila saadaan suhteellisen alas, duplex-teräksien kanssa lähes samalle tasolle. Duplex-terästen alin suositeltu käyttölämpötila on  $-40 \dots -50^{\circ}\text{C}$ . [22; 34]



Kuva 19. Eri pääluokkien periaatteelliset transitiolämpötila-alueet. [34]

#### 4.4 HITSATTAVUUS

Hitsattavuus on yksi tärkeimmistä tuotteilta vaadittavista ominaisuuksista, joten siihen perehdytään hieman syvemmin kuin aiemmin käsiteltyihin asioihin. Tuotteiden hitsit eivät yleensä ole voimaliitoksia, vaan lähinnä sidontahitsejä, eli ne eivät kannu suuria rasituksia. Hitsit altistuvat samalla tavalla korroosiolle, kuin kanavien muutkin osat. Hitsien korroosionkestävyys käsitellään erikseen kohdassa 4.5.2 Hitsausliitosten korroosioalttius.

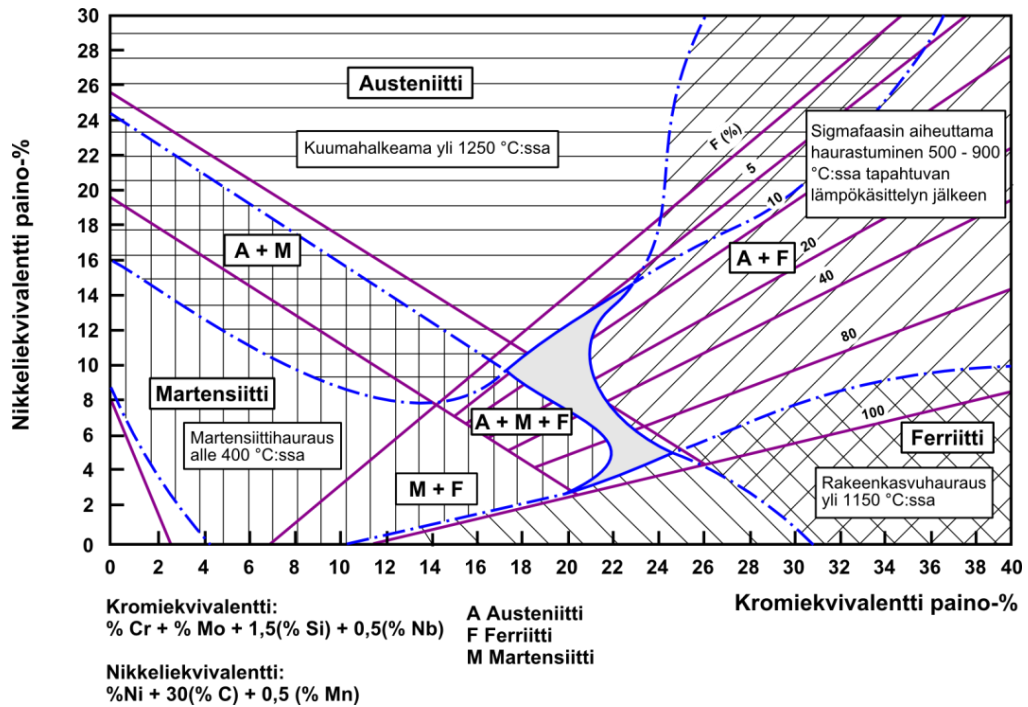
Hitsattavuus, oikeammin ilmaistuna rakenneosan hitsattavuus, voidaan jakaa kolmeen alakohtaan: perusaineen hitsattavuus, rakenteellinen hitsattavuus sekä valmistuksellinen hitsattavuus. Ne ovat läheisesti kytköksissä toisiinsa, mutta tässä työssä keskitytään perusaineen hitsattavuuteen, koska rakenteellinen ja valmistuksellinen hitsattavuus liittyvät enemmän rakenteen suunnitteluun kuin materiaalin valintaan. Rakenneosan hitsattavuus on lyhyesti sanottuna sitä parempi, mitä vaivattomammin saavutetaan vaadittava lopputulos. [32]

Perusaineen hitsattavuus jaetaan usein edelleen kolmeen osaan, joiden mukaan voidaan arvioida materiaalin käyttäytymistä hitsaustapahtumassa. Nämä ovat:

- kemiallinen koostumus, joka vaikuttaa
  - hitsisulan käyttäytymiseen
  - kuumahalkeilutaipumukseen
  - karkenemistaipumukseen
  - vanhenemistaipumukseen
- metallurgiset ominaisuudet, jotka liittyvät perusaineen valmistusmenetelmään ja vaikuttavat
  - suotautumiin
  - sulkeumiin
  - raekokoon
  - mikrorakenteeseen
  - anisotropiaan tai homogeenisuuteen
- fysikaaliset ominaisuudet, joista tärkeimpiä ovat
  - lämpölaajenemiskerroin
  - lämmönjohtavuus
  - sulamispiste ja puuroalue
  - lujuus
  - sitkeys.

Ruostumattomien terästen hitsattavuutta arvioidaan yleensä erilaisten diagrammien avulla. Eri diagrammit soveltuvat erilaatuisille ruostumattomille teräksille ja tunnetuimpia näistä ovat Schaeffler-, DeLong- sekä WRC –diagrammit. Kaikissa näissä arvioidaan lopullisen hitsin ferriittipitoisuutta ja/tai syntyvää mikrorakennetta erilaisten ekvivalenttien ja hitsiin osallistuvien aineiden avulla, koska ne ovat tärkeimmät tekijät hitsin onnistumisen arviointiin. Diagrammien avulla voidaan alustavasti valita oikea hitsauslisäaine myös eripariliitoksiin. [32]

Schaeffler-diagrammista johdettu Bystramin diagrammi kuvaa kokonaisuudessaan hyvin ruostumattomien terästen hitsauksessa ilmeneviä ongelmia (kuva 20). Kuvasta havaitaan alustavasti, että austeniittisilla laaduilla voi esiintyä kuumahalkeilua, ferriittisillä tai ferriittis-martensiittisillä laaduilla rakeenkasvuhaurautta, martensiittisillä laaduilla martensiittihaurautta ja duplex-teräksille ominainen ongelma on sigmahauraus. Hitsauksen yhteydessä lopullisen hitsin koostumuksessa yritetään aina päästä keskellä sijaitsevan yhtenäisen vaalean alueen sisäpuolelle. [14; 32]



Kuva 20. Schaeffler-diagrammin pohjalle tehty Bystramin diagrammi, josta selviää mikrorakenteet ja ongelma-alueet. [14]

Ennen oikeiden rakenteiden valmistuksen aloittamista tulee hitsausliitoksista tehdä hitsausohjeet ja koekappaleet, jotka tarkastetaan asianmukaisella tavalla. Näin varmistetaan hitsin ja muutosvyöhykkeen halutut ominaisuudet. [29]

#### 4.4.1 Austeniittinen perusaine

Nykyaikaisia austeniittisia peruslaatuja on helppo hitsata ja ne ovat erinomaisesti hitsattavia kaikilla yleisillä hitsausmenetelmillä. Yleinen käsitys on, että austeniittiset laadut ovat hitsauksen yhteydessä alttiita kuumahalkeilulle ja myös herkistymistä voi esiintyä. Kuumahalkeiluongelma keskittyy kuitenkin tilanteisiin, joissa tulee käyttää täysin austeniittista lisäainetta. Sitä käytetään ainoastaan seoksille, jotka sisältävät yli 20 % nikkeliä. Tällaisia ovat super-austeniittiset laadut ja osa tulenkestävistä ruostumattomista teräksistä. Täysin austeniittisia lisäaineita käytetään myös tilanteissa, joissa hitsin sisältämä ferriitti saattaa aiheuttaa ferriitin valikoituvan syöpymisen (esimerkiksi urea- ja suolahapposäiliöt) tai jos pienikin ferriittimäärä on kielletty hitsissä (esimerkiksi kryogeeniset sovellukset ja miinanraivaajien osat). [32; 47]

Usein puhutaan myös hitsin muutosvyöhykkeen herkistymisvaarasta eli kromin ja hiilen yhdistymisestä karbideiksi. Herkistymisvaara on hitsauksen yhteydessä todellinen vasta noin 0,07 % hiiltä sisältävillä laaduilla ja nykyään peruslaatuja hiilipitoisuus on vain noin puolet siitä, vähähiilisillä laaduilla vielä pienempi. Herkistymisriski kuitenkin hieman korostuu ohuilla levyvahvuuksilla, koska tällöin jäähtyminen on hitaampaa. Jos herkistymisvaaraa epäillään esimerkiksi erittäin suuren lämmöntonnin vuoksi, kannattaa materiaaliksi valita peruslaatuja vähähiilisemmät tai stabiloidut laadut (EN 1.4307, EN 1.4541, EN 1.4404 ja EN 1.4571). Hitsauksen kannalta austeniittiset laadut voidaan jakaa kahteen ryhmään:

- peruslaadut, joiden hitsaukseen käytetään hieman ferriittiä sisältäviä lisäaineita
- täysausteniittiset laadut, joiden hitsaukseen käytetään puhtaasti austeniittista lisäainetta. [32]

*Peruslaadut.* Austeniittisten peruslaatuja hitsauksessa esiintyy nykyään hyvin harvoin ongelmia. Useissa tutkimuksissa on todettu, että erittäin suurillakaan lämmöntonneilla (jopa 6 kJ/mm) ei ole suurta vaikutusta syntyvän hitsin ominaisuuksiin eikä kuumahalkeilualttiuteen. Peruslaatuja hitsauksessa käytetään normaalisti noin 5 – 10 % ferriittiä sisältäviä lisäaineita, koska juuri ferriitti estää tehokkaasti kuumahalkeilua sitomalla sulasta materiaalista epäpuhtauksia, kuten rikkiä ja fosforia, paremmin kuin austeniitti. Ferriitti nostaa myös hitsiaineen lujuutta, pienentää hitsiaineen lämpölaajenemiskerrointia ja nostaa lämmönjohtavuutta. Se kuitenkin huonontaa hitsin sitkeyttä hyvin matalissa lämpötiloissa ja voi aiheuttaa haurastumisilmiöitä erittäin korkeissa lämpötiloissa. Hitsauslisäaineena käytetään yleensä niin sanotusti yliseostettuja laatuja, jotta hitsin korroosionkesto-ominaisuudet vastaisivat mahdollisimman hyvin perusainetta. Pääasiassa syntyvän hitsin sitkeys- ja lujuusominaisuudet ovat perusainetta vastaavat tai jopa paremmat ilman mitään esi- tai jälkilämpökäsittelyjä. [3; 32; 38]

Peruslaatuja suurimmat todelliset ongelmat syntyvät usein austeniittisten laatuja suurista vetelyistä eli hitsausmuodonmuutoksista. Niistä johtuen kappaleet tulee kiinnittää ja silloittaa hyvin sekä mahdollisuuksien mukaan käyttää taka-askelhitsausta. Lisäksi hitsit tulisi sijoittaa kappaleiden neutraaliakseleille ja hitsausjärjestys tulisi miettiä hyvin. Jos peruslaaduista valmistetaan tuotteita äärimmäisiin olosuhteisiin,

esimerkiksi nesteytettyjen kaasujen säiliöt tai korkeissa, yli 500 °C käyttölämpötiloissa olevat tuotteet, tulee hitsien ferriittipitoisuus arvioida diagrammien avulla, koska ferriittipitoisuus vaikuttaa huomattavasti iskusitkeyteen niin kylmissä kuin kuumissa olosuhteissa. Lisäksi kylmissä olosuhteissa myös hitsin happipitoisuus tulisi minimoida, koska happi vaikuttaa iskuenergiaa pienentävästi. [3; 32; 38]

*Täysausteniittiset laadut.* Austeniittisten erikoislaatuojen hitsattavuus on hyvä, mutta niiden hitsauksessa on paljon tarkemmat energia- ja lämpötilarajoitukset, joita tulee noudattaa hyvän lopputuloksen saavuttamiseksi (esimerkiksi max lämmöntuonti 1 kJ/mm ja välipalkolämpötila max 100 °C). Lisäaineet valitaan tarkoin käyttökohteen mukaan ja usein käytetään nikkelivaltaisia lisäaineita, jolloin kuumahalkeiluriski on todellinen. Yleensä erikoisterästen käytön kannalta korroosionkestävyydellä on erittäin tärkeä asema ja tarpeeksi hyvän korroosiokestävyyden varmistaminen hitsauksen yhteydessä on tärkeää. Lämmöntuonnin ja muiden hitsausparametrien rajoittaminen on tällöin erittäin tärkeää laadukkaan lopputuloksen varmistamiseksi. [3; 32; 38]

On olemassa myös tyypilujitettuja, esimerkiksi EN 1.4311, sekä koneistettavaksi, esimerkiksi EN 1.4305, tarkoitettuja austeniittisiä laatuja. Tyypilujitetut laadut voidaan hitsata perusainetta vastaavilla erittäin niukkahiilisillä lisäaineilla, koska niiden lujuusominaisuudet riittävät myös tyypiseostetuille teräksille. Koneistettaviksi tarkoitettujen laatuojen hitsattavuus on huono runsaan rikkiseostuksen vuoksi. [3; 32]

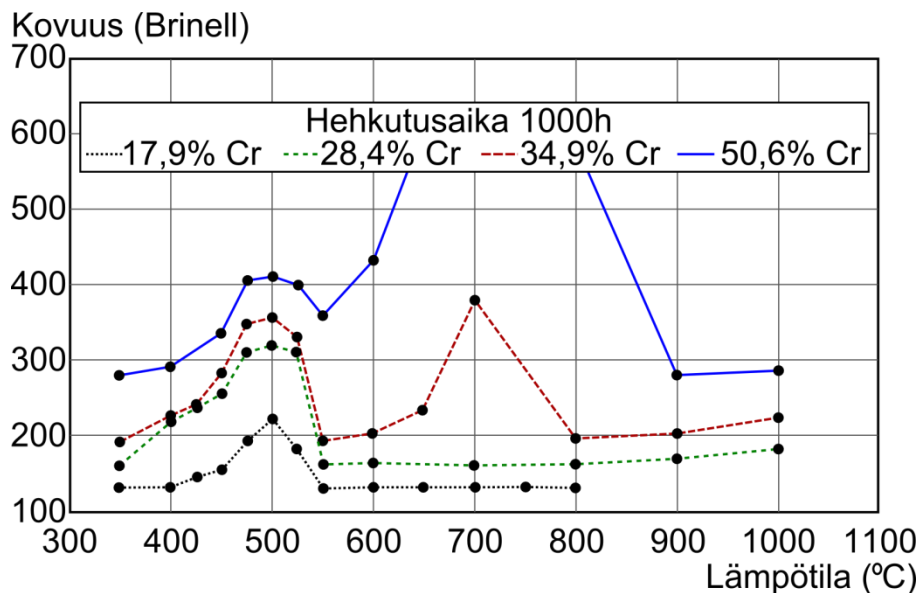
#### 4.4.2 Ferriittinen perusaine

Ferriittiset laadut ovat yleisesti ottaen vaikeampia hitsata kuin austeniittiset tai duplex-teräkset, koska niiden muutosvyöhyke saattaa haurastua lämmön vaikutuksesta. Haurastuminen johtuu epäsuotuisasta rakeenkasvusta, hauraan martensiitin muodostumisesta tai näiden yhteisvaikutuksesta. Perinteiset ferriittiset laadut ovat myös suhteellisen herkkiä raerajakorroosiolle (esimerkiksi EN 1.4016). Ferriittisillä laaduilla on kuitenkin yksi merkittävä etu hitsauksen kannalta austeniittisiin laatuihin verrattuna: hitsausmuodonmuutokset ovat paljon pienemmät. [3; 32; 38]

Kaikilla ferriittisillä teräksillä saattaa esiintyä hitsauksen yhteydessä muutamia korkeiden lämpötilojen aiheuttamia haurastumisilmiöitä sekä kylmä- eli vetyhalkeilua. Ongelmat keskittyvät lähinnä runsaasti seostettuihin laatuihin joissa kromin ja



molybdeenin summa on yli 20 %. Haurausilmiöiden takia ferriittisten ruostumattomien terästen käyttö hitsatuissa tuotteissa rajoittuu melkein pelkästään ohutlevyihin. Kuvassa 21 nähdään kromipitoisuuden vaikutus sigma- ja 475 °C haurauden aiheuttamaan kovuuden nousuun. [3; 32; 38]

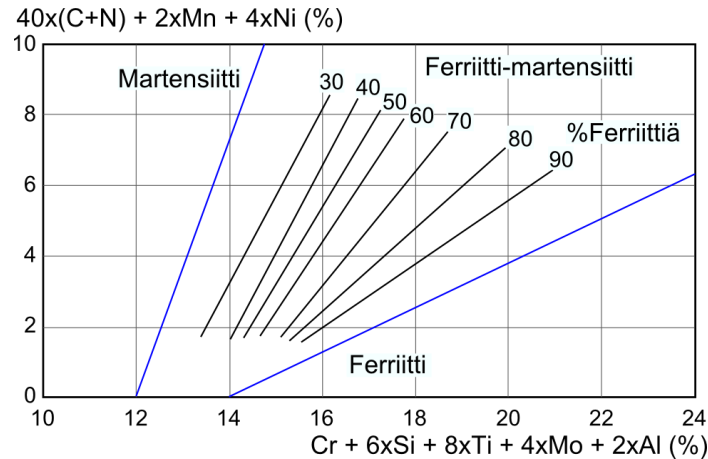


Kuva 21. Kromipitoisuuden vaikutus sigma- ja 475 °C hauraudesta johtuvaan kovuuden nousuun. [32]

Ferriittisten laatujen hitsin mikrorakenteen ennustamiseksi on kehitetty diagrammi, jossa ferriittiä suosivat alkuaineet ovat vaaka-akselilla ja austeniittia suosivat pystyakselilla (kuva 22). Kuvasta nähdään, että ferriittisten terästen alueella hitsin mikrorakenteeksi saadaan martensiitti, ferriitti + martensiitti tai ferriitti. Mikrorakenteen ennustamiseksi voidaan käyttää myös Kaltenhauserin ferriittitekijää KFF (Kaltenhauser Ferrite Factor), kaava 2. [7]

$$KFF = Cr + 6Si + 8Ti + 4Mo + 2Al - 40(C + N) - 2Mn - 4Ni \quad (2)$$

Kun KFF on pienempi kuin 8, teräs on austenoinnin ja nopean jäähtymisen jälkeen martensiittinen. Jos KFF on yli 14, teräs on puhtaasti ferriittinen ja näiden lukujen väliin jäävän teräksen mikrorakenteeksi tulee ferriittis-martensiittinen. [7]

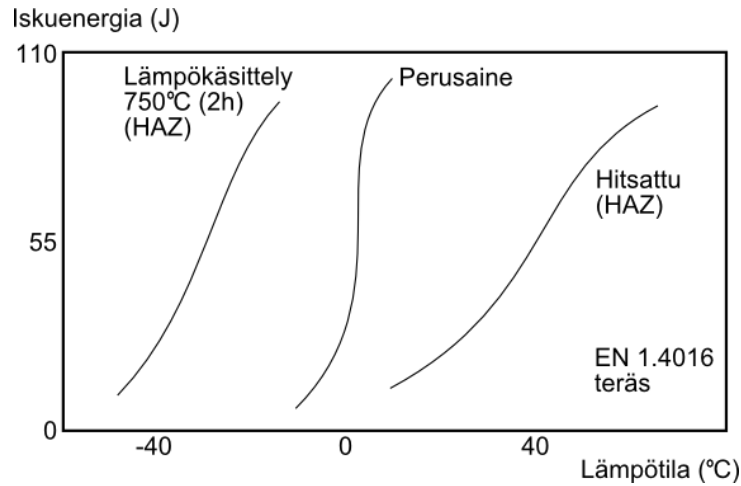


Kuva 22. Diagrammi ferriitin ja martensiitin määrän ennustamiseen. [32]

Hitsauksen kannalta ferriittiset laadut voidaan jakaa kolmeen luokkaan:

- stabiloimattomat laadut
- stabiloidut laadut
- niukkahiiliset ferriittis-martensiittiset laadut. [32]

*Stabiloimattomat laadut.* Stabiloimattomat laadut ovat hitsattavissa, mutta hitsiaineen ja muutosvyöhykkeen ominaisuudet, kuten lujuus, sitkeys ja korroosionkestävyys huononevat voimakkaasti. Tämä johtuu ferriittisen rakenteen allotropiasta, jossa hitsauksen tai muun lämmöntuonnin yhteydessä austeniitiksi muuttunut ferriitti muuttuukin nopeasti jäähtyessään hauraaksi martensiitiksi. Hitsiaineen ominaisuudet pysyvät hyvinä, jos käytetään austeniittista lisäainetta. Lisäaineen valinta ei kuitenkaan vaikuta perusaineen haurastumiseen muutosvyöhykkeellä. Teräksen ominaisuudet saadaan palautettua lähes ennalleen jälkilämpökäsittelyllä, jolloin esimerkiksi muutosvyöhykkeen transitiolämpötila laskee merkittävästi. (kuva 23). Stabiloimattomista ferriittisistä laaduista tunnetuin on EN 1.4016, muita vähemmän käytettyjä ovat esimerkiksi EN 1.4749 ja 1.4113. Hitsatut stabiloimattomat rakenteet eivät altistu yleensä voimakkaalle korroosio- tai mekaaniselle rasitukselle. [3; 32; 37; 38]



Kuva 23. Lämpökäsittelyn vaikutus stabiloimattoman ferriittisen teräksen HAZ:n transitiolämpötilaan. [30]

*Stabiloidut laadut.* Stabiloitujen laatuojen hitsattavuus on huomattavasti parempi kuin stabiloimattomien. Tämä johtuu teräsiin seostetuista stabilointiaineista, kuten titaani, niobi tai tietyissä tapauksissa voidaan käyttää myös vanadiumia tai zirkoniumia. Stabiloiva aine sitoo hitsistä typpeä ja hiiltä karboninitrideiksi. Tällöin hiili ei pääse sitoutumaan kromin kanssa, eikä raerajakorroosioon johtava kromikarbidien erkautuminen ole mahdollista. Hiilen vähyys estää tällöin myös hauraan martensiitin syntymisen; stabiloidut laadut eivät muutu missään lämpötilassa mikrorakenteeltaan austeniittiseksi, joten martensiittireaktio ei ole mahdollinen. Typen sitominen pitää ferriittisissä laaduissa muutosvyöhykkeen suhteellisen sitkeänä. [3; 32; 37; 38]

Stabilointi ei poista haurastuttavaa rakeenkasvuilmiötä, joka alkaa noin 1150 °C:ssa. Sen vuoksi lämmöntuonti tulisi pitää hitsauksen aikana mahdollisimman pienenä. Ilmiön nopeus riippuu muun muassa seostuksesta; esimerkiksi runsaasti kromia (20 - 30 %) sisältävillä ferriittisillä teräksillä rakeenkasvuhauraus on suurempi ongelma kuin vähemmän kromia sisältävillä laaduilla. Tunnetuimmat titaanistabiloidut laadut ovat EN 1.4512 ja EN 1.4510. Nykyaikaiset laadut, kuten EN 1.4509 ja EN 1.4521, ovat hitsattavuudeltaan hieman parempia, koska ne sisältävät hyvin vähän hiiltä ja typpeä. Näissä laaduissa muutosvyöhykkeen sitkeys pysyy hyvänä myös suhteellisen alhaisissa lämpötiloissa. [3; 32; 37; 38]

*Niukkahiiliset ferriittis-martensiittiset laadut.* Muista ferriittisistä laaduista poiketen näiden laatujen muutosvyöhykkeen mikrorakenne tulee olla hitsauksen jälkeen martensiittinen. Niukkahiilissä ferriittisissä laaduissa, esimerkiksi EN 1.4003, on hiiltä ja typpeä vain 0,01-0,02 %, joten syntyvä martensiitti ei ole haurasta, vaan sitkeydeltään hyvää niukkahiilistä sälemartensiittia. Sälemartensiitti säilyttää hyvän sitkeytensä myös matalissa, jopa -50 °C lämpötiloissa. Niukkahiiliset laadut ovat suhteellisen hyvin hitsattavia ja voidaan käyttää melko suuria lämmöntuonteja, esimerkiksi 1,2 kJ/mm, sitkeyden merkittävästi huonontumatta. Hyvien ominaisuuksiensa vuoksi niukkahiilistä laaduista valmistetaan esimerkiksi kantavia hitsattuja rakenteita. Yleensä käytetään austeniittisiä hitsauslisäaineita, jotta sitkeys saadaan varmistettua myös itse hitsiaineessa. [21; 32; 37]

#### 4.4.3 Austeniittis-ferriittinen perusaine

Nykyisten austeniittis-ferriittisten terästen hitsattavuus on hyvä ja lähellä austeniittisten laatujen tasoa. Kaikkia tavanomaisia hitsausprosesseja voidaan käyttää. Duplex-teräksillä ei yleensä esiinny kuumahalkeilua ferriitin esiintymisen vuoksi ja hitsausmuodonmuutokset ovat pienemmät austeniittisiin laatuihin verrattuna. Hitsausprosessin lämpösyklit aiheuttavat duplex-teräksien mikrorakenteessa ilmiöitä, jotka yleensä nostavat hitsin ja muutosvyöhykkeen ferriittipitoisuutta. Ferriittipitoisuuden nousu aiheuttaa hitsin ja muutosvyöhykkeen ominaisuuksissa muutoksia, joten sen kontrollointi on erittäin tärkeää. Duplex-teräksillä voidaan käyttää joko austeniittisiä tai perusainetta vastaavia lisäaineita. Hitsauslisäaineeksi täytyy valita nikkelillä yliseostettu laatu, jotta hitsin ferriittipitoisuus saadaan pysymään sopivana. Jos lisäainetta ei käytetä, tai jos käytetään täysin perusainetta vastaavaa lisäainetta, ferriittipitoisuus voi nousta hyvin korkeaksi (yli 70 %) ja heikentää hitsin ominaisuuksia. Ferriittipitoisuuden ennustamiseen käytetään aikaisemmin mainittuja diagrammeja. [3; 6; 32]

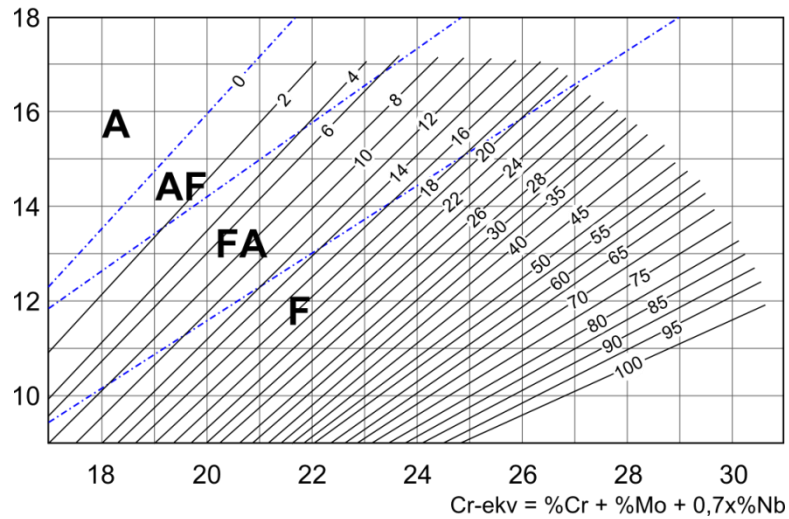
Duplex-teräksissä esiintyy samantapaisia haurausilmiöitä kuin ferriittisissä laaduissa sekä vetyhalkeilualttiutta, jos ferriittipitoisuus on suuri (yli 70 %) ja hitsausprosessin yhteydessä vetytitoisuus suuri (10 – 15 ml / 100g, vetytitoisuus / tuotu lisäainemäärä). Duplex-teräksille ei yleensä suoriteta esi- tai jälkilämpökäsittelyjä. Hitsattavuudeltaan duplex-teräkset voidaan jaotella kahteen kategoriaan:

- Vanhat laadut, joiden ferriittipitoisuus on suuri, jopa 70 %
- Uudet laadut, jotka sisältävät 50 % austeniittia ja ferriittiä. [22; 32]

*Vanhat, perinteiset laadut.* Perinteisten laatujen, kuten EN 1.4460, hitsattavuus on suhteellisen huono, koska muutosvyöhykkeelle muodostuu helposti haurasta sigmafaasia. Lisäksi muutosvyöhykkeellä tapahtuu rakeenkasvua ja ferriittipitoisuuden suurenemista, joka entisestään haurastuttaa HAZ:a. Näissä laaduissa korkea hiilipitoisuus (noin 0,05 %) altistaa hitsin ja muutosvyöhykkeen herkistymiselle, joka voi johtaa raerajakorroosioon. Nämä laadut eivät ole nykyään kovin yleisiä, eikä niistä yleensä valmisteta hitsattuja rakenteita. [6; 29; 32]

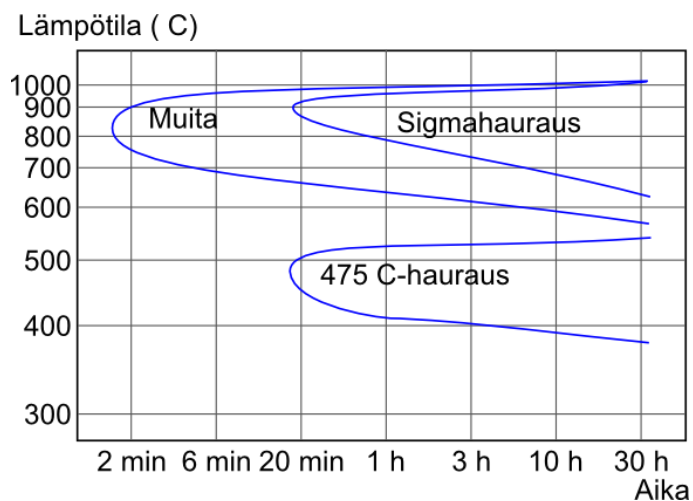
*Uudet laadut.* Uudemmat duplex-teräkset ovat hyvin hitsattavia, kuten jo aiemmin mainittiin. Duplex-terästen hitsisula ei ole niin juoksevaa kuin austeniittisten laatujen eikä tunkeuma ole yhtä suuri samoilla hitsausparametreilla. Lisäksi näilläkin duplex-laaduilla saattaa esiintyä erilaisia haitallisia metallienvälisiä yhdisteitä, jos materiaali altistetaan hyvin korkeille lämpötiloille pitkäksi aikaa (esimerkiksi 900 °C / 2 min). Erot austeniittisten laatujen hitsaukseen keskittyvät kuitenkin lähinnä ferriittipitoisuuden kontrollointiin. Duplex-teräksien ferriittipitoisuuden arviointiin suositellaan käytettäväksi WRC-92 -diagrammia (kuva 24). Ferriittipitoisuus vaihtelee paljon hitsin eri osissa, mutta sillä ei ole suurta vaikutusta hitsin ominaisuuksiin, mikä ilmenee myös kansainvälisien standardien suosituksista. Esimerkiksi standardissa IIW-1165-92 suositellaan syntyvän hitsin ferriittipitoisuudeksi 22 – 60 % (TIG-hitsit 22 – 70 %). Yleensä hitsausliitosten mekaaniset ominaisuudet täyttävät perusaineen vaatimukset, iskutkeys mukaan lukien. [29; 30; 32]

$$\text{Ni-ekv} = \% \text{Ni} + 35x\% \text{C} + 20x\% \text{N} + 0,25x\% \text{Cu}$$



Kuva 24. WRC-92 -diagrammi, josta voi ennustaa hitsin ferriittipitoisuuden ja jäähdytysjärjestyksen. [32]

Hitsin ferriittipitoisuuden pitäminen sallituissa rajoissa varmistetaan oikealla lämmöntuonnilla sekä oikealla lisäaineella ja suoja kaasulla. Liian suuri jäähtymisnopeus aiheuttaa ferriittipitoisuuden kasvua ja nitridien erkautumista, jolloin hitsin sitkeys- ja korroosionkesto-ominaisuudet huonontuvat. Liian pieni jäähtymisnopeus synnyttää hitsiin hauraita metallienvälisiä yhdisteitä sekä nostaa austeniittipitoisuutta joka aiheuttaa jännityskorroosiovaaran. Haurastumisilmiöitä voidaan arvioida TTT-käyrien (Time-Temperature-Transformation) avulla, kuva 25. [6; 32]



Kuva 25. Erään duplex-teräksen TTT-käyrä, josta nähdään lämpötilan ja ajan vaikutus haurausilmiöihin. [32]

Kuvasta nähdään, miksi hitsattujen duplex-teräsrakenteiden käyttölämpötilaksi suositellaan korkeintaan noin 275 °C; haurastumisriski alkaa jo suhteellisen alhaisilla lämpötiloilla, aivan kuten ferriittisillä laaduilla. Standardissa SFS-EN 1011-3 duplex-teräksille annetaan suositellut lämmöntuonnit ja välipalkolämpötilat. Ne ovat:

- matala- ja keskiseosteiset duplex-laadut (normaalit laadut): 0,5 – 2,5 kJ/mm & max 250 °C
- runsasseosteiset duplex-laadut (super-duplex): 0,2 – 1,5 kJ/mm & 100 – 150 °C

Niin sanotuilla super-duplex-teräksillä lämmöntuonnin yläraja on pienempi, koska niihin muodostuu runsaan seostuksen takia helpommin metallienvälisiä yhdisteitä. Lämmöntuonti voi olla näillä laaduilla normaaleja laatuja pienempi runsaan tyypiseostuksen takia: tyyppi edesauttaa austeniitin muodostumista, jolloin myös suhteellisen nopean jäähtymisen yhteydessä syntyy runsaasti austeniittia. Ohuiden levyjen hitsauksessa ei suositella lämmöntuonteja, jotka ovat standardin antaman suosituksen ylärajalla, koska jäähtyminen on suhteellisen hidasta hitsattaessa ohutlevyjä. [6; 22]

#### 4.4.4 Martensiittinen perusaine

Yleisesti ottaen martensiittisten laatuojen hitsattavuus on huono tai jopa erittäin huono. Se johtuu korkeasta hiilipitoisuudesta; aivan kuten hiiliteräksilläkin korkeampi hiilipitoisuus vaikeuttaa hitsausta. Tavallisilla martensiittisilla laaduilla välipalkolämpötilojen hallinta on tärkeää sekä yleensä tehdään hitsauksen yhteydessä esi- ja jälkilämpökäsittelyt. Ne ovat yleensä erittäin alttiita vetyhalkeamille. Vaikka martensiittiset laadut ovat tarkoitettu lähinnä valutuotteisiin tai tuotteisiin joita ei hitsata, ne voidaan käsitellä kolmessa kategoriassa hitsauksen kannalta:

- tavalliset runsashiiliset martensiittiset laadut
- martensiittis-austeniittiset laadut
- erittäin matalahiiliset uudet supermartensiittiset laadut. [29; 32]

*Tavalliset runsashiiliset laadut.* Tavallisia martensiittisiä teräksiä käytetään yleensä kohteissa, joita ei hitsata ja yleensä ne toimitetaan karkaistuna ja päästettynä. Jos näitä laatuja (esimerkiksi EN 1.4021 ja EN 1.4028) hitsataan, joudutaan tekemään kalliit ja

aikaa vievät esi- ja jälkilämpökäsittelyt. Lisäaineena voidaan käyttää perusainetta vastaavia tai austeniittisia laatuja. Yleensä suositellaan austeniittista lisäainetta, koska se tekee hitsistä sitkeämmän ja pienentää vetyhalkeiluriskiä. Jos hitsiltä vaaditaan perusainetta vastaavia lujuusominaisuuksia, tulee käyttää perusainetta vastaavia lisäaineita. [3; 32]

*Martensiittis-austeniittiset laadut.* Niin sanotut pehmeämartensiittiset laadut (esimerkiksi EN 1.4313 ja EN 1.4418) on kehitetty hitsattavuuden ja sitkeyden parantamiseksi. Ne sisältävät suhteellisen vähän hiiltä (noin 0,05 %), joka parantaa sitkeyttä. Lisäksi niihin on seostettu nikkeliä muutamia prosentteja karkenevuuden varmistamiseksi. Vaikka näiden terästen hitsattavuus on parempi kuin perinteisten laatuojen, niillekin suositellaan esikuumentusta ja jälkilämpökäsittelyä. Näiden laatuojen perusainetta vastaavat hitsauslisäaineet sisältävät jälkilämpökäsittelyn jälkeen noin 25 % stabiilia austeniittia, joka pitää hitsin suhteellisen sitkeänä (noin 60 J / -20 °C). Ilman lämpökäsittelyä valmiissa hitsissä on noin 95 % martensiittia, jolloin hitsi on erittäin luja ja hauras. [3; 32]

*Supermartensiittiset teräkset.* Näillä laaduilla hiilipitoisuus on noin 0,02 %. Supermartensiittisten terästen lujuus- ja sitkeysominaisuudet ovat erinomaiset, esimerkiksi myötölujuus noin 800 MPa ja iskusitkeys jopa yli 140 J / -60 °C. Hitsaus vaatii yleensä ainoastaan esilämmityksen ilman jälkilämpökäsittelyä. Uuden sukupolven supermartensiittiset teräkset sisältävät erittäin vähän hiiltä, jopa vain 0,01 %. Ne on tarkoitettu hitsattavaksi ilman mitään lämpökäsittelyä ja niiden muutosvyöhykkeen iskusitkeys on erinomainen hitsauksen jälkeen (yli 200 J / -60 °C). Uudet supermartensiittiset laadut ovat vasta kehitystasolla eikä niiden hitsauslisäaineista ole vielä paljon tietoa saatavilla. Yleisimmät lisäainetyypit näille teräksille ovat duplex- tai super-duplex laatuja, joilla saavutetaan lähes perusainetta vastaavat lujuus- ja sitkeysominaisuudet. [3; 32]

Kaikkien martensiittisten terästen hitsauksen yhteydessä tulee minimoida hitsiin kohdistuvan vedyn määrä. Lisäksi tulee noudattaa materiaalivalmistajan antamia ohjeita välipalkkolämpötiloista sekä esi- ja jälkilämpökäsittelyistä, jotta saavutetaan hyvä lopputulos. [3; 32]



#### 4.4.5 Eripariliitokset

Eripariliitoksella tarkoitetaan liitosta, jossa käytetään kahta tai kolmea eri koostumuksen omaavaa ainetta: yksi tai kaksi perusainetta ja hitsiaine. Eripariliitoksilla pyritään yleensä taloudellisuuteen eli käytetään ruostumatonta terästä, tai korroosio-ominaisuuksiltaan parempaa laatua, vain siihen kohteeseen, mihin sitä todella tarvitaan. Eripariliitos voi siis olla:

- ruostumaton teräs – hiiliteräs (yleisin)
- ruostumaton teräs, laatu A – ruostumaton teräs, laatu B
- ruostumaton teräs, laatu A – ruostumaton teräs, laatu A, mutta ei käytetä perusainetta vastaavaa lisäainetta
- huonosti hitsattavien (voimakkaasti karkenevien) terästen hitsaus austeniittisella lisäaineella
- nikkeliosteisten terästen hitsaus austeniittisella lisäaineella. [32]

Eripariliitoksen onnistuminen edellyttää oikeaa lisäaineen, railomuodon ja prosessin valintaa. Perusmateriaaleihin syntyy muutosvyöhykkeet, jotka käyttäytyvät kuten normaaleissa liitoksissa eli perusaineen hitsattavuus on otettava eripariliitoksissa huomioon (esikuumennus, lämmöntuonti, jälkilämpökäsittely). [32]

Hitsaustapahtumassa hitsiaine sekoittuu perusmateriaalien kanssa ja on tärkein yksittäinen kontrolloitava tekijä hitsin onnistumisen kannalta. Eripariliitoksien hitsauslisäaineenvalinta arvioidaan yleensä jo aiemmin mainitun Schaeffler-diagrammin avulla. Eri hitsausprosesseilla perusmateriaalin ja hitsiaineen sekoittumiselle on annettu tyypilliset sekoittumisasteet:

- jauhekaarihitsaus nauhalla 10 - 15 %
- jauhekaarihitsaus langalla 40 – 80 %
- TIG-hitsaus lisäaineella 20 – 60 %
- TIG-hitsaus ilman lisäainetta 100 %
- plasmahitsaus lisäaineella 5 – 80 %
- plasmahitsaus ilman lisäainetta 100 %
- MIG/MAG-pulssihitsaus 10 – 20 %
- MIG/MAG-hitsaus 20 – 40 %

- puikkohitsaus 15 – 30 %.

Yllä mainitut sekoittumisasteet ovat vain ohjeellisia ja voivat todellisuudessa vaihdella annettuja arvoja enemmän. Eripariliitosten hitsaukseen käytetään niin sanottuja yliseostettuja hitsauslisäaineita, jotka sekoitessaan perusmateriaaliin laimenevat. Lisäaineen yliseostus määrää suurimman mahdollisen sekoittumisasteen, sillä liian laimeaan hitsiin voi syntyä helposti martensiittia. Käytännössä vaativien eripariliitosten hitsaus suunnitellaan tarkasti ja ennen hitsausta tehdään hitsausohjeet ja menetelmäkoheet. [30; 32; 41]

#### 4.5 KORROOSIONKESTO JA PEITATTAVUUS

Korroosionkeston kannalta tärkein seosaine on kromi. Se mahdollistaa ehdottoman tärkeän oksidikalvon muodostumisen; ruostumaton teräs ei itsessään ole jalometalli, kuten kulta tai platina, vaan korroosionkesto perustuu nimenomaan oksidikalvon kestävyteen, kuten titaanilla, kuparilla ja alumiinilla. Korroosionkeston kannalta tärkeitä seosaineita ovat myös molybdeeni ja typpi. Nikkelin rooli on hieman monimutkaisempi ja sen tärkeys korroosionkestoan korostuu depassivoitumisessa tilassa, joka esiintyy yleensä vasta erittäin matalissa pH-pitoisuuksissa, taulukko 3. Eri seosaineiden merkityksestä ruostumattomien terästen ominaisuuksiin voi lukea tarkemmin liitteestä 2. [34; 46; 63]

Taulukko 3. Eräiden ruostumattomien terästen depassivoitumis-pH -arvoja 2M NaCl-liuoksessa 25 °C lämpötilassa. [14]

Nimike	Teräs (EN-standardi)	pH
X6Cr17	EN 1.4016	3
X6CrMo17-1	EN 1.4113	2,4
X2CrMoTi18-2	EN 1.4521	1,8
X5CrNi18-10	EN 1.4301	2,1
X5CrNiMo17-12-2	EN 1.4401	1,8
X2CrMoTi29-4	EN 1.4592	1,1
X1NiCrMoCu25-20-5	EN 1.4539	1,2
X1CrNiMoCuN25-25-5	EN 1.4537	0,6

Yleensä ruostumattomien terästen korroosionkestävyydestä puhuttaessa eri pääluokat lajitellaan seuraavasti:

- paras – austeniittiset laadut
- hyvä – duplex-teräkset
- suhteellisen heikko – ferriittiset teräkset
- huonoin – martensiittiset laadut.

Lajittelu on suuntaa antava, mutta pohjana käytetään yleensä vanhaa kirjallisuutta, josta puuttuvat uudet ruostumattomien terästen laadut. Nykyään on kehitetty esimerkiksi joitakin ferriittisiä laatuja, jotka yltyvät korroosionkestävyydeltään samalle tasolle kuin austeniittiset peruslaadut. Myös duplex-teräksien korroosionkestävyys on usein erinomainen. Martensiittisten laatuojen korroosiokesto-ominaisuudet ovat vielä suurimmalla osalla heikot, mutta niitäkin kehitetään koko ajan. [49; 63]

Materiaalinvalintaa on usein helppo perustella riittäväällä korroosionkestolla, mutta toisaalta olisi hyvä selvittää, mikä laatu kyseisissä olosuhteissa oikeasti kestää ja mikä ei. Näin päästään mahdollisimman kustannustehokkaaseen ratkaisuun.

#### 4.5.1 Korroosionkesto käyttöolosuhteet huomioon ottaen

Erilaatuisten ruostumattomien terästen korroosionkestävyyttä on arvioitu useissa eri kirjallisuusviitteissä, mutta nykyaikaisista laaduista ei ole vielä ehditty tehdä täydellistä selvitystä. Korroosionkestävyyttä arvioidaan teoreettisesti isokorroosioikärien, pistekorroosioekvivalentin (Pitting Resistance Equivalence, PRE), rakokorroosioekvivalentin (Crevice Resistance Equivalence, CRE), kriittisen pistekorroosiolämpötilan (Critical Pitting Temperature, CPT), kriittisen rakokorroosiolämpötilan (Critical Crevice Corrosion Temperature, CCT) ja kriittisen pistekorroosio potentiaalın (Critical Pitting Potential, CPP) avulla. Taulukoituihin arvoihin ei kuitenkaan pidä luottaa täysin, vaan aina ennen tuotteiden valmistusta tulee tehdä kokeet todellisessa käyttöympäristössä; käyttöympäristön korroosio-olosuhteet voivat vaihdella laitteiden käyttöasteen mukaan. [31; 46]

*Yleinen korroosio.* Materiaalia voidaan pitää yleiseltä korroosiokestoltaan käyttökohteessa erinomaisena, jos sen tasainen syöpyminen vuodessa on alle 0,1 mm (yleinen isokorroosioikärien raja). Outokumpu Oy on tehnyt kattavat tutkimukset erilaisten ruostumattomien terästen yleisestä korroosioista. Korroosiotaulukot löytyvät esimerkiksi yhtiön uusimmasta julkaisusta Corrosion Handbook, tenth edition.

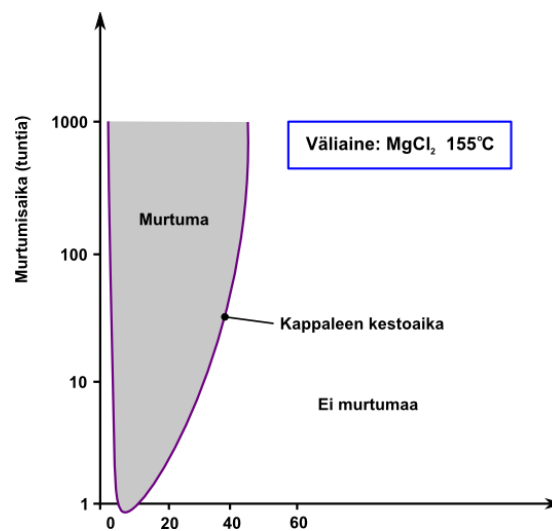
Taulukoista nähdään, että tyypillisesti ruostumattomissa teräksissä esiintyy yleistä korroosiota vain vahvoissa hapoissa, kuumissa lipeäsovelluksissa tai ympäristöissä, joissa passiivikalvon stabiili muodostuminen ei ole mahdollista (ympäristöt, joissa ei ole vapaana happea tai hapettuminen on erittäin voimakasta). Kanavat saattavat altistua käyttöolosuhteissa ilman mukana kulkeville vahvoille hapoille tai emäksille, mutta liuosten konsentraatio ei ole suuri eivätkä ne yleensä vaikuta koko kanavan pinta-alalle. Tästä johtuen yleistä korroosiota ei käytössä oleviin laatuihin (EN 1.4301 ja EN 1.4404) pääse merkittävästi syntymään. Taulukoista huomataan, että on olemassa uusia ferriittisiä teräksiä ja duplex-laatuja (EN 1.4509, EN 1.4521 ja EN 1.4162), jotka yltyvät korroosionkestoltaan hyvin monessa sovelluksessa samalle tai lähes samalle tasolle perinteisten austeniittisten laatuojen kanssa. Uusille laaduille ei ole ehditty tehdä aivan yhtä kattavia testejä kuin perinteisille austeniittisille laaduille. [46]

*Raerajakorroosio.* Raerajakorroosiolla tarkoitetaan yleensä ruostumattomissa teräksissä herkistymistä, eli kromikarbidien suotautumista raerajoilla. Lisäksi on olemassa harvinaisempi metallienvälisten yhdisteiden aiheuttama muoto, jossa muodostuu sigma-, Chi- ja Laves-faaseja. Eri laaduilla suotautumismekanismi on hieman erilainen, mutta käytännössä ilmiö ja sen seuraukset ovat samanlaiset. Raerajakorroosiota ilmenee hitsauksen ja kuumamuokkauksen yhteydessä tai jos ruostumatonta terästä, jota ei ole tarkoitettu kuumiin olosuhteisiin, käytetään hyvin korkeissa, useiden satojen asteiden lämpötiloissa. Raerajakorroosio ei nykyisissä laaduissa ole yleensä ongelma, eikä sitä tuotteissa yleensä esiinny. Se voi kuitenkin edesauttaa muita korroosionmuotoja, kuten pistekorroosiota. Raerajakorroosio estetään joko matalalla, noin 0,03 %, hiilipitoisuudella (austeniittiset laadut ja duplex-teräkset), liuotushehkuksella (martensiittiset laadut) tai seostamalla teräkseen stabilointiaineita, kuten titaania tai niobia (ferriittiset ja osa austeniittista laaduista). [41; 46]

*Galvaaninen korroosio.* Galvaanista korroosiota tapahtuu kanavissa lähinnä asennusvirheiden vuoksi. Asennusvirheellä tarkoitetaan esimerkiksi sinkittyjen ruuvien käyttöä ruostumattomasta teräksestä tehtyjen osien kanssa. Tällöin sinkityt ruuvit syöpyvät nopeasti ja saattavat pahimmassa tapauksessa katketa ja aiheuttaa tapaturman. Lisäksi joskus tuotteisiin suunnitellaan hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen välinen eripariliitos. Tällöin hiiliteräs altistuu galvaaniselle korroosiolle ja saattaa syöpyä. Liitteessä 1 olevasta jännitesarjasta nähdään, että ruostumattomien terästen eri laatuojen

välillä on pieni potentiaaliero seostuksesta riippuen. Tällä potentiaalierolla ei ole kuitenkaan käytännön kannalta merkitystä, eikä erilaatuisten ruostumattomien terästen välillä yleensä tapahdu galvaanista korroosiota. [31; 46]

*Jännityskorroosio ja korroosioväsyminen.* Jännityskorroosiota ja korroosioväsymistä esiintyy kanavissa huomattavasti enemmän, kuin yleistä, raeraja- tai galvaanista korroosiota. Ne ilmenevät yleensä korotetussa, yli 50 °C, lämpötilassa, mutta vaurioita on havaittu myös normaaleissa, noin 20 °C, lämpötiloissa. Jännityskorroosioalttiuden arviointiin on olemassa useita erilaisia kokeita sekä alttiutta voidaan arvioida myös nikkelpitoisuuden tai mikrorakenteen avulla. Kuvasta 26 nähdään miten nikkelpitoisuus vaikuttaa jännityskorroosionkestoon. Kuvasta havaitaan, että tällä hetkellä käytössä olevien laatuojen nikkelpitoisuudet ovat huonoimmat mahdolliset jännityskorroosion kannalta. [14; 15; 31; 46]



Kuva 26. Aika murtumiseen nikkelpitoisuuden funktiona. [14]

Yleisesti ottaen kaikki tavalliset austeniittiset laadut kestävät huonosti jännityskorroosiota. Superausteniittisissa laaduissa nikkelpitoisuus on kuitenkin niin suuri, että jännityskorroosionkesto on huomattavasti parempi. Ferriittiset ja martensiittiset laadut sekä duplex-teräkset kestävät jännityskorroosiota hyvin tai erittäin hyvin, eikä niissä yleensä havaita tämän tyyppin vaurioita. Taulukossa 4 on esitetty suhteellinen arvio eri laatuojen jännityskorroosion kestävyydelle. [46]

Taulukko 4. Eräiden ruostumattomien terästen jännityskorroosion suhteellinen kestävyys. [32]

Teräs	Mikrorakenne	Jännityskorroosion kestävyys 1=huonoin, 10 = paras
EN 1.4301	austeniittinen	1
EN 1.4436	austeniittinen	3
EN 1.4539	austeniittinen	9
EN 1.4462	duplex	9
EN 1.4016	ferriittinen	10
EN 1.4521	ferriittinen	10

Jännityskorroosionkestävyys korreloi hyvin korroosioväsymiskestävyyden kanssa, koska jännityskorroosio on yksi väsymiskorroosioon johtavista mekanismeista. Korroosioväsymistä on kuitenkin vaikea ennustaa, koska mallinnuksessa täytyy ottaa huomioon normaali väsymiskäyttäytyminen sekä korroosion aiheuttamat olosuhteet. Yleisesti ottaen duplex-laadut kestävät kaikkein parhaiten korroosioväsymistä, koska ne ovat yleensä erittäin lujia, sisältävät ferriittiä sekä kestävät korroosiota erinomaisesti. [4; 46]

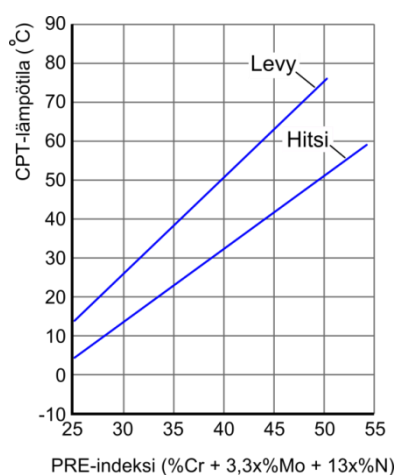
*Piste- ja rakokorroosio.* Piste- ja rakokorroosioauriot ovat hyvin yleinen ilmiö ruostumattomien terästen yhteydessä, joita ilmenee myös teollisuuden ilmanvaihtokanavissa. Näiden korroosionmuotojen kestämissä arviointiin on kehitetty kaksi yksinkertaista laskukaavaa: PRE ja CRE, jotka antavat suuntaa piste- ja rakokorroosionkestolle – mitä suurempi luku, sitä parempi kestävyys. PRE-luku on yleisempi ja sitä käytetään hyvin useassa yhteydessä. Näiden lisäksi käytetään usein CPP-, CPT- ja CCT -arvoja, jotka kertovat kriittisen potentiaalivirran tai kriittisen lämpötilan tietyssä liuoksessa piste- ja rakokorroosiolle. Pistekorroosion ehkäisyyn ei ole oikeastaan muuta keinoa kuin oikea materiaalivalinta. Rakokorroosion ilmenemiseen voidaan vaikuttaa suunnittelulla; kaikki mahdolliset pienet kolot, epäjatkuvuuskohdat ja paikat, joihin on mahdollisuus kertyä epäpuhtauksia, tulisi suunnittelun avulla välttää. Taulukkoon 5 on koottu usean eri laatujen PRE-, CRE -arvoja. Taulukosta huomataan, että ferriittisten laatujen joukosta löytyy samalla, tai hyvin lähelle samalla, PRE- ja CRE -luvulla olevia laatuja kuin perinteiset austeniittiset laadut. Myös duplex-teräkset yltävät niiden rinnalle ja niin sanotuilla super-duplexeilla on melkein suprausteniittisiin laatuihin verrattavissa olevia lukuja. [29; 63]

Taulukko 5. Usean eri laadun PRE- ja CRE-lukuja.  $PRE = \%Cr + 3,3x\%Mo + 16x\%N$ ,  $CRE = \%Cr + 4,1x\%Mo + 27x\%N$ . [32; 46]

Teräs	Mikrorakenne	PRE	CRE
EN 1.4003	ferriittinen	11,0	11,0
EN 1.4016	ferriittinen	16,5	16,5
EN 1.4509	ferriittinen	18,0	18,0
EN 1.4521	ferriittinen	24,0	25,3
EN 1.4021	martensiittinen	13,0	13,0
EN 1.4162	duplex	26,7	29,5
EN 1.4362	duplex	26,7	28,7
EN 1.4462	duplex	35,8	40,1
EN 1.4410	duplex	42,2	48,5
EN 1.4301	austeniittinen	19,9	21,1
EN 1.4404	austeniittinen	24,0	28,1
EN 1.4547	austeniittinen	44,7	52,1
EN 1.4652	austeniittinen	56,1	67,4

#### 4.5.2 Hitsausliitosten korroosioalttius

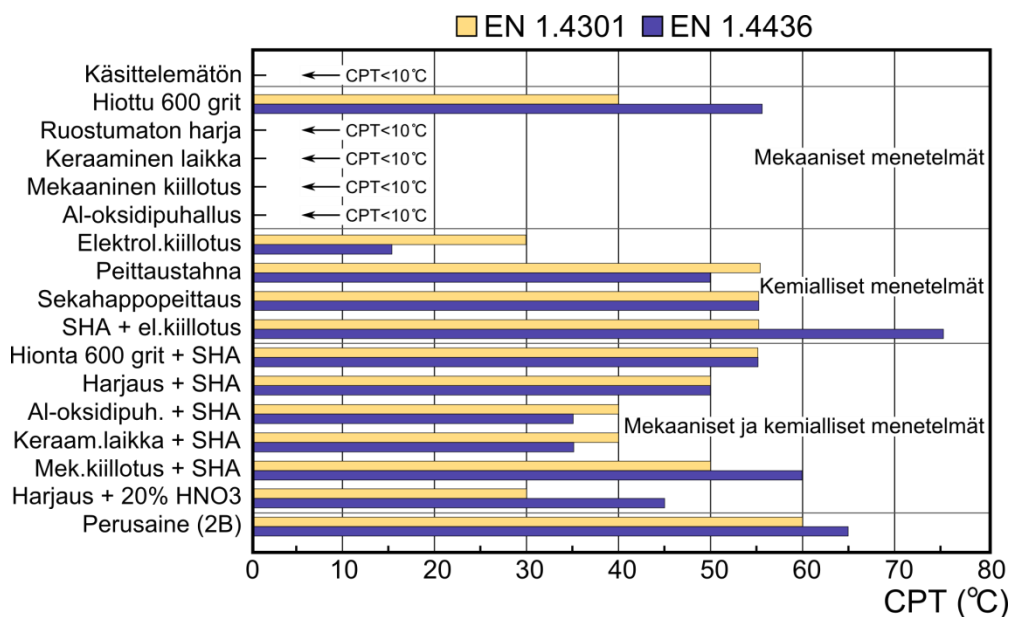
Hitsi on aina jonkinlainen epäjatkuvuuskohta tuotteissa. Epäjatkuvuudella voidaan tarkoittaa geometrista, kemiallista tai mekaanista poikkeavuutta. Yleensä hitsi on kaikkien edellä mainittujen yhdistelmä. Kun hitsi jähmettyy, seosaineet eivät sekoitu tasaisesti, vaan hitsiin syntyy suuria koostumuseroja. Paikalliset seosainepitoisuudet voivat kohota niin suuriksi, että jähmettymisen yhteydessä syntyy metallienvälisiä yhdisteitä, joiden korroosionkestävyys on heikompi kuin perusaineella. Yleisesti ottaen hitsien korroosionkestävyys on lähes aina heikompi kuin perusaineen, varsinkin jos hitsataan ilman lisäainetta (kuva 27). [3; 28; 32]



Kuva 27. Hitsin korroosionkestävyys laskee huomattavasti, jos hitsataan ilman lisäainetta. [28]

Hitsausliitoksissa esiintyy samanlaisia korroosimuotoja kuin perusaineessakin: yleistä, raeraja-, galvaanista ja paikallista korroosiota. Ilmiöt ja syntyvät ovat samanlaisia,

eikä niitä käydä tässä uudestaan läpi. Lisäksi ruostumattomien terästen hitsausliitoksissa voi esiintyä niin sanottu veitsenviiltokorroosio, joka esiintyy stabiloiduissa teräksissä hitsin sulaneella, mutta sekoittumattomalla alueella sekä ferriitin selektiivinen korroosio. Korroosiovaurioiden mahdollisuus hitsausliitoksissa minimoidaan oikeilla toimintatavoilla; roiskeet, sytytysjäljet ja muut epäpuhtaudet on poistettava sekä hitsin ja HAZ:n hapettunut pinta ja sen alla oleva kromiköyhävyöhyke on poistettava, jonka jälkeen pintaan täytyy antaa yhtenäinen passiivikalvo. Lisäksi oikean lisäaineen valinta ja hitsauksen oikea suoritustapa ovat erittäin tärkeitä. Kuvassa 28 näkyy jälkikäsittelyn vaikutus hitsausliitoksen korroosiokestävyyteen. [32; 46]



Kuva 28. Jälkikäsittelyn vaikutus hitsin korroosionkestoon. [3]

Erilaisten korroosimuotojen ehkäisyyn hitseissä voidaan antaa joitakin yksityiskohtaisia ohjeita ja toimintatapoja. Näitä ovat esimerkiksi:

- Hitsin yleinen korroosio
  - Väärä hitsauslisäaine → valitse oikea lisäaine
  - Huono jälkikäsittely → happopeittauksella ja elektrolyyttisellä kiillotuksella saavutetaan parhaat tulokset
- Galvaaninen korroosio
  - Väärä hitsauslisäaine → valitse oikea lisäaine
- Raerajakorroosio



- Liian suuri lämmöntuonti → yritä pienentää lämmöntuontia esimerkiksi valitsemalla eri hitsausprosessi
- Korkeahiilinen laatu → vaihda matalahiiliseen tai stabiloituun laatuun
- Piste- ja rakokorroosio
  - Väärä perus- tai hitsauslisäaine → varmista materiaalin korroosionkestävyys, vaihda lisäaine
  - Epäjatkuvuuskohta → poista hitsistä reunahaavat, kuvut tai muut epäjatkuvuudet, suunnittele hitsiliitos niin, ettei siinä tai sen läheisyydessä ole rakoja
  - Huono jälkikäsitely → happopeittauksella ja elektrolyyttisellä kiillotuksella saavutetaan parhaat tulokset
- Jännityskorroosio
  - Materiaalivalinta → jos mahdollista, käytä ei-austeniittisia tai superausteniittisiä laatuja
  - Jännitykset hitsissä → vähennä jännityksiä rakenteen suunnittelulla tai äärimmäisissä tapauksissa voi tulla kysymykseen jännityksenpoistohehkus
- Veitsenviiltokorroosio
  - Suoritustapa → hitsien oikea palkomuoto ja hitsausjärjestys
- Ferriitin selektiivinen korroosio, liikaa ferriittiä hitsissä
  - Suoritustapa → pidempi valokaari lisää typen määrää hitsissä, jolloin ferriittipitoisuus pienenee
  - Lisäaine → vaihda puhtaasti austeniittiseen lisäaineeseen
  - Suojakaasu → pieni pitoisuus typpeä suojakaasussa suosii austeniittia.

[32; 38; 46]

#### 4.5.3 Peitattavuus

Kaikki ruostumattomat teräkset ovat peitattavissa tavanomaisilla peittäusmenetelmillä, koska peittäus perustuu ruostumattoman teräksen itsestään korjautuvaan passiivikalvoon. Ruostumattoman teräksen laatu vaikuttaa ratkaisevasti peittäusaikaan ja tarvittavan liuoksen väkevyyteen. Yleisesti voidaan sanoa, että mitä korroosionkestävämpi laatu sitä pidempi peittäusaika ja/tai sitä väkevämpi liuos. [10]

Taulukko 6. Esimerkki peittausliuoksista, peittausajoista ja happoliuoksen lämpötiloista. [14]

Laatu	Peittausliuos	Peittausaika	Happoliuoksen lämpötila
Ferriittiset ja martensiittiset	1) Typpi-fluorivetyhappoliuos: 62 % typpihappo: 200 l 65 % fluorivetyhappo: 10 l Vesi: 800 l	noin 15 min	50-60 °C
	2) Rikkihappoliuos: 90 % rikkihappo: 100 l 35 % suolahappo: 50 l Vesi: 900 l		50-55 °C
Austeniittiset ja duplexit	1) Typpi-fluorivetyhappoliuos: 62 % typpihappo: 200 l 65 % fluorivetyhappo: 20 l Vesi: 800 l	noin 15 min	50-60 °C
	2) Rikkihappoliuos: 90 % rikkihappo: 100 l Vesi: 900 l	noin 5 min	60 °C

Taulukkoon 6 on koottu Euro Inox:n laatimia ohjeellisia peittausaikoja ja peittausliuoksen koostumuksia eri laaduille. Somotec Oy ja AvestaPolarit suosittelevat peittausaikoja hieman erilaisilla arvoilla, joten liuosten pitoisuudet ja lämpötilat eivät ole absoluuttisen tarkkoja. Peittausaikaan vaikuttaa hyvin voimakkaasti käytettävän happoseoksen lämpötila, joten sopiva peittausaika todetaan yleensä käytännönkokeilla. Liitteeseen 3 on taulukoita peittauksessa esiintyviä virheitä ja niihin johtaneita syitä, jotta yrityksessä voidaan arvioida peittauksen onnistumista luotettavasti. [10; 13; 56]

#### 4.6 SAATAVUUS JA HINTA

Austeniittisten ruostumattomien terästen peruslaatuja, EN 1.4301 ja EN 1.4401 (tai vastaavat), on nykyään helposti saatavana levynä, tankona, profiileina, nauhana, putkena ja niin edelleen. Näiden laatuojen huono puoli on suhteellisen korkea hinta ja varsinkin hinnan raju heilahtelu. Ei-austeniittisten laatuojen saatavuus on vielä nykyään melko rajoitettu. [52]

##### 4.6.1 Eri laatuojen saatavuus





Kuten mainittiin, austeniittisiä peruslaatuja saa nykyään helposti monenmuotoisina tuotteina (taulukko 7). Super-austeniittiset ja muut erikoisemmat austeniittiset laadut

kuuluvat joidenkin tukkureiden varasto-ohjelmiin, mutta niistä ei valmisteta esimerkiksi putkia kuin harvinaisiin erikoistarpeisiin. Lisäksi erikoisempien laatuojen levypaksuusalueet rajoittuvat yleensä melko kapealle sektorille.

Taulukko 7. Suomessa varastoitavat laadut. Tiedot on kerätty suurimmilta ruostumattoman teräksen toimittajilta. [8; 44; 51; 57]

	1.4301	1.4307	1.4305	1.4404	1.4401	1.4435	1.4571	1.4835	1.4828	1.4529	1.4547	1.4003	1.4016	1.4512	1.4509	1.4521	1.4162	1.4462	1.4460	1.4362	1.4410	1.4021	
Levy 1,0	x			x					x			x	x	x	x								
Levy 1,25	x			x								x	x										
Levy 1,50	x			x								x	x	x	x								
Levy 2,0	x			x				x			x	x	x	x	x		x	x		x	x		
Levy 3,0	x			x				x	x		x	x		x			x	x		x	x		
Levy 4,0	x			x				x			x	x					x	x		x	x		
Levy 5,0	x			x				x			x	x					x	x		x	x		
Levy 6,0	x			x				x			x	x					x	x		x	x		
Levy 8,0	x			x				x			x	x					x	x		x	x		
Levy 10,0	x			x				x			x						x	x		x	x		
Levy >10,0	x			x				x		x							x	x		x	x		
Suorakaideputki	x			x			x					x											
Neliöputki	x			x			x					x											
Pyöreä putki	x			x		x						x					x	x					
Pyörötanko	x	x		x															x				x
Kulmatanko	x			x																			
Lattatanko	x			x																			

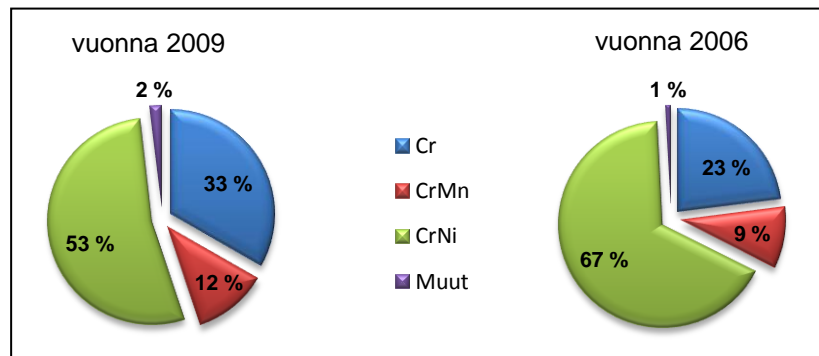
	= Austeniittinen laatu
	= Ferriittinen laatu
	= Duplex-teräs
	= Martensiittinen laatu

Suomessa varastoitavat ferriittiset laadut rajoittuvat vielä nykyään hyvin kapealle alueelle. Muualla maailmassa ferriittisten laatuojen käyttö on runsaampaa ja ulkomailta, esimerkiksi Ranskasta tai Yhdysvalloista, saa tilattua uutta laatua EN 1.4521. Myös Outokumpu Distribution Oy tekee koesulatuseriä laadusta EN 1.4521, mutta tilausmäärän täytyisi olla noin 24 tonnia, jotta toimitusajat olisivat edes kohtuulliset. Outokumpu Distribution Oy:n materiaaliasiantuntijat arvelevat uusien ferriittisten laatuojen menekin lisääntyvän runsaasti seuraavan muutaman vuoden aikana. Myynnin lisääntyä myös tukkurit tulevat lisäämään uusia laatuja varasto-ohjelmiinsa ja saatavuus tulee parantumaan huomattavasti. [48]

Duplex-laatuojen saatavuus rajoittuu Suomessa melkein pelkästään levyihin, joiden paksuus on vähintään 2 mm. Niiden käyttö on viime vuosina lisääntynyt huomattavasti,

mutta ohuille, alle 2mm duplex-laaduille ei ole löydetty vielä todellisia käyttökohteita. Uusista duplex-teräksistä on valmistettu aivan viime aikoina putkia ja Metso Paper Oy testaa lean duplex LDX 2101® (EN 1.4162) putkia koepaperikoneella. [52]

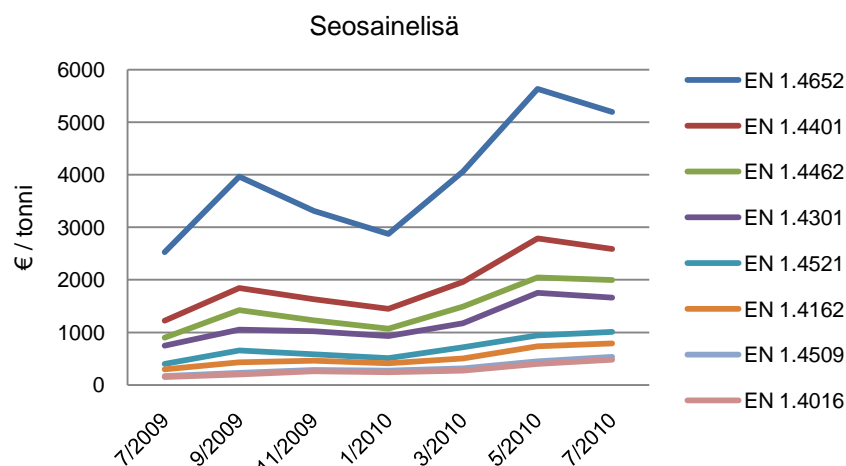
Martensiittisten laatuja saatavuus on yleisesti ottaen huono ja niiden käyttö rajoittuu suhteellisen kapealle alueelle. Tukkurit ja teräsvalmistajat tarjoavat hankintapalveluja, joiden kautta kaikkia laatuja Suomeen saa, mutta hinta saattaa nousta hyvin suureksi sekä toimitusajat pidentyä kohtuuttomiksi. Kuvassa 29 on esitetty ruostumattomien terästen käyttöosuudet maailmalla vuonna 2006 ja 2009. Kuva korreloi melko hyvin käytännön saatavuustilanteen kanssa ja siitä huomataan, että austeniittisten laatuja osuus on vähentynyt suhteessa käytettyyn kokonaismäärään. [25]



Kuva 29. Ruostumattomien terästen käyttöosuudet vuonna 2009 ja 2006. [25]

#### 4.6.2 Ruostumattomien terästen hinta

Ruostumattomien terästen hinta koostuu käytännössä perusmateriaalin eli raudan hinnasta, teräksen valmistuksesta ja seosainelisästä AAF (Alloy Adjustment Factor). Kuvassa 30 on eräiden laatuja seosainelisät graafin muodossa. Siitä nähdään helposti, että nikkelin hinnan heilahtelu ja kasvaminen on nostanut ja muokannut austeniittisten laatuja hintoja viime vuosina huomattavasti.



Kuva 30. Seosainelisät 7/2009 – 7/2010 muutamalle laadulle kahden kuukauden välein. [45]

Uusien ferriittisten ja duplex-laatujen mekaaniset ominaisuudet, korroosiokesto-ominaisuudet, hyvä hitsattavuus sekä erittäin kilpailukykyinen hinta tulevat varmasti lisäämään niiden käyttöä tulevaisuudessa. Vanhat, perinteiset laadut EN 1.4301 ja EN 1.4401 ovat hinnaltaan jopa kaksinkertaisia uusiin, korroosionkestoltaan lähes samalle tasolle yltäviin ferriittisiin laatuihin, EN 1.4509 ja EN 1.4521, verrattuna. Korroosionkestoltaan hyvin lähellä perinteistä haponkestävää EN 1.4401 oleva uusi lean duplex LDX 2101® (EN 1.4162) on hinnaltaan perinteisen ruostumattoman teräksen EN 1.4301 luokkaa. Taulukkoon 8 on koottu ruostumattomien terästen hintoja suhteessa tavalliseen rakenneteräkseen.

Taulukko 8. Ruostumattomien teräslaatuja hinta suhteessa rakenneteräkseen kesällä 2010. [52]

Teräs	S235JR	EN 1.4301	EN 1.4404	EN 1.4509	EN 1.4521	EN 1.4162
Suhteellinen hinta	1	4,5	5,3	2,1	3,5	4,3

#### 4.6.3 Valmistuskustannukset

Materiaalin laadun vaihtaminen voi aiheuttaa muutoksia valmistuskustannuksissa sekä voi aiheuttaa myös mahdollisia muita kustannuksia esimerkiksi varastoinnissa. Ruostumattomien teräslaatuja erottaminen ulkonäön perusteella on lähes mahdotonta, joten varastointi täytyy hoitaa asianmukaisesti niin, etteivät eri laadut mene keskenään sekaisin. Ferriittiset laadut erottaa austeniittisista laaduista helposti magneetin avulla.

Varsinaisiin valmistuskustannuksiin voi tässä tapauksessa vaikuttaa lähinnä hitsattavuus, käytettävä hitsauslisäaine ja lämpökäsittelyjen tarpeet. Työn alussa mainittiin, että materiaalin tulee olla suhteellisesti helposti hitsattavissa, eli lämpökäsittelyt eivät tule kysymykseen. Lisäainekustannukset ovat hitsaavassa konepajassa yleensä marginaalinen kustannus, joten sen mahdollinen vaihtaminen ei vaikuta kokonaiskustannuksiin merkittävästi. [9]

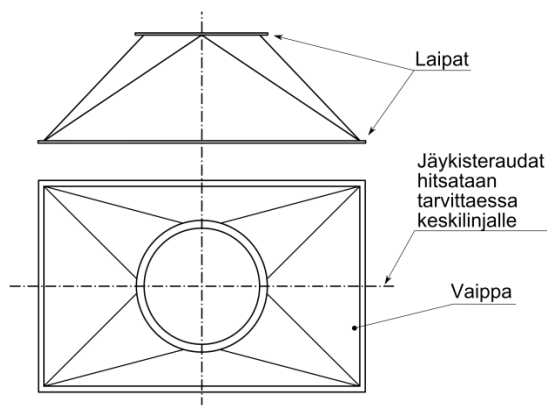
Ab Jet-Steel Oy:ssä käytettävät työmenetelmät eivät sisällä mitään sellaista prosessia, jossa materiaalin laadun pienet vaihtelut vaikuttaisivat paljon valmistuskustannuksiin. Tällaisia menetelmiä olisivat esimerkiksi sorvaaminen tai jyrsiminen. [9; 50]

## **5 RUOSTUMATTOMIEN TERÄSLAATUJEN SOVELTUVUUS YRITYKSEN TUOTTEISIIN**

Seuraavaksi esitellään muutama esimerkkitapaus yrityksen tuotteista ja vertaillaan eri laatuja soveltuvuutta niihin. Tuotteista ei näytetä oikeita valokuvia salassapitosyiden vuoksi, mutta periaatepiirroksista selviää tuotteiden muoto ja materiaaleilta vaadittavat ominaisuudet.

### **5.1 CASE 1: MUUNTOKARTIO**

Kuvassa 31 on periaatepiirros yleisestä ilmanvaihtokanavaosasta, muuntokartiosta. Muuntokartioiden ainevahvuudet ovat yleensä 1...2 mm, mutta niitä on valmistettu jopa 4 mm paksusta materiaalista. Laipat valmistetaan latta- tai kulmatangosta. Valmistus aloitetaan leikkaamalla levystä aihiot hienosädeplasmalla, jonka jälkeen ne särmätään muotoonsa. Tämän jälkeen muuntokartion osat hitsataan yhteen sekä laipat ja jäykisteet hitsataan kiinni. Kun kappale on hitsattu kokoon, se peitataan ja pakataan.



Kuva 31. Muuntokartion periaatteellinen esitys.

Muuntokartiossa on paljon hyvin loivia särmäyksiä. Loivat, muutaman asteen särmäykset ovat suhteellisen haastavia hallita suuren takaisinjouston vuoksi. Lisäksi aihoiden särmäyksien suunnat vaihtelevat suhteessa valssaussuuntaan, joka entisestään vaikeuttaa valmistusta. Näin ollen mahdollisimman pieni takaisinjousto olisi eduksi valmistettavuudelle.

Osaan liitetään laipat, jotka valmistetaan lattatangosta. Laippojen olisi hyvä olla samaa materiaalia, kuin muuntokartion vaippa, mutta se ei ole ehdoton edellytys. Kappale ja kaikki sen sisältämät osat liitetään toisiinsa hitsaamalla, joten hitsattavuus on yksi tärkeimmistä ominaisuuksista. Hitsauksessa esiintyvät vetelyt huonontavat kappaleen ulkonäköä, joten pienet hitsausmuodonmuutokset olisivat eduksi. Korroosionkeston kannalta tärkeä näkökohta on jäykisterautojen ja vaipan väliin jäävä pieni rako, joka altistaa kappaleet rakokorroosiolle. Rakoa on vaikea suunnittelun avulla poistaa, joten mahdollisimman hyvä rakokorroosionkesto olisi eduksi. Taulukkoon 9 on arvioitu eri laatujen soveltuvuutta muuntokartioon eri näkökulmista ja huomataan, että uusien laatujen käytön kannalta esteenä on vain saatavuus.

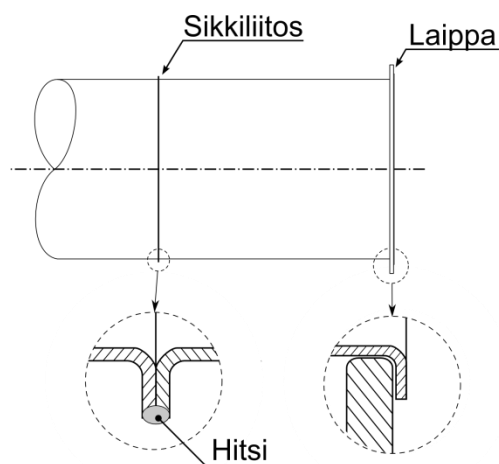
Taulukko 9. Eri laatujen vertailu muuntokartion materiaaliksi.

	EN 1.4021	EN 1.4003	EN 1.4016	EN 1.4509	EN 1.4521	EN 1.4162	EN 1.4462	EN 1.4301	EN 1.4404
hitsattavuus	0	++	0	+	+	++	++	+++	+++
särmättävyys	0	++	+++	+++	++	++	+	++	++
korroosionkesto	0	0	0	++	+++	+++	-	++	+++
peitattavuus	+	+	++	+++	+++	+++	++	+++	+++
saatavuus	0	++	+	+	0	0	0	+++	+++

- = ominaisuus usein ylimitoitettu käyttökohteeseen
- +++ = erittäin hyvä
- ++ = hyvä
- +
- 0 = ongelmia syntyy

## 5.2 CASE 2: PYÖREÄ KANAVA

Pyöreät kanavat valmistetaan levyaihioista mankeloimalla. Pyörityksen jälkeen pitkittäishitsit hitsataan mekanisoidusti plasmahitsauslaitteella. Sylinterinmuotoisen kappaleen päihin ajetaan sikit, jotka pitävät laipan paikoillaan tai joista kanaviin hitsataan jatkot (kuva 32). Sikkien kääntö kanavan päähän vaatii materiaalilta suhteellisen hyvää muovattavuutta. Sikit sulatetaan yhteen yleensä TIG-hitsausmenetelmää käyttäen ilman lisäainetta tai vaihtoehtoisesti paksummilla materiaaleilla ( $s > 1,5$  mm) käytetään MAG-hitsausta. Myös pyöreiden kanavien laipat olisi hyvä olla samaa materiaalia kuin kanava itse, mutta se ei ole ehdoton vaatimus.



Kuva 32. Pyöreän kanavan periaatekuva.



Hitsiliitoksen muoto, jolla kanavat jatketaan, on erittäin arka rakokorroosiolle. Sen muotoa on kuitenkin vaikea muuttaa ja sikkiliitos pitää kanavat pyöreinä sekä toimii kanavassa samalla jäykistimenä. Myös laipan ja sikin väliin voi jäädä sopivankokoisia rakoja korroosion kannalta. Materiaalilta vaaditaan siis hitsattavuutta, muovattavuutta ja hyvää rako- ja pistekorroosion kestoa. Taulukossa 10 on arvioitu materiaalien sopivuutta pyöreään kanavaan ja havaitaan, että tässäkin tapauksessa saatavuus on ongelma materiaalin vaihtamiseen.

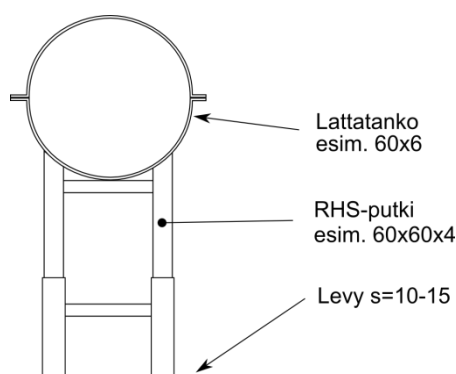
Taulukko 10. Materiaalien sopivuuden vertailu pyöreään kanavaan.

	EN 1.4021	EN 1.4003	EN 1.4016	EN 1.4509	EN 1.4521	EN 1.4162	EN 1.4462	EN 1.4301	EN 1.4404
hitsattavuus	0	++	0	+	+	++	++	+++	+++
taivutettavuus	0	+++	+++	+++	+++	+++	++	+++	+++
korroosionkesto	0	0	0	++	+++	+++	-	++	+++
peitattavuus	+	+	++	+++	+++	+++	++	+++	+++
saatavuus	0	++	+	+	0	0	0	+++	+++

- = ominaisuus usein ylimitoitettu käyttökohteeseen
- +++ = erittäin hyvä
- ++ = hyvä
- + = ok, joitakin rajoituksia voi olla
- 0 = ongelmia syntyy

### 5.3 CASE 3: KANNAKE

Kannakkeet valmistetaan yleensä kulmatangosta tai neliöputkesta. Kannakkeiden kiinnityslaput leikataan levystä. Osat liitetään yhteen hitsaamalla. Kannakkeisiin tulevat sangat valmistetaan lattatangosta tai tietyissä tapauksissa kulmatangosta. Kuvassa 33 on esitetty esimerkki kannakkeesta..



Kuva 33. Eräänlaisen kannakkeen periaatepiirros.

Kannakkeilta ei aina vaadita yhtä hyvää korroosionkestävyyttä kuin kanavilta, koska ne sijoittuvat usein ulkoilmaan tai paperitehtaalla olevaan avoimeen tilaan. Kannakkeisiin ei myöskään yleensä jää rakokorroosiolle suotuisia koloja. Taulukkoon 11 on koottu kannakemateriaalilta vaadittavia ominaisuuksia ja vertailtu eri laatuojen soveltuvuutta kannakkeeksi. Taulukosta nähdään, että kannakkeita voisi valmistaa hyvin muistakin laaduista kuin perinteisistä EN 1.4301 ja EN 1.4404, mutta saatavuus on taas ongelma.

Taulukko 11. Vaihtoehtoisten kannakemateriaalien vertailu.

	EN 1.4021	EN 1.4003	EN 1.4016	EN 1.4509	EN 1.4521	EN 1.4162	EN 1.4462	EN 1.4301	EN 1.4404
hitsattavuus	0	++	0	+	+	++	++	+++	+++
korroosionkesto	0	+	++	++	-	-	-	+++	-
peitattavuus	+	+	++	+++	+++	+++	++	+++	+++
saatavuus	0	++	0	0	0	0	0	+++	+++

- = ominaisuus usein ylimitoitettu käyttökohteeseen  
 +++ = erittäin hyvä  
 ++ = hyvä  
 + = ok, joitakin rajoituksia voi olla  
 0 = ongelmia syntyy

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Nykyään ruostumattomien terästen kirjo on erittäin laaja ja niiden käyttö lisääntyy melkein kaikilla teollisuuden aloilla. Ruostumattomien terästen valmistajat kehittävät jatkuvasti tuotteidensa ominaisuuksia ja uusia laatuja tulee markkinoille melko usein. Uusien laatuojen yleistyminen ja käyttöönotto kestää esimerkiksi suurilla paperiteollisuuden yrityksillä useita vuosia. Tästä johtuen niiden saatavuus Suomessa on vielä huono, erityisesti ohutlevyjen osalta. Perinteiset austeniittiset laadut tulevat varmasti pysymään käytetyimpänä luokkana, mutta uusista ferriittisistä laaduista ja duplex-teräksistä löytyy varmasti moneen paikkaan kustannustehokkaampi ratkaisu. Niiden käyttö tulee todennäköisesti hyvien ominaisuuksiensa ansiosta yleistymään.

Ruostumattomat teräkset soveltuvat suurelta osalta perinteiseen konepajateollisuuteen, myös ohutlevytuotteiden valmistukseen. Martensiittiset laadut ovat aivan oma luokkansa ja niiden käyttökohteet eroavat yleensä hyvin paljon kolmen muun luokan kanssa. Vaihtoehtoisia uusia laatuja, joita Jet-Steel Oy voi tulevaisuudessa käyttää

ilman mainittavia lisäkustannuksia tai merkittäviä muutoksia valmistusprosesseissa ovat ainakin:

- EN 1.4509
  - kaksoisstabiloitu ferriittinen teräs
  - vastaa monessa tapauksessa laatua EN 1.4301
  - noin puolet halvempi kuin laatu EN 1.4301
- EN1.4521
  - titaanistabiloitu ”haponkestävä” ferriittinen teräs
  - vastaa monessa tapauksessa laatua EN 1.4401
  - noin puolet halvempi kuin laatu EN 1.4401
- EN 1.4162
  - vähän nikkeliä sisältävä duplex-teräs
  - vastaa monessa tapauksessa laatua EN 1.4404
  - hieman halvempi kuin laatu EN 1.4301

Jos konepajaan tulee kahden perinteisen laadun rinnalle ferriittisiä laatuja ja/tai duplex-teräksiä, tulee materiaalien ja lisäaineiden varastointiin kiinnittää erityistä huomiota (varsinkin, jos uusia laatuja hitsataan ei-austeniittisilla lisäaineilla).

Kaikki edellä mainitut laadut soveltuvat hyvin ohutlevyteollisuuden työstöprosesseihin, kuten esimerkiksi särmäykseen. Ferriittisten laatuojen särmättävyys ja taivutettavuus voi olla käytännössä jopa parempi pienen takaisinjouston ja pienen muokkauslujittumisen vuoksi. Leikkaus, lävistys ja lastuaminen vaativat kyseisillä laaduilla työstökoneilta vähemmän voimaa kuin duplex-teräksillä tai austeniittisilla laaduilla.

Ferriittisten laatuojen hitsattavuus tai hitsien mekaaniset ominaisuudet eivät yllä austeniittisten terästen tasolle, mutta sillä ei välttämättä ole käytännössä suurta merkitystä, koska hitsit eivät yleensä joudu suurelle mekaaniselle rasitukselle. Duplex-terästen hitsattavuus on lähellä austeniittisten tasoa, joten niiden kanssa ei syntyne ongelmia.

## **7 JATKOTOIMENPITEET**

Uusien materiaalien käyttöönotto vaatii aina aluksi tiettyjä toimenpiteitä. Jotta varmistutaan uusien laatuojen ominaisuuksien riittävydestä, tulee ennen oikeiden tuotteiden valmistusta tehdä erilaisia kokeita. Tuotteen toimivuuden kannalta tärkeimpiä kokeita ovat korroosionkeston testaaminen kenttäkokeilla sekä hitsausliitosten riittävien ominaisuuksien varmistaminen. Hitsausliitoksia varten yrityksessä kannattaa tehdä jokaista materiaalia ja railomuotoa varten oma hitsausohje. Muut valmistusmenetelmät, kuten levyn leikkaus- ja taivutusprosessit, eivät vaadi erityistoimenpiteitä edellä mainittujen uusien materiaalien käyttöönoton yhteydessä.

Yrityksen kannattaa pitää yllä tietotaitoa ruostumattomista teräksistä sekä varsinkin uusien materiaalien ominaisuuksista, jotta niiden mahdollinen käyttöönotto sujuu ilman suurempia ongelmia. Hyvä yleistieto erilaisista ruostumattomista teräksistä tukee yrityksen imagoa, antaa asiantuntevan kuvan ulospäin ja helpottaa asiointia asiakkaiden kanssa.

## **8 YHTEENVETO**

Perinteiset austeniittiset laadut ovat nikkeliipitoisuutensa takia suhteellisen kalliita ja niiden hinta voi vaihdella hyvin nopeasti. Lähinnä hinnan vuoksi teollisuudessa siirrytään joskus ferriittisiin laatuihin tai duplex-teräksiin, joiden käyttö lisääntyy koko ajan.

Ruostumattomia teräksiä on erittäin paljon erilaisia, mutta Suomessa niiden käyttö keskittyy muutamaan austeniittiseen peruslaatuun. Muualla Euroopassa ja myös esimerkiksi Yhdysvalloissa ferriittisten ruostumattomien terästen ja duplex-laatuojen käyttö on yleisempää. Erikoislaatuojen tilaaminen ulkomailta on kallista ja toimitusajat voivat venyä hyvin pitkiksi.

Ruostumattomia teräksien neljästä pääluokasta kolme sopii hyvin normaalin konepajan materiaaliksi; austeniittiset, ferriittiset ja duplex-teräkset. Yrityksen tuotteilta ei vaadita äärimmäisiä ominaisuuksia eivätkä tuotteet joudu kovan mekaanisen rasituksen alaiseksi. Sen vuoksi vaihtoehtoisia laatuja löytyy suhteellisen helposti.

Ennen uusien laatujuen käyttöönotta on tehtävä kunnolliset kenttäkokeet korroosionkeston varmistamiseksi sekä hitsauskokeet hitsattavuuden ja lopullisen tuloksen varmistamiseksi. Laadun vaihtaminen ei aiheuta merkittäviä valmistuksen lisäkustannuksia ja ainoa ongelma niiden käyttöönotossa on huono saatavuus, joka tulee hyvin todennäköisesti lähitulevaisuudessa muuttumaan.

## LÄHDELUETTELO

1. Aaltonen, Kalevi, Andersson, Paul and Kauppinen, Veijo. *Levytyö- ja työvälinetekniikat*. Porvoo : WSOY, 1997.
2. AGA. *Teollisuuskaasut*. Espoo : Oy AGA Ab, 2010.
3. Alenius, Marko. *Ruostumattomien terästen hitsaus ja hitsausliitosten korroosio*. [Asiakirja] s.l. : Teknillinen korkeakoulu, 2007.
4. Alfonsson, Elisabet. LDX 2101® - låglegerat duplexstål. *Inspectan web-sivusto*. [Online] Huhtikuu 17, 2008. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] <http://www.inspecta.se/downloads/kurser&seminarier/tryck&svets2008/1.6%20Elisabet%20Alfonsson.pdf>.
5. Alfred, Otto and Pauly, Thomas. *The stainless steel industry's response to new challenges: Grade selection against the background of the alloying element market*. Belgia : Euro Inox, 2008.
6. Avesta Welding. *Duplex ruostumattomien terästen hitsaus*. Avesta : Avesta Welding AB, 2006.
7. Balmforth, M. C. and Lippold, J. C. *A New Ferritic-Martensitic Stainless Steel Constitution Diagram*. s.l. : Welding Research supplement, 2000. Vol. I.
8. BE Group Oy. *Tuoteluettelo*. s.l. : Be Group Oy, 2010.
9. Borg, Pekka. *Konstruktioinsinööri, EWS-hitsausneuvoja, konepajapäällikkö*. [interv.] Sami Korhonen. Heinäkuu 10, 2010.
10. Bornmyr, Anders and Holmberg, Björn. *Handbook for the pickling and cleaning of stainless steel*. s.l. : Avesta Polarit Welding AB, 1995.
11. Brongers, Michiel P.H. and Mierzwa, Aaron J. *Corrosion cost in pulp and paper industry*. 2002.
12. Carl Cloos Schweißtechnik GmbH. CP (Cold Process). *Cloos - Schweisstechnik*. [Online] Carl Cloos Schweißtechnik GmbH. [Cited: Elokuu 25, 2010.] [http://www.cloos.de/uk/welding-processes/CP\\_Cold\\_Process\\_welding.php](http://www.cloos.de/uk/welding-processes/CP_Cold_Process_welding.php).

13. Crookes, Roger. *Pickling and Passivating Stainless Steel*. Second Edition. Sheffield : Euro Inox, 2007. 978-2-87997-224-4.
14. Cunat, Pierre-Jean. *The Euro-Inox Handbook of Stainless Steel*. Brysseli : Euro-Inox, 2002.
15. De Renzo, D.J. *Corrosion Resistant Materials Handbook*. 4th edition. Noyes : William Andrew Publishing, 1985.
16. ESAB. *Hitsauslisäaineet*. Helsinki : ESAB Oy, 2008.
17. ESAB Oy. *Hitsausuutiset*.1, Helsinki : ESAB oy, 2007.
18. Euro Inox. Stainless Steel: Tables of Technical Properties. *Euro Inox*. [Online] Syyskuu 4, 2007. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] [http://www.euro-inox.org/pdf/map/Tables\\_TechnicalProperties\\_EN.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf).
19. Euro Inox. What is stainless steel. *Euro Inox*. [Online] Heinäkuu 25, 2008. [Cited: heinäkuu 26, 2010.] [http://www.euro-inox.org/pdf/map/What\\_is\\_Stainless\\_Steel\\_EN.pdf](http://www.euro-inox.org/pdf/map/What_is_Stainless_Steel_EN.pdf).
20. Fronius. The CMT Process –A Revolution in Materials-Joining Technology. [Online] Fronius. [Cited: Elokuu 25, 2010.] [http://www.gxcme.edu.cn/jpkc1/hj060522/weld12.6/lesson/lesson5/5\\_1\\_6.pdf](http://www.gxcme.edu.cn/jpkc1/hj060522/weld12.6/lesson/lesson5/5_1_6.pdf).
21. Greeff, M. L. and du Toit, M. *Looking at Sensitization of 11-12% chromium EN 1.4003 Stainless Steels during Welding*. s.l. : Welding Journal, 2006.
22. Holmberg, Björn. *Stainless Steels - their properties and suitability for welding*. s.l. : Avesta Polarit Welding AB, 2002.
23. Holmberg, Björn. *Svetsning av det nya duplexa stålet Outokumpu LDX 2101*. Tukholma : Outokumpu AB, 2008.
24. Hyyryläinen, Janne. *Särmättävien ohutlevyosien valmistustarkkuuteen vaikuttavat tekijät ja niiden määrittäminen*. Oulu : Oulun yliopisto, 2004.
25. ISSF. *ISSF - Annual Review*. s.l. : International Stainless Steel Forum, 2010.

26. ISSF. *New 200-series steels: An opportunity or a threat to the image of stainless steel?* s.l. : International Stainless Steel Forum, 2005.
27. ISSF. *The Ferritic Solutions*. s.l. : ISSF - International Stainless Steel Forum, 2007.
28. Joseph, Davis R. *Corrosion of weldments*. s.l. : ASM International, 2006.
29. Kaufman, JG and McGuire, Michael F. *Stainless Steels for Design Engineers*. s.l. : ASM International, 2008.
30. Keränen, Marko. *Effect of welding parameters of plasma transferred arc welding method on abrasive wear resistance of 12V tool steel deposit*. Espoo : Aalto Yliopisto, 2010. 978-952-60-3110-1.
31. Kunnossapitoyhdistys ry. *Korroosiokäsikirja*. Kolmas painos. Helsinki : KP-Media Oy, 2006.
32. Kyröläinen, Antero and Lukkari, Juha. *Ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus*. Toinen painos. Tampere : Metalliteollisuuden keskusliitto MET, 2002.
33. Lahti, Kari. *Ruostumattoman teräksen lastuaminen*. Espoo : Valmistustekniikan kerho, Koneinsinööriosasto, TKK Otaniemi, 1997.
34. Leffler, Béla. *Stainless - stainless steels and their properties*. *Outokumpu Oy:n sivuilta*. [Online] 2001. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] <http://www.outokumpu.com/files/Group/HR/Documents/STAINLESS20.pdf>.
35. London Metal Exchange. *Nickel price graphs*. *London Metal Exchange - The World Centre For Non-Ferrous Metal Trading*. [Online] London Metal Exchange. [Cited: Heinäkuu 12, 2010.] [http://www.lme.com/nickel\\_graphs.asp](http://www.lme.com/nickel_graphs.asp).
36. Lukkari, Juha. *Hitsaustekniikka, perusteet ja kaarihitsaus*. Helsinki : Oy Edita Ab, 1998.
37. Lula, R.A. *Toughness of Ferritic Stainless Steels*. s.l. : ASTM International, 1980.
38. Martikainen, Jukka. *Hitsausmetallurgia, luennot*. Lappeenranta : Digipaino, 2010.
39. Metalliteollisuuden keskusliitto. *Tekninen tiedotus 23/86, Ohutlevyjien taivutus*. Helsinki : Metalliteollisuuden keskusliitto MET, 1986.



40. Metalliteollisuuden keskusliitto. *Tekninen tiedotus 9/85, Teräslevyjien terminen leikkaus*. Helsinki : Metalliteollisuuden keskusliitto MET, 1985.
41. Moore, Peter. Technical HandBook of Stanless Steel. *Atlas Specialty Metals:n web-sivusto*. [Online] Toukokuu 14, 2008. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] <http://www.atlasmetals.com.au/files/atlas-technical-handbook-rev-may-2008.pdf>.
42. Myer, Kutz. *Handbook of Materials Selection*. s.l. : John Wiley & Sons, 2002.
43. Oberg, Erik, et al. *Machinery's Handbook & Guide to Machinery's Handbook*. 28th edition. s.l. : Industrial Press, 2008.
44. Outokumpu Distribution Oy. Service center Järvenpää, Plate service Jyväskylä. *Outokumpu Distribution Oy:n web-sivusto*. [Online] Kesäkuu 12, 2009. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] <http://www.outokumpu.com/43414.epibrw>.
45. Outokumpu Distribution Oy. Steel Grades, Properties and Global Standards. *Outokumpu Oy:n web-sivusto*. [Online] Maaliskuu 19, 2004. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] [http://www.outokumpu.com/applications/upload/pubs\\_32381211.pdf](http://www.outokumpu.com/applications/upload/pubs_32381211.pdf).
46. Outokumpu Stainless AB. *Corrosion Handbook for Stainless Steels*. Tenth Edition. Avesta : Outokumpu Oyj, 2009.
47. Outokumpu Stainless Oy. *Ruostumattomat teräkset*. 3. painos. Tampere : Teknologiateollisuus Oy, 2004. Eripainos julkaisusta Muokatut teräkset, raaka-ainekäsikirja 2001. 951-817-839-9.
48. Peronvuo, Rauli. *Product expert - ferritics*. Kesäkuu 24, 2010.
49. Roberge, P.R. *Handbook of Corrosion Engineering*. s.l. : McGraw-Hill, 2000.
50. Rouhiainen, Asko. *Konstruktioinsinööri, toimitusjohtaja*. [interv.] Sami Korhonen. Heinäkuu 10, 2010.
51. Ruukki Oy. Ruostumattomat teräslevyt ja -kelat, varasto-ohjelma 2009. *Ruukki Oy:n web-sivusto*. [Online] Elokuu 25, 2008. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] [http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/1794332CB97301F2C22575F4002BCB47/\\$File/Ruostumattomat%20ter%C3%A4slevyt%20ja%20kelat\\_07.2009.pdf?openElement](http://www.ruukki.com/www/materials.nsf/materials/1794332CB97301F2C22575F4002BCB47/$File/Ruostumattomat%20ter%C3%A4slevyt%20ja%20kelat_07.2009.pdf?openElement).

52. Schild, Risto. *Myyntipäällikkö*. Kesäkuu 18, 2010.
53. Somotec Oy. *Pelox peittaustuotteet*. Kuopio : Somotec Oy, 2006.
54. SSAB tunnplåt AB. *Sheet Steel Forming Handbook - size shearing and plastic forming*. Borlänge : SSAB, 2003. 91-971592-9-8.
55. Taulavuori, Tero. *Ferriittisten ruostumattomien terästen merkitys lisääntyy*. Forssa : Teknologiateollisuus ry, 2009.
56. The Welding Experts - Lincoln Electric. Surface Tension Transfer (STT). *Lincoln Electric - The Welding Experts*. [Online] Lincoln Electric. [Cited: Elokuu 25, 2010.] <http://content.lincolnelectric.com/pdfs/products/literature/nx220.pdf>.
57. Tibnor Oy. Ruostumattomat teräkset. *Tibnor Oy:n web-sivusto*. [Online] Maaliskuu 3, 2010. [Cited: Heinäkuu 26, 2010.] <http://www.tibnor.fi/BinaryLoader.axd?OwnerID=4e41371e-31d8-447e-9b1f-d5b56bb81de9&OwnerType=1&PropertyName=Files&FileName=Ruostumattomat.pdf&Attachment=True>.
58. Toppila, Rauno. *Ferriittiset ruostumattomat teräkset*. Kemi : Kemi-Tornion ammattikorkeakoulu, 2010. 978-952-9785-96-4.
59. Työterveyslaitos. KAMAT-tietokortit. *Työterveyslaitos - KAMAT-tietokortit*. [Online] [Cited: Heinäkuu 23, 2010.] <http://www.ttl.fi/partner/kamat/tietokortteihin/Documents/Metallinhappopeittaus.pdf>.
60. Väisänen, Tapio and Paro, Jukka. *Superausteniittisen ruostumattoman teräksen ja ruostumattoman duplex-teräksen lastuttavuus*. Espoo : Otamedia Oy, 2000. 951-22-5048-9.
61. Varis, Juha. *Levytyötekniikka*. Lappeenranta : Digipaino, 2007.
62. VTT. *Käsikirja - Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa*. s.l. : VTT, 2006. 2-87997-208-6.
63. Winston, Revie R. *Uhlig's Corrosion Handbook*. 2nd edition. s.l. : John Wiley & Sons, 2000. 0-471-15777-5.