



Ferriittiset ruostumattomat teräkset ja niiden hitsaus

May 12, 2011

www.outokumpu.com

Ruostumattomat teräket

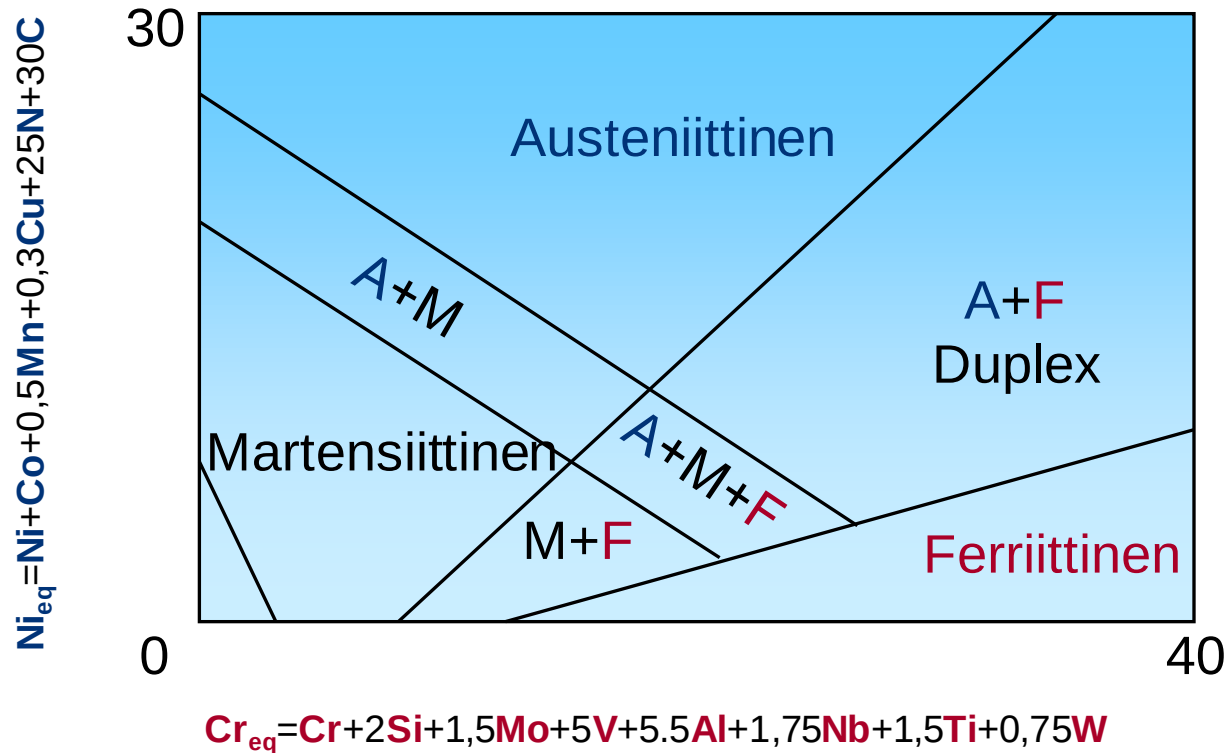
Ferriittisten ominaisuudet

Ferriittisten hitsaus

Ruostumaton teräs

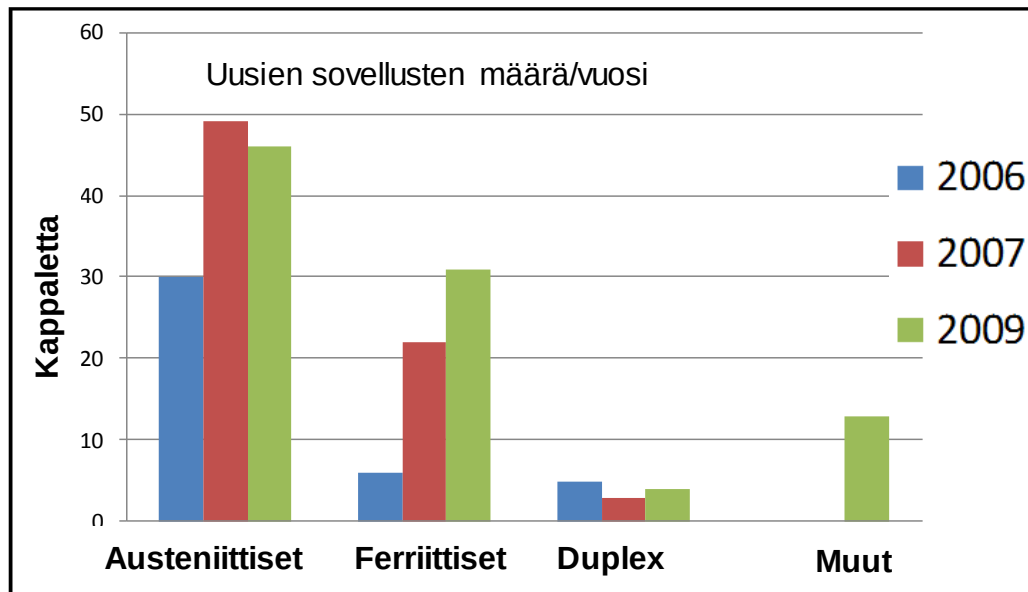
- Rautapohjainen metalliseos, johon on seostettu korroosionkestävyyden parantamiseksi vähintään 10,5 % **kromia (Cr)**.
- Pintaan muodostuu hapettavissa olosuhteissa hyvin ohut, läpinäkyvä kromioksidirikas (Cr_2O_3) **passiivikalvo**.
- Kromin (Cr), molybdeenin (Mo), nikkelin (Ni) ja typen (N) määrillä on suurin merkitys sekä korroosionkestävyyteen että kiderakenteeseen.

Ruostumattoman teräksen mikrorakenteen riippuvuus seostuksesta



Ferriittinen ruostumaton teräs

- Rautapohjainen seos, jossa 10.5-30 % kromia
- Tyypillisesti ei seosteta nikkeliä
- Voi sisältää muita seosaineita kuten Mo, Si, Al, Ti ja Nb
- Seostus räätälöidään sovelluskohtaisesti tarvittavien ominaisuuksien (muovattavuus, korroosionkestävyys) mukaan
- Osuus viimevuosina kasvanut nikkelin hinnannousun seurauksena. Austeniittisissa nikkeli keskeinen seosaine.



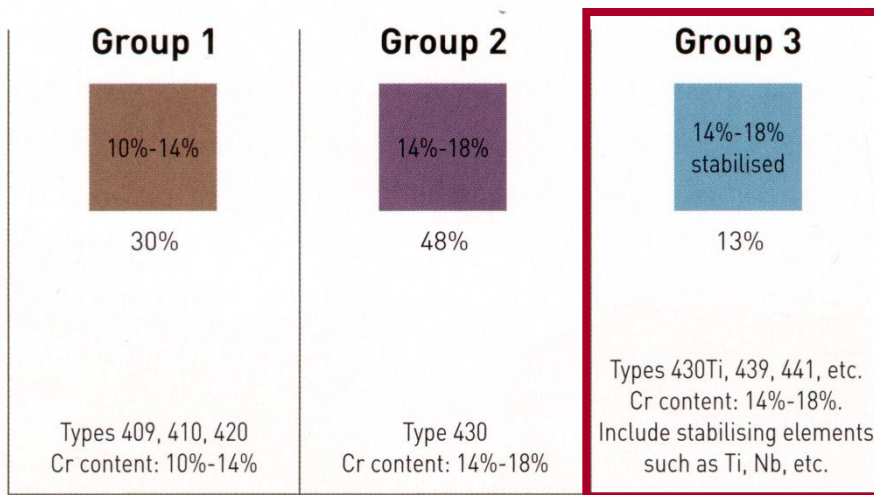
Source: ISSF

Ferriittiset ruostumattomat teräslaadut

- ns. ferriittiset ”vakiolaadut” voidaan jakaa ominaisuuksiensa perusteella kolmeen eri ryhmään
 - Ryhmä 1: Ruostumattomat rakenneteräkset
 - Ryhmä 2: 17 Cr vakiolaatu
 - Ryhmä 3: Stabiloidut laadut
 - Ryhmä 4: Molybdeeniseostetut laadut
 - Ryhmä 5: Superferriittiset laadut

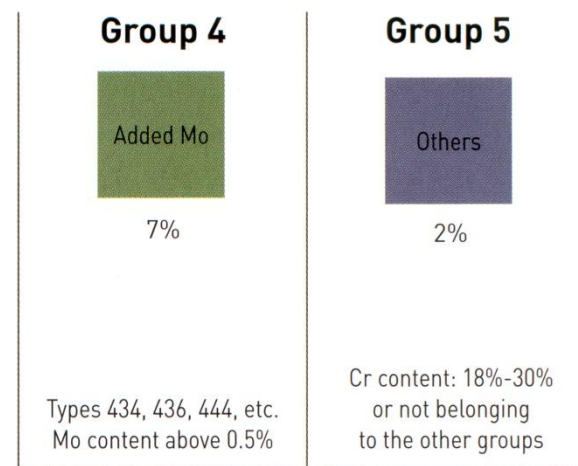
STANDARD FERRITIC GRADES

~91% of total volume in 2006



SPECIAL FERRITIC GRADES

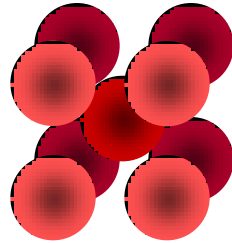
~9% of volume in 2006



Fysikaaliset ominaisuudet

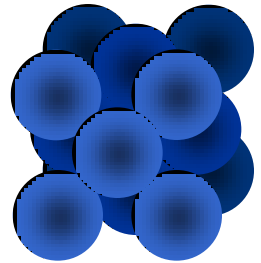
- Ferriittiset ruostumattomat teräkset:

- Tilakeskeinen kuutiollinen rakenne, ka. tiheys ~68%
- Tiheys: $\sim 7.7 \text{ kg/dm}^3$
- Sähkönvastus: $\sim 0.60 \text{ } \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$
- Lämmönjohtavuus: $\sim 25 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Lämpölaajenemiskerroin ($20^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C}$): $\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Magneettinen
- Välisija-atomien, C ja N diffuusionopeus suurempi ferriittisissä teräksissä



- Austeniittiset ruostumattomat teräkset:

- Tiivispakkauksellinen pintakeskeinen kuutiollinen rakenne, ka. tiheys ~74%
- Tiheys: $\sim 7.9 \text{ kg/dm}^3$
- Sähkönvastus: $\sim 0.73 \text{ } \Omega \text{ mm}^2 \text{ m}^{-1}$
- Lämmönjohtavuus: $\sim 15 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Lämpölaajenemiskerroin ($20^\circ\text{C} \rightarrow 100^\circ\text{C}$): $\sim 16 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Antimagneettinen
- Välisija-atomien, C ja N liukoisuus suurempi austeniittisissä laaduissa

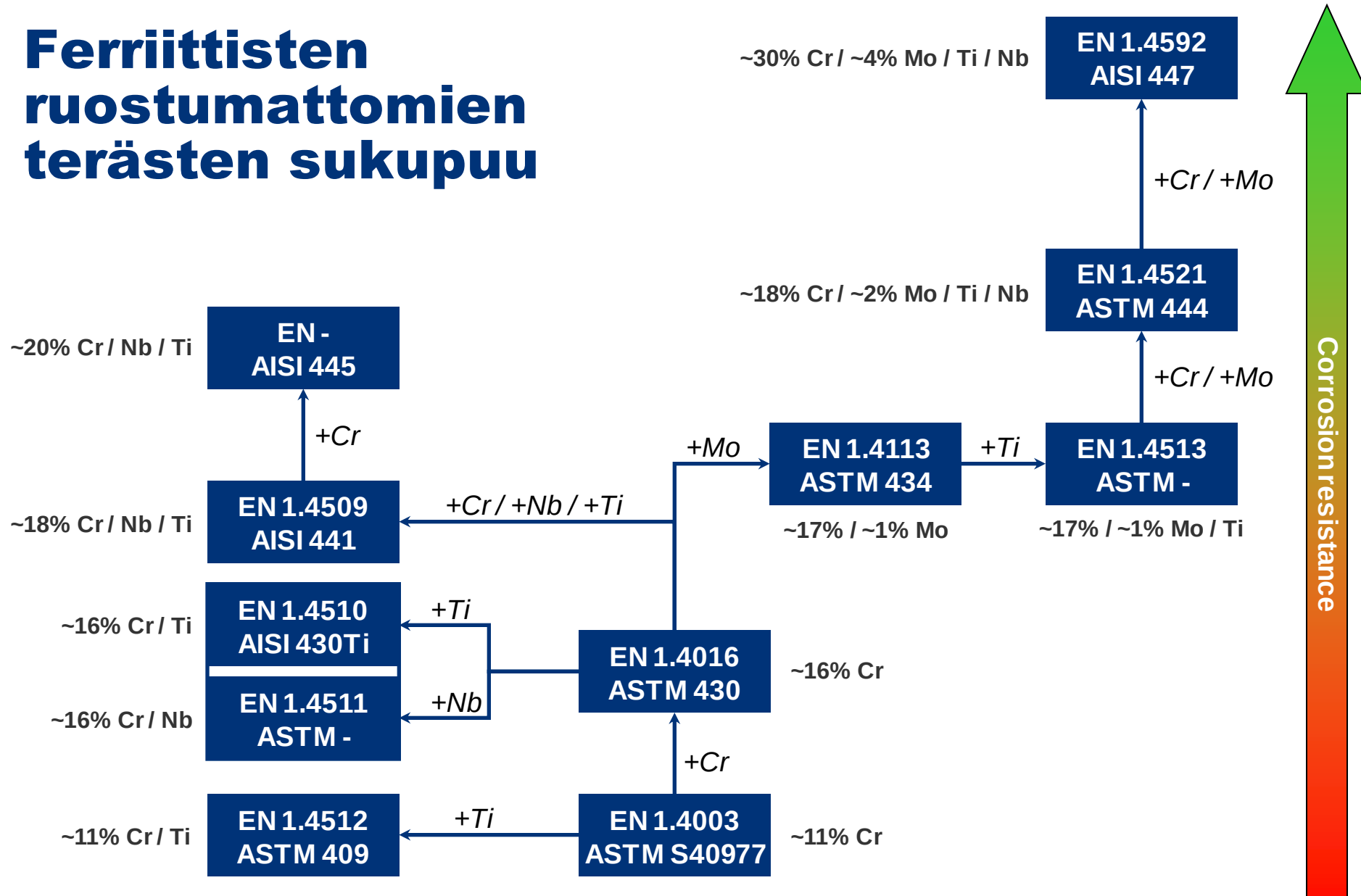


Yleistä ferriittisten muovattavuudesta

Ferriittisten mekaaniset ominaisuudet

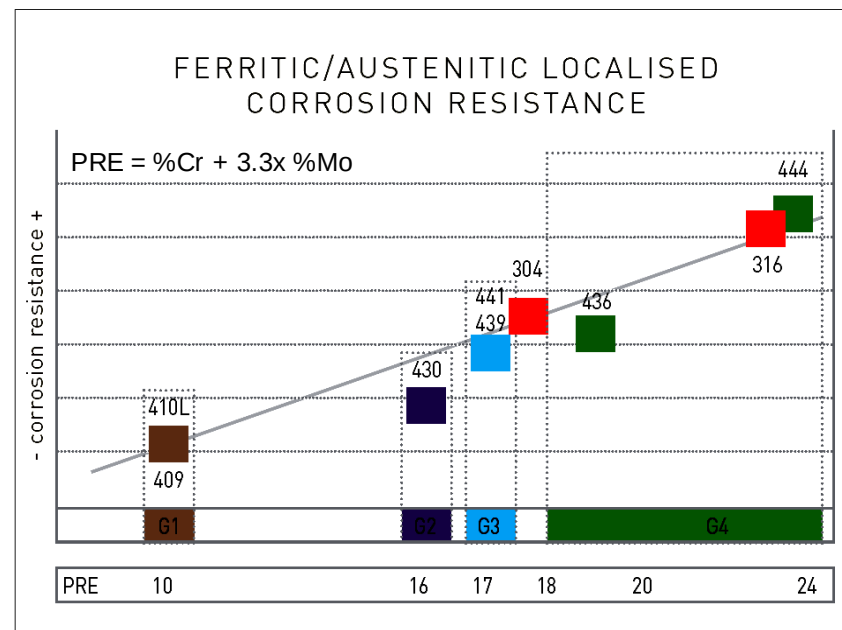
Ferriittisten hitsaus

Ferriittisten ruostumattomien terästen sukupuu



Korroosionkestävyys

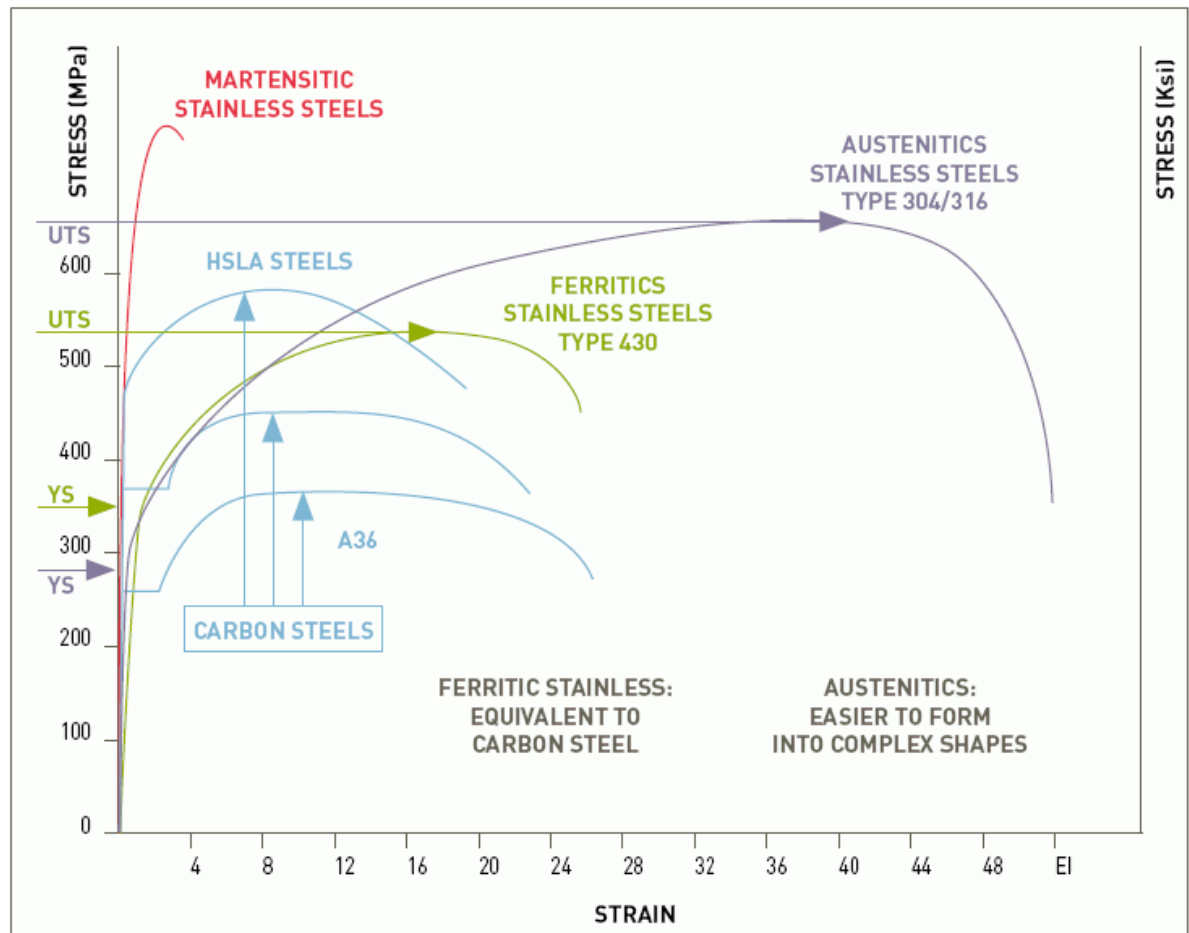
- Korroosionkestävyys on verrannollinen kromi ja molybdeenipitoisuuteen:
 - Nitridien muodostumisen takia typen vaikutus korroosionkestävyyteen on rajoitettu
 - Ferriittiset laadut eivät sisällä nikkeliä, joka parantaa uudelleen passivoitumista.
- Raerajakorroosiolle herkittyminen voi tapahtua stabiloimattomilla laaduilla lyhyenkin lämpökäsittelyn jälkeen, esim. hitsaus
 - Ferriitti matriisissa on korkea hiilen ja typen diffuusionopeudet
 - Titaani ja/tai niobi stabilointi on hyödyksi monissa sovelluksissa.
- Ferriittiset laadut eivät ole alttiita jännityskorroosiolle (SCC) kuten austeniittiset standardilaadut.



Source: ISSF The Ferritic solution

Mekaaniset ominaisuudet

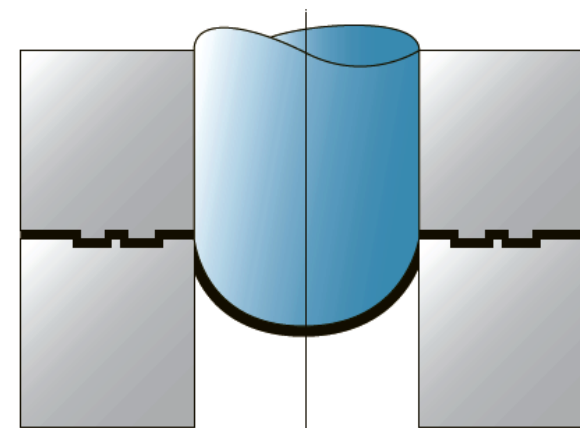
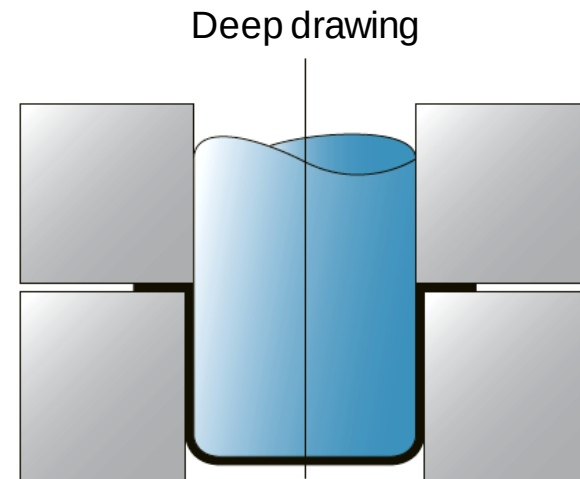
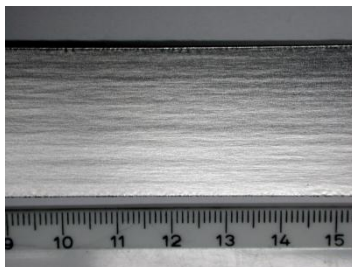
- Lähempänä hiiliteräksiä kuin austeniittisia!
- Austeniittiseen verrattuna:
 - Korkeampi myötölujuus
 - Vähäisempi lujittuminen
 - Alhaisempi murtovenymä



Kuva: ISSF, The Ferritic Solution

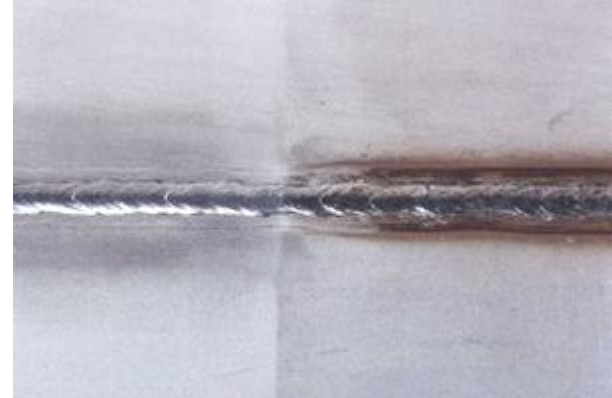
Muovattavuus

- Ferriittisten laatuojen syväveto helpompaa kuin austeniittisten
 - Ridging tai roping-ilmiö.
- Stabilointi (Ti ja/tai Nb) (esim. EN 1.4509) lieventää ilmiötä
- Ferriittisten laatuojen venymät rajoitettuja verrattuna austeniittisiin
- Ferriittisten laatuojen muokkauslujittuminen matalampaa



Stretch forming

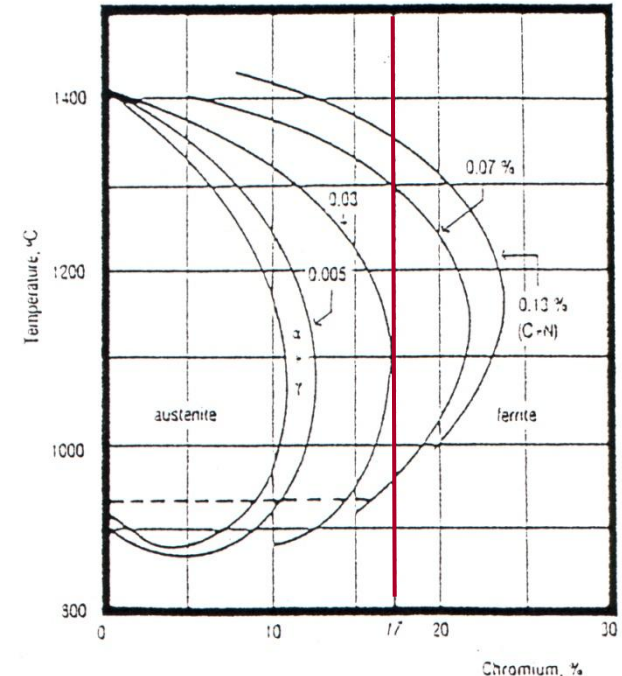
Liitettävyyys



- Hitsaus:
 - Rakeenkasvu on voimakkaampaa kuin austeniittisilla laaduilla ja voi johtaa hitsialueen poikkeaviin mekaanisiin arvoihin.
 - Stabilointi titaani tai niobilla on keino välttää herkistyminen raerajakorroosiolle.
 - EN 1.4016 laadun hitsaus on vaativaa. Piste- ja laser-hitsaus sopivia menetelmiä.
- Erilaiset juotosmenetelmät soveltuvat ferriittisille laaduille paremmin kuin austeniittisille
- Yleiset mekaaniset liittämismenetelmät ja liimaus soveltuvat myös ferriittisille ja voivat korvata hitsauksen.

Mitä tarkoittaa ferriittisen ruostumattoman teräksen stabilointi ?

- Ferriittisiin ruostumattomiin teräksiin (esim. P810) muodostuu austeniittia lämpökäsittelyjen yhteydessä (ns. Austeniittiluuppi, γ), joka voi aiheuttaa ei-toivottuja ominaisuuksia:
 - => Karkeneminen (α') jäähtymisen yhteydessä voi johtaa haurastumisongelmiin (esim. hitsit)
 - => Herkistyminen kromikarbidien erkautumisen vuoksi (kromiköyhät vyökykkeet)
- Austeniitin määrä riippuvainen erityisesti vapaan hiilen (C) ja typen (N) määrästä
 - => C+N pyritään sitomaan erkaumiin seostamalla vahvoja karbidin/nitridinmuodostajia (Ti, Nb, Zr)
 - => Stabilointi suoritetaan standardien yhtälöiden mukaan huomioiden C+N-pitoisuus
 - => matalan stabilointi-indexin aikaansaamiseksi C+N pitoisuus tulisi olla mahdollisimman alhainen
- Näin ollen aikaansaadaan kaikissa lämpötiloissa ferriittinen rakenne, jolla merkittävä vaikutus valmistettavuuteen sekä käyttöominaisuuksiin

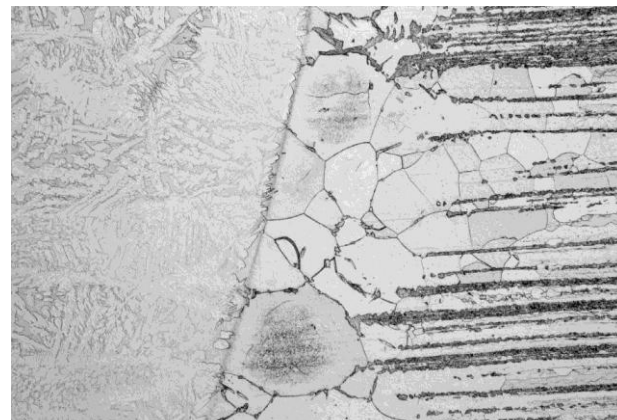


Ferriittisen ruostumattoman teräksen niobi- ja kaksoisstabilointi

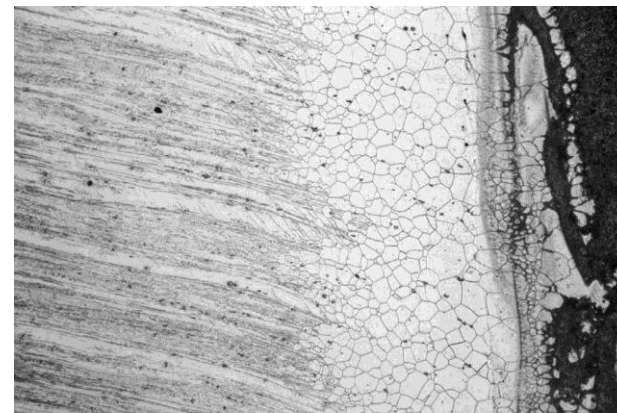
- Stabilointiin käytettävän Niobin ja/tai Titaanin osuus on riippuvainen välisija-atomipitoisuudesta seuraavasti:
 - $\text{Ti } 6 \times (\text{C} + \text{N})$
 - $\text{Nb } 8 \times (\text{C} + \text{N})$
 - $\text{Nb} + \text{Ti} = 0.2 + 4(\text{C} + \text{N})$
- Alhainen C+N pitoisuus mahdollistaa alhaiset stabilointiasteet
 - Kustannukset (Ti/Nb kalliita seosaineita)
 - Minimoi haittavaikutukset (liiallinen Ti-seostus ongelmallinen pinnan kannalta)
- Ylimääräinen Nb seostus muodostaa teräkseen metallienvälisiä ns. lavesin faaseja (Fe_2Nb)
 - parantaa virumisenkestävyyttä (hyödynnetään kuumalujuutta vaativissa kohteissa, kuten esimerkiksi pakoputkistoissa)
- Kaksoisstabiloinnilla kyetään hyödyntämään molempien edut
 - Ti parantaa hitsattavuutta ja valmistettavuutta (ympäyrysefekti => valurakenne)
 - Nb mahdollistaa alhaisen Ti-tason (pintavirheiden minimointi)

Stabiloinnin vaikutukset lopputuoteominaisuuksiin

- Hitsattavuus
 - Herkistyminen eliminoitu
 - Ti-seostuksella tasa-akselinen hitsin mikrorakenne
 - Ei karkenemista
 - Lämmöntuontirajoitukset rakeenkasvuhaurauden eliminoimiseksi
- Muovattavuus
 - Paremmat R-arvot => hyvä syvävedettävyys
 - Vähäisempi taipumus Roping-pintavikaan (varauksin, vaatii kontrolloidun valmistuksen)
- Virumisenkestävyys
 - Ylimääräinen Nb muodostaa Fe_2Nb -erkaumia, jotka parantavat kuumalujuutta



Stabiloimaton 1.4016



Tuplastabiloitu 1.4521

Outokummun valmistamat ferriittiset ruostumattomat teräkset

- EN 1.4003, UNS S40977: 12Cr ”rakenneteräs”
- EN 1.4512, AISI 409: 12Cr, Ti-stabiloitu ”pakoputkiteräs”
- EN 1.4016, AISI 430: 17Cr ”yleisteräs”
- EN 1.4509, AISI ”441”: 18Cr, Ti-Nb -stabiloitu ”yleisteräs”
- EN 1.4521, AISI 444, 17Cr-2Mo: Ti-Nb -stabiloitu ”kuumavesivaraajateräs”

} Matala Cr

Teräslaji	Myötölujuus Rp0,2 (MPa)	Murtolujuus Rm (MPa)	Murtovenymä A80(%)
1.4003	Min. 320 (300 ... 360)	450 ... 650	Min. 20 (20 ... 28)
1.4512	Min 220 (270 ... 310)	380 ... 560	Min. 25 (27 ... 35)
1.4016	Min. 280 (300 ... 360)	450 ... 600	Min. 20 (25 ... 30)
1.4509	Min. 250 (300 ... 350)	430 ... 630	Min. 18 (27 ... 32)
1.4521	Min. 300 (360 ... 410)	420 ... 640	Min. 20 (25 ... 30)

Yleistä ferriittisten muovattavuudesta

Ferriittisten mekaaniset ominaisuudet

Ferriittisten hitsaus

Yhteenveto - hitsattavuus

Ferriittiset teräket voidaan jakaa hitsattavuuden kannalta kolmeen ryhmään:

Ryhmä / Teräslaji

- Niukkahiiliset* / EN 1.4003
- Ti / Nb stabiloidut** / EN 1.4509; EN 1.4521
- Stabiloimattomat*** / EN 1.4016

Yleiskuvaus hitsattavuudesta

- Hyviä hitsattavia
- Tyydyttävästi hitsattavia
- Vaativia hitsausteknisesti. Perusaineen haurausilmiöt huomioitava

Suurin osa ferriittisistä ruostumattomista teräksistä voidaan hitsata yleisillä hitsaustekniikoilla ja esilämmityksen tarve vain poikkeustapauksissa

Ferriittisillä ruostumattomilla teräksillä on austeniittisiin teräksiin verrattuna alhaisempi lämpölaajeneminen ja suurempi lämmönjohtavuus $\Rightarrow$ vetely on alhaisempi

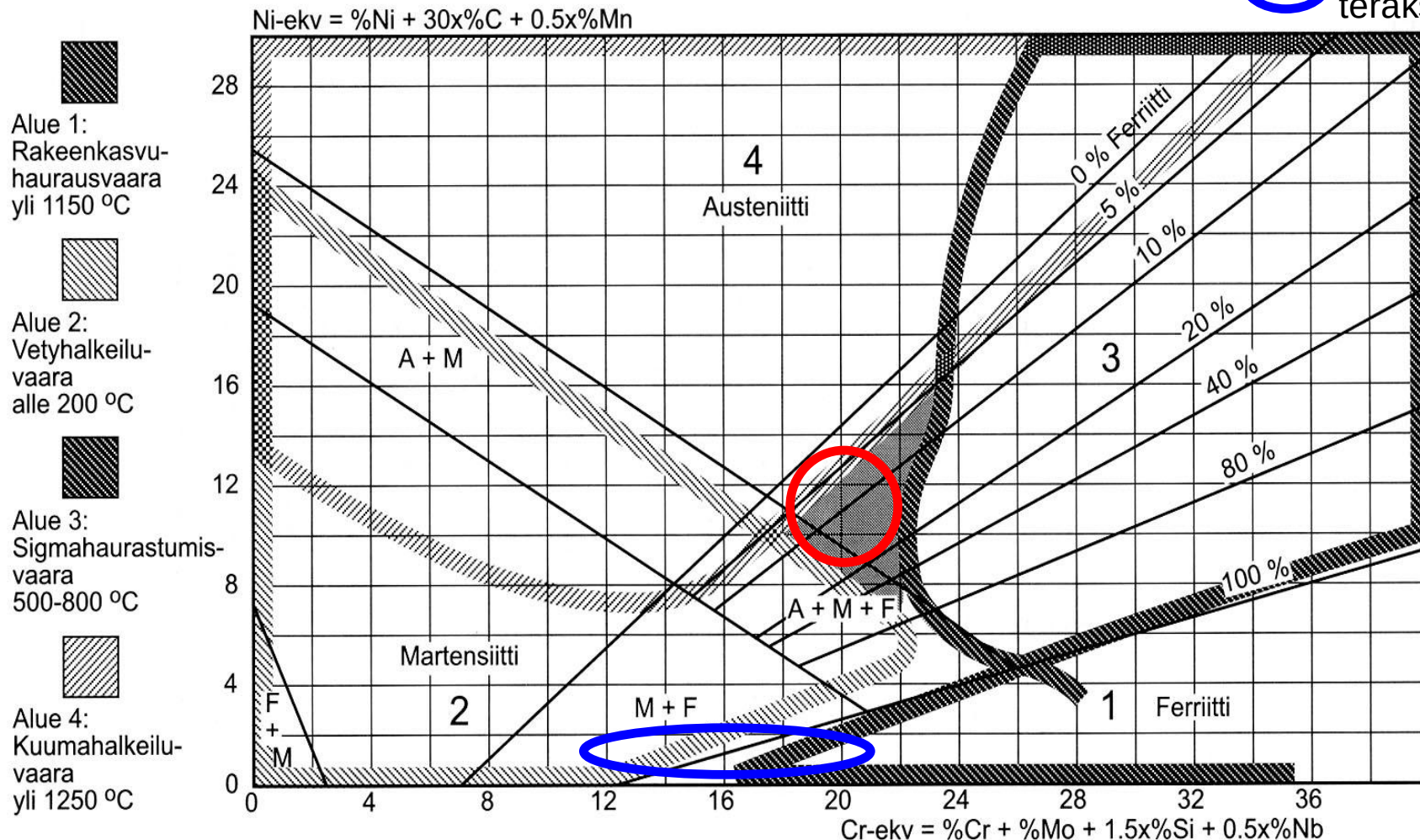
* Sitkeysominaisuudet ovat parhaat, kun muutosvyöhykkeen mikrorakenne on niukkahiilinen sälemartensiitti

** Herkistymisen ja martensiitin muodostuminen on estetty, mikrorakenne ferriittinen kaikissa lämpötiloissa

*** Herkistymisvaara sekä muutosvyöhyke haurastuu (martensiitin muodostuminen ja raekoon kasvu)

Hitsattavuutta rajoittavat tekijät

 EN 1.4301 / EN 1.4436
 Ferriittiset-teräkset



Hauraus- ja murtumisilmiöiden välttäminen

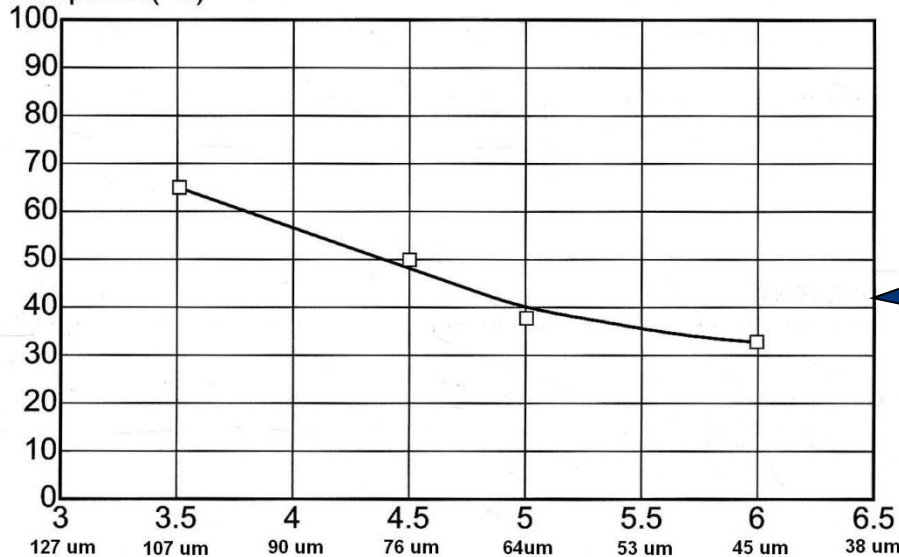
Rakeenkasvuaurastuminen

- Lisäaine: Austeniittinen lisäaine
- Perusaine: Vaikutusmahdollisuus vähäinen
- Menetelmä: Pieni lämmöntuonti

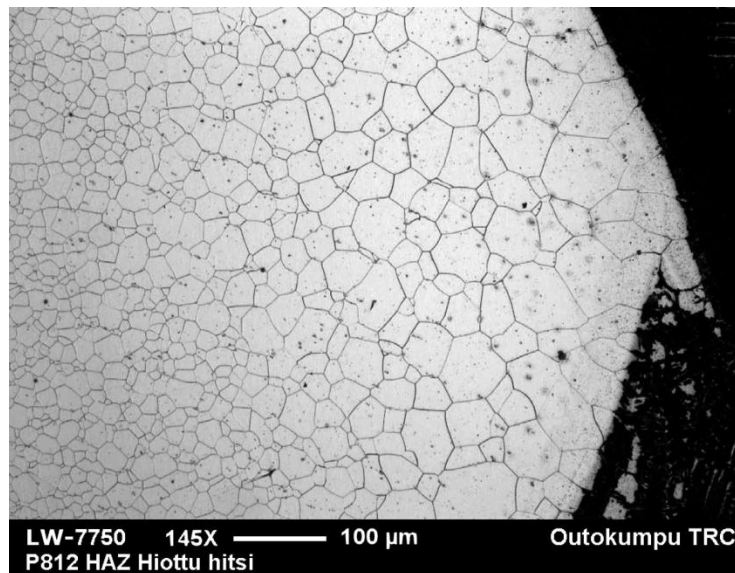
Vetyhauraus

- Lisäaine: Niukkavetyisiä, kuivia ja puhtaita
- Perusaine: Railopinnat puhtaita ja kuivia
- Menetelmä: Ei vetyä suojaasuun

Lämpötila (°C)



ASTM raekokomero
μm



Raekoon vaikutus iskusitkeyden transitiolämpötilaan teräksen 1.4526 (AISI 436, X6CrMoNb 17-1) simuloidussa hitsin HAZ:ssa.

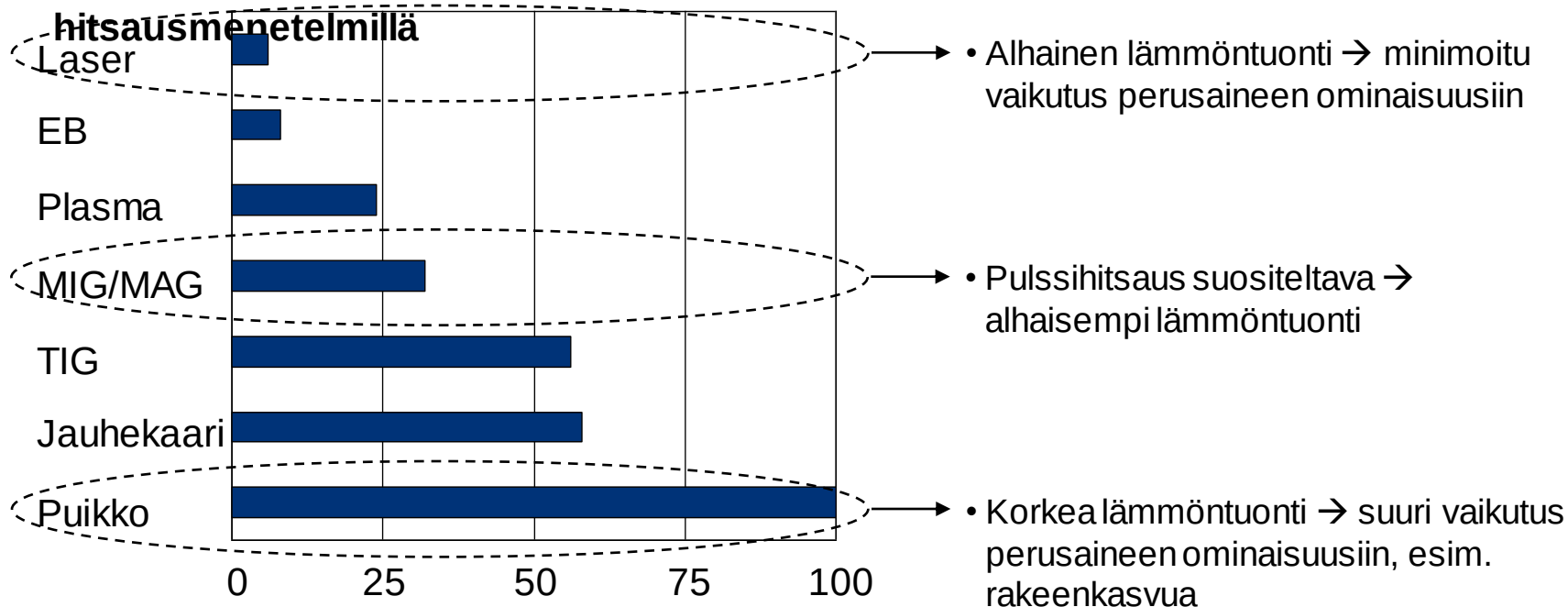
Hauraus- ja murtumisilmiöt - Kooste

Hauraus- tai murtumisilmiö	Syy	Seuraus	Miten vältetään	Ongelmalliset teräslajit
Herkistyminen	Cr-karbidien erkautuminen raerajoille	Huono korroosionkesto	Lyhyt lämpökäsittely n. 800 °C:ssa	1.4016
Rakeenkasvu	Korkeasta lämpötilasta johtuva rakeenkasvu	Hauraus HAZ:ssa	Lämmöntuonnin minimointi	1.4512, 1.4016, 1.4509, 1.4521
475 °C haurastuminen	Ferriittisen rakenteen erkautuskarkeneminen 400-500 °C:ssa	475 °C hauraus	Lyhyt lämpökäsittely n. 600 °C:ssa ja nopeajäähdytys	1.4016, 1.4509, 1.4521 (Cr, Mo, Ti, Si) seostus edesauttaa)
σ -haurastuminen	Metallien välisten faasien muodostuminen 550-900 °C:ssa	Sigmahauraus	Lyhyt lämpökäsittely yli 900 °C:ssa ja nopeajäähdytys	1.4521 (Cr, Mo, Ti ja Si) seostus edesauttaa)
Vetyhauraus	Vety mikrorakenteessa	Vetyhauraus	Estetään vedyn pääsy hitsitapahtumaan	Kaikki
Martensiitin muodostuminen	Martensiitin muodostuminen nopean jäähdytymisen seurauksena	Haurastuminen HAZ:ssa	Martensiitin poistaminen hehkuttamalla 600-700 °C:ssa	1.4016 (korkea C ja matala Cr edesauttavat)

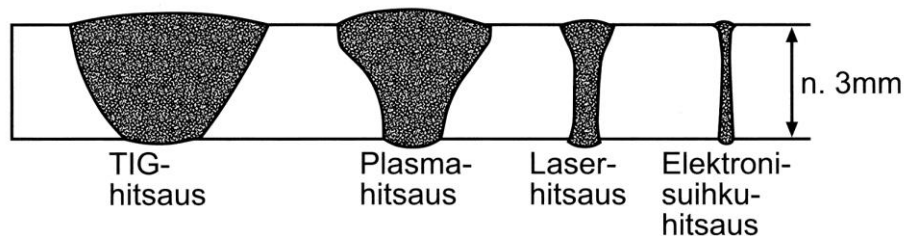
Hitsausmenetelmät - yleistä

Suhteellinen lämmöntuonti eri

hitsausmenetelmillä



Lämmöntuonnin vaikutus hitsin vaikutusvyöhykkeeseen – kuvainnollinen esitys



Lisäaineen valinta

Pääsääntö lisäainevalintaan:

- Ferriittiset teräkset suositellaan yleensä hitsattavaksi austeniittisella lisäaineella
- Ferriittisiä lisäaineita käytetään vain erikoisolosuhteissa, kuten esim. rikkihaitoiset kaasut.

Yleisimpiä hitsauslisäaineita:

EN	ASTM	Lisäaine
1.4003	S40977	EN 19 9L & 18 8Mn & EN 13
1.4512	409	EN 19 9L & 18 8Mn & EN 13
1.4016	430	EN 19 9L & EN 23 12L & EN 17
1.4509	441	EN 19 9L & EN 23 12L & EN 17
1.4521	444	EN 19 12 3L & EN 23 12 2L

Hitsisulan suojaaminen

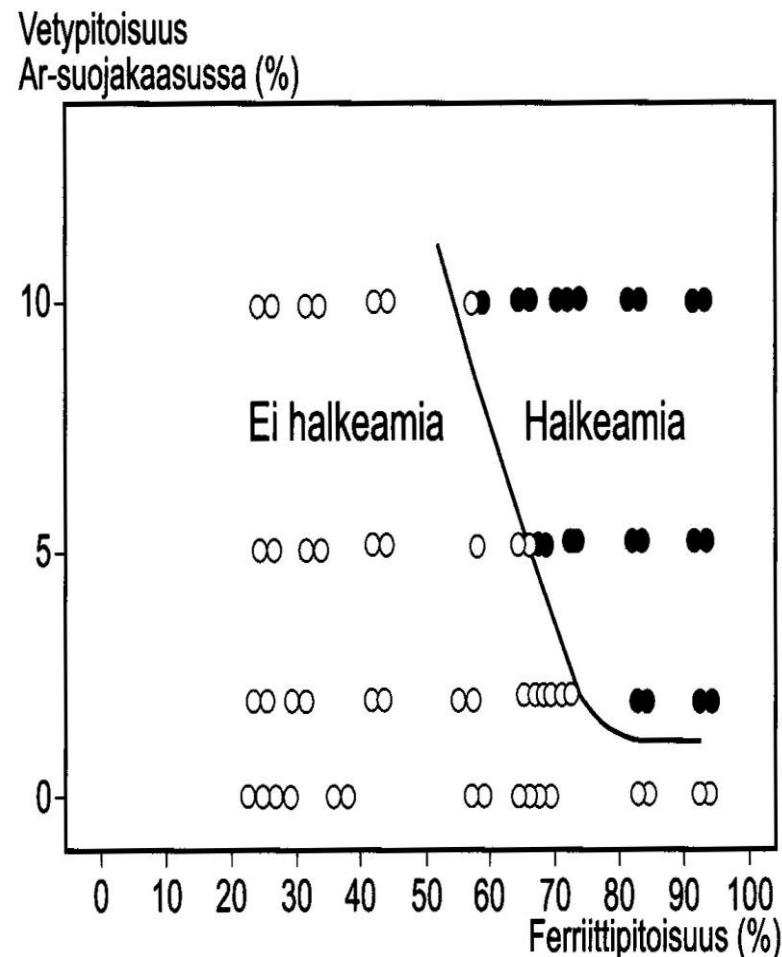
Ferriittisiä teräksiä hitsattaessa on vältettävä vetyä sisältävän suojakaasun käyttöä.

Vetyä sisältävän suojakaasun käyttö voi aiheuttaa haurastumista ja halkeilua ferriittiä sisältävässä hitsiaineessa.

Hitsin vetypitoisuutta nostavat:

- kosteat puikot, jauheet ja täytelangat
- vety suojakaasussa

➔ Tästä syystä on huolehdittava lisäaineiden asiallisesta varastoinnista ja käsittelystä.



Tärkeä muistaa:

Ferriittisillä teräksillä suuri vetyhalkeiluvaara

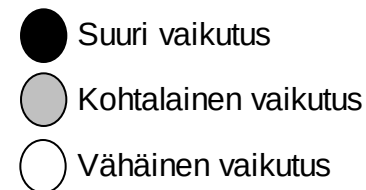
Hitsisulan suojaaminen - Suojakaasut

Menetelmä	Suojakaasu	Juurikaasu
MAG	- Ar + 2% O ₂ - Ar + 2% CO ₂	
MAG-täytelanka	- Ar + 2% O ₂ / Ar + 2% CO ₂ - Ar + 15-25% CO ₂ - 100% CO ₂	
TIG ja Plasma	- Ar	- Ar
Puikko	- Emäs	

Yleisiä ohjeita:

- Suojakaasussa ei saa käyttää vetyä ja typpeä
- Suojakaasussa voidaan käyttää heliumia tunkeuman parantamiseksi
- Emäspuikolla saadaan hitsiaineeseen matala vetypitoisuus ja hyvä iskutkeys

Ruostumattoman teräksen hitsausliitos on korroosioherkempää kuin perusaine

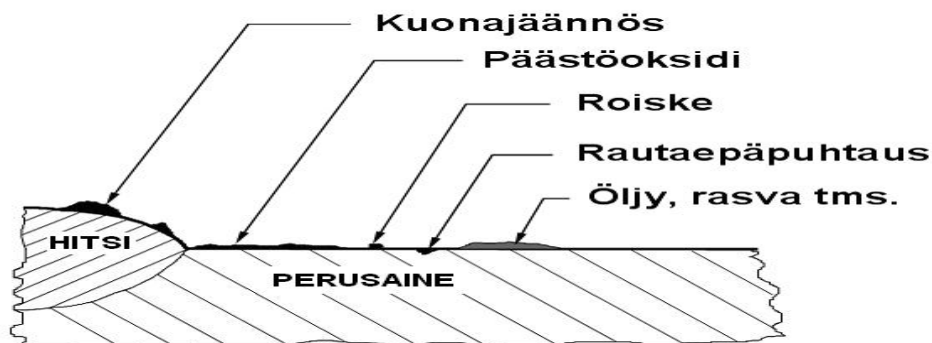


- Hitsausliitokselle on kuitenkin mahdollista saada perusaineen veroinen korroosionkestävyys ottamalla huomioon oheisen taulukon mukaiset toimenpiteet

	Oikea perusaineen valinta	Oikea lisäainevalinta	Perus- ja lisäaineen asianmukainen käsittely	Oikea suunnittelu	Oikea hitsausmenetelmä	Hitsauksen suoritus (kiinnitys, lämmöntuonti)	Virheetön hitsi	Huolellinen hitsin jälkikäsittely
Hitsausliitoksen epäedullinen muoto				●			●	●
Hitsausliitoksen kemiallinen koostumus		●	○					
Seosaineiden jakauma hitsausliitoksessa					○	○		○
Teräksen mikrorakenne					○	●		●
Hitsausliitokseen liittyvä jännitystila	●				○	●		○
Hapettumakerrokset eli ”päästövärit”			○		○	●		●

Hitsin jälkikäsittely on osa valmistusta haluttaessa perusaineen veroinen korroosionkestävyys

1. Hitsauksen aiheuttamat ilmiöt teräksen pinnalle:



Pintaan muodostuu ei-tiivis oksidikalvo

Jälkikäsittelyillä pyritään sekä pinnan että mikrorakenteen ilmiöiden eliminoimiseen

2. Hitsauksen aiheuttama muutos mikrorakenteessa:

Kromilla voimakas taipumus reagoida hapen kanssa

Pinnan alla oleva teräskerros köyhtyy kromista

3. Yhteisvaikutus:

Vaurioitunut pinta ei pysty suojaamaan alla olevaa kromiköyhää teräspintaa

Hitsi ilman jälkikäsittelyä kestää selvästi huonommin korroosiota kuin moitteeton teräspinta

Hitsin korroosionkestävyys – Jälkikäsittelyn vaikutus

Hitsauksen aikana syntyvät päästövärit

- Paksuja ja huokoisia kromioksidikalvoja, joiden alla on teräksessä vähemmän kromia
 - Paikallisesti heikentynyt korroosionkestävyys
 - Tyypillinen pistesyöpymisenpaikka on putken asennushitsin sisäpuolella
- Parannustoimenpide: suojakaasun käyttäminen tai oikea hitsien jälkikäsittely sekä päästövärien poistaminen peittauksella



ilman jälkikäsittelyä



peittauhna



mekaaninen kiillotus



mekaaninen kiillotus
ja HNO₃/HF-peittaus



hiekkapuhallus (Al₂O₃)



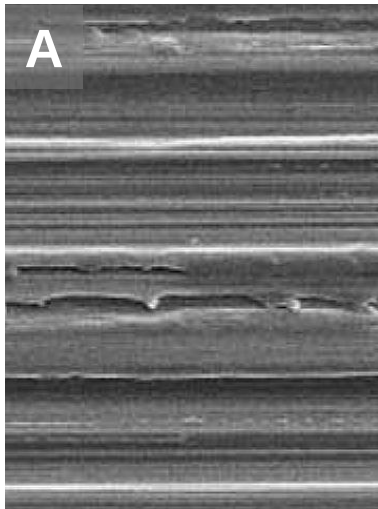
hiekkapuhallus (Al₂O₃)
ja HNO₃/HF-peittaus

Olosuhteet:
EN 1.4432,
5% NaCl,
35°C, 2 vrk.

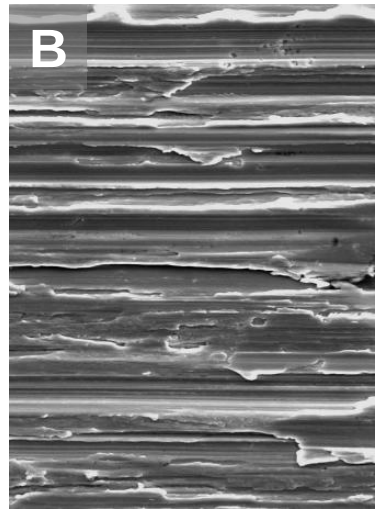
Mekaaninen pinnanviimeistely ja peittaus

Jälkipeittauksen ja voitelun vaikutus:

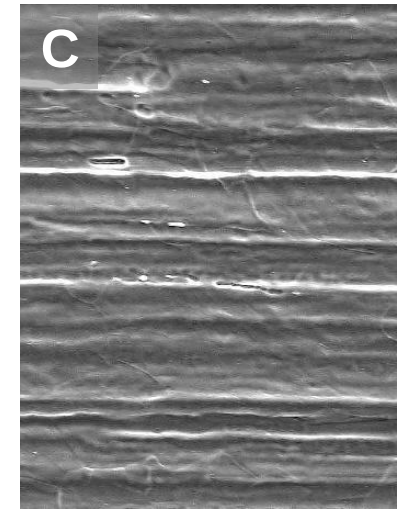
- Kolme SEM-kuvaa, sama suurennus (80 x 60 µm)



Märkähionta öljyllä
(Tornion tehtaan
hiontalinja, 4N)



Ammattimainen kuiva-
hionta ja harjaus
hionta-automaatilla
("400 grit",)



Sama näyte ja pinta-alue
kuin vasemmalla, mutta
kovan kylmäpeittauksen
jälkeen

- Märkähionnan tulos on 'clean cut'.
- Peittaus syövyttää jäysteet ja likaa keräävät taskut pinnalta pois.

Hitsin korroosionkestävyys ja jälkikäsittelyt

Hitsin jälkikäsittelyt voidaan jakaa kolmeen alalajiin

Toimenpide

Tavoitteet ja huomioitavat asiat

Lämpökäsittely:

Hitsin homogenisointi

Jokaisella teräslajilla on oma oikea lämpötila ja vähimmäiskäsittelyaika.

Mekaaniset menetelmät:

- Harjaus
- Hiekkapuhallus
- Hionta
- Kiillotus

Hitsin muotoilu ja puhdistus

Mekaanisia menetelmiä käytettäessä on tärkeää välttää vieraiden partikkeleiden, kuten raudan, joutuminen ruostumattoman teräksen pinnalle



Kemialliset menetelmät:

- Peittaus
- Passivointi

Hitsin puhdistus ja passivointi

Peittausjätteet on huuhdeltava huolellisesti pois, koska ne syövyttävät teräspintaa. Passivointiliuos ei syövytä teräksen pintaa, joten se ei ole riittävä menetelmä hilseytyneen hitsin käsittelyyn.

Vierasruoste

(~10 vuotta ulkona ilman pesua)

Yksi tavallisimpia syitä ruostumattomien hitsien korroosiovaurioihin on puutteellinen jälkikäsittely tai sen kokonaan tekemättä jättäminen

Kiitos!



Welding Handbook
First Edition, 2010

**OUTO
KUMPU**

Hannu-Pekka Heikkinen, DI
Research Engineer - Product Development
Tornio Research Centre

Outokumpu Tornio Works
FIN-95400 Tornio, Finland
Tel: +358 16 454 271
Mobile: +358 40 7122 351
hannu-pekka.heikkinen@outokumpu.com